

Rainer Flohr

*Beitrag zur optimalen Verbindungstechnik  
in der Oberflächenmontage (SMT)*



Rainer Flohr

*Beitrag zur optimalen  
Verbindungstechnik  
in der Oberflächenmontage (SMT)*

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

**FAPS**



Carl Hanser Verlag München Wien

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

Tag der Einreichung:	27. 05. 1991
Tag der Promotion:	25. 09. 1991
Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. H. Brand
Berichterstatte:	Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann
	Prof. Dr.-Ing. habil. W. Sauer

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

**Flohr, Rainer:**

Beitrag zur optimalen Verbindungstechnik in der  
Oberflächenmontage (SMT) / Rainer Flohr. - München;  
Wien; Hanser 1991

(Fertigungstechnik - Erlangen; 23)

Zugl.: Erlangen, Nürnberg, Univ., Diss., 1991

ISBN 3-446-16568-1

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.

© Carl Hanser Verlag München, Wien 1991

Herstellung: Copy Center 2000, Erlangen-Eltersdorf

Printed in Germany

## **Vorwort**

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

Herrn Professor Dr.-Ing. K. Feldmann, dem Leiter des Lehrstuhls für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik am Institut für Fertigungstechnik, danke ich für die großzügige Förderung bei der Durchführung dieser Arbeit.

Herrn Professor Dr.-Ing. habil. W. Sauer, dem Leiter des Instituts für Elektroniktechnologie an der Technischen Universität Dresden, danke ich für seine Bereitschaft, das Koreferat zu übernehmen.

Außerdem bedanke ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl, insbesondere bei dem "SMD-Team", für die ständige Gesprächs- und Hilfsbereitschaft. Ferner gilt mein Dank allen Studenten und wissenschaftlichen Hilfskräften, die durch ihre Unterstützung zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Herrn Dipl.-Ing. M. Elbacher danke ich für die Mitwirkung bei der Bildgestaltung dieser Arbeit und für die langjährige erfolgreiche Zusammenarbeit.

Rainer Flohr



# **BEITRAG ZUR OPTIMALEN VERBINDUNGS- TECHNIK IN DER OBERFLÄCHENMONTAGE (SMT)**

## **- INHALTSVERZEICHNIS -**

<b>0</b>	<b>Abkürzungen</b>	<b>1</b>
<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Ausgangspunkt: Die Montage oberflächenmontierbarer Bauelemente</b>	<b>7</b>
2.1	Systemintegration in der Elektronik	8
2.1.1	Schaltungsträger auf Leiterplattenbasis	8
2.1.2	Hybridintegrierte Schaltungen	12
2.1.3	Anwenderspezifische Schaltkreise (ASIC)	14
2.2	Einfluß neuer Montagevarianten auf die Verbindungstechnik	15
2.2.1	Die Flipchip - Technik	16
2.2.2	Die Chip And Wire Technik	16
2.2.3	Tape Automated Bonding (TAB)	17
2.2.4	Integration mehrerer Chips im Multichip - Modul (MCM)	18
2.3	Technologische Verfahrensketten in der Oberflächenmontage	20
2.3.1	Reine SMD - Baugruppen	20
2.3.2	Gemischtbestückte Baugruppen	22
2.3.3	Die Quantitative Entwicklung des Leiterplattenmarktes	24
2.4	Bestückung von oberflächenmontierbaren Bauelementen	24
<b>3</b>	<b>Verbindungsmedien in der SMT</b>	<b>29</b>
3.1	Klebstoffe für SMD's	29
3.1.1	Einfluß der Viskosität	29
3.1.2	Thermische Einflüsse auf den SMD - Klebstoff	30
3.1.3	Lufteinschlüsse im SMD - Klebstoff	30

3.2	Einsatz von Leitleber	31
3.2.1	Die elektrische Leitfähigkeit von Leitlebern	32
3.2.2	Mechanische Kennwerte von leitfähigen Klebstoffen	33
3.3	Technologie der Lotpasten	34
3.3.1	Lotpulver	35
3.3.2	Flußmittel	37
4	Lötverfahren in der SMT	39
4.1	Weichlöten in der Elektronik	39
4.2	Wellenlöten von SMD - Platinen	41
4.2.1	Spezifische Probleme beim Wellenlöten von SMD - Leiterplatten	41
4.2.2	Optimierung des Wellenlötprozesses	42
4.2.3	Wellenlöten unter Stickstoff	44
4.3	Reflowlötverfahren in der SMT	45
4.3.1	Spezifische Aspekte beim Infrarotlöten	46
4.3.2	Löten in der Dampfphase	51
4.3.3	Vergleich Dampfphasen- mit Infrarotlöten	52
4.3.4	Alternative Reflowlötverfahren für spezielle Bauelemente	54
4.3.5	Beurteilung von Reflowlötverbindungen	55
4.4	Vergleich Reflow- mit Wellenlöten für SMD	59
5	Flexibler Lotpastenauftrag für die Oberflächenmontage	61
5.1	Verfahren für den Lotpastenauftrag	61
5.1.1	Technologische Aspekte beim Sieb- und Schablonendruck	63
5.1.2	Kinematische Alternativen und Einsatzgrenzen für das Dispensieren von Lotpaste	66
5.1.3	Alternative Lotpasten - Auftragsverfahren	70
5.1.5	Zusammenstellung der Belotungsverfahren	72
5.2	Automatisierungsmöglichkeiten bei den Lotpastenauftragsver- fahren	74
5.2.1	Ansätze zur Automatisierung bei Sieb- bzw. Scha- blonendruck	74
5.2.2	Lösungsmöglichkeiten für das automatisierte Dispensieren	78

5.4	Das Programm "PASTE" zur Wirtschaftlichkeitsuntersuchung für die Lotpastenauftragsverfahren	80
5.4.1	Wirtschaftliche Basisdaten	81
5.4.2	Programmstruktur und Menüführung von "PASTE"	83
5.4.3	Überblick über die Einsatzbereiche der Verfahren	87
5.4.4	Auswahl einer optimalen Verfahrenskombination	92
6	Datenbankgestützte Auswahl von Lötanlagen	99
6.1	Lötmethoden für SMD - Gehäuseformen	102
6.2	Auswahlkriterien zur Abgrenzung	103
6.3	Programmablauf	104
7	CAD / CAM - Verfahrenskette für das Infrarotlöten	107
7.1	CAD / CAM - Verfahrensketten	107
7.2	CAD / CAM - Verfahrensketten in der Elektronik	110
7.3	Steuern und Regeln beim Infrarotlöten	115
7.4	Vorüberlegungen und experimentelle Untersuchungen zur Realisierung CAD / CAM - Verfahrenskette für das Infrarotlöten	119
7.4.1	Ausgangslage und Handlungsbedarf	119
7.4.3	Experimentelle Untersuchungen	125
7.4.4	Daten von industriellen Anwendern	133
7.5	Realisierung der CAD / CAM - Verfahrenskette	135
7.5.1	Postprozessor zur Bestimmung der Prozeßparameter	135
7.5.2	Umsetzung in eine Verfahrenskette	146
7.5.3	Testphase und Ergebnisdiskussion	154
8	Zusammenfassung	158
9	Literaturverzeichnis	160



## 0 Abkürzungen

ASIC	Application Specific Integrated Circuit
BICMOS	Bipolar Complementary MOS Fieldeffect Transistor
CMOS	Complementary MOS Technology
COB	Chip On Board
DIP	Dual Inline Package
E CAD	Elektronik CAD
ECL	Emitter Coupled Logic
HIC	Hybrid Integrated Circuit
IC	Integrated Circuit
IR	Infrarot
LCCC	Leadless Ceramic Chip Carrier
LP	Leiterplatte
LSI	Large Scale Integration
MCM	Multichip Modul
MELF	Metal Electrode Face
MOS	Monolithisch integrierter Schaltkreis
MpZ	Maschen pro Zoll
PCB	Printed Circuit Board
PLCC	Plastic Leaded Chip Carrier
QFP	Quad Flat Package
rad	radiales Bauelement
SICT	Silicon Integrated Technology
SMD	Surface Mounted Device (Oberflächenmontierbares Bauelement)
SMT	Surface Mounting Technology
SOIC	Small Outline Integrated Circuit
TAB	Tape Automated Bonded
THD	Through Hole Device (bedrahtetes Bauelement)
TTL	Transistor Transistor Logic
VLSI	Very Large Scale Integration



# 1 Einleitung

Die Fortschritte in der Elektronikindustrie haben - wie in keiner anderen Branche - entscheidenden Einfluß auf die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit der gesamten Volkswirtschaft. Nahezu alle Produktbereiche, von der Unterhaltungselektronik bis zum Werkzeugmaschinenbau, werden von der raschen Entwicklung in der Elektronikproduktion geprägt. Ziel muß es daher sein, durch neue Strategien und Methoden das Qualitätsniveau in der Elektronik weiter zu steigern.

Die derzeitige Situation ist geprägt durch extrem kurze Innovationszyklen von der Produktentwicklung bis zur Markteinführung. Ursachen hierfür sind zum Teil im Verhalten des Marktes, aber auch in der schnellen Entwicklung der Mikroelektronik zu suchen. Des weiteren resultieren aus der marktseitig geforderten hohen Diversifikation der Produkte geringe Losgrößen in der Fertigung. Darin liegt der allseitige Ruf nach Flexibilität in der Produktion begründet. Wie in Bild 1.1 dargestellt, ist die Verbindungstechnik als Schlüsseltechnologie von diesen Trends direkt betroffen.

Im Bereich der Verbindungstechnik kann den Forderungen, die sich aus den kurzen Produktzyklen und kleinen Losgrößen an die Fertigungsstruktur ergeben, nur durch erhöhte Flexibilität der Produktionsanlagen entsprochen werden. Diese könnte durch rechnergestützte Generierung der Lötparameter für das Infrarotlöten oder durch den Einsatz von Dispensern beim Lotpastenauftrag erreicht werden.

Die resultierenden Anforderungen an die Qualität und zeitgerechte Abwicklung der Planung und Durchführung der Produktion können nur mit integrierten rechnergetützten Systemen realisiert werden. Für die Integration aller Teilfunktionen von Planung und Produktion ist neben der flexiblen materialflußtechnischen Verknüpfung in der Fertigung, vor allem die Organisation der

Informationsflüsse über alle Teilfunktionen der Produktion wesentlich. [16]  
 Diese Problemstellung, und die in der Elektronikproduktion weit fortgeschrittene Rechnerdurchdringung in Entwicklung und Herstellung eröffnen der Integration von CAD / CAM - Werkzeugen große Rationalisierungspotentiale. [15]



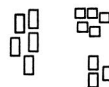

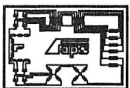
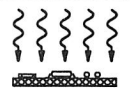

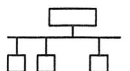
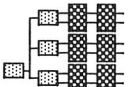
 Trends Auswirkungen auf	 kürz. Produktzyklen	 kleinere Losgrößen	 Rechnerintegration
 <b>DESIGN</b>	kurze Entwicklungszeiten		Postprozessoren Schnittstelle CAD/CAM
 <b>VERB.-TECHN.</b>	rechnergestützte Generierung der Lötparameter	Flexibilität Dispensen autom. Siebwechsel Umrüsten	CAD/CAM Beherrschbarkeit der Prozesse BDE/Diagnose
 <b>BESTÜCK- TECHNIK</b>	Erstellung der Bestück- programme	Rüsten/Umrüsten Flexibilität Großes BE-Spektrum	CAD/CAM BDE/Diagnose
 <b>INFO-FLUSS</b>	Rechnerintegration CAD/CAM- Verfahrensketten Einbindung PPS	Rechnerintegration Flexibilität	Vernetzung Schnittstellen Ankopplung zu PPS
 <b>MAT-FLUSS</b>		Flexibilität Umrüsten	SPS Datenträger BDE/Diagnose

Bild 1.1: Organisatorische Trends in der SMT

Neben der Integration von Rechnern in die Produktion resultieren zusätzliche Anforderungen aus dem schnellen Wandel der Produkt- und Prozeßtechnologie. Bedingt durch die fortschreitende Miniaturisierung und Integration auf Baugruppenebene und durch die neuen konstruktiven Möglichkeiten räumlicher Schaltungsträger werden erweiterte Anforderungen insbesondere an die Verbindungstechnik gestellt (Bild 1.2).

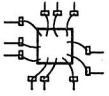
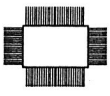

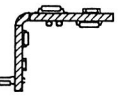
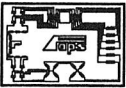
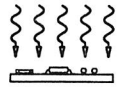

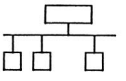
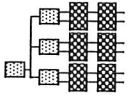
Trends Auswirkungen auf	 COB, Flip-Chip	 Miniaturisierung	 LP-Dispensen	 3D-Lederplatte
 LAYOUT	erweiterte Bauelemente-datenbanken			3D-CAD
 VERB.-TECHN.	Bonden Kleben Löten	Siebdruck Tauchbelotung Dispensen	Lotpasten- technologie Lötprozeß	Leitkleben Tauchbeloten Dispensen
 BESTÜCK- TECHNIK	spezielle Maschinen, erweiterte Maschinen- funktion	optische Zentrierung		erweiterte Kinematik
 INFO-FLUSS			CAD/CAM- Kopplung	CAD/CAM- Kopplungen
 MAT-FLUSS	zusätzl. Maschinen Zuführmodule			Werkstück- träger

Bild 1.2: Technologische Trends in der SMT

Die Montage ungehäuster Chips, die sogenannte Chip on Board - Technik, gewinnt im Hinblick auf die hohe Integrationsdichte auf der Leiterplatte zu-  
sehens an Bedeutung. Dadurch müssen innovative Verbindungstechnologien  
wie z.B. das Boden vom Chipproduzenten zum Baugruppenhersteller verlagert  
werden. Der Zwang zur Optimierung herkömmlicher Verfahren bzw. zur Ent-  
wicklung neuer Technologien für die Bereitstellung von Lot an den Fügestellen  
zwischen Bauelement und Leiterplatte wird durch die Miniaturisierung der  
Anschlußrastermaße bei den Bauelementen hervorgerufen.

Da die Verbindungstechnik als zentraler Fokus der SMT von allen Trends  
direkt betroffen ist, werden in dieser Arbeit Problemstellungen und Trends für  
die Verbindungstechnik aufgegriffen und konkrete Lösungen erarbeitet.

Die Arbeit schildert in den ersten Kapiteln die verbindungstechnischen Pro-  
blematiken bei der Entstehung von Baugruppen (Systemintegration, Be-  
stückung, Verbindungsmedien, Lötverfahren).

In den Kapiteln 5, 6 und 7 werden Problemlösungen zu wichtigen Fragen in der  
Verbindungstechnik vorgestellt: Dies betrifft einerseits das Problem der wirt-  
schaftlichen und technologischen Einsatzgrenzen der Verfahren für den Lot-  
pastenauftrag (Dispensen bzw. Sieb- / Schablonendruck), andererseits wird eine  
am Lehrstuhl realisierte CAD / CAM - Kopplung für das Infrarotlöten vor-  
gestellt, wodurch ein weiterer Schritt in Richtung Rechnerintegration in der  
Elektronikproduktion vollzogen werden konnte.

Außerdem wird auf die datenbankgestützte Lötanlagenwahl eingegangen,  
die als letzter Baustein - nach den Bestückautomaten und Siebdruckern - zur  
Realisierung des rechnergestützten SMD - Linienkonfigurationsmoduls dient.

## 2 Ausgangspunkt: Die Montage oberflächenmontierbarer Bauelemente

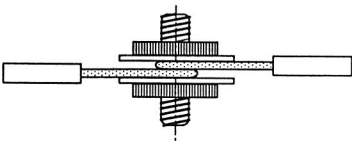
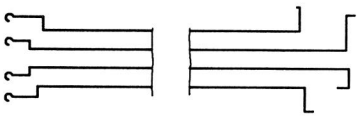
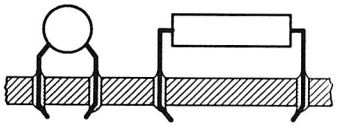

<p><b>Generation 1</b></p> <p>20er und 30er Jahre: Schraubklemmenverbindungen, später Lötverbindungen und Bananenstecker</p>	 <p>A schematic diagram showing a central horizontal bar with two long horizontal lines extending from its ends. In the center, there is a vertical assembly consisting of a screw passing through a rectangular block, with a nut and a washer on the opposite side.</p>
<p><b>Generation 2</b></p> <p>30er und 40er Jahre: Vorkonfektionierte Kabelbäume mit Isolierhülle</p>	 <p>A schematic diagram showing two sets of horizontal lines representing cables. Each set has multiple lines with small rectangular blocks at their ends, representing connectors or insulation. The lines are arranged in a way that suggests they are part of a larger assembly.</p>
<p><b>Generation 3</b></p> <p>50er - 70er Jahre: Gedruckte Schaltungen, erst einseitig kaschiert, später doppelseitig und Multilayer; ab Mitte der 50er: maschinelles Löten</p>	 <p>A schematic diagram showing two printed circuit boards (PCBs) mounted on a common base. The left board is a simple rectangle with a circular component on top. The right board is more complex, with a rectangular component on top and several smaller components below it. Both boards are shown with hatching to indicate they are mounted on a substrate.</p>
<p><b>Generation 4</b></p> <p>seit Ende der 70er Jahre: Auflöten von SMDs auf Leiterplatten (auf Keramiksubstrate bereits 10 Jahre früher)</p>	 <p>A schematic diagram showing two surface-mount components (SMDs) mounted on a substrate. Each component is a rectangular block with two small rectangular pads on its bottom surface, which are soldered to the substrate. The substrate is indicated by hatching.</p>

Bild 2.1: Die Geschichtliche Entwicklung des Schaltungsaufbaus (nach [89])

Die Oberflächentechnik ist ein weiterer Schritt zu höherer Systemintegration im Aufbau elektronischer Schaltungen. Die Entwicklung wurde von Paul Eisler initiiert, der 1942 die erste gedruckte Schaltung in London vorstellte. Bild 2.1 vermittelt dazu einen Überblick über die "Evolution" des Schaltungsaufbaus.

Die ersten Halbleiterbausteine waren mit radialen Anschlüssen versehen, die in die Bohrungen einer einseitigen Leiterplatte gesteckt wurden. Durch die Erfindung des Dual Inline Package (DIP) mit zwei parallelen Beinchenreihen von Fairchild wurde es erst möglich, ICs zusammen mit den passiven Bauelementen in einem Arbeitsgang in der Welle zu löten [72].

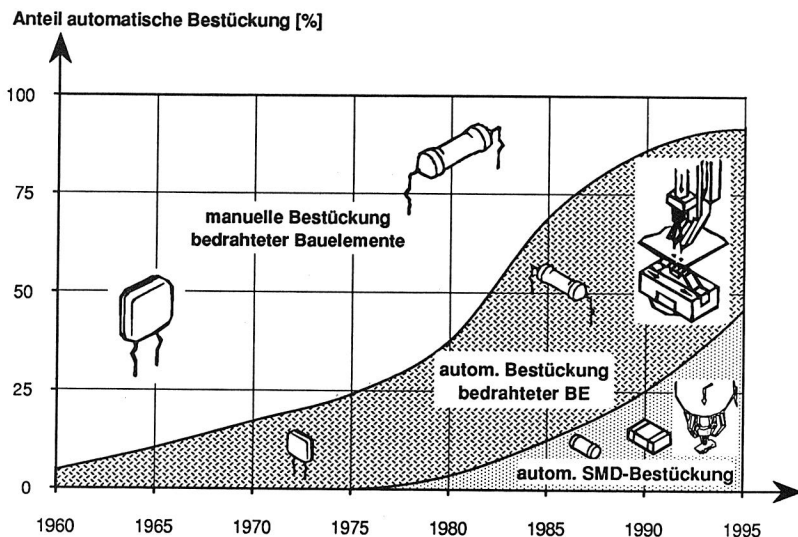
## **2.1 Systemintegration in der Elektronik**

In den 50er Jahren wurden die ersten oberflächenmontierbaren Bauelemente, damals Flat Packs genannt, bei Anwendungen mit extremen Anforderungen an die Zuverlässigkeit eingesetzt. Diese Flat Packs mußten mit vergoldeten Anschlüssen versehen sein, da sie sehr dicht an der Leiterplattenoberseite angebracht wurden. Außerdem mußte ein spezielles Lötverfahren (Hot Bar) angewandt werden. Deshalb konnten sich die Flatpacks nie durchsetzen und wurden in den 60ern wieder von den DIPs verdrängt.

### **2.1.1 Schaltungsträger auf Leiterplattenbasis**

Aufgrund des Aufschwungs in den 60er und 70er Jahren in der Elektrotechnik bzw. Elektronik und der damit verbundenen erhöhten Nachfrage, konnte die Bestückung in vielen Fällen automatisiert werden. Voraussetzung dafür war allerdings die Entwicklung spezieller Bestückautomaten.

Nach der Statistik der Japanese Printed Circuit Association von 1984 (Bild 2.2) wurden 1960 nur 5 %, bereits 1980 schon 35 % der Bauelemente automatisch bestückt. Die bedrahtete Technik wird seit Anfang der 80er Jahre von der Oberflächentechnik substituiert. Nach einer Studie von ITT wurden 1985 weltweit 156 Mrd Bauelemente verarbeitet, 17 % davon in SMD - Bauform. Für 1990 werden 193 Mrd prognostiziert, 38 % davon SMDs. Dies entspricht einem Rückgang von 8 % bei den THD und einem Wachstum von 174 % bei den SMD.



**Bild 2.2:** Entwicklung der automatischen Bestücktechnik

Mitte der 80er Jahre hatte die SMT das Prototypen- und Teststadium hinter sich gelassen und hielt auf breiter Front Einzug in der Industrie. Dies liegt darin begründet, daß zu diesem Zeitpunkt die Anlaufschwierigkeiten überwunden und bereits eine breite Palette an oberflächenmontierbaren Bauelementen verfügbar waren [4].

Die Einführung und das Wachstum der SMT wurde dabei von zwei unabhängig wirkenden Forderungen des Marktes ausgelöst [71]:

1. Von der wachsenden Forderung nach höherem Automatisierungsgrad in der Baugruppenfertigung, um die Produktivität zu erhöhen und die Montagekosten zu senken.
2. Von der fortschreitenden Entwicklung der SICT (Silicon Integrated Circuit Technology) und der damit verbundenen Forderung nach immer höheren Anschlußzahlen.

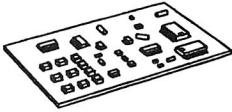
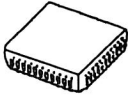
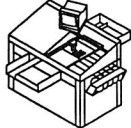
Flachbaugruppe 	Technologie 	Fertigung 
<input type="checkbox"/> Miniaturisierung <input type="checkbox"/> Aufnahmebohrungen entfallen <input type="checkbox"/> Erhöhung der Packungsdichte <input type="checkbox"/> Gewichtsreduktion <input type="checkbox"/> Größere mechanische Belastbarkeit der FBG	<input type="checkbox"/> Eignung für hohe Frequenzen <input type="checkbox"/> Höhere Qualität durch die Automatisierung <input type="checkbox"/> Biegen und Schneiden der Drähte entfällt <input type="checkbox"/> Vereinfachung des Fügeprozesses <input type="checkbox"/> Beidseitige Bestückung möglich	<input type="checkbox"/> Gut automatisierbare Technologie <input type="checkbox"/> Zuverlässige und kostengünstige Automatenbestückung <input type="checkbox"/> IC's mit höherer Zahl von Anschlüssen möglich <input type="checkbox"/> Simultanbestückung möglich

Bild 2.3: Gründe für den Einsatz der SMT

Das herkömmliche DIP Format (Dual Inline Package) mit einem Rastermaß von 0,1" (= 2,54 mm) als Gehäuseform für IC's hätte bei 64 I / O - Anschlüssen eine Länge von ca. 81 mm. Deshalb wurden neue Gehäuseformen mit den erforderlichen Anschlußzahlen, optimaler Platzausnutzung und besseren elektrischen Charakteristika für die Oberflächenmontage entwickelt: die Lead-less Ceramic Chip Carriers (LCCC), die Quad Flat Packages (QFP) und die Small Outline Integrated Circuits (SOIC).

Diese Gehäusetypen weisen in der Regel ein Rastermaß von 1,27 mm (= 1/20 Zoll) auf und können auf den gleichen Maschinen wie die passiven Bauelemente bestückt werden. Die Möglichkeit alle Bauelementetypen mit einer Maschine zu bestücken stellt ein enormes Rationalisierungspotential dar, da in der bedrahteten Technik für jede Bauelementfamilie (DIP, ax und rad) ein spezieller Automat erforderlich ist [82]. In Bild 2.3 sind die wichtigsten Gründe für den Einsatz von oberflächenmontierbaren Bauelementen dargestellt [86] [60].

Ein anderer interessanter Aspekt bei der Einführung der SMT ist der Blickwinkel, mit dem die neue Technologie von Firmen mit unterschiedlichen Produktspektren gesehen wurde:

Im Consumer Elektronik Sektor (phono, TV usw.) wurde die SMT als Ersatz für die herkömmliche, bedrahtete Technik unter Beibehaltung der Designs eingeführt. Das Baugruppenspektrum in dieser Branche ist durch ein deutliches Übergewicht bei den passiven Bauelementen gekennzeichnet. Die Vorteile der SMT liegen in diesem Zusammenhang in einem höheren Automatisierungsgrad, der eine höhere Produktivität zur Folge hat und in der erhöhten Funktionalität bei gleichzeitiger Platzersparnis. Der Verbindungstechnik kommt bei den typischen Leiterplatten der Consumerelektronik geringere Bedeutung zu, da viele passive Bauelemente verarbeitet werden, die ohne Probleme mit den gängigen Massenlötverfahren gelötet werden können. Außerdem werden keine hohen Forderungen an die Zuverlässigkeit der Lötverbindungen gestellt.

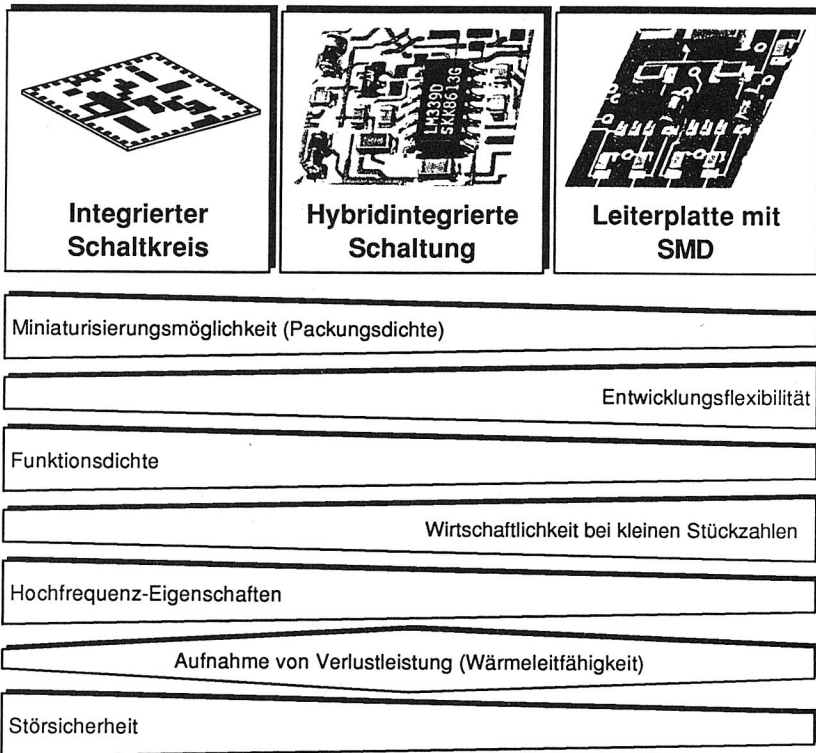
In der Elektronik für Investitionsgüter wurde die SMT als Technologie aufgenommen, durch die neue Gestaltungsmöglichkeiten für Schaltungen eröffnet werden. In dieser Produktkategorie ist der Anteil von aktiven Bauelementen wesentlich höher, die Leiterplatten sind komplexer und ein Höchstmaß an Qualität, insbesondere die Lötverbindungen betreffend, wird gefordert. Bei der Investition sind die Flexibilität und die Kosteneffektivität des Bestück-equipments wesentliche Randbedingungen.

### **2.1.2 Hybridintegrierte Schaltungen**

Hybridintegrierte Schichtschaltungen (HIC) sind kundenspezifische Subbaugruppen, in denen bestimmte elektronische Funktionen zusammengefaßt werden. Ihr Integrationsgrad liegt zwischen dem von Halbleitermonolithen (IC) und Leiterplatten (PCB) mit bedrahteten oder oberflächenmontierten Bauelementen.

Die Dünn- und Dickschichttechnologie füllt dabei ganz bestimmte Anwendungsnischen in der Elektronik aus und stellt so eine Ergänzung zur IC- und PCB-Technik dar. Die Gründe und Vorteile des Einsatzes von Hybridschaltungen verschieben sich laufend, da nicht nur die HIC sondern auch die IC- und PCB-Technik weiterentwickelt werden. Einige Vorteile der Hybridtechnik gegenüber den benachbarten Technologien sind in Bild 2.4 dargestellt. Hauptgründe für den Einsatz von Schichtschaltungen liegen in der geringen Packungsdichte (Konsumelektronik), den günstigen HF Eigenschaften (Funk / Radar) und in ihrer Zuverlässigkeit (Medizintechnik).

Bei der Verarbeitung von leistungsstarken Chips dienen als Substrat bis zu 30 Lagen dünner Keramik, die auf fotomechanischem Wege mit Leiterbahnen versehen und gemeinsam gebrannt (cofired, vgl. Bild 2.5) werden. [37]



**Bild 2.4:** Die Hybridschaltung zwischen IC und SMD - Baugruppe (nach [29])

Der Kostenvergleich zwischen Hybridschaltungen und SMD - Leiterplatten gestaltet sich in der Regel als schwierig, da Schichtschaltungen im allgemeinen keine Kostenminimierung bewirken, wenn sie als reine Baugruppensubstitution mit lediglich anderem Substrat und sonst gleichen diskreten Komponenten eingesetzt werden. Dennoch könnte die Hybridtechnik in diesem Fall aufgrund der höheren Qualität und Zuverlässigkeit gerechtfertigt sein. Wenn zusätzlich die hohe Miniaturisierungsmöglichkeit und die Entwicklungsflexibilität in Betracht gezogen werden oder wenn beispielsweise besondere Material-

eigenschaften, wie hohe Wärmeleitfähigkeit und ausgezeichnete Temperaturbeständigkeit der Keramik gefordert werden, so kann der Einsatz der Hybridtechnik attraktiv und notwendig werden [46].

### **2.1.3 Anwenderspezifische Schaltkreise (ASIC)**

Nach Ansicht von Kayser, Rehberg und Witte [46] bewegt sich die Systemintegration in Richtung anwendungsspezifischer Schaltungen, den sogenannten ASIC's. Die Zusammenfassung von diskreten Schaltungselementen durch anwendungsspezifische Schaltkreise ermöglicht eine Erhöhung der Funktionsdichte. Die verfügbaren Schaltkreise reichen von einfacher, rein digitaler programmierbarer Logik (Gate Array) bis hin zu voll kundenspezifischen Schaltungen für analoge und/oder digitale Problemstellungen [46].

ASICs bieten wegen der optimalen Ausnutzung des Siliziums niedere Materialkosten, hohe Zuverlässigkeit, geringste Verlustleistung, angepaßte Geschwindigkeit und größte Sicherheit gegen Nachbau. Trotzdem wird immer noch die überwiegende Anzahl von Geräten mit Leiterplatten bestückt, die Standardbausteine (in TTL oder CMOS) niedrigen Integrationsgrades tragen. Ursache hierfür ist die Unsicherheit der Entwickler über den erforderlichen Aufwand der Anfangsinvestitionen, die Einarbeitung, die Lieferzeiten und die Kosten für die Herstellung sowie die frühzeitige Bindung an einen Halbleiterhersteller, der u. U. erheblichen Einblick in das Anwender Know How bekommt [88].

Die höchste Stufe der Systemintegration ist die sog. Vollkundenschaltung. Sie gibt die Wahl frei bis hinunter zu den Kennwerten des einzelnen Bauelementes. Entsprechend sind die Anforderungen an den Entwickler am höchsten; die Dauer der Entwicklung ist auf ca. 2 Jahre zu veranschlagen. Wirtschaftlich sind deshalb nur Stückzahlen von > 100.000 p.a.. Halbleiterspeicher, Mikroprozessoren, Taschenrechner und Uhrenbausteine sind Beispiele für solche Vollkundenschaltungen.

## 2.2 Einfluß neuer Montagevarianten auf die Verbindungstechnik

Bei vielen Anwendungen mit den herkömmlichen Technologien wird die Grenze der Integrationsmöglichkeit erreicht, da der zur Verfügung stehende Raum in den Gehäusen extrem limitiert ist. Andererseits werden jedoch durch steigende Anschlußzahlen der integrierten Schaltkreise die Bauelementgehäuse ständig größer. Deshalb ist ein erheblich größerer Platzbedarf pro Bauelement auf der Leiterplatte nötig. Unter der Berücksichtigung, daß der eigentliche integrierte Schaltkreis etwa 10 % der Fläche seines Gehäuses besitzt, wurden Verfahren zum Setzen des IC ohne Gehäuse auf die Leiterplatte entwickelt [38]. Bild 2.5 gibt eine Übersicht über die Alternativen zur Montage ungehäuseter Chips.

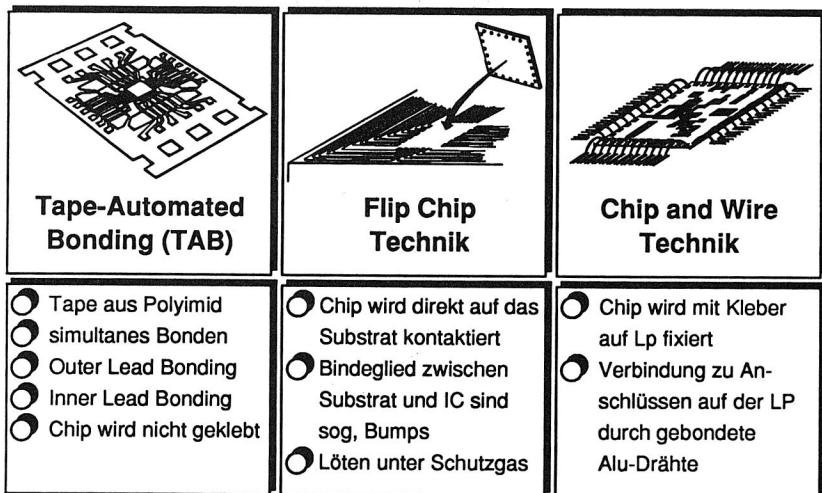


Bild 2.5: Montagevarianten zur Verarbeitung ungehäuseter Chips

### **2.2.1 Die Flipchip - Technik**

Die Flipchip - Technik ist ein Verbindungsverfahren, bei dem der Chip direkt auf das Substrat, ohne zusätzliche Verbindungsglieder wie Leads oder Drähte, kontaktiert ist. Der Platzbedarf entspricht so der Chipgröße. Das Bindeglied zwischen Substrat und Chip sind Bumps, zu denen die Verbindung durch Löten hergestellt wird.

Bei unterschiedlichem thermischen Ausdehnungsverhalten von Chip und Substratwerkstoff muß der Bump die Scherkräfte ohne Schaden aufnehmen können. Daher wird ein duktiler Bumpwerkstoff (Lot) bevorzugt. Die Bumps sitzen auf der Chipseite, und die Substratkontakte sind lötfähig ausgeführt. Eingesetzt werden SnPb- und InPb - Lote. Ist der Chip auf dem Substrat positioniert, erfolgt unter Schutzgas die Lötung. Durch das Aufschmelzen des Lotes entsteht an den Kontaktierungsstellen ein Selbstzentrierungseffekt [26][11].

### **2.2.2 Die Chip And Wire Technik**

Chip an Wire bedeutet das direkte Aufbringen von ungehäuten Halbleiterchips auf die Leiterplatte. Der Chip wird dabei mit Kleber auf der Leiterplatte fixiert. Nach Herstellung der elektrischen Verbindungen in einem Ultraschallbondverfahren mit Aluminiumdraht wird der Chip mit einer Kunststoffmasse verkapselt [47].

Die Anzahl der Anschlüsse pro Chip ist durch die Feinheit der Leiterzüge auf der Leiterplatte begrenzt. Bei Leiterzugbreiten und -abständen von 0,1 mm (pitch 0,2) sind bis zu 120 Anschlüsse möglich. Höhere Anschlußzahlen können durch Einsatz von Multilayerleiterplatten erreicht werden, wenn die IC-Klebefläche und ein Teil der Anschlüsse auf einer inneren Lage des Multilayers sitzen [25].

D.G. Weiss rechnet mit einem Chip and Wire Anteil von über 10 % bis 1995 aufgrund der wesentlichen Vorteile gegenüber gehäusten IC's: z.B. höhere Packungsdichte und kürzeren Signallaufzeiten [93].

### **2.2.3 Tape Automated Bonding (TAB)**

Die TAB Technologie ist ein Kontaktierungsverfahren für Chips mit hohen Anschlußzahlen. Grundlage für diese Technologie ist ein Endlosband (das Tape) aus Polyimidfolie mit einer leitenden Cu - Schicht, das die Anschlußbeinchen (Leads) für die Verbindung mit dem ungehäusten Chip (Inner Lead Bonding) und dem Substrat bzw. der Leiterplatte (Outer Lead Bonding) trägt [76].

Einige Charakteristika bzw. Vorteile der TAB Technik [75]:

- > Geringe Padabstände ( $< 40 \mu\text{m}$ )
- > Simultanes Bonden
- > Geringer induktiver Widerstand pro Längeneinheit
- > Einsetzbar auch bei Frequenzen bis zu 10 GHz
- > Geringe Bauhöhe
- > Integration von unterschiedlichen Chips auf einem Tape möglich
- > Möglichkeit von dynamischen und Burn In Tests vor der Montage
- > Geringe Temperaturbelastung der IC's beim Bonden

Auf den Aluminiumpads der Chips werden in mehreren Prozeßschritten Goldhöcker (Bumps) aufgebracht. Die anschließende Kontaktierung mit dem Tape erfolgt simultan - im Gegensatz zum parallelen Drahtbondverfahren - mit einer Thermode. Der Chip wird nicht, wie bei der Flip Chip Technik, auf die Leiterplatte geklebt, sondern nur von der flexiblen Kapton / Cu - Spinne in der gebondeten Position gehalten. Dadurch werden keine mechanischen Belastungen infolge unterschiedlicher Ausdehnungskoeffizienten auf das Bauelement ausgeübt.

Die TAB Technik ist insofern interessant, als sie problemlos mit der herkömmlichen SMT verknüpft werden kann. Die Grenzen liegen dann allerdings bei einem Rasterabstand von ca. 0,5 mm [11].

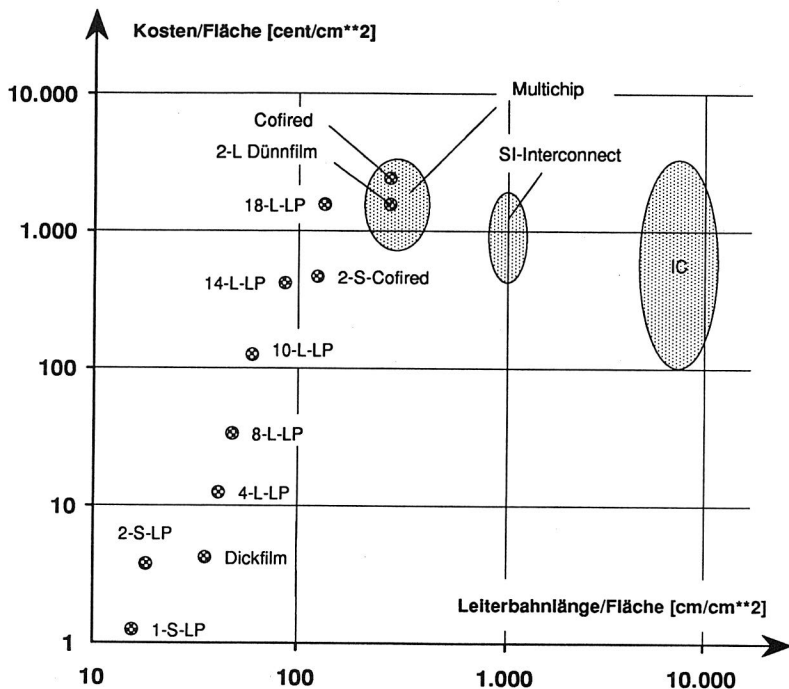
## **2.2.4 Integration mehrerer Chips im Multichip - Modul (MCM)**

Der steigende Bedarf an Leiterplattenfläche durch zunehmende Funktionserhöhung in den Systemen führte zu der Entwicklung von Multilayerleiterplatten (bis zu 42 Leiterplattenlagen). Eine weitere Erhöhung der Ebenen ist aus Qualitätsgründen nicht mehr sinnvoll; außerdem verschlechtert die Durchkontaktierungsdichte die effektive Verwendung von zusätzlichen Ebenen. Die logische Konsequenz ist der Versuch, höhere Leiterbahnen- und Bauelementdichten auf neuen Trägermaterialien unterzubringen.

Die Forderung nach dem Multichip bedingt die Aufgabe, neue Leiterplatten und Prozesse zu definieren, die die Strukturen klein halten und die den Leistungsumsatz beherrschen [37]. Bild 2.6 zeigt die verschiedenen Einsatzbereiche heute üblicher Technologien in Abhängigkeit der Kosten.

Zur Herstellung eines Multichips verarbeitet man, wie bei der Chip On Board Technik, ungehäuste Chips. Mehrere "nackte" Chips werden hierbei zusammen auf ein Feinstleistersubstrat gepackt und bilden so das sogenannte Multichip Modul (MCM). Mit dieser Technik können die Probleme, bedingt durch die hohe Anschlußzahl und die hohe Leistungsfähigkeit der VLSI Bausteine, gelöst werden. Zwei unterschiedliche Substratmaterialien sind dabei denkbar:

1. ein cofired, high density Keramiksubstrat mit bis zu 30 Lagen,
2. ein Dünnschichtmehrlagensystem mit Polyimiden (z.B. Kapton) als Isolator und einer Platte aus Aluminium, Silizium, Kupfer, Edelstahl oder Keramik als Grundmaterial.



**Bild 2.6:** Kosten pro Leitungsdichte üblicher Technologien [71]

Die VLSI Chips des Moduls werden elektrisch durch Drahtbonden mit dem Substrat verbunden oder immer häufiger durch TAB bzw. Flip Chip Technologie bei Bauelementen mit hohen Anschlußzahlen und/oder bei Hochleistungschips kontaktiert. Die Substrate weisen eine Leiterbahndichte zwischen 200 und 1000 cm/cm<sup>2</sup> auf. Bei den Keramiksubstraten werden bei 30 Schichten mit einem Bahnabstand von 0,25 mm maximal 1200 cm/cm<sup>2</sup> erreicht (= 10 / 0,25 x 30), bei den 2- bis 5- lagigen Substraten in Dünnsfilmtchnik mit einem Leiterbahnabstand von 40 bis 100 µm maximal 1250 cm/cm<sup>2</sup>.

Durch den Einsatz von ungehäuten Chips wird die Substratfläche optimal ausgenutzt und werden geringe Signallaufzeiten erreicht. Ein weiterer Vorteil liegt in der Möglichkeit, Chips in CMOS-, ECL- und BICMOS - Technologie auf einem Modul zu mischen, was z.B. bei der Wafer Scale Technik, die eine ähnliche Komplexität und Integrationsdichte erreicht, nicht möglich ist.

Nach Meinung von D.J. Pedder wird die MCM Technologie die nächste Generation der Aufbau- und Verbindungstechnik für VLSI Bausteine nach der SMT darstellen. Die SMT wird jedoch nach der Einführung der MCM Technologie von größter Wichtigkeit bleiben [71].

## **2.3 Technologische Verfahrensketten in der Oberflächenmontage**

### **2.3.1 Reine SMD - Baugruppen**

Die einseitig mit oberflächenmontierbaren Bauelementen bestückte Leiterplatte stellt die technologisch einfachste Variante dar, da lediglich der SMD - Reflowprozeß durchlaufen werden muß. Dieser Prozeß setzt sich aus Pastenauftrag (Sieb- bzw. Schablonendruck oder Dispensen), SMD - Bestückung, optische Kontrolle, Reflowlöten und Reinigung zusammen. Der Reinigungsprozeß wird erforderlich, wenn mittel bis stark aktivierte Lotpasten zum Einsatz kommen.

Bei der doppelseitig mit SMDs bestückten Platine muß der Reflowprozeß zweimal durchlaufen werden. Hierbei schmelzen die Lötstellen der zuerst gelöteten Seite, die beim Reflowlöten der zweiten Seite die untere ist, wieder auf. Es hat sich gezeigt, daß die Kapillarkräfte der Lotschmelze jedoch groß genug sind, um die Bauelemente an der Plattenunterseite festzuhalten [72].

Bauteile, bei denen das Verhältnis von Gewicht zu Lotfläche relativ hoch ist, sollten erst beim zweiten SMD - Reflowzyklus gelötet werden. Zusätzlich können die Bauelemente auf der Leiterplattenunterseite mit Kleber fixiert werden. Bei Einsatz eines höher schmelzenden Lotes auf der Unterseite könnte abermaliges Verflüssigen beim zweiten Reflowprozeß vermieden werden, was jedoch zu Komplikationen bei der Temperaturkontrolle führen kann.

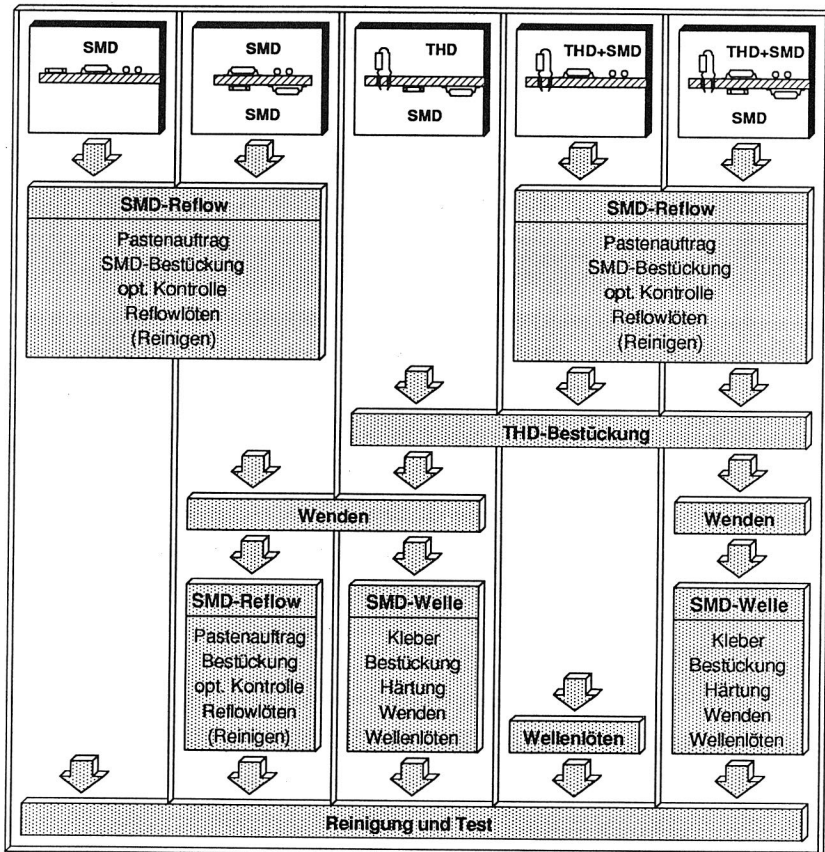


Bild 2.7: Technologische Verfahrensketten

## 2.3.2 Gemischtbestückte Baugruppen

Trotz des raschen Fortschreitens der SMT wird immer noch ein großer Teil der Schaltungen mit bedrahteten Bauelementen realisiert. Dies liegt darin begründet, daß einerseits noch nicht alle Bauelemente in SMD - Form verfügbar sind und daß andererseits - speziell bei Schaltungen, in denen höhere Ströme fließen - Verlustleistungen von SMDs nicht abgefangen werden können. Hingegen werden eine Reihe von Bauelementen (ASICs usw.) nur in SMD - Bauformen angeboten. Daraus ergibt sich der Zwang zur Mischbestückung. In Bild 2.6 sind die drei möglichen Mischbestückungsformen dargestellt.

1. Beidseitige Bestückung mit SMD nur auf der Unterseite (Lötseite) wird vorwiegend bei der Massenproduktion für Consumer Elektronik (Tuner, Video ...) eingesetzt. Vorteile liegen in der Flächeneinsparung und in den relativ geringen Prozeßkosten, da nur ein Löt- und Reinigungszyklus notwendig ist. Nachteilig ist, daß nicht alle SMD - Typen für das Wellenlöten zugelassen oder möglich sind, und daß hinsichtlich des Layouts große Restriktionen in Kauf genommen werden müssen.
2. Einseitig gemischte Bestückung wird vorwiegend bei komplexen Schaltungen für professionelle Anwendungen (Telekommunikation, Industrieelektronik, Meßgeräte) eingesetzt. Dieses Bestückprinzip ist für ein großes Spektrum geeignet, da alle Bauelemente verarbeitbar sind. Die geringe Flächeneinsparung, insbesondere bei Standardleiterplatten, gestaltet sich als nachteilig.
3. Höchste Integrationsdichte weist die beidseitig mit SMD und einseitig mit THD bestückte Leiterplatte auf. Typische Anwendungen ergeben sich für höchste Packungsdichten (Luft- und Raumfahrt, Speicher), da sehr kompakte Layoutvarianten realisiert werden können. Aufgrund der hohen Packungsdichte müssen die Schaltungen meist auf mehrlagigen Leiterplatten mit Feinststrukturen aufgebaut werden.

Die Vielzahl von Prozessschritten erfordert größte Sorgfalt bei der Montage, um Nacharbeit und Ausschuß möglichst minimal zu halten [48]. Für die Bestückreihenfolge bestehen zwei Alternativen: 1. Kleberauftrag, SMD - Bestückung, Wenden, THD - Bestückung, Wellenlöten oder 2. wie in Bild 2.6 dargestellt und auch vom USA Surface Mount Council 1988 empfohlen [90].

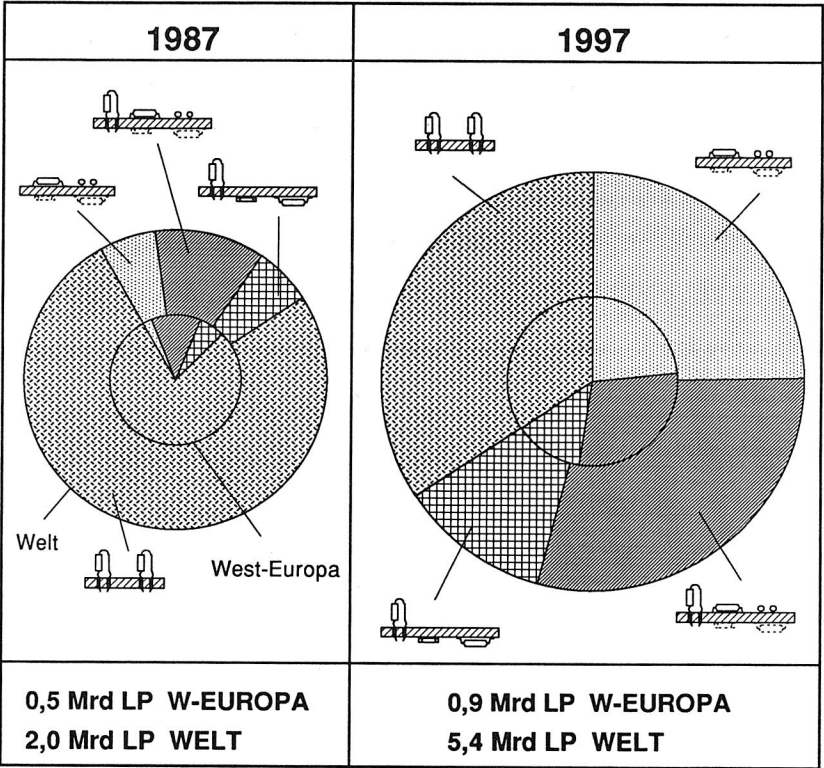


Bild 2.8: Entwicklung der SMD - Anteile am Leiterplattenmarkt (nach [68])

### **2.3.3 Die Quantitative Entwicklung des Leiterplattenmarktes**

Bild 2.8 zeigt den aktuellen Stand und die prognostizierte Entwicklung der SMD - Anteile am gesamten Leiterplattenmarkt. Bemerkenswert dabei ist, daß der Anteil der reinen SMD - Platinen weltweit von 175 Mio (1987) um Faktor 8 auf 1.360 Mio (1997) wachsen wird.

Der Anteil der reinen THD - Platinen wird in diesem Zeitraum von weltweit 2,2 Mio (76%) auf 1,9 Mio (33%) zurückgehen. Westeuropa wird in den nächsten 10 Jahren den Rückstand, der im Augenblick gegenüber dem Weltdurchschnitt besteht, wieder aufholen. Sehr großes Gewicht fällt den gemischtbestückten Platinen zu, da 1997 voraussichtlich 42% aller Leiterplatten in Hybridbauweise (SMD + THD) realisiert werden [68].

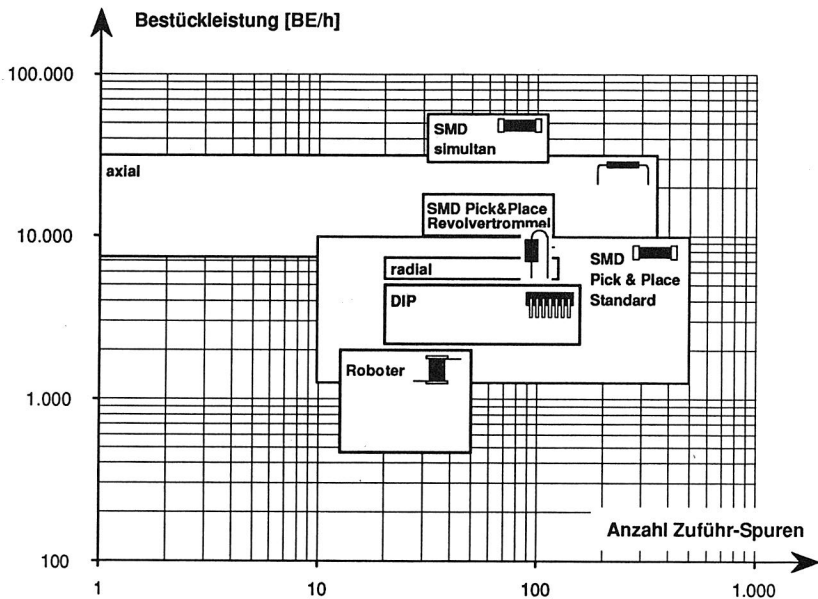
## **2.4 Bestückung von oberflächenmontierbaren Bauelementen**

Wesentlicher Vorteil der Oberflächenmontage gegenüber der konventionellen Bestücktechnik von bedrahteten Bauelementen ist die Universalität der SMD - Automaten.

Für die automatisierte konventionelle Baugruppenfertigung sind für jeden Gehäusotyp separate Bestückmaschinen erforderlich: Axial-, Radial- und DIP - Automat. Die Kopplung dieser hochproduktiven Automaten ergibt unter den Bedingungen der Flexibilität infolge Auftragsvielfalt und unter Berücksichtigung von Störungen nicht in jedem Fall auch eine hochproduktive Fertigungszelle [81]. Für die Bestückung von Exoten müssen in der Regel Sonderbestückautomaten bzw. Industrieroboter vorgesehen werden, da viele bedrahtete Bauelemente nicht auf den konventionellen Automaten verarbeitet werden können.

Nur für große Losgrößen und Stückzahlen läßt sich die Montage von bedrahteten Bauelementen wirtschaftlich automatisieren.

Bild 2.9 zeigt die Einsatzbereiche von Bestückautomaten, die in der SMT und THT eingesetzt werden. Die Daten hierzu wurden durch eine umfangreiche Marktrecherche ermittelt. Wesentliche Kenngrößen einer Bestückmaschine sind die Bestückleistung (bestückbare Bauelemente pro Stunde) und die Anzahl der möglichen Zuführspuren als entscheidendes Kriterium für die Flexibilität.



**Bild 2.9:** Einsatzbereiche von Bestückautomaten

Der Einsatz von SMDs begünstigt die automatisierte Montage außerordentlich, da die Bauelemente nur auf die Leiterplatte aufgesetzt werden. Damit entfallen - im Gegensatz zur automatischen Bestückung von bedrahteten Bauelementen - bauteilspezifische Führungs- und Unterwerkzeuge. Außerdem steht der durch

die Größe der Bestückwerkzeuge beim konventionellen Bestücken erforderliche Raum (Bestückschatten) zusätzlich als Fläche für höhere Packungsdichten zur Verfügung.

In Bild 2.9 sind die von den SMD - Maschinen abgedeckten Bereiche angegeben. Pick & Place - Automaten mit einer Rüstkapazität von bis zu 500 unterschiedlichen Bauelementen sind im Bereich der sequentiell arbeitenden Maschinen mit einer maximalen Leistung von 10.000 BE/h einzuordnen (gestrichelte Linie). In dem Feld oberhalb dieser Linie sind Hochleistungs - Pick & Place - Automaten (sog. Chipshooter) mit Mehrkopfrevolvertrommel und/oder beweglichen Zuführeinrichtungen angesiedelt.

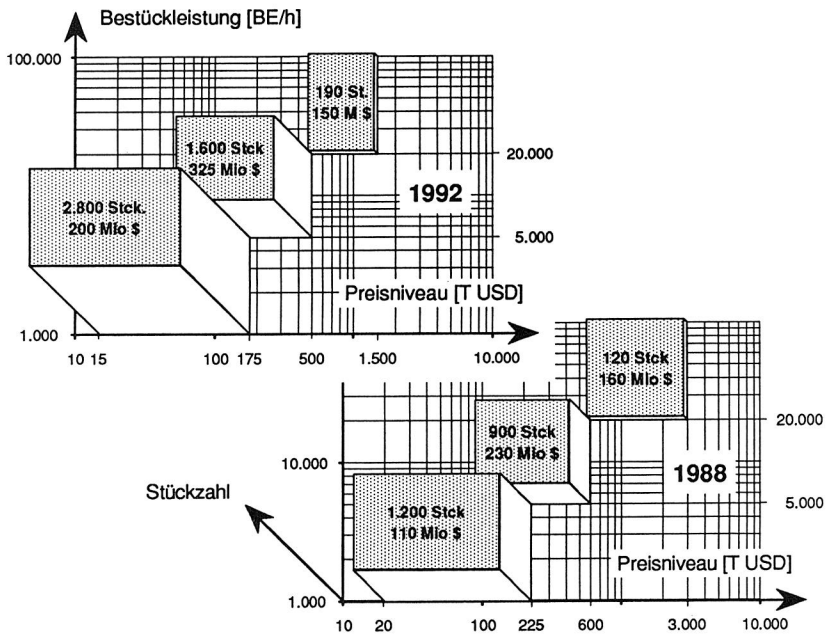
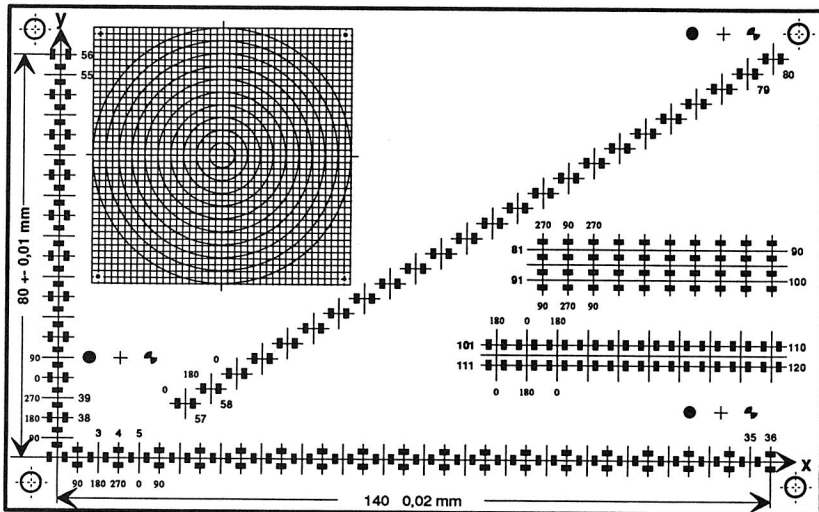


Bild 2.10: Weltmarkt der SMD - Bestückautomaten

Die Unterteilung in Pick & Place - Automaten, Chipshooter und Simultanbestücker wurde auch in Bild 2.10 (nach [34]) beibehalten. Dargestellt ist für diese drei Typen jeweils das Preisniveau, die abgesetzte Stückzahl und das daraus resultierende Marktvolumen für die Jahre 1988 und 1992.

Der Markt für die Standard - SMD - Maschinen wird sich danach nahezu verdoppeln. Bei den Chipshootern wird er um ca. 50% von 230 auf 325 Mio \$ wachsen. Für die Simultanbestücker wird ein leichter Rückgang von 160 auf 150 Mio \$ prognostiziert. Das hohe Wachstum bei den Standard - SMD - Maschinen ist durch den Einstieg von vielen mittelständischen Unternehmen in die SMT und die erweiterten Möglichkeiten beim Setzen von fine - pitch - Bauelementen bedingt.



**Bild 2.11:** Musterleiterplatte zur Bestimmung von Genauigkeit und Leistung von SMD - Bestückautomaten

Entscheidende Kriterien bei der Bewertung von SMD - Bestückautomaten sind die Bestückleistung und die -genauigkeit. Da hier noch keinerlei einheitliche Definitionen existieren, wurde vom VDI / VDE - Arbeitskreis "Leiterplattenbestückung" eine Richtlinie zur Ermittlung von Leistung und Genauigkeit in Form einer Musterleiterplatte (Bild 2.11) definiert, die die Möglichkeit eines objektiven Vergleichs von Bestückautomaten gibt [12].

### **3 Verbindungsmedien in der SMT**

Bevor die endgültige Verbindung zwischen Bauelement und Leiterbahn hergestellt werden kann, muß ein Medium aufgebracht werden, das die Bauelemente nach dem Bestücken hinreichend gut fixiert. Eingesetzt werden:

- Lotpasten,
- Leitkleber, die gleichzeitig Fixier- und Verbindungsmedium darstellen, oder
- SMD - Kleber, die Bauelemente nach dem Bestücken bis zum Wellenlötprozeß auf der Leiterplatte festhalten.

#### **3.1 Klebstoffe für SMD's**

Einzelne Charakteristika des Klebstoffes können die Qualität der Leiterplatte und somit letztendlich die Produktivität des Gesamtprozesses entscheidend beeinflussen. Größen wie Viskosität, Fließgrenze, Temperatur, Partikelgröße, Blasenfreiheit, Haftfestigkeit im gehärteten und ungehärteten Zustand kommen besondere Bedeutung zu. Da die meisten dieser Merkmale voneinander abhängig sind, gestaltet sich die Festsetzung der optimalen Parameter sehr diffizil. Die Anforderungen an SMD - Klebstoffe werden in den Quellen [83] [74] [70] [92] [89] detailliert beschrieben.

##### **3.1.1 Einfluß der Viskosität**

Aus den Anforderungen, die an einen SMD - Klebstoff hinsichtlich der Viskosität bestehen, läßt sich zunächst strukturviskoses Verhalten ableiten, bei dem die Viskosität unter Scherbelastung abgebaut wird. Im Gegensatz zu der

starken Scherung des Klebers in der Kanüle, wirken nach dem Absetzen des Klebepunktes keine oder nur sehr geringe durch die Gravitation verursachte Kräfte. Von Schauburger wurde eine Anpassungsfunktion entwickelt, die auf der Regressionsformel nach Casson basiert [83]. Damit kann die sog. Casson - Fließgrenze, ein Maß für die Haftung und für das Verschieben von Bauteilen im nicht ausgehärteten Zustand des Klebers, bestimmt werden. Des weiteren beschreibt die Fließgrenze die Geometrie des Klebepunktes nach dem Absetzen auf der Leiterplatte. Ein häufig eingesetztes Verfahren zur Bestimmung des Fließverhaltens ist die Ermittlung des Durchmesser / Höhenverhältnisses der Klebepunkte. Je höher die Fließgrenze des Klebers ist, um so besser ist die Naßhaftung der Klebepunkte. In Versuchen wurden Fließgrenzen von 150 Pa als unterer Richtwert ermittelt [83].

### **3.1.2 Thermische Einflüsse auf den SMD - Klebstoff**

Bei Temperaturerhöhung wird die Fließgrenze des Klebstoffes geringer. Sie sollte jedoch bis 35 °C oberhalb der 200 Pa - Grenze bleiben, so daß ausreichende Haftfestigkeit auch bei erhöhten Raumtemperaturen gewährleistet bleibt. Erfüllt ein Kleber diese Forderung, kann durch eine Temperaturregelung an der Kartusche die dosierte Klebermenge und die Tropfengeometrie bzw. das Fadenziehen beeinflusst werden. Bemerkenswert ist, daß eine Erhöhung der Raumtemperatur um 5 °C eine Zunahme der dispensten Klebermenge um bis zu 50 % zur Folge hat.

### **3.1.3 Lufteinschlüsse im SMD - Klebstoff**

Da der SMD - Kleber meistens mit Dispensern appliziert wird, ist die Anlieferung in Kartuschen unerläßlich. Mikroblasen im Klebstoff können beim Aushärten eine Schwammstruktur erzeugen, so daß es beim anschließenden

Wellenlöten zu Lufteinschlüssen unter dem Bauelement kommen kann. Makroblasen führen zu Aussetzern beim Dispensen und damit zum Verlust von Bauelementen beim Wellenlöten. Das Röntgen der Kartuschen ist eine Möglichkeit, um Lufteinschlüsse im Kleber zu detektieren [83].

### 3.2 Einsatz von Leitleber

Die Verlustleistungen erreichen bei dichtgepackten Leiterplatten bis zu 30 W pro cm<sup>2</sup>. Unzureichende Wärmeabfuhr verursacht Scherbeanspruchung im Verbund Bauelement / Substrat, was zu Bruchversagen der Lötverbindungen führen kann. Als alternative Verbindungstechnik bietet sich das Leitleben an, da die Klebeverbindung höheres plastisches und elastisches Verformungsvermögen als die Lötverbindung aufweist [63].

<b>Vorteile des Leitlebens:</b>	<b>Nachteile des Leitlebens:</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>» Weniger Prozeßschritte: Vortrocknen- und Reinigungsprozeß entfallen, damit wirtschaftlicher</li> <li>» Keine Probleme bei der Verbindung unterschiedlicher, auch nicht lötfähiger Oberflächen</li> <li>» Geringe Temperaturbelastung der BE im Fertigungsprozeß</li> <li>» Gute kurzzeitige Temperaturbeständigkeit der Klebeschicht</li> <li>» Reduzierung des Problems der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>» Geringere thermische Leitfähigkeit als bei metallischen Fügeschichten</li> <li>» Längere Aushärtezeit</li> <li>» Geringere Strombelastbarkeit der Klebeschicht als bei der Lötverbindung</li> <li>» Spaltenhöhenüberbrückung nur im Rahmen der Dicke der aufgetragenen Klebspots</li> <li>» Lotpaste ist kostengünstiger als Leitleber</li> </ul>

Bild 3.1: Vor- und Nachteile des Leitlebens [64] [36]

Mittlerweile wurden einige Klebstoffe entwickelt, die den Anforderungen größtenteils entsprechen. Die Akzeptanz der Industrie ist jedoch noch sehr verhalten, da keine Untersuchungen über das Langzeitverhalten vorliegen. Außerdem wird das Problem des Bruchversagens durch den Einsatz von Bauelementen mit J - Leads oder Gull - Wings in der kommerziellen Elektronik relativiert. Zudem stehen die (noch) höheren Kosten des Leitlebers einem verbreiteten Einsatz entgegen [72]. Vor- und Nachteile des Leitlebens sind in Bild 3.1 festgehalten.

Kleber für die elektrische und mechanische Verbindung von SMDs mit den Leiterbahnen müssen folgende Forderungen erfüllen [56]:

- > fertigungsfreundliche Verarbeitbarkeit
- > angepaßte thermische Ausdehnung
- > hinreichende Wärme- und elektrische Leitfähigkeit
- > Glasübergangstemperatur  $T_g < 100\text{ °C}$  zur Vereinfachung von Reparaturarbeiten
- > hinreichende Duktilität
- > hinreichende Haftfestigkeit im trockenen und nassen Zustand
- > Integrationsmöglichkeit in die technologische Verfahrenskette
- > geeignetes Kurz- und Langzeitverhalten

### **3.2.1 Die elektrische Leitfähigkeit von Leitlebern**

Eine der wichtigsten Kriterien beim Einsatz von Leitlebern ist die elektrische Leitfähigkeit. Die größte Rolle unter den elektrisch leitenden Klebstoffen spielen silbergefüllte Epoxidsysteme. Bei kupfergefüllten Klebstoffen ist die elektrische Leitfähigkeit aufgrund der Oxidschicht an der Partikeloberfläche wesentlich geringer als bei Silber. Der spezifische Widerstand von silbergefüllten Epoxidklebstoffen liegt bei ca.  $10^{-4}\text{ }\Omega \cdot \text{cm}$ . Der spezifische Widerstand der reinen Metalle liegt bei  $1,6 \cdot 10^{-6}\text{ }\Omega \cdot \text{cm}$  (Ag) bzw.  $1,7 \cdot 10^{-6}\text{ }\Omega \cdot \text{cm}$  (Cu).

Als Basispolymere kommen vorwiegend Epoxidharzsysteme (kalt- und warmhärtend) vor. Kleine Silberpartikel in der Größe zwischen 0,5 und 40 µm dienen als Füllmaterial [8]. Für die Silberpartikel sind unterschiedliche Geometrien im Einsatz: Plättchen, Kugeln, Nadeln, Brocken, verzweigte Nadeln und Vielecke.

Durch die Form der Partikel wird nicht nur der elektrische Leitungsmechanismus beeinflusst, sondern auch das rheologische Verhalten der Paste und die Eigenschaften der Klebstelle. Die Leitung des elektrischen Stromes erfolgt in den sich gegenseitig berührenden Silberpartikeln, wobei die Polymermatrix nur sehr unwesentlich in den Leitungsmechanismus einbezogen ist. Für die Leitfähigkeit entscheidend ist die durchschnittliche Anzahl von Kontakten der Partikel untereinander. Um günstige rheologische Eigenschaften zu erzielen, darf der Silberanteil nur einen gewissen Prozentsatz im Kleber erreichen [9]. Folgende Standardrezeptur kommt häufig zum Einsatz:

70%	Leitpigment
24%	Epoxidharz
3%	Reaktivverdünner
3%	Härter

### **3.2.2 Mechanische Kennwerte von leitfähigen Klebstoffen**

Leitkleber bestehen zu ca. 80 Gewichtsprozent aus Metallflakes. Dieser hohe Füllungsgrad hat zur Folge, daß sich die mechanischen Kennwerte des Klebstoffes erheblich von denen der Harzmatrix unterscheiden. In der Regel sind sie spröder.

Bei Temperaturänderungen auf der Leiterplatte wächst, infolge der unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten der Fügepartner, die Spannung in der Klebstoffuge.

Verbindet ein spröder Klebstoff (vergleichbar einem Lot) diese Fügepartner, so wird bei ausreichender Haftfestigkeit die Spannung in das Bauteil übertragen und es kommt zum Bruch. Ein guter Klebstoff zeichnet sich durch eine möglichst geringe Steigung der Hook'schen Geraden bei ausreichend hoher Bruchspannung aus [64].

### 3.3 Technologie der Lotpasten

Wichtigste Funktion der Lotpaste ist die Bereitstellung von Lot und Flußmittel an den Anschlußflächen der Leiterbahnen in der richtigen Dosierung. Weiterhin ist durch die Lotpaste die Fixierung der Bauelemente zwischen den Verfahrensschritten "Bestücken" und "Löten" sicherzustellen [89]. Die wichtigsten Anforderungen an Lotpasten sind im DIN - Entwurf 32513 (1988) enthalten.

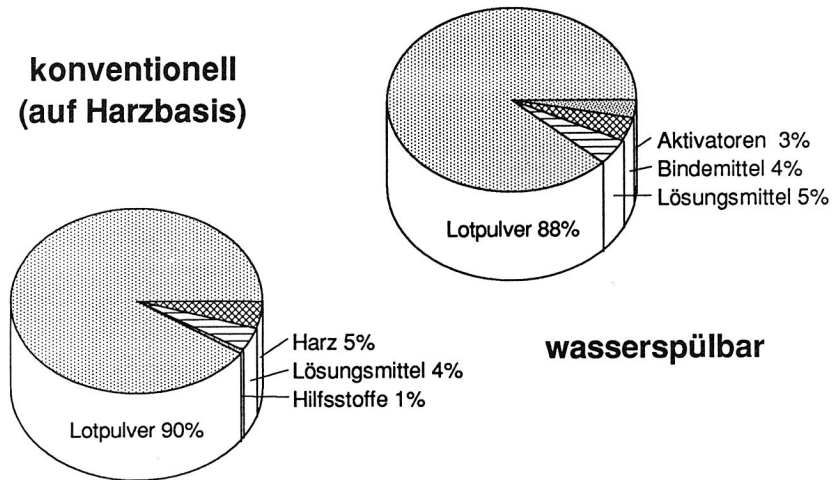


Bild 3.2: Zusammensetzung von Weichlotpasten in Gewichtsprozent  
(nach [54])

Lotpasten sind eine Suspension von Lotpulver in Flußmitteln von hochviskoser Konsistenz [50]. Geeignete Zusätze geben der Paste ein thixotropes Verhalten, das präzises Auftragen und genügend Formstabilität der applizierten Depots gewährleistet. Bild 3.2 zeigt die Zusammensetzung von gängigen Lotpasten.

### 3.3.1 Lotpulver

Als Standardlot wird in der SMT die Legierung Sn62PbAg2 (62 Gewichtsprozent Sn, 36 % Pb und 2 % Ag) mit einer Schmelztemperatur von ca. 179 °C eingesetzt. Aus dem PbSn - Phasendiagramm (Bild 3.3) kann das Schmelzverhalten von PbSn - Legierungen, insbesondere der Legierung Sn63Pb, entnommen werden.

Das silberhaltige Lot Sn62PbAg2 hat gegenüber der Legierung Sn63Pb folgende Vorteile [56]:

- + feineres Gefüge
- + bessere mechanische Festigkeit
- + Ag - Anteil schützt vor Ablegieren der AgPd - Metallisierung von BE
- + niedrigere Schmelztemperatur (179 °C statt 183 °C)

Die Form der Lotpulverteilchen hängt von der Methode der Pulverherstellung ab und variiert zwischen irregulären Formen beim Verblasen von Lot an Luft zu fast perfekten Kugeln beim Verdüsen von Lot in Flüssigkeiten.

Das Lotpulver sollte möglichst oxidfrei sein. Je kleiner und verzweigter die Lotteilchen, desto größer ist die Oberfläche an der sich Oxide bilden und einem guten Lötergebnis entgegenwirken. Ziel sollte sein, möglichst kugelförmige Partikel zu erzeugen, da bei einer Kugel das Verhältnis von Volumen zu Oberfläche am günstigsten ist.

Außerdem ergeben sich durch sphärische Partikel bessere rheologische Eigenschaften. Von besonderer Bedeutung für fine - pitch - Lotpasten ist die der eigentlichen Herstellung des Pulvers nachgeschaltete Pulverauffbereitung, bei der aus dem Rohpulver die spezifikationsgerechten Teilfraktionen extrahiert werden.

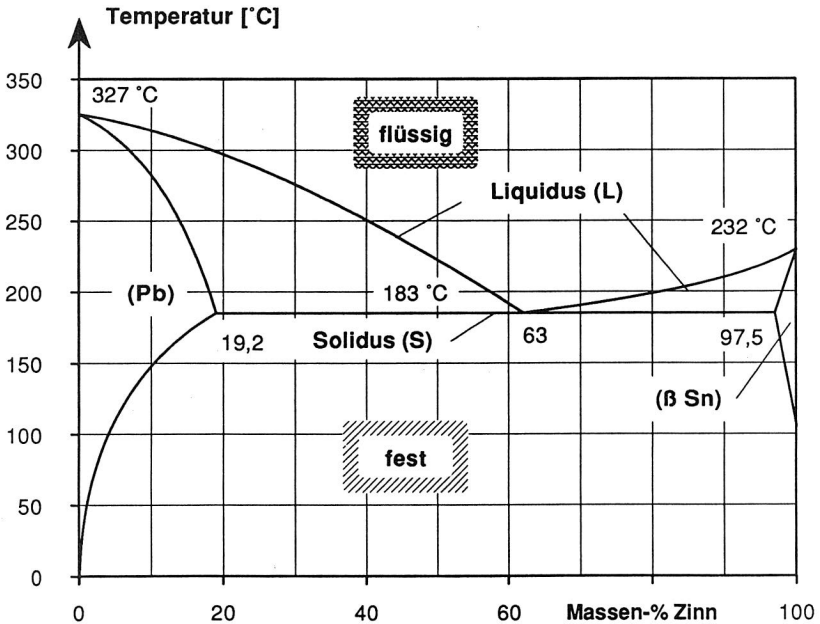


Bild 3.3: Phasendiagramm des Zinn / Blei - Systems [50]

Die Forderung nach hohem Auflösungsvermögen, wie sie der Feinliniendruck mit sich bringt, fördert unmittelbar die Tendenz zur Verwendung von feinerem Lotpulver. Wegen der mit dem Partikeldurchmesser exponentiell steigenden spezifischen Oberfläche dieser Pulver erfordern deren Oberflächeneigenschaften erhöhte Aufmerksamkeit [80].

### 3.3.2 Flußmittel

Weichlötflußmittel sollen die Benetzung fördern um dadurch die gute Ausbildung der Lötstelle zu gewährleisten. Flußmittel übernehmen dabei folgende Funktionen [50]:

- > Chemisch: Beseitigung der Oxidfilme auf den zu lötenden Substratoberflächen und Schutz dieser Oberflächen während des Lötens vor Reoxidation.
- > Thermisch: Förderung des Wärmeflusses zwischen Wärmequelle und Lötbereich.
- > Physikalisch: Entfernung der Reaktionsprodukte von der Oberfläche, und damit Ermöglichung eines direkten Kontaktes von Lot und Substrat.

Flußmittel bestehen i.a. aus einer Harzkomponente, aus Lösungsmitteln und aus Hilfsstoffen wie Thixotropiemittel, Aktivatoren usw. (vgl. Bild 3.2). Das Harz bedingt die pastöse Beschaffenheit der Paste und wird aus dem Baumharz Kolophonium gewonnen. Die Lösungsmittel machen das Kolophonium und damit auch die fertige Lotpaste dünnflüssiger. Aufgabe der Aktivatoren ist das Freibeizen der Oberflächen (Leiterbahn, Bauelement und Lotpulver) von Oxiden. Ihre Wirkung entfaltet sich erst bei erhöhter Temperatur unterhalb des Schmelzpunktes. Die Problematik bei der Auswahl eines geeigneten Flußmittels besteht darin, daß sich die Forderungen nach der chemischen Wirksamkeit und der korrosiven Wirkung nach dem Löten diametral entgegenstellen.

Da die meisten Bauelemente sehr korrosionsempfindlich sind, ist die Auswahl auf die begrenzt aktiven beschränkt. Die Nachteile durch Flußmittelmrückstände kann durch Waschen nach dem Löten vermieden werden [50]. Da die Waschung mit Freon zunehmend mit gesetzlichen Auflagen belegt wird (FCKW wird frei!), steht zu erwarten, daß die umweltfreundlichen und wasserspülbaren Lotpasten zunehmend eingesetzt werden.

Der grundsätzliche Aufbau wasserspülbarer Lotpasten ist mit dem konventioneller, kolophoniumhaltiger Produkte identisch. Wie in Bild 3.2 dargestellt, bestehen auch diese Pasten aus Lotpulver, einem organischen Bindemittel, Aktivatoren sowie aus Lösungsmitteln. Ein komplexes Gemisch aus wasserlöslichen Polymeren, Netzmitteln und Thixotropiemitteln übernimmt dabei die Funktion des Kolophoniums.

Wichtige Randbedingung für alle eingesetzten Bindemittel, Aktivatoren und Lösungsmittel ist die biologische Abbaubarkeit im Abwasser. Bei der Verwendung von wasserspülbaren Lotpasten ist beim Reflowlötprozeß genaue Kontrolle des Temperaturprofils erforderlich, um die Bildung von Polymerisations- und Zersetzungsprodukten des organischen Bindemittels zu verhindern. Auf lange Vorheizzeit und auf eine Peaktemperatur kleiner 240 °C sollte geachtet werden [54]!

## 4 Lötverfahren in der SMT

Mit der Einführung der Leiterplatte als Basiselement für mechanische Befestigung und elektrische Kontaktierung von Bauelementen ergab sich die Möglichkeit, alle Lötverbindungen einer Schaltung in einem Arbeitsgang herzustellen. Elektronikbaugruppen können hunderte von Lötstellen enthalten, so daß die Automatisierung des Lötprozesses ein erhebliches Rationalisierungspotential in der Elektronikfertigung darstellt.

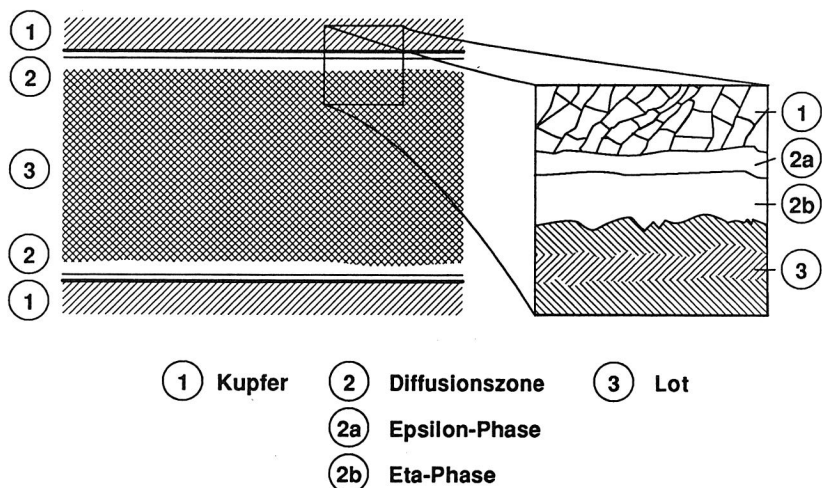
### 4.1 Weichlöten in der Elektronik

Beim Weichlöten werden die Fügepartner vom flüssigen Lot benetzt und teilweise angelöst, bleiben jedoch in ihrem Hauptteil als Festkörper erhalten. Somit ist es möglich, in einem Prozeßschritt Werkstücke (z.B. Bauelement und Leiterbahn) mit unterschiedlichen Oberflächenbeschichtungen zu verbinden, wenn diese vom flüssigen Weichlot ausreichend benetzt werden können [40].

Aufgrund dieses speziellen Vorteiles und der relativ niedrigen Löttemperatur stellt das Weichlöten immer noch die am weitesten verbreitete Verbindungstechnik in der Baugruppenfertigung dar. Im Vergleich zu anderen Verbindungstechniken liegen die Herstellkosten pro Lötverbindung bei der Baugruppenfertigung im Bereich von 0,0005 DM / Lötstelle [27] und damit sehr niedrig, so daß das Weichlöten auch künftig seine Bedeutung und Anwendungsbreite in der Elektronikfertigung beibehalten wird.

Die Lötverbindung übernimmt in der Elektronik neben der elektrischen Funktion gleichzeitig die mechanische Fixierung der Bauelemente auf der Leiterplatte. Zudem wird ein Teil der in den Schaltkreisen erzeugten Wärmeleistung über die Fügeverbindungen in die Substrate abgeführt [39]. Diese

Funktionen können nur übernommen werden, wenn die Lötstelle optimal ausgebildet ist. Die reaktive Natur des Lötens bedingt den schichtförmigen Aufbau der Verbindung. Bild 4.1 zeigt den Schnitt durch eine Lötstelle eines SMD's zwischen zwei Kupferoberflächen (Bauelementmetallisierung und Leiterbahn).



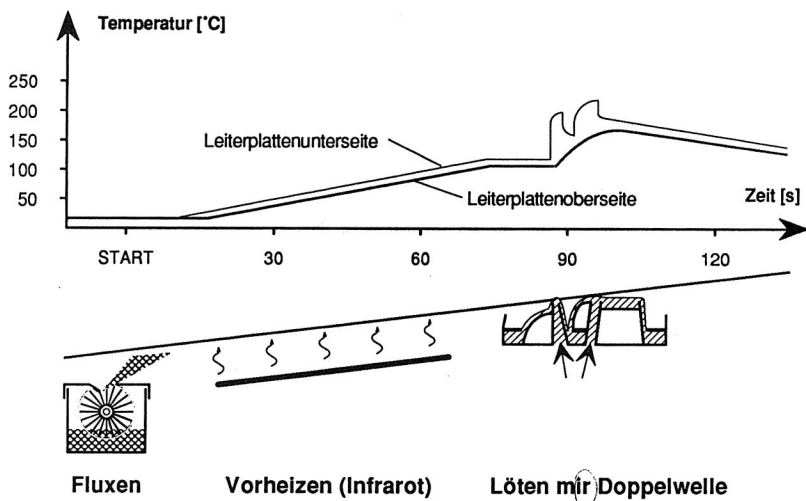
**Bild 4.1:** Intermetallische Zonen zwischen Kupfer und Lot [40]

Unmittelbar unter dem Kupfer der Bauelementmetallisierung befindet sich eine dünne Schicht mit der Zusammensetzung  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  (Epsilon - Phase). Darunter liegt eine dickere Schicht mit der Zusammensetzung  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  (Eta - Phase). Diese Schichtstruktur bestimmt maßgeblich das Verhalten der Lötstelle unter mechanischer Beanspruchung. Die Dicke der gesamten Diffusionszone hängt davon ab, wie lange das geschmolzene Lot mit dem Kupfersubstrat in Berührung war, bevor das Lot erstarrte. Dieses, auch als Konfrontationsdauer bezeichnete Zeitintervall, hängt vom eingesetzten Lötverfahren ab und hat auf die metallurgische Struktur der Lötstelle und damit auf deren Verhalten im Einsatz unter thermischer und mechanischer Wechselbelastung ausschlaggebenden Einfluß [89].

## 4.2 Wellenlöten von SMD - Platinen

### 4.2.1 Spezifische Probleme beim Wellenlöten von SMD - Leiterplatten

Beim Wellenlöten wird an die Lötseite einer um ca. 7° geneigt bewegten Platine flüssiges Lot durch eine entsprechend geformte Düse herangeführt. Relativ unproblematisch ist das Wellenlöten von passiven Bauelementen in SMD - Form, wie Chip und MELF.



**Bild 4.2:** Elemente und Temperaturverlauf einer Doppelwellenlötanlage

Schwieriger dagegen gestaltet sich das Wellenlöten von Transistoren und insbesondere von integrierten Schaltkreisen (IC). Aufgrund der größeren Bauhöhe dieser Körper, der höheren Pakungsdichte von SMD - Baugruppen und des kleineren Abstandes der Anschlußbeinchen kann es sowohl zu schlecht oder gar nicht gelöteten Anschlüssen als auch zu Lotbrückenbildung kommen.

Wegen der geringen Benetzungsfähigkeit der Plastik - IC - Gehäuse entsteht hinter dem Körper eine Zone, die vom flüssigen Lot nicht erreicht wird. Zur Vermeidung von Lotbrücken ist eine laminar strömende Welle erforderlich. Zur Beseitigung des Schatteneffektes und zur Überwindung der Kapillardepression zwischen den Bauelementen sollte eine turbulente Welle mit großem Aufwärtsdruck eingesetzt werden.

Beide Forderungen können von einer Einfachwelle nicht erfüllt werden, daher wurden für die Lötung von gemischt bestückten Baugruppen Anlagen entwickelt, die mit einer Doppelwelle ausgerüstet sind [3]. Bild 4.2 zeigt eine Prinzipdarstellung einer Doppelwellenanlage (nach [91]).

#### **4.2.2 Optimierung des Wellenlötprozesses**

Trotz der Bedeutung und der langjährigen Anwendung des Wellenlötens, sind die Kenntnisse über die physikalischen Zusammenhänge auf einem sehr bescheidenen Stand. Die Einstellung und Optimierung der Anlage bleibt der Erfahrung des Bedienpersonals überlassen, da keine statistisch gesicherten Daten über den Zusammenhang zwischen Prozeßparametern und Fehlerarten zur Verfügung stehen.

Dieser Mangel ist dadurch zu begründen, daß ca. 60 Parameter den Lötprozeß beim Löten von bedrahteten Bauelementen beeinflussen. Diese Zahl vergrößert sich noch, wenn die SMDs und die Haupteinflußgröße Mensch berücksichtigt werden [41].

Um den Zusammenhang zwischen aufgetretenen Fehlern auf der gelöteten Baugruppe und den Prozeßparametern erfassen zu können, wurde von Hiller und Jillek ein rechnergestütztes System entwickelt [41]. Hierbei werden Prozeßparameter wie Temperaturen, Geschwindigkeiten, Winkel, Höhe der Fluxschaumkrone usw. direkt von der Steuerung abgefragt bzw. von zu-

sätzlichen Sensoren aufgenommen. Die Lötfehlererfassung wird mittels eines Grafiktablets realisiert, dem die Layout- und Bauteilinformationen über ein Datenfile zur Verfügung gestellt werden. Eingabe des Fehlerortes und des Fehlertyps (offene Lötstelle, zu wenig Lot, zu viel Lot, Zinnbrücken) erfolgt mit einem Grafikstift.

Durch die statistische Auswertung größerer Datenmengen können offensichtliche Zusammenhänge erkannt, und stochastische von systematischen Fehlern getrennt werden. Außerdem muß zwischen prozeß- und layoutbedingten Fehlern unterschieden werden.

Mittelfristig sollen die Daten als Grundlage für ein Expertensystem dienen, mit dem durch einen Vergleich von Prozeßparametern und aufgetretenen Fehlern in einem geschlossenen Regelkreis Optimierungen der Prozeßparameter vorgenommen werden können. Dieser Regelkreis müßte allerdings relativ kurz sein, d.h. die Baugruppen müßten direkt nach dem Lötprozeß automatisch auf Fehler untersucht werden, damit kurzfristig auf die Parameter eingewirkt werden könnte.

Verguld erreicht über den allgemeinen Ansatz eines Prozeßmodelles, der auf die Wellenlöttechnik projiziert wird, Verbesserungen im Lötprozeß [91]: "Prozeßverbesserung resultiert aus dem ständigen Versuch, aus dem Ursachen - Wirk - Mechanismus eines Prozesses zu lernen und aus der Anpassung der Prozeßparameter zur Reduktion der Variationsmöglichkeiten. Um Verbesserungen vornehmen zu können, müssen die Zusammenhänge zwischen Ursache und Prozeßführung geklärt werden. Der Prozeß kann durch eine systematische Vorgehensweise verbessert werden, indem die aufeinanderfolgenden Entscheidungen und Aktionen eines Prozesses geplant, ausgeführt, festgehalten und bewertet werden."

Um das Lötergebnis zu verbessern, werden meistens nur die Prozeßparameter variiert. Häufig liegen die Ursachen jedoch in den Maschinenparametern, in

der Maschinenjustage, in der Qualität der Fügepartner und Hilfsstoffe und in dem mangelhaften Kenntnisstand der Anlagenbediener. Aus diesem Grunde wurde von Verguld eine Untersuchung und Verbesserung der Lötprozesse auf dieser Basis in verschiedenen Unternehmen durchgeführt. Ergebnis war eine durchschnittliche Verbesserung der Fehlerrate von 0,5 auf 0,07 %.

Aus den oben beschriebenen Überlegungen heraus wurde von A. Wiczorek ein Expertensystem zur Fehlerminimierung beim Weichlöten entwickelt [94]. Die beiden entscheidenden Module dieses Systems sind die Fehlerdiagnose und die Abhilfeoptimierung. Bei der Entdeckung eines Lötfehlers werden unerwünschte Symptome festgestellt, die vom Anwender zu analysieren sind. Ausgehend von den Symptomen werden von dem Expertensystem neben der genauen Fehlerart auch die Sicherheit, mit der der Fehler aufgrund der Eingaben bestimmt worden ist, geliefert [28]. Ist der Fehler korrekt festgestellt, läuft die Abhilfeoptimierung zur Beseitigung ab. Von diesem Expertensystem wird somit die Fehleranalyse im Hinblick auf die genaue Bestimmung der Fehlerursachen sowie die Überarbeitung der Bewertung von Abhilfeketten geleistet.

### **4.2.3 Wellenlöten unter Stickstoff**

An Fertigungsverfahren der modernen Elektronikproduktion werden stetig steigende Anforderungen hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit, der Fehlerrate und der Umweltverträglichkeit gestellt [30]. Aus diesen zwingenden Forderungen heraus wurde das Wellenlöten in Schutzgasatmosphäre entwickelt. Löten in einer sauerstofffreien  $N_2$  - Atmosphäre vermeidet Oxidation von Lotschmelze und Komponenten. Daher wird nur noch sehr wenig Flußmittel benötigt. Auf das Waschen nach dem Löten kann völlig verzichtet und somit Umweltbelastungen vermieden werden, die bei Einsatz der gängigen und bewährten Waschmedien (Freon, Frigen) auf FCKW - Basis entstehen. Der Lotverbrauch wird verringert, und die Anlagenwartung vereinfacht, da sich keine Krätze bildet [5].

Zum Einsatz kommen meistens gasdichte Tunnelöfen durch die die Leiterplatten auf einem kontinuierlich laufenden Band hindurchgefahren werden. Ofenein- und -auslauf sind im allgemeinen offen und nur mit Gasvorhängen gegen die Außenluft abgesperrt. Schutzgas wird an mehreren Stellen in den Tunnel eingeleitet und strömt kontinuierlich von innen nach außen. Es steht zu erwarten, daß sich diese Technik angesichts der steigenden Auflagen zur Schonung der Umwelt durchsetzen wird, da das Löten unter Schutzgas nur wenige Nachteile aber immens viele Vorteile aufweist.

## 4.3 Reflowlötverfahren in der SMT

Beim Reflowlöten wird ein zuvor aufgebrachtes Lotdepot ohne weitere Lotzugabe durch Aufschmelzen zum Löten verwendet. Für den ersten Arbeitsschritt, das Aufbringen der Lotdepots auf die Lotpads der Leiterplatte, kommen drei unterschiedliche Verfahren zum Einsatz: 1. die Verwendung von Lotpasten, 2. das Aufbringen der Lotdepots durch Beschichtung und 3. die Verwendung von Lotformteilchen.

Die wichtigsten Reflowlötverfahren sind in Bild 4.3 zusammengefaßt. Unterschieden wird nach Art der Wärmezufuhr und nach Art der Wärmeübertragung.

Die zugeführte Wärmemenge ist abhängig:

- > vom Wärmeübergangskoeff. bei Konvektion und Konduktion,
- > vom Absorptionskoeffizienten bei Strahlung,
- > von der Temperatur der Wärmequelle,
- > von der Verweilzeit und
- > von der Größe der Oberfläche des Lötgutes

Die Temperatur, die sich an verschiedenen Teilen der Baugruppe einstellt, ist abhängig von der Wärmeaufnahme und -abgabe an der jeweiligen Meßstelle [59]. Die SMT wird hauptsächlich von zwei Massenreflowlötverfahren bestimmt. Dabei handelt es sich um das Infrarotreflowlöten und das Dampfphasenlöten. Im Fertigungsumfeld haben beide Verfahren weite Verbreitung gefunden, wobei das Infrarotlöten zur Zeit an Übergewicht gewinnt [77].





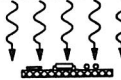
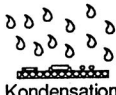


Wärme- zufuhr Wärme- übertragung				
 Strahlung	-	Laser	Infrarot	Infrarot
 Kondensation	-	-	-	Dampfphase
 Konduktion	Heizplatte Heizband	Stempel	Bügel	-
 Konvektion	-	Gasdüse	Heißluft Heißgas	Heißluft Umluft Heißgas

Bild 4.3: Reflowlötverfahren für SMD's (nach [59])

#### 4.3.1 Spezifische Aspekte beim Infrarotlöten

IR - Löten zeichnet sich insbesondere durch leichte Steuerung der Wärmezufuhr, durch Umweltfreundlichkeit und durch kontaktfreie Wärmezufuhr aus [55]. Wärme kann auf drei verschiedene Arten übertragen werden: Wärmeleitung, Konvektion und Strahlung, wobei für IR - Lötanlagen die dritte die

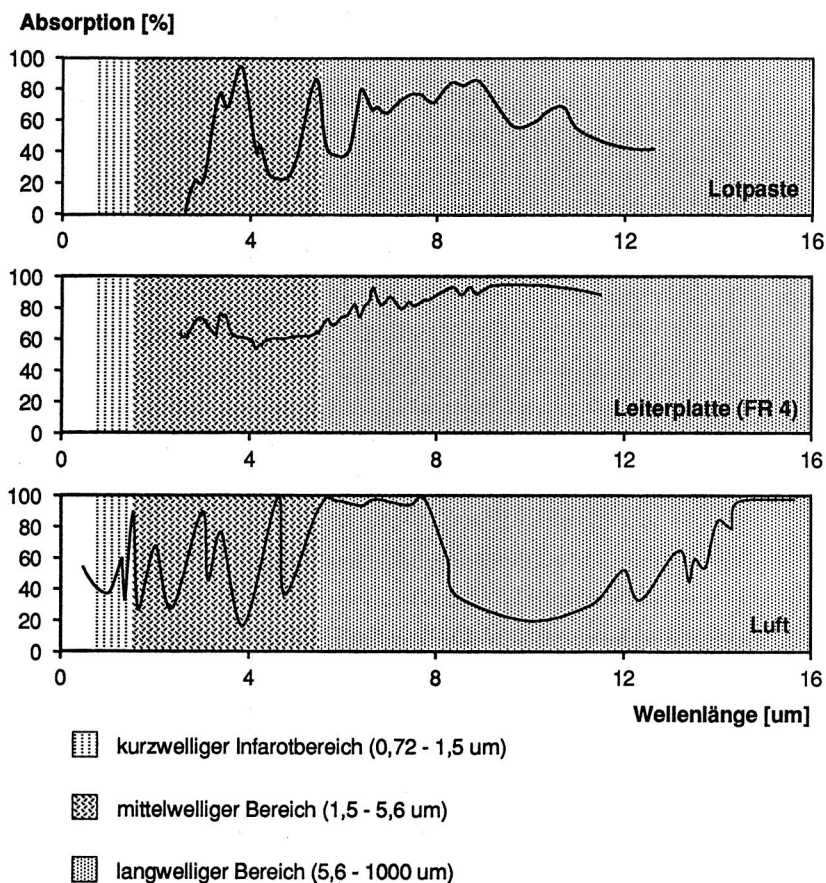
wichtigste Übertragungsart darstellt. IR - Strahlung wird üblicherweise in drei Wellenlängenbereiche unterteilt, den kurz-, mittel- und langwelligen Bereich (vgl. Bild 4.4). Da die Grenzwerte zur Aufteilung in die drei Bereiche nicht festliegen, sind Abweichungen bei unterschiedlichen Literaturquellen möglich.

Wie sich das Lötgut gegenüber der IR - Strahlung verhält, ist von drei materialspezifischen Faktoren abhängig: 1. Reflexion, 2. Absorption und 3. Transparenz bzw. Transmission. Die Aufteilung der Gesamtstrahlung in diese drei Anteile hängt von einer Vielzahl von Parametern ab, die sich teilweise gegenseitig beeinflussen, so daß eine Berechnung sehr schwierig wird und nur näherungsweise erfolgen kann. Folgende Parameter verändern die Anteile von Absorption, Reflexion und Transmission an der Gesamtstrahlung [79]:

- > Temperatur des zu erwärmenden Körpers
- > Wellenlänge der auftreffenden IR - Strahlung
- > Dicke des Werkstoffs
- > Beschaffenheit und Güte der Oberfläche
- > Farbe der Oberfläche
- > Material des Körpers

In Bild 4.4 sind für das gängige Leiterplattenmaterial FR4, für ein typisches Lot und für Luft Kennlinien aufgezeigt, wie sich bei veränderlicher Wellenlänge der auftreffenden IR - Strahlung der Anteil der Absorption verteilt. Deutlich ist zu erkennen, daß Maxima jeweils im mittelwelligen Bereich (ca. 2 - 4  $\mu\text{m}$ ) und im langwelligen Bereich ( $> 5,5 \mu\text{m}$ ) liegen. Aus diesem Grunde können in IR - Öfen zwei Strahlertypen zum Einsatz kommen (je nach Herstellerphilosophie):

1. Schwarzstrahler, deren strahlende Oberflächen aus geschwärzten Metallplatten oder Keramikkörpern bestehen. Flächenstrahler dieser Art arbeiten in einem Temperaturbereich von 250 bis 300 °C.
2. Quarz - Hochtemperaturstrahler, die bei Temperaturen von 800 bis 1100 °C arbeiten. Das Strahlungsmaximum liegt im nahen IR - Bereich.



**Bild 4.4:** Energieabsorption von Lotpaste, FR4 und Luft [89][56][79][31]

Für das Strahlungsverhalten eines sogenannten schwarzen Körpers sind im wesentlichen zwei Gesetze maßgebend:

1. Das Stefan - Boltzmann - Gesetz, was besagt, daß die abgestrahlte Energie eines Strahlers proportional zur 4. Potenz der Strahlerober-

flächentemperatur ist. Danach emittieren Quarz - Hochtemperaturstrahler erheblich mehr Energie als Strahler mit niedriger Temperatur. Die Gefahr des Überhitzens der Baugruppen durch ungenaue Regelung ist bei ihnen ungleich größer als bei "kühlen". Andererseits spricht die Strahlungsleistung auf Heizstromänderungen schneller an.

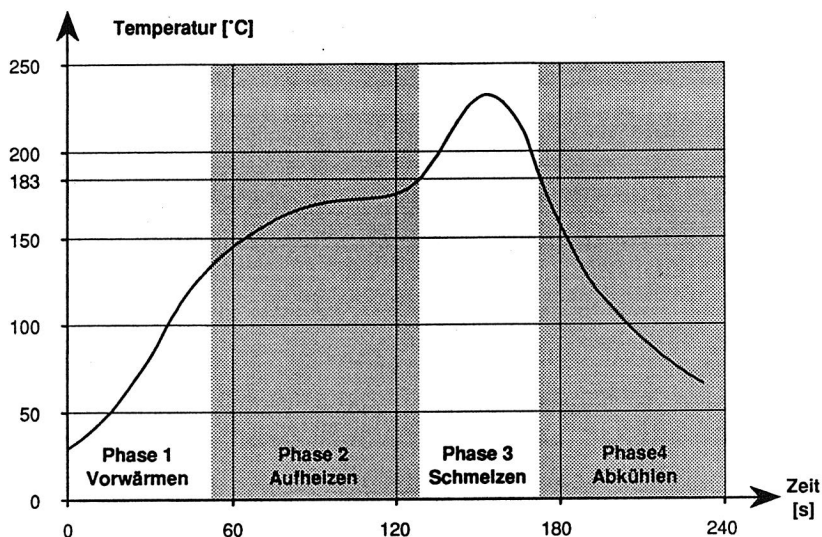
2. Das Wien'sche Verschiebungsgesetz besagt, daß die Wellenlänge des Maximums der emittierten Strahlung indirekt proportional zur Strahleroberflächentemperatur ist. Die Wellenlänge der heißen Strahler ist kürzer als die der kühlen.

Beim IR - Löten einer Leiterplattenbaugruppe muß so viel Energie eingestrahlt werden, daß an den Stellen mit dem größten Wärmebedarf sicher gelötet wird. An den unbestückten Stellen der Platine bzw. an den sehr kleinen Bauteilen steigt die Temperatur schneller und weiter an als z.B. an PLCC 68 - Kontakten. Schädigung der Baugruppe durch örtliche Überhitzung muß aber vermieden, und die Temperaturdifferenzen auf der Leiterplatte dürfen nicht zu groß werden.

Diese Forderung ist mit niedrigtemperierten langwelligen IR - Strahlern leichter und sicherer zu verwirklichen als mit heißen kurzwelligen [31]. Dabei spielt eine Rolle, daß die umgebende Luft im langwelligen IR - Bereich weit stärker absorbiert als im kurzwelligen (vgl. Bild 4.4), und dadurch Wärmeleitung bzw. Konvektion zum Temperatúrausgleich auf der bestückten Leiterplatte beiträgt.

Die mit dem langwelligen IR - Licht verbundene geringere Energieeinstrahlung muß durch größere Strahleroberflächen (Flächenstrahler) und durch längere Einwirkungszeiten auf die Baugruppen (langsamere Transportgeschwindigkeit) ausgeglichen werden. Die Aufteilung in mehrere und separat regelbare Heizzonen ist bei IR - Lötstrecken unbedingt notwendig, damit das Temperaturprofil verändert und variabel gestaltet werden kann. Die Temperaturen des

Lötprofilen beziehen sich dabei immer auf die Lötstellen und nur mittelbar auf Substrat und Bauteilgehäuse, wenn nicht anders angegeben.



**Bild 4.5:** "Ideales" Temperaturprofil

Während des Durchlaufs durch das Lötssystem wird für alle Leiterplattentypen ein linearer, gleichmäßiger Temperaturverlauf angestrebt, das ideale Temperaturprofil. Dieses ideale Profil ist anlagenspezifisch und wird meist vom Anlagenhersteller qualitativ vorgegeben.

Ein beispielhafter Temperaturverlauf ist in Bild 4.5. dargestellt [66]. Allen Temperaturprofilen sind hierbei vier Hauptphasen gemeinsam:

1. Vorwärmstufe: Flüchtige Anteile aus der Lotpaste und Oberflächenfeuchtigkeit verdampfen. Viskositätszusätze werden ausgetrieben.

2. Aufheizstufe: Das Flußmittel erreicht maximale Aktivität, Reduktionsvorgänge finden an den Anschlußflächen statt. Lot ist kurz unter dem Schmelzpunkt.
3. Schmelzstufe: Metallteile schmelzen auf und füllen die Lötstellen.
4. Abkühlstufe: Metall erstarrt und kühlt schnell ab.

Besonders wichtig ist der ausgeprägte "Peak" in der Schmelzstufe, um die Konfrontationsdauer zwischen Lotschmelze und Substrat bzw. Bauelement auf ein Minimum zu reduzieren und um eine möglichst dünne Diffusionszone und feinkörniges Gefüge in der Lötstelle zu erzielen.

Löten unter Schutzgasatmosphäre ist möglich, wenn der IR - Ofen als Tunnelofen mit gasdichter Muffel gebaut ist. Dann können flußmittelärmere Lotpasten eingesetzt und die Lötqualität weiter verbessert werden.

#### **4.3.2 Löten in der Dampfphase**

Die Leiterplattenbaugruppen werden in gesättigten Dampf gebracht, der sich sofort auf den relativ kleinen Teilen kondensiert. Dabei wird die latente Verdampfungswärme freigesetzt. Die Temperatur des gesättigten Dampfes ist die gleiche wie die Siedetemperatur der Flüssigkeit. Damit ist der Wärmeübergang extrem schnell und es ergeben sich Ansprechzeiten für kleine Teile von weniger als 5 s, für große bis zu 45 s [50].

Sobald alle Teile der Baugruppe die Dampftemperatur erreicht haben, kondensiert kein Dampf mehr, und wird keine Wärme mehr übertragen, d.h. kann keine Überhitzung stattfinden. Da weitere Energiezufuhr lediglich mehr Dampf erzeugt, kann auf Temperatursteuerung verzichtet werden. Der Dampf erreicht alle Teile der Baugruppe, wodurch die Aufheizung außerordentlich gleichmäßig verläuft.

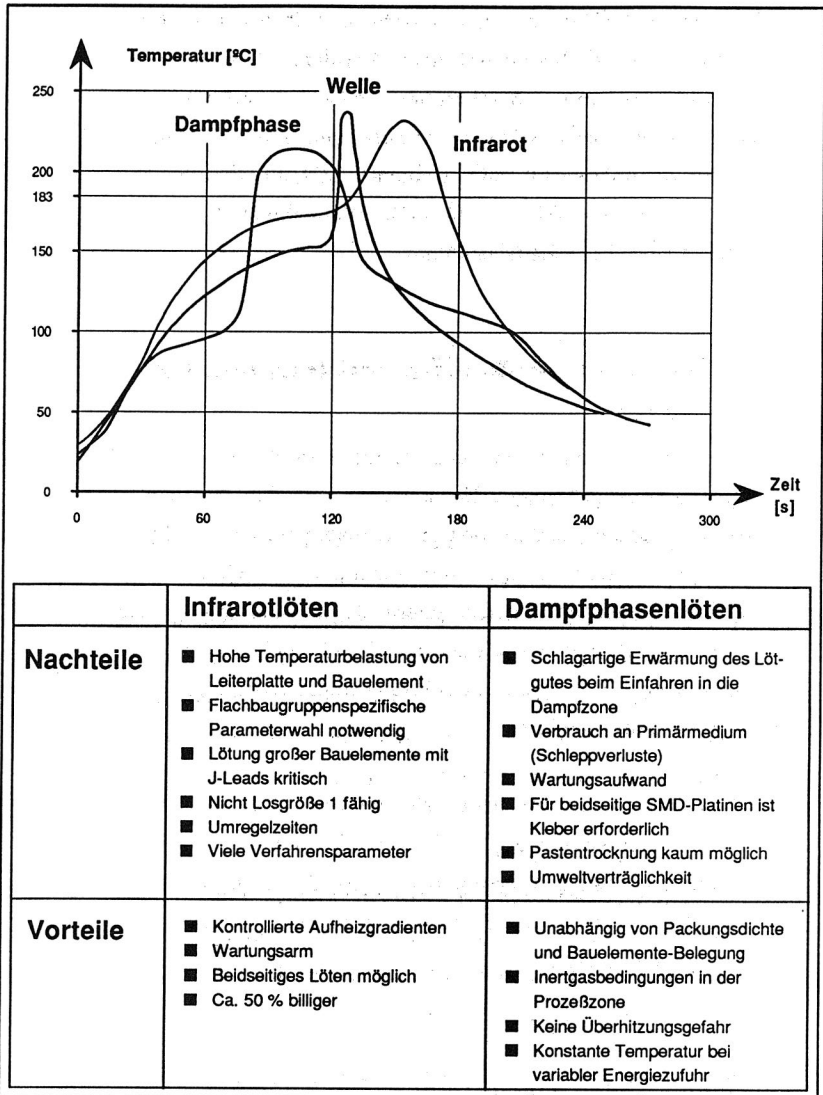
Die Zersetzung der Flüssigkeiten ist unter 250 °C sehr gering, aber an heißen Stellen (z.B. bei Berührung mit dem Heizelement) kann u.a. Perfluoroisobutylen (PFIB) entstehen, das besonders giftig ist und hohes Fieber erzeugt. Um der Bildung dieser Substanz vorzubeugen, muß der Flüssigkeitsspiegel durch Sensoren überwacht und der aus der Anlage entweichende Dampf wirksam abgesaugt werden. Mit ausreichenden Vorsichtsmaßnahmen stellt Dampfphasenlöten kein Sicherheitsrisiko dar.

### **4.3.3 Vergleich Dampfphasen- mit Infrarotlöten**

Beide Reflowmethoden haben einzigartige Vorteile. Das Dampfphasenlöten eignet sich am besten für die Herstellung von Schaltungen mit temperaturempfindlichen Bauelementen, die ungleichmäßig auf großen Multilayerplatten oder auf Leiterplatten mit spezieller Außenkontur verteilt sind. Gut geeignet ist das Dampfphasenlöten insbesondere für die Massenfertigung mit großem Durchsatz. Das Dampfphasenlöten hat Vorteile beim Löten von aufwendigen Schaltungen, da die zeit- und kostenintensive Ermittlung der leiter-spezifischen Lötparameter entfallen kann.

IR - Löten eignet sich am besten für die Herstellung von Schaltungen, bei denen die Bauelemente möglichst gleichmäßig auf temperaturunempfindlichen Substraten verteilt sind. Aufgrund der relativ niedrigen Investitionssumme für Kleinanlagen, werden in Labor und Kleinserienfertigung fast ausschließlich IR - Lötstrecken eingesetzt.

Reflowanlagen für die Massenfertigung müssen entsprechend mehr Heizzonen aufweisen, um den hohen Durchsatz bewältigen zu können. Die Kosten für diese Lötanlagen liegen in der gleichen Größenordnung wie vergleichbare Dampfphasenanlagen. In Bild 4.6 sind die wesentlichen Unterschiede von Dampfphasen- und IR - Löten beschrieben [77] [96] [7].



**Bild 4.6:** Vergleich der Reflowverfahren Infrarot und Dampfphase

Deutlich ist der hohe Temperaturgradient beim Eintritt in den Dampfbereich zu erkennen, der sich nachteilig auf die Bauelemente auswirken kann. SMD - Baugruppen können sowohl mit Dampfphasen- als auch mit IR - Löten erfolgreich hergestellt werden. Beide Verfahren lassen sich im Hinblick auf hohe Ertragsraten und Qualität noch optimieren z.B. durch rechnergestützte Lötparametererstellung (vgl. Kap. 7) bei IR - Anlagen oder durch Optimierung der Vorwärmstrecke bei Dampfphasenanlagen [33].

#### **4.3.4 Alternative Reflowlötverfahren für spezielle Bauelemente**

##### **a) Heißluft- und Heißgaslöten**

Zum Aufschmelzen von Weichlot kann auch heißes Gas (häufig Luft) zum Einsatz kommen. Jedoch sind Überhitzungsgefahr und damit Schädigungen von Bauelementen und Leiterplatte leicht möglich, da Temperatur und Gasgeschwindigkeit relativ hoch gewählt werden müssen [3]. Statt eines LötKolbens setzt man Heißgasgeräte für Reparaturarbeiten (Auslöten, Löten) ein. Für Standardbauelemente mit vielen Anschlüssen werden passende Lötspitzen angeboten [57].

##### **b) Heizplatte, Heizband**

Da bei diesen Verfahren die Wärme prinzipiell durch die Leiterplatte zugeführt werden muß, sind sie nur zur Vorwärmung von Baugruppen geeignet. Die erforderliche Prozeßwärme wird durch ein anderes Verfahren, z.B. IR - Löten, übertragen [35].

##### **c) LötKolben, Heizstempel**

Das Kolbenlöten wird hauptsächlich beim Nachbestücken von speziellen Bauelementen und bei Reparaturlöten benötigt. Für die Serienfertigung ist diese Variante nicht geeignet.

#### d) Stempel- und Bügellöten

Eine Erweiterung des einfachen LötKolbens sind die speziell ausgeformten Heizstempel, die zum Löten von IC - Gehäusen mit Gull - Wing - Anschlüssen verwendet werden. Die Wärme wird den Anschlüssen eines Fine - Pitch - ICs über einen beheizbaren Lötbügel direkt zugeführt. Bei diesem Verfahren ist der Lotpastenauftrag überflüssig, da die Pads vorverzinnt sind. Mittlerweile werden auf dem Markt Maschinen angeboten, die sowohl das Bestücken als auch das Bügellöten von Fine - Pitch - ICs bewerkstelligen können [85].

#### e) Laserlöten

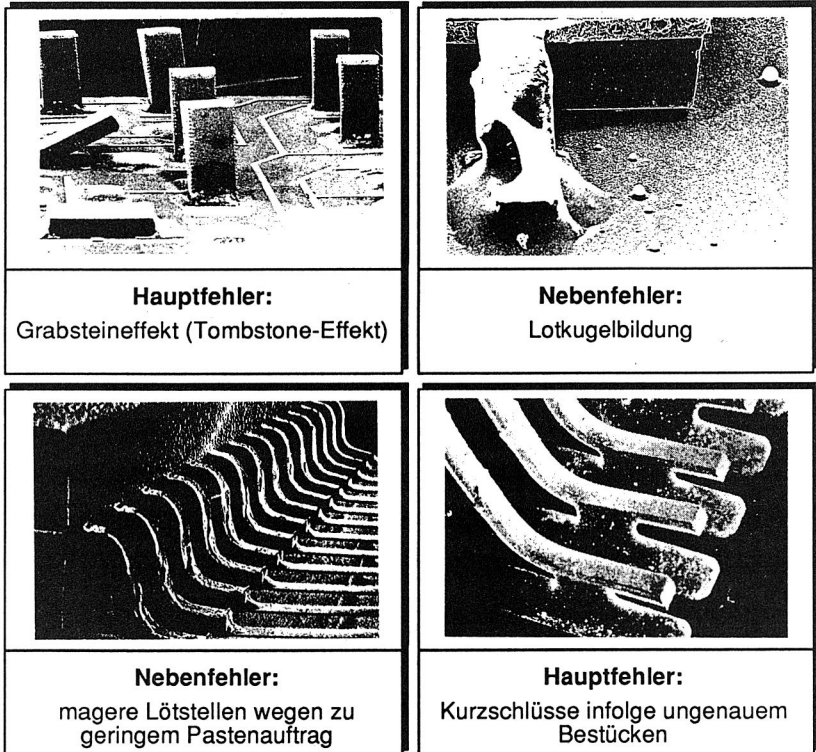
Kurzwellige IR - Strahlung wird punktförmig konzentriert sequentiell auf jedes einzelne Pad der Baugruppe gelenkt. Dabei ist die Energiedichte so hoch, daß innerhalb von ca. 0,1 s das Lotdepot aufschmilzt, und die Lötverbindung zustande kommt. Dieser schnelle Vorgang ist mit einem hohen Temperaturgradienten verbunden, der nur schwer kontrolliert werden kann [31].

Allerdings realisierte Horneff einen Regelkreis, der durch Regelung der Löttemperatur über die zugeführte Laserleistung exakte Einhaltung der optimierten Lötcurven ermöglicht. Dadurch wird die Reproduzierbarkeit und die Qualität erheblich verbessert [44]. Nachteilig für eine breite Anwendung dieses Verfahrens sind die hohen Kosten der Fertigungsmittel sowie die relativ geringe Produktivität [59].

### 4.3.5 Beurteilung von Reflowlötverbindungen

Die einwandfreie Herstellungsqualität einer Lötverbindung ist die wichtigste Voraussetzung für die mechanische und elektrische Zuverlässigkeit im praktischen Betrieb. Sichtbare Zeichen einer guten und zuverlässigen Lötstelle

sind gute Benetzung, die richtige Menge Lot, eine dichte und glatte Oberfläche und die korrekte Lage der Anschlüsse des Bauelements zu den Löt pads. Diese Grundprinzipien gelten für alle Lötstellen unabhängig davon, wie sie hergestellt wurden. Alle Lötstellen auf einer gedruckten Schaltung sollten ein gleichmäßiges Bild ergeben [50].



**Bild 4.7:** Typische Fehlerbilder nach dem Reflowlöten

Die Sichtprüfung mit bloßem Auge, mit einem Vergrößerungsglas oder mit einem Mikroskop ist die kostengünstigste, und für die meisten SMD - Baugruppen die angemessenste Methode. Darüberhinaus kann es Faktoren und

Überlegungen geben, automatisierte Prüfverfahren einzusetzen, wie Röntgenstrahlprüfung, 3D - Sensorik mittels Lasertriangulation oder digitale Bildverarbeitung mit CCD - Kamera [62].

Die Lötfehler werden in drei Gruppen eingeteilt [3] (vgl. Bild 4.7):

1. Hauptfehler, bei denen mit einer Gefährdung der Schaltungsfunktion zu rechnen ist.
2. Nebenfehler, hier ist die Wahrscheinlichkeit der Verursachung eines Funktionsfehlers sehr gering.
3. Schönheitsfehler, die keinerlei Einfluß auf die Funktion und Zuverlässigkeit der Schaltung haben.

Die in der Praxis auf SMD - Baugruppen in Erscheinung tretenden Fehler beim Reflowlöten sind in Bild 4.8 zusammenfassend dargestellt (nach [38]). Die aufgezählten Fehler treten zwar alle unmittelbar nach dem Löten auf, sind aber nicht unbedingt Folge eines mangelhaften Lötprozesses.

Vielmehr liegen die Fehlerursachen an einer unzureichenden physikalischen, chemischen oder geometrischen Beschaffenheit der beiden Fügepartner Leiterplatte und Bauelement. Gründe für ein schlechtes Lötergebnis sind außerdem in den beiden dem Löten vorgeschalteten Prozessschritten "Lotpastenauftrag" und "Bestücken" zu finden. Der geringste Teil der Fehler ist dem eigentlichen Reflowlötprozeß zuzuschreiben.

Hier muß lediglich darauf geachtet werden, daß die Aufheizgeschwindigkeit nicht zu hoch gewählt wird, daß die Lötzeit nicht zu kurz ist, und daß an allen Anschlüssen das vorgegebene Temperaturprofil möglichst unabhängig von der Geometrie und den thermischen Eigenschaften erreicht wird. Diese Forderungen können jedoch vor allem für Baugruppen mit hoher Bestückdichte in der Praxis nur sehr schwer umgesetzt werden. Auf die Gründe hierfür und mögliche Lösungsalternativen wird in Kapitel 7 näher eingegangen.

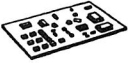



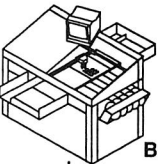
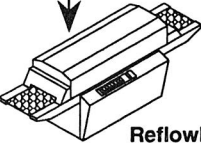
Ursprung des Fehlers	Aufgetretener Fehler	Grund für die Entstehung
<b>Leiterplatte</b> 	Lageveränderung der Bauelemente	Padlayout wurde nicht auf die Lötmethodik abgestimmt
	Tombstone-Effekt	schlechte Lötbarkeit der Pads
	Nichtbenetzen oder Entnetzen	schlechte Lötbarkeit
<b>Lotpaste</b> 	Tombstone-Effekt	ungenügende Trocknung der Lotpaste
	Lotkugelbildung	ungeeignete Lotpaste
	Lotkugelbildung	unzureichende oder übermäßige Trocknung der Paste
 <b>Siebdruck</b>	Tombstone-Effekt	ungleicher Pastenauftrag
	magere Lötstellen	zu geringer Pastenauftrag
	magere Lötstellen	ungleicher Pastenauftrag
<b>Bauelemente</b> 	Unzureichende Lötung	ungenügende Metallisierung der Anschlüsse
	Tombstone-Effekt	unzureichende oder schlechte Lötbarkeit der Anschlüsse
 <b>Bestücken</b>	Dejustierung	ungenauere Bestückung
	Kurzschlüsse bei IC's	ungenauere Bestückung
 <b>Reflowlöten</b>	Tombstone-Effekt	unterschiedl. Aufschmelzpt. der beiden Anschlußflächen
	Lotkugelbildung	zu hohe Aufheizgeschw.
	Hohlraumbildung	zu lange Lötzeit
	keine Lötung	zu niedrige Temperatur

Bild 4.8: Ursache und Entstehungsort von Fehlern nach dem Reflowlöten

## 4.4 Vergleich Reflow- mit Wellenlöten für SMD

Wellenlöten ist das seit Jahren bewährte Lötverfahren. Auch in der SMT konnte sich das Wellenlöten nach Überwindung anfänglicher Prozeßschwächen auf der Lötseite etablieren. Dennoch ist das Schwallöten von SMD mit Einschränkungen verbunden, da nicht alle Gehäusetypen in der Welle gelötet werden können (vgl. Kap. 6.1) bzw. bestimmte Layoutrules zu beachten sind. Dennoch läßt sich kein anderes Verfahren in der Großserienfertigung so effizient einsetzen wie das Wellenlöten [3].

Im Gegensatz zum Wellenlöten wird beim Reflowlöten ein relativ kleines Lotvolumen mit einer relativ große Substratoberfläche konfrontiert. Bei vielen Reflowverfahren ist die Konfrontationsdauer zwischen Lotschmelze und Substrat sowie auch die Erstarrungsphase erheblich länger als beim Wellenlöten.

Als Entscheidungskriterien bei der Wahl zwischen den verschiedenen Reflow - Lötverfahren sind die Lötparameter Temperaturverlauf, Konfrontationszeit und Erstarrungsgeschwindigkeit von ausschlaggebender Bedeutung [90]. Bild 4.6 enthält dazu eine vergleichende Darstellung der typischen Temperaturprofile. In Bild 4.9 sind die wesentlichen Unterschiede zwischen Wellen- und Reflowlöten und die Spitzentemperatur kombiniert mit der Konfrontationsdauer für das jeweilige Lötverfahren dargestellt.

Kriterium	Welle	Reflow (IR bzw. VP)
THD lötbar	ja	nein
SMD lötbar	zum Teil	ja
Packungsdichte	gering	hoch
Spitzentemperatur	235 - 250 Grd. C	210 - 260 Grd. C
Regelgenauigkeit	hoch	sehr hoch
Flußmittelauftrag	vorher	zusammen mit Paste
Konfrontationsdauer	4 - 10 s	20 - 30 s
Erstarrungstemperatur		
Schmelze/Substrat	< 1 s	3 - 10 s

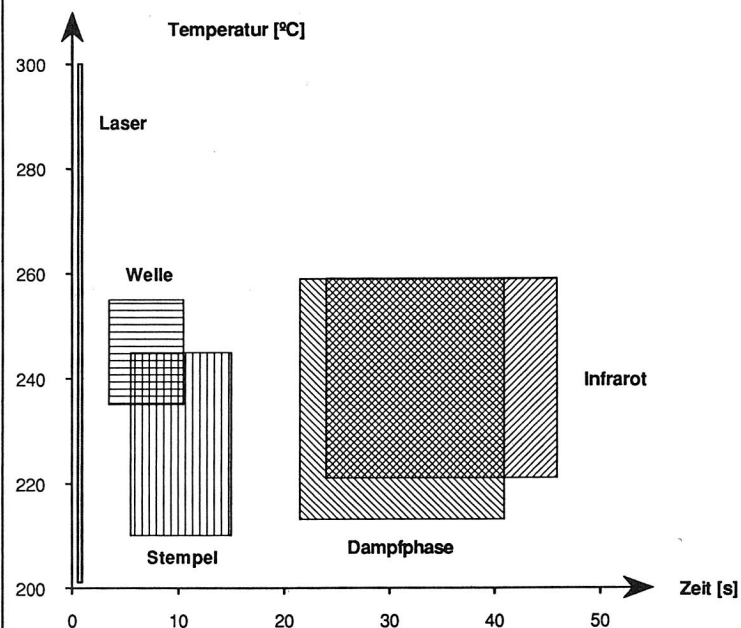


Bild 4.9: Vergleich der Lötverfahren (nach [32])

## **5 Flexibler Lotpastenauftrag für die Oberflächenmontage**

Für das Auftragen der Lotpaste kommen im wesentlichen zwei Verfahren zum Einsatz: der Sieb- bzw. Schablonendruck und das Dispensieren. Bei der industriellen Serienproduktion von Baugruppen wird im allgemeinen das Sieb- bzw. Schablonendruckverfahren eingesetzt und der damit verbundene Nachteil der geringen Flexibilität in Kauf genommen. Bei der Produktion von kleinen Stückzahlen bietet sich das serielle Aufbringen der Lotdepots mit einer Dosier- nadel, das sogenannte Dispensieren an. Entscheidender Vorteil des Dispensens ist die sehr hohe Flexibilität, nachteilig ist die geringere Produktivität. Aus diesem Grunde ist es von sehr großem Interesse, wo die Einsatzgrenzen der Wirtschaftlichkeit und Technologie bei den Lotpastenauftragsverfahren liegen.

### **5.1 Verfahren für den Lotpastenauftrag**

Insbesondere im Hinblick auf die Anforderungen, die durch die Miniaturisierung der Bauelemente an die Technologie des Lotpastenauftrags gestellt werden, müssen die herkömmlichen Verfahren eingehend untersucht und Möglichkeiten für die Zukunft aufgezeigt werden. Bei einem SMD - Montagevorgang für anschließende Reflowlötung werden die beiden Fügepartner Bauelement und Leiterplatte durch die Medien Lot und Flußmittel fixiert.

Der zeitliche und örtliche Auftrag dieser Hilfsstoffe ist dabei nicht zwangsläufig festgelegt. Bild 5.1 zeigt einige Möglichkeiten auf, die realisiert sind, denkbar wären oder gerade entwickelt werden. Auf diese Alternativen wird anschließend näher eingegangen.

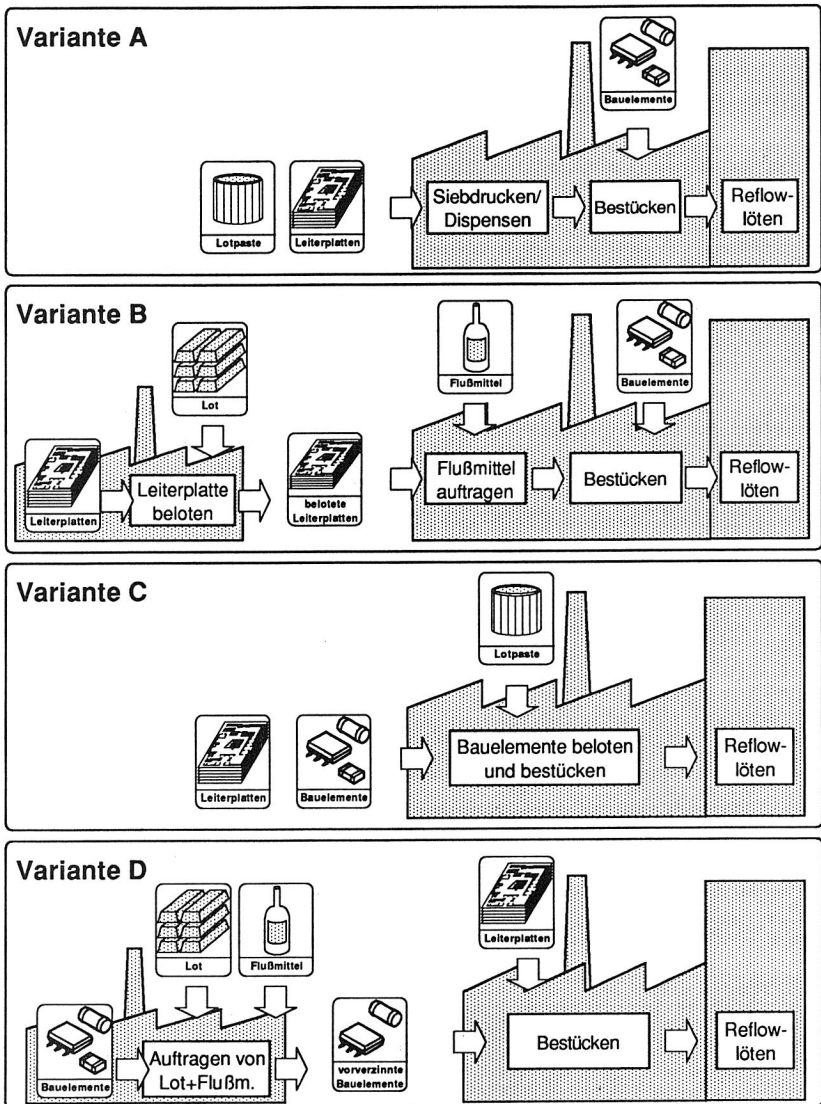


Bild 5.1: Alternative Strukturen für den Lot- und Flußmittelauftrag

### **5.1.1 Technologische Aspekte beim Sieb- und Schablonen-druck**

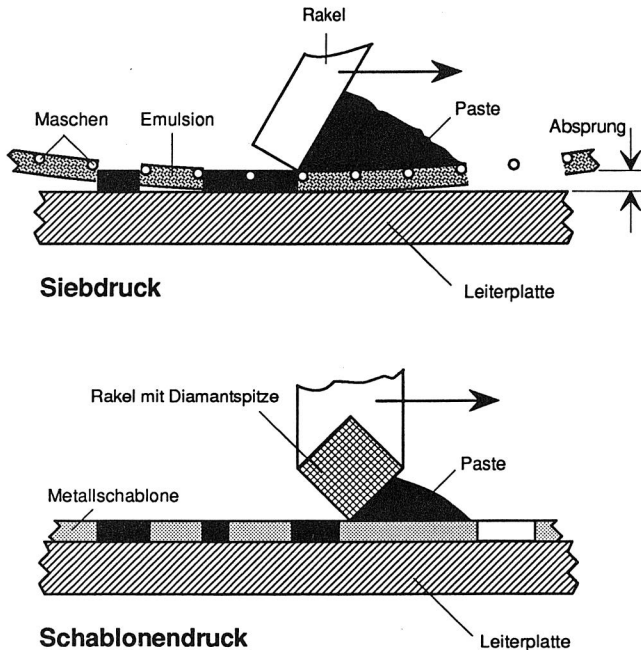
Beim Siebdruck dient ein Sieb aus Stahldraht oder Polyesterfäden, die mit 45° Neigung in einem Metallrahmen eingespannt sind, als Bildträger. Für das Drucken von Lotpaste sind Fadendurchmesser von 100 µm und Maschenweiten von ca. 80 Fäden pro Zoll (= 100 Mesh) gebräuchlich [52]. Das Druckmuster wird durch Belichten einer photoempfindlichen, 150 - 250 µm dicken Emulsionsschicht hergestellt, die auf das Sieb aufgebracht wurde.

Vor dem eigentlichen Druckvorgang fährt ein Flutrakel über das Sieb und verteilt so die vorher manuell aufgebraachte Lotpaste gleichmäßig. Beim Druckvorgang wird das Sieb in einem Abstand von ca. 1 - 1,5 mm, dem sogenannten Absprung, über der Leiterplatte fixiert. Das Gummirakel drückt dabei das Sieb auf die Leiterplattenoberseite und aufgrund des Rakeldrucks wird die Lotpaste durch die freien Stellen des Siebs auf die Pads der Leiterplatte gepreßt (Bild 5.2). Der Druckvorgang liefert sauber begrenzte Lotpastendepots mit gleichmäßiger Dicke [78].

Mit der Einführung der Fine - Pitch - Bauelemente werden die Abstände und Dimensionen der zu bedruckenden Pads immer kleiner. Um trotzdem ausreichend Lotpaste für ein gutes Lötergebnis aufbringen zu können, muß die Paste dicker gedruckt werden, was zu gegenläufigen Ansprüchen beim Siebdruck führt: Einerseits sollte der Drahtdurchmesser möglichst gering sein, um möglichst viel offene Fläche in den Sieböffnungen zu erhalten; andererseits muß eine dickere Emulsionsschicht hergestellt werden, was bei kleinen Drahtdurchmessern bisher nur schwer realisierbar war.

Durch die Einführung eines neuen Emulsionstyps können Siebe mit wesentlich feineren Drähten eingesetzt werden, da diese Emulsion aufgrund ihrer Transparenz beim Belichten größere Lagendicken zuläßt.

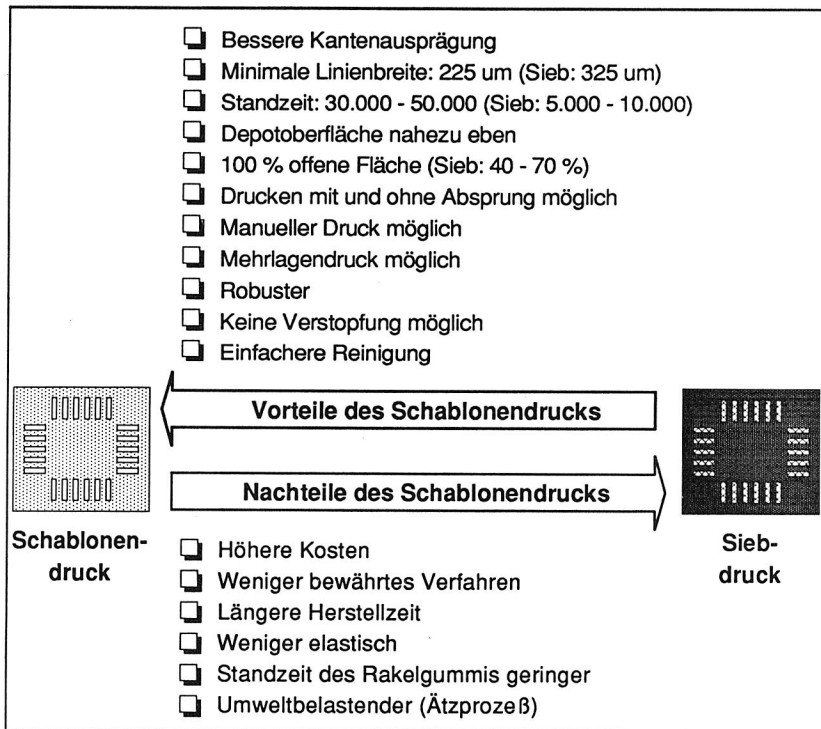
Drahtdurchmesser von 50  $\mu\text{m}$  bei Maschenweiten von 80 Maschen pro Zoll (MpZ) bei Edelstahl bzw. 100 MpZ bei Polyester ergeben eine offene Fläche von 71 % bzw. 64 %. Daraus ergibt sich eine theoretisch druckbare Linienbreite von minimal 150  $\mu\text{m}$ . In der Praxis kann diese Breite wegen der Auflösung der Emulsion und den Werkstoffeigenschaften nicht erreicht werden.



**Bild 5.2:** Prinzipdarstellung von Sieb- und Schablonendruck

Mit einem 300  $\mu\text{m}$  dicken Sieb (Maschen plus Emulsion) können normalerweise nur Linienbreiten von  $> 325 \mu\text{m}$  realisiert werden. Die Faustregel "Siebdicke + 25  $\mu\text{m}$  = minimale Linienbreite" wird von A. Hobby als allgemeingültig angegeben [43]. Die Höhe der gedruckten Pads ergibt sich i.a. zu  $2/3$  der Sieb-  
dicke.

Beim Schablonendruck dient eine Metallschablone, in die das Druckbild eingätzt wurde, als Bildträger. Dadurch kann eine zu 100 % offene Fläche an den zu bedruckenden Stellen erreicht werden. Die Metallschablone wird entweder direkt in einem Metallrahmen fixiert oder man klebt sie zentrisch auf das Sieb eines bespannten Rahmens auf. Durch Einkleben einer am Rand perforierten Metallschablone in einen mit Polyestergerewebe bespannten Siebdruck - Rahmen kann nach Heraustrennen des überflüssigen Innensiebes die Metallschablone wie ein herkömmlicher Siebdruckrahmen verwendet werden [87].



**Bild 5.3:** Vor- und Nachteile des Schablonendrucks gegenüber dem Siebdruck

Zum Druck von Padmustern für Fine - Pitch - IC's (25 mil) werden üblicherweise Metallschablonen verwendet, da sich beim Schablonendruck die minimale Linienbreite aus Schablonendicke plus 25  $\mu\text{m}$  berechnet [42]. D.h. bei einer Schablonendicke von 200  $\mu\text{m}$  beträgt die minimale Linienbreite 225  $\mu\text{m}$  und die Höhe des gedruckten Lotdepots 200  $\mu\text{m}$ . Aufgrund der 100 % - igen Öffnung können hochviskose Lotpasten mit rel. großen Partikeln zum Einsatz kommen.

Beim Ätzen der Schablonen entstehen Unterätzungen, die die Qualität des Druckergebnisses erheblich mindern. Deshalb wurde dazu übergegangen, die Schablonen in einem ersten Ätzzvorgang nur bis zur halben Materialstärke zu bearbeiten. Nach dem Wenden der Schablone wird das Restmaterial in den Aussparungen von der anderen Seite her abgeätzt. Dadurch kann die Unterätzung auf ein Minimum reduziert werden.

Neuere Entwicklungen in der Ätztechnik erlauben die Herstellung von Schablonen mit variabler Dicke. Der Einsatz dieser Schablonen ist besonders dann sinnvoll, wenn die Bauelementtypen auf der Leiterplatte hohe Varianz aufweisen. In Bild 5.3 sind die Vor- und Nachteile der beiden gängigen Parallelverfahren zum Lotpastenauftrag vergleichend dargestellt [52] [45] [87].

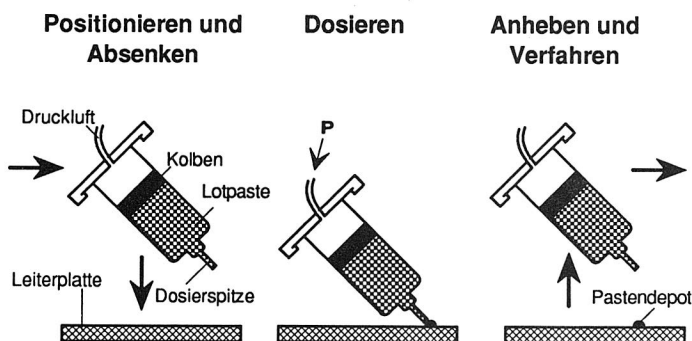
### **5.1.2 Kinematische Alternativen und Einsatzgrenzen für das Dispensen von Lotpaste**

Die Technologie des Dispensens von Lotpaste in der SMT wurde ursprünglich bei der Reparatur von Leiterplatten und bei der Prototypenfertigung eingesetzt. Die Lotpaste wird mit Hilfe eines sogenannten Dispensers sequentiell auf die Anschlußpads der Leiterplatte aufgetragen. Die dispensierte Lotpastenmenge kann entweder mit Nadelventil oder definiertem Druckluftstoß dosiert werden. Der Dispensvorgang für den Druck eines Lotpastendepots ist in Bild 5.4 dargestellt.

Zur exakten Einhaltung der Dosiermenge sind vor allem zwei Parameter zu kontrollieren und zu regeln:

1. Die Temperatur der Paste muß in der Kartusche konstant gehalten werden, da sie sehr stark die Viskosität und damit die Ausbringmenge des Dosiervorganges beeinflusst.
2. Die Ausbringmenge beim Dosieren hängt bei konstanter Dosierzeit sehr stark vom Füllstand der Kartusche ab, da sich die Kompressibilität der hinter dem Kolben in der Kartusche eingeschlossenes Luftmenge mit dem Füllstand ändert. Deshalb ist im Dispenserkopf i.a. ein Füllstandsmeßsystem integriert. Mit dieser Information wird von der Steuerung die Dosierzeit berechnet, um gleichmäßige Dosiermengen zu erhalten.

Die Vorteile des Dispensens gegenüber dem Sieb- und Schablonendruck liegen in der Flexibilität und in der besseren Umweltverträglichkeit, da das Waschen von Sieben bzw. Schablonen entfällt. Die Kosten zur Herstellung des Bildträgers entfallen. Negativ wirkt sich bei großen Padzahlen pro Leiterplatte die lange Dispenszeit aus [49].



**Bild 5.4:** Prinzipdarstellung des Dispensens

Der Einfluß der einzelnen Parameter auf das Dispensergebnis wurde anhand von Versuchen im Labor ermittelt<sup>1</sup>. Folgende Parameter wurden dabei variiert:

- > Dosierzeit (Stufe 11 bis 20; vom Automaten vorgegeben)
- > Dosierdruck (2 bis 4 bar)
- > Lotpastentemperatur (29 bis 33 °C)
- > Düsendurchmesser (0,25 bis 1,38 mm)
- > Lotpastentyp (3 Pasten)

Die Untersuchungen brachten folgende Ergebnisse: Um möglichst viele Dosierzeiten nutzen zu können, d.h. möglichst viele unterschiedliche Dotgrößen dispensen zu können, empfiehlt sich der Einsatz von Pasten mit niedriger Viskosität. Die optimale Einstellung der Parameter hängt sehr stark von der geforderten Masse der Dots ab. Grundsätzlich positiv wirken sich ein hoher Druck (4 bar) und eine hohe Temperatur (32 °C) aus.

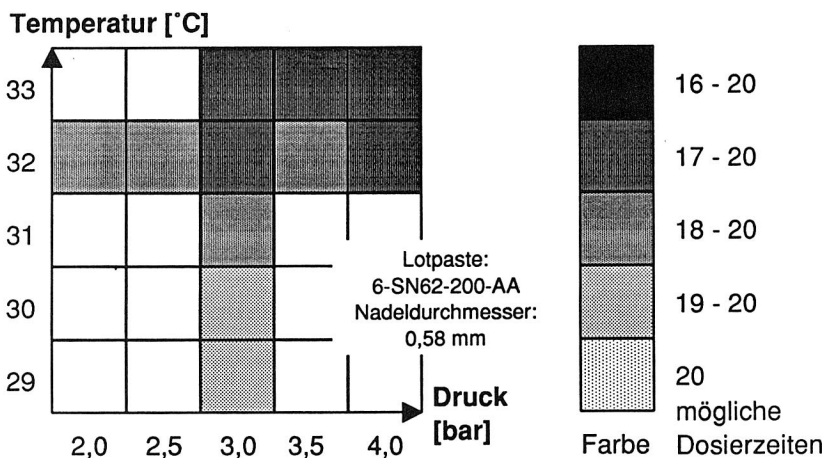


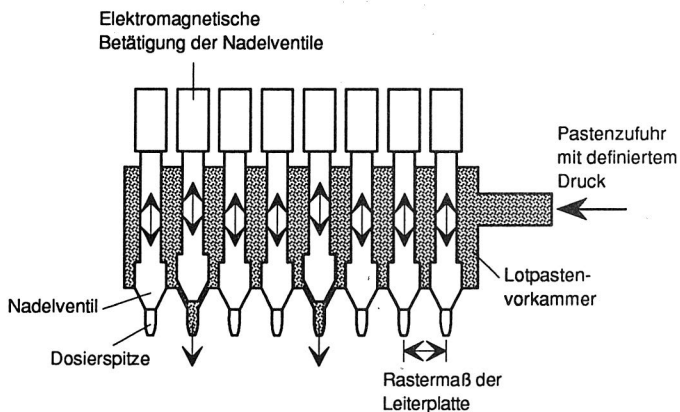
Bild 5.5: Bandbreitendiagramm

<sup>1</sup> Bei der Durchführung der Versuche wurde der Autor von cand. Ing. H. Arnold unterstützt.

Die größte Bandbreite mit 5 verwendbaren Dosierzeiten und Dots mit einer minimalen Masse von 8 mg wird mit einem Nadelinnendurchmesser von 0,58 mm dispenst. Bild 5.5 zeigt dazu ein Bandbreitendiagramm. In den getönten Bereichen wurden reproduzierbare Dots mit den angegebenen Parametern erreicht.

Der Grundgedanke des Mehrfachdispensers ist die wesentliche Erhöhung der Auftragsleistung durch gleichzeitiges paralleles Dispensen mehrerer Lotpasten-depots unter Beibehaltung der Vorteile des Einfachdispensers, wie Flexibilität, freie Programmierbarkeit und geringer Umrüstaufwand.

An das Leiterplattenlayout sind dabei besondere Anforderungen zu stellen: Sämtliche Pads müssen sich auf den Gitterpunkten eines Rasters befinden, das als Rastermaß den Abstand zweier Dosierspitzen hat. Außerdem sollten die Bauelemente so angeordnet sein, daß sich möglichst viele Pads in einer Linie liegen, die quer zur Bewegungsrichtung des Dispenserkopfes verläuft, so daß möglichst viele Pads gleichzeitig dispenst werden können (Bild 5.6).



**Bild 5.6:** Prinzipieller Aufbau eines Mehrfachdispensers

### 5.1.3 Alternative Lotpasten - Auftragsverfahren

Da die bisher aufgezeigten Verfahren kaum Möglichkeiten für die Verbindung von IC - Bauelementen mit einem Anschlußraster kleiner 0,4 mm mit der Leiterplatte durch ein Reflowverfahren bieten, wird ständig nach neuen Möglichkeiten gesucht, dieser Herausforderung seitens der Bauelemente gerecht zu werden.

#### a) Tauchbelotung von Leiterplatten

Das Tauchbelotungsverfahren OPTIPAD beruht auf dem Prinzip, metallurgisch homogenes Lot und Flußmittel zeitlich getrennt auf die Pads aufzutragen (vgl. Bild 5.1). Das Verfahren wurde von Dr. D. Friedrich entwickelt und im Frühjahr 1990 mehrfach der Öffentlichkeit vorgestellt [22] [23] [24]. Mit Hilfe dieses Verfahrens lassen sich Lotdepots mit annähernd rechtwinkligen Querschnitten aus metallurgisch homogenem Lot auf den Pads der Leiterplatte realisieren. Das Auftragen erfolgt als zusätzlicher Prozeßschritt beim Leiterplattenhersteller, so daß der Prozeßschritt "Lotpastenauftrag" unmittelbar vor dem Bestücken entfallen kann. Der chronologische Aufbau der Lotdepots wird in Bild 5.7 verdeutlicht.

Vorteile dieses Verfahrens:

- + Höhere Bestücksicherheit durch ebene Bestückfläche
- + Ausgleich der Höhendifferenz der Anschlüsse bei vielpoligen IC's, da das Depot beim Aufschmelzen ballig und damit höher wird.
- + Vereinfachung der Prozeßfolge beim Bestücken, weil die Technologie des Lotpastenauftrags entfällt.
- + Flexible Fertigung von kleinen Losgrößen wirtschaftlich möglich, da keine zeitliche Abhängigkeit zwischen Lotapplikation und Bestücken besteht.

Nachteile des Tauchbelotungsverfahrens: Noch nicht im industriellen Einsatz erprobt und kostspielig bei IC's mit kleinem Rastermaß ( $< 0,635\text{ mm}$ ).

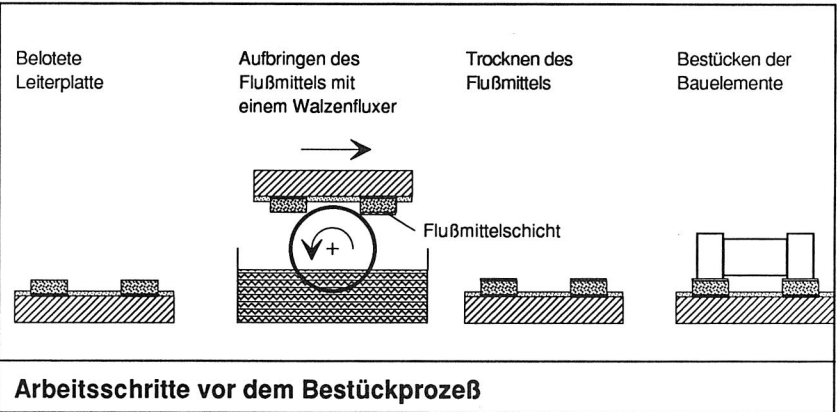
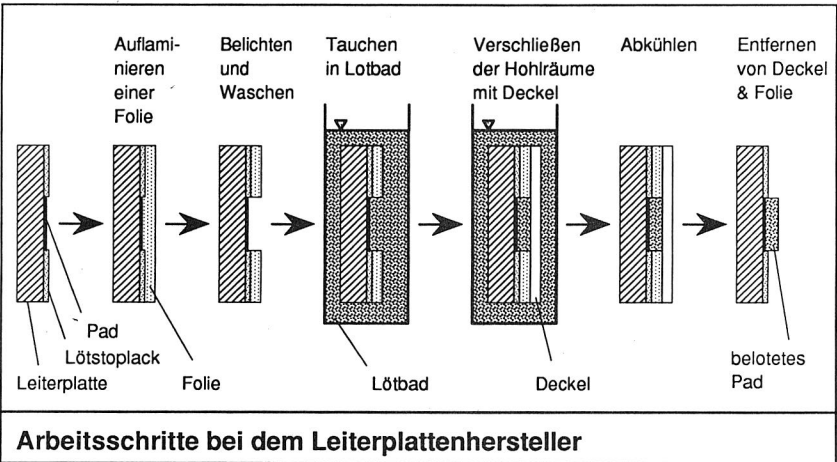


Bild 5.7: Aufbau der Lotdepots beim Tauchbeloten mit Optipad

## b) Tauchbelotung von Bauelementen

Bei dieser Alternative wird Lot und Flußmittel in Form von Lotpaste auf die Anschlüsse der Bauelemente in der Bestückmaschine aufgetragen. Der Greifer des Bestückautomaten entnimmt ein Bauelement aus dem Gurt, verfährt über einen Behälter mit Lotpaste, senkt ab bis die Anschlüsse die Lotpastenoberfläche berühren, hebt wieder an und plziert das Bauteil auf der Leiterplatte.

## c) Vorverzinnung von Bauelementen

Bei diesem Lösungsvorschlag wird metallisch homogenes Lot und Flußmittel in getrennter Form auf die Bauelementeanschlüsse aufgetragen. Dieser Prozeß ist der Herstellung des jeweiligen Bauelementes unmittelbar nachgeschaltet und muß so erfolgen, daß auf den Anschlüssen möglichst ebene, gleichmäßig dicke Schichten entstehen.

### **5.1.5 Zusammenstellung der Belotungsverfahren**

Bild 5.8 zeigt eine Zusammenstellung der erwähnten Verfahren zum Lotpastenauftrag. Von besonderem Interesse sind der augenblickliche Realisierungsgrad und die technologischen Grenzen der Verfahren.

Verfahren	Realisierungs-grad	Kennzeichen	min. Raster	Anwendungs-bereich
Siebdruck manuell	Industrieller Einsatz	Geringe Inv.-kosten, Hohe Mengenleistung Gute Genauigkeit	0,65 mm	Serienfert. Mittlere Lose Mittlere Genauigk.
Siebdruck halb-automatisch	Industrieller Einsatz	Hohe Inv.-kosten,, Hohe Mengenleistung Hohe Genauigkeit	0,42 mm	Serienfert. Mittlere Lose Mittlere Genauigk.
Siebdruck automatisch	Industrieller Einsatz	Sehr hohe Inv.-kosten, Sehr hohe Leistung, Hohe Genauigkeit	0,42 mm	Massenfert. Evtl inline Große Lose
Siebdruck voll-automatisch	Prototyp, noch kein ind. Einsatz	Sehr hohe Inv.-kosten, Alle Losgrößen, Hohe Flexibilität	0,42 mm	Serienfert. Flexible Fert. mind. 3 Linien
Dispensen halb-automatisch	Industrieller Einsatz	Geringe Leistung, Sehr hohe Flexib. Gute Genauigkeit	0,75 mm	Serienfert. Hochflex. Fert.
Doppel-Dispenser automatisch	Industrieller Einsatz	Hohe Inv.-kosten Mittlere Leistung Hohe Flexibilität	0,75 mm	Serienfert. Hochflex. Fert. Evtl. Inline
Dispenser inline automatisch	Industrieller Einsatz	Hohe Inv.-kosten geringe Leistung sehr hohe Flexib.	0,75 mm	Inline-Betrieb Evtl. f. Unterseite Hochflex. Fert.
Dispenser inline mit Nadelventil	Fertig entwickelt, noch kein ind. Einsatz	Hohe Inv.-kosten Mittlere Leistung Sehr flexibel	0,65 mm	Inline-Betrieb Evtl. f. Unterseite Hochflex. Fert.
Mehrfachdispenser mit Nadelventilen	Prinzipieller Lösungsvorschlag	Hohe Inv.-kosten Hohe Leistung Pads im Raster	Keine Aussagen möglich	Inline-Betrieb Hochflex. Fert.
Tauchbelotung von Leiterplatten	Prototyp, noch kein ind. Einsatz	Hochwertige Lötverb. Sehr hohe Genauigk. Bei Großserien teuer	Vorauss. 0,2 - 0,3 mm	Kleine Rastermaße Hohe Qualität Flex. Fert.
Tauchbelotung von Bauelementen	Im Labormaßstab realisiert	Geringe Inv.-kosten Hohe Flexibilität Geringere Leistung	Keine Aussagen möglich	Musterserien Flex. Fertigung
Vorbelotung von Bauelementen	Prinzipieller Lösungsvorschlag	Hochwertige Lötverb. Sehr hohe Flexib. Teuere Bauelemente	Vorauss. 0,2 - 0,3 mm	Für alle Fert.-typen geeignet

**Bild 5.8:** Zusammenstellung der Belotungsverfahren

## 5.2 Automatisierungsmöglichkeiten bei den Lotpastenauftragsverfahren

### 5.2.1 Ansätze zur Automatisierung bei Sieb- bzw. Schablonendruck

Da Siebdruckmaschinen sowohl zum Sieb- als auch zum Schablonendruck eingesetzt werden können, werden im Folgenden nur noch Siebdruckmaschinen erwähnt. Diese Maschinen sind - je nach Anforderung - in den unterschiedlichsten Automatisierungsstufen auf dem Markt verfügbar. Bild 5.9 zeigt eine Siebdruckmaschine mit den möglichen automatisierbaren Funktionen.

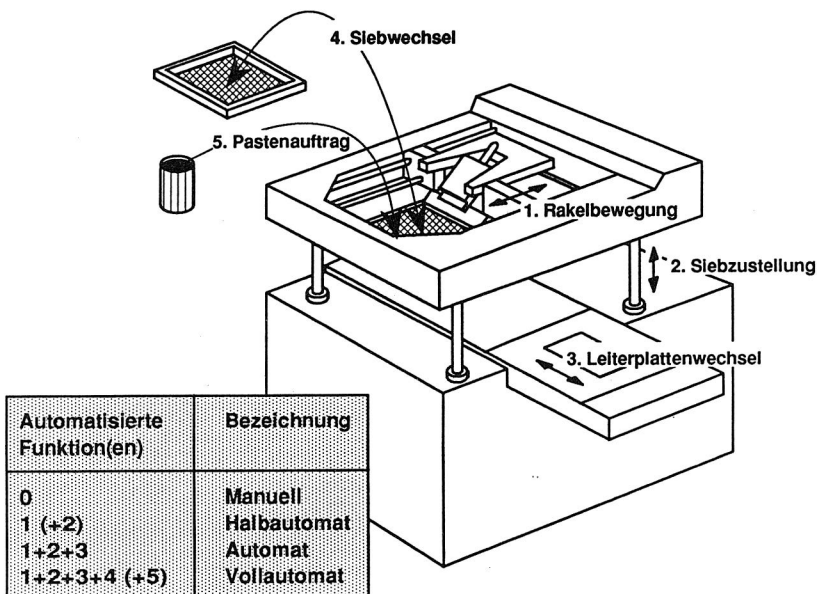


Bild 5.9: Kinematische Funktionen einer Siebdruckmaschine

a) **Manueller Siebdrucker**

Für den Laborbetrieb und die Musterfertigung sind im allgemeinen Tischiebdrucker ausreichend. Rakelbewegung, Siebpositionierung, Leiterplattenwechsel, Siebwechsel, Pastenauftrag und Justierung erfolgen hierbei rein manuell. Diese Vorrichtungen haben aber auch durchaus ihre Berechtigung in der Großserienfertigung, wenn für jeden Leiterplattentyp ein fest gerüsteter Tischiebdrucker im Lager vorhanden ist: d.h. das aufwendige Umrüsten und Justieren kann dabei entfallen.

b) **Halbautomatische Siebdruckmaschine**

Bei der Fertigung von Leiterplatten in kleinen bis mittleren Losgrößen werden vorwiegend halbautomatische Siebdrucker eingesetzt. Halbautomatisch bedeutet die Automatisierung von Rakelbewegung und Siebpositionierung. Die Siebdruckmaschine bildet dabei ein von den Bestückautomaten materialflußtechnisch entkoppeltes Arbeitssystem, da die Produktionsleistung um Faktor 2 bis 15 höher ist als bei den SMD - Linien. Die Leiterplatten werden meist losweise in Kassetten angeliefert und von dem Bediener nach dem Siebdruck in Magazine eingelegt, die an den Bestückautomaten zu rüsten sind.

c) **Automatische Siebdruckmaschinen**

Automatische Siebdruckmaschinen sind für die Großserien- und Massenfertigung von SMD - Baugruppen bestimmt, da der Leiterplattentransport vom Magazin in die Druckposition von einem maschineninternen Transportsystem übernommen wird. Die Justierung von Leiterplatte zu Sieb erfolgt über Indexierstifte oder optische Positioniersysteme. Üblicherweise arbeiten diese Maschinen nach dem Stock to Stock Prinzip, d.h. von Magazin in Magazin. Zur Versorgung von Chipshootern sind auch Inline - Lösungen wirtschaftlich realisierbar. Größte Hindernisse bei der Integration des Siebdruckprozesses in die flexible SMD - Fertigung sind der hohe Umrüstaufwand der Maschinen (ca. 30 Minuten) und die zeitlich begrenzte Lagerfähigkeit der gedruckten Lotpaste.

#### d) Vollautomatische Siebdruckmaschinen

Wesentliche Verbesserung wurde durch die Entwicklung von automatischen Siebdruckmaschinen erreicht, bei denen sowohl das Drucksieb als auch die Rakeleinheit und die Leiterplattenaufnahme vollautomatisch gewechselt werden können [67]. Auch das Auftragen der Lotpaste erfolgt automatisch durch eine Dosiereinrichtung.

Der Umrüstvorgang kann durch einen übergeordneten Leitreechner oder ein Barcode - Erkennungssystem ausgelöst werden. Dabei ist für jeden Leiterplattentyp nur eine einmalige Justage der Siebposition notwendig. Anschließend wird das Sieb, ebenso wie eine eventuell notwendige andere Rakeleinheit oder Leiterplattenaufnahme, beliebig oft innerhalb von 2 Minuten ausgewechselt.

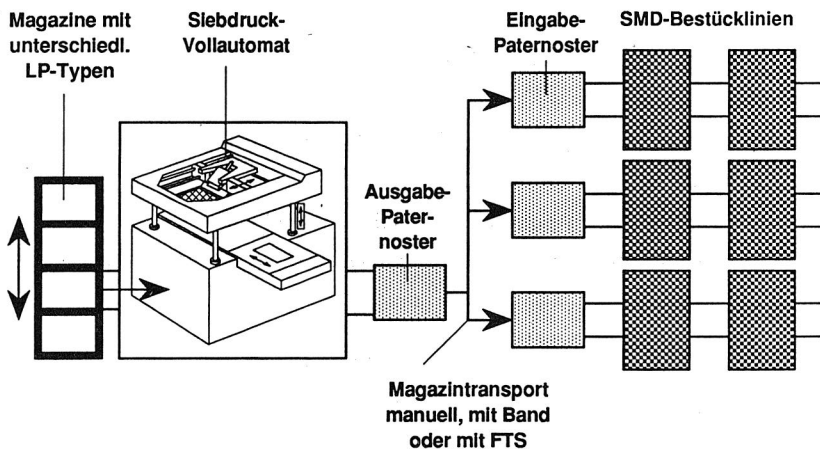
Aus der automatische Umrüstung resultieren folgende Vorteile:

- + Personalarme Fertigung, da fast keine manuellen Tätigkeiten.
- + Wirtschaftliche Fertigung auch bei kleinsten Losgrößen, bis hin zu LG 1.
- + Mögliche Versorgung von mehreren SMD - Bestücklinien.
- + Höhere Produktionsleistung, da das zeitaufwendige Umrüsten entfällt.

Aus wirtschaftlichen Gründen erscheint es sinnvoll, mehrere Bestücklinien mit einem Siebdrucker zu versorgen, was jedoch mit den herkömmlichen Halb- oder Vollautomaten schwer zu verwirklichen ist, da einerseits möglichst selten umgerüstet, andererseits aber die bedruckten Leiterplatten aus technologischen Gründen nur wenige Stunden gelagert werden sollten. Einen Ausweg aus diesem Widerspruch bietet ein vollautomatisches Gerät, das Leiterplatten in Chargengrößen von 20 - 30 Stück bearbeitet (Bild 5.10). Die unbedruckten Leiterplattentypen werden in Magazinen an dem Automaten bereitgestellt und manuell oder durch ein Handhabungsgerät positioniert. Die bedruckten Platinen legt man nach dem Druck in Magazinen mit einer Kapazität von 20 - 30 Leiterplatten ab.

Aufgrund der hohen Flexibilität des Siebdruckers kann ein Magazin als Fertigungslos angesehen werden, das erst bei Bedarf durch die SMD - Bestücklinien mit Paste bedruckt wird. Die Losgröße ergibt sich dabei als Kompromiß aus folgenden Faktoren:

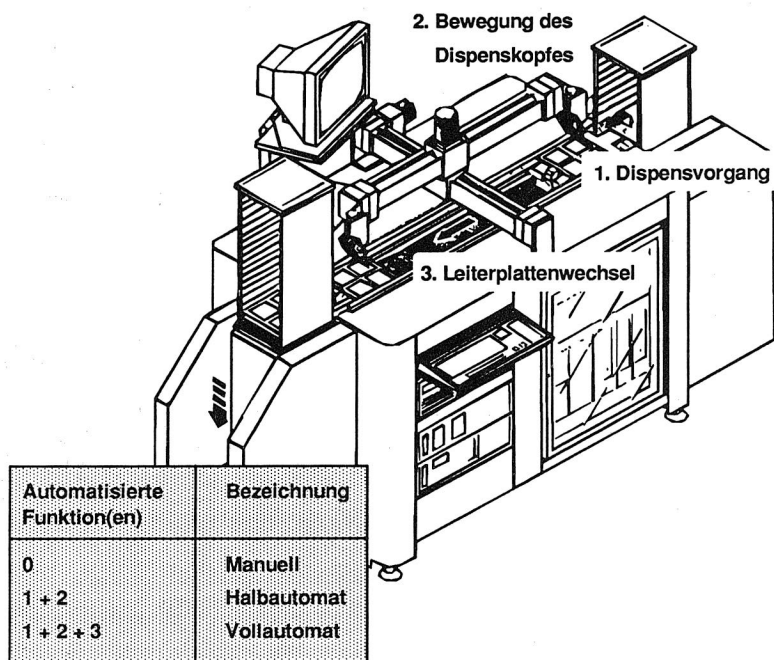
- > Zeitliche Vorteile beim Umrüsten schlagen sich erst bei Losgrößen < 20 nieder.
- > Die Bestückzeit beträgt für 30 Leiterplatten selten mehr als 3 h, damit ist gute Lotpastenqualität gesichert.
- > 20 - 30 Leiterplatten bilden eine optimale Transporteinheit.



**Bild 5.10:** Integration eines vollautomatischen Siebdruckers in eine Baugruppenfertigung

## 5.2.2 Lösungsmöglichkeiten für das automatisierte Dispensen

Im Gegensatz zum Siebdruck zeichnet sich das Dispensen von Lotpaste durch äußerst hohe Flexibilität aus, da keine leiterplattenspezifischen Werkzeuge (z.B. Sieb, Metallschablone) erforderlich sind. Die Lotpastendepots werden statt dessen sequentiell von einem frei programmierbaren Dispenserkopf auf die Leiterplatten aufgebracht (vgl. Bild 5.11). Die Dispensleistung liegt bei ca. 10.000 Dots pro Dispenserkopf und Stunde, was eine relativ lange Dispensdauer für eine Leiterplatte zur Folge hat.

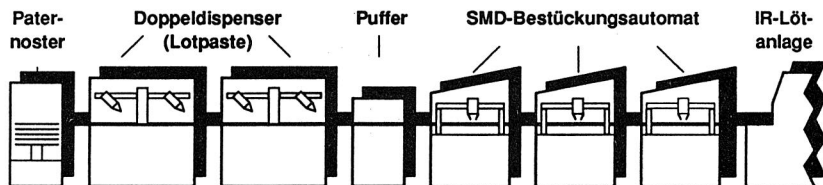


**Bild 5.11:** Kinematische Funktionen eines Dispensers

Deshalb wird diese Dispenstechnik in der industriellen Produktion bisher nur selten eingesetzt. Aus wirtschaftlicher Sicht lohnt sich der Einsatz bei hochflexibler Fertigung mit geringen Gesamtstückzahlen ( $< 500 - 1000$ ) und kleinen Losgrößen ( $< 10 - 20$ ).

Dispenser werden deshalb entweder direkt in eine Bestücklinie integriert oder extern betrieben. Durch die hohe Flexibilität der Dispenssysteme ist der Inline - Einsatz auch bei SMD - Linien mit häufig wechselnden Leiterplattentypen möglich. Der Materialfluß kann so erheblich vereinfacht werden bei Kostenreduzierung und Minimierung der Verwechslungsgefahr. Das Problem der begrenzten Lagerfähigkeit von applizierter Lotpaste entfällt, da der Bestückvorgang dem Lotpastenauftrag unmittelbar nachgeschaltet ist.

Wird von einer mittleren Padzahl pro Bauelement von 6 ausgegangen [27], so ergibt sich eine Leistung von 1.600 BE / h für einen Dispenserkopf. Dies bedeutet, daß zwei Doppeldispenser eine Bestücklinie mit drei SMD - Automaten mittlerer Leistungsklasse versorgen können. In Bild 5.12 ist eine mögliche Linienkonfiguration aufgezeichnet. Die Doppeldispenser verfügen über zwei simultan arbeitende Dispenserköpfe.

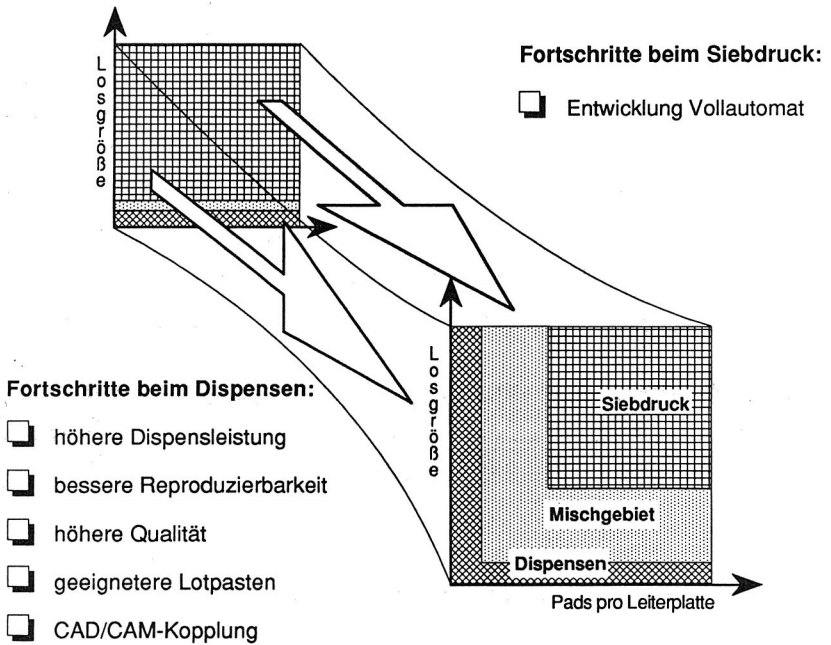


**Bild 5.12:** Hochflexible Linienkonfiguration mit Dispensern

Der Zeitaufwand für das Umrüsten und für die Programmerstellung liegt für einen Dispenser in ähnlichen Größenordnungen wie bei SMD - Bestückungsautomaten, da Dispenser die gleiche Kinematik aufweisen. Die Möglichkeit einer CAD / CAM - Kopplung ist ebenso wie bei Bestückern gegeben.

## 5.4 Das Programm "PASTE" zur Wirtschaftlichkeitsuntersuchung für die Lotpastenauftragsverfahren

In der Dispensetechnik wurden in den letzten Jahren erhebliche Fortschritte erzielt. Insbesondere die Dispensleistung, die Reproduzierbarkeit, die Qualität und die Lotpastentechnologie konnten erhöht werden. Dadurch gewinnt das Dispensieren als Alternative zum Siebdruck durchaus an Gewicht, vor allem auch im Hinblick auf den Trend zu kleineren Losgrößen und die Möglichkeit für mittelständische Unternehmen, Bestückautomaten für SMD einzusetzen.



**Bild 5.13:** Motivation für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung beim Lotpastenauftrag

Andererseits wurden auch in der Siebdrucktechnik einige interessante Neuentwicklungen (z.B. Vollautomat) auf den Markt gebracht (Bild 5.13). Für Neueinsteiger und Anwender stellt sich das Problem, in welche Technologie investiert werden soll bzw. ob die eingesetzte Technologie wirtschaftlich günstig im Vergleich zu möglichen Alternativen liegt.

Aus diesen Überlegungen heraus wurde das Programm "PASTE"<sup>2</sup> entwickelt mit dem unterschiedliche Lotpastenauftragsverfahren unter wirtschaftlichen Aspekten verglichen werden können. Außerdem besteht die Möglichkeit, für ein vorgegebenes Leiterplattenspektrum die wirtschaftlich günstigste Kombination von Maschinen zu bestimmen. Das Programm kann an jedem PC installiert werden. Möglichkeiten und Ergebnisse dieser rechnergestützten Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen werden in den folgenden Kapiteln beschrieben.

### **5.4.1 Wirtschaftliche Basisdaten**

Als Grundlage für einen aussagekräftigen Vergleich der Lotpastenauftragsverfahren dienen wirtschaftliche Kenngrößen der wichtigsten Techniken wie in Bild 5.14 wiedergegeben. In diese Liste wurden die gängigen Methoden für den Lotpastenauftrag mit den möglichen Automatisierungsstufen aufgenommen. Außerdem sind mit dem vollautomatischen Siebdrucker und Nadelventil - Inline - Dispenser zwei Neuentwicklungen enthalten, die bereits auf dem Markt sind bzw. demnächst auf den Markt kommen.

Der Dispenser Duo - Automat verfügt über einen Doppelkopf und dosiert somit simultan auf zwei Leiterplatten. Die Leiterplatten werden über Eingabe- und Ausgabepaternoster magaziniert.

---

<sup>2</sup> Bei der Erstellung des Programms wurde der Verfasser von Herrn cand. Ing. S. Bachschuster unterstützt.

Die fixen Maschinenkosten pro Monat berechnen sich aus der Abschreibung, den kalkulatorischen Zinskosten, den Raumkosten, den Energiekosten und den Instandhaltungskosten. Außerdem aufgelistet ist die Rüstzeit an der Maschine für ein neues Fertigungslos und der Anteil an der manuellen Arbeit am Rüstvorgang sowie die durchschnittliche Leiterplattenwechselzeit mit manuellem Anteil. Die Dispenszeit pro Pad ist eine wichtige Größe zur Lösung der Problemstellung ob Dispensen eine Alternative zum Siebdruck darstellt.

1. Verfahrensnummer	1	2	3	4	5	6	7	8
2. Verfahrensprinzip (D/S)	S	S	S	S	D	D	D	D
3. Umrüsten vorgesehen (J/N)	J	J	J	J	J	J	J	J
4. Maschinenbezeichnung	Sieb Manu- ell	Sieb Halb- aut.	Sieb Auto- mat	Sieb Voll- auto.	Disp. Halb- auto.	Disp. Duo- auto	Disp. inline	Disp. inline Nadel
5. Fixe Maschinenkosten [DM/Monat]	330	3.800	6.400	11.400	1.670	3.500	4.500	4.800
6. Fixe Kosten für LP-Typ [DM/Typ]	500	500	500	700	200	200	200	200
7. Arbeitslohn an der Maschine [DM/h]	50	50	60	60	40	40	50	50
8. Rüstzeit der Maschine [min]	30	30	50	4	5	10	5	5
9. Anteil manueller Arbeit am Rüstvorgang [0 ... 1]	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
10. LP-Wechselzeit [s]	15	15	3	4	12	10	5	5
11. Anteil manueller Arbeit am LP-Wechselvorgang [0 ... 1]	1.0	1.0	0.1	0.1	1.0	0.1	0.1	0.1
12. Druckzeit pro LP [s] bzw. Disp.-zeit pro Pad [s]	15	15	3	4	0.4	0.2	0.4	0.2
13. Anteil man. Arbeit am Drucken bzw. Disp. [0 ... 1]	1.0	1.0	0	0	0.0	0	0	0
14. Lotpastenkosten [DM/Pad]	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0006	0.0006	0.0006	0.0003

**Bild 5.14:** Wirtschaftliche Kenngrößen

Diese Grunddaten sind als Maschinendatensätze in "PASTE" hinterlegt. Einzelne Maschinenparameter sind ohne Aufwand zu modifizieren, so daß durch Parametervariation interessante "Spielvarianten" durchlaufen werden können.

## 5.4.2 Programmstruktur und Menüführung von "PASTE"

Die Berechnung der Typkosten, die bei der Belotung von Leiterplatten eines bestimmten Typs ohne Berücksichtigung der fixen Kosten für die Maschine pro Monat entstehen, und des Kapazitätsbedarfs aus den Daten der entsprechenden Maschine und des Leiterplattentyps läuft programmtechnisch in folgenden Schritten ab:

### 1. Schritt: Berechnung der Hauptzeit

Die Hauptzeit ist die Zeit, die pro Leiterplatte für den eigentlichen Lotpastenauftrag benötigt wird. Für die beiden unterschiedlichen Verfahren gilt:

Siebdruck: Hauptzeit = Druckzeit  
Dispensen: Hauptzeit = Padzahl x Dispenszeit pro Pad

### 2. Schritt: Berechnung des Kapazitätsbedarfs

Der Kapazitätsbedarf, das heißt, die Zeit in Stunden, die pro Monat für die Belotung eines bestimmten Leiterplattentyps auf einer bestimmten Maschine benötigt wird, berechnet sich durch folgende Formel:

$$\text{Kapazitätsbedarf} = \frac{\text{Bedarf pro Monat}}{\text{Losgröße}} \times \text{Rüstzeit} + \text{Bedarf pro Monat} \times (\text{Leiterplattenwechselzeit} + \text{Hauptzeit})$$

### 3. Schritt: Berechnung der fixen Typkosten pro Monat

Die fixen Typkosten des Leiterplattentyps fallen für jeden Typ einmalig an. Da in PASTE die Kosten für den Zeitraum eines Monats berechnet werden, müssen die fixen Typkosten, die für den Gesamtbedarf an Leiterplatten eines Typs anfallen, auf den Bedarf pro Monat umgelegt werden. Bei den Dispens-

verfahren entstehen die fixen Typkosten nur durch das Dispensprogramm, das für jeden Leiterplattentyp einmal erstellt werden muß. Deshalb gilt:

$$\text{Fixe Typkosten pro Monat} = \text{Fixe Typkosten} \times \frac{\text{Bedarf pro Monat}}{\text{Gesamtbeford}}$$

Die fixen Typkosten entstehen bei den Siebdruckverfahren hauptsächlich durch die Herstellung oder Beschaffung des Siebes bzw. der Metallschablone. Ist der Bedarf an Leiterplatten eines bestimmten Typs so hoch, daß eine Maschine für die Belotung nicht mehr ausreicht, so sind eventuell noch mehr Maschinen und damit auch Siebe notwendig. Die fixen Typkosten fallen deshalb mehrmals an. Es gilt:

$$\text{Fixe Typkosten pro Monat} = \text{Fixe Typkosten} \times \text{Zahl der Maschinen} \times \frac{\text{Bedarf pro Monat}}{\text{Gesamtbeford}}$$

Die Zahl der Maschinen ist der Quotient aus Kapazitätsbedarf und Kapazität pro Monat aufgerundet auf die nächste ganze Zahl.

#### 4. Schritt: Berechnung der Typkosten

Die Typkosten sind die variablen Kosten in DM pro Monat, die bei der Belotung eines bestimmten Leiterplattentyps auf einer bestimmten Maschine entstehen. Sie werden folgendermaßen bestimmt:

$$\begin{aligned} \text{Typkosten} = & \text{Fixe Typkosten pro Monat} + \\ & + \frac{\text{Bedarf pro Monat}}{\text{Losgröße}} + \text{Arbeitslohn} \times \text{BZA\_Rüst} \times \text{Rüstzeit} + \\ & + \text{Bedarf pro Monat} \times \text{Arbeitslohn} \times \text{BZA\_LPWechsel} \times \text{LP-Wechselzeit} + \\ & + \text{Bedarf pro Monat} \times \text{Arbeitslohn} \times \text{BZA\_Hauptzeit} \times \text{Hauptzeit} + \\ & + \text{Bedarf pro Monat} \times \text{Padzahl} \times \text{Lotpastenkosten pro Pad} \end{aligned}$$

Die Kosten für die Belotung eines Leiterplattentyps oder des gesamten Leiterplattenspektrums setzen sich zusammen aus den variablen Kosten, das sind die

oben berechneten Typkosten, und dem Anteil an den fixen Kosten, die durch die Beschaffung einer oder mehrerer Maschinen (z.B. durch Abschreibung, Raumkosten) pro Monat entstehen. Die fixen Kosten werden in PASTE auf zwei verschiedene Arten berücksichtigt.

Im Menü 'Überblick über die Wirtschaftlichkeit der einzelnen Verfahren' wird von einer 100%-igen Maschinenauslastung ausgegangen. Deshalb ist der Anteil der fixen Kosten, die für den Leiterplattentyp anfallen, an den gesamten fixen Kosten für die Maschine genauso groß wie der Anteil der Fertigungszeit für den Leiterplattentyp an der gesamten zur Verfügung stehenden Fertigungszeit:

$$\text{Anteil des LP-Typs an den fixen Kosten} = \text{fixe Kosten pro Monat} \times \frac{\text{Kapazitätsbedarf}}{\text{Fertigungszeit pro Monat}}$$

Die Gesamtkosten für die Belotung des Leiterplattentyps sind dann die Summe aus dem Anteil des Leiterplattentyps an den fixen Kosten und den Typkosten:

$$\text{Gesamtkosten für LP-Typ} = \text{Anteil des LP-Typs an den fixen Kosten} + \text{Typkosten}$$

In den Menüpunkten 'Auswahl einer optimalen Verfahrenskombination' und 'Berechnung der Kosten für eine vorgegebene Verfahrenskombination' werden die fixen Kosten anders berücksichtigt, da dort der Kapazitätsbedarf der einzelnen Leiterplattentypen bekannt ist.

Es wird dabei davon ausgegangen, daß die fixen Kosten pro Monat sofort anfallen, wenn eine Maschine für die Fertigung angeschafft wird und zwar unabhängig davon, wie stark sie ausgelastet ist. Es können dabei aber verschiedene Leiterplattentypen auf einer Maschine gefertigt werden, solange noch freie Kapazität in Fertigungsstunden pro Monat vorhanden ist. Die Gesamtkosten für die Belotung des vorgegebenen Leiterplattenspektrums sind dann die Summe der fixen Kosten für alle notwendigen Maschinen und der Typkosten aller Leiterplatten:

$$\begin{aligned} \text{Gesamtkosten für LP-Spektrum} &= \text{Fixe Kosten Maschine1} + \text{Fixe Kosten Maschine2} + \dots \\ &+ \text{Typkosten LP-Typ1} + \text{Typkosten LP-Typ2} + \dots \end{aligned}$$

Die Menüführung des Programms ist aus Bild 5.15 ersichtlich.

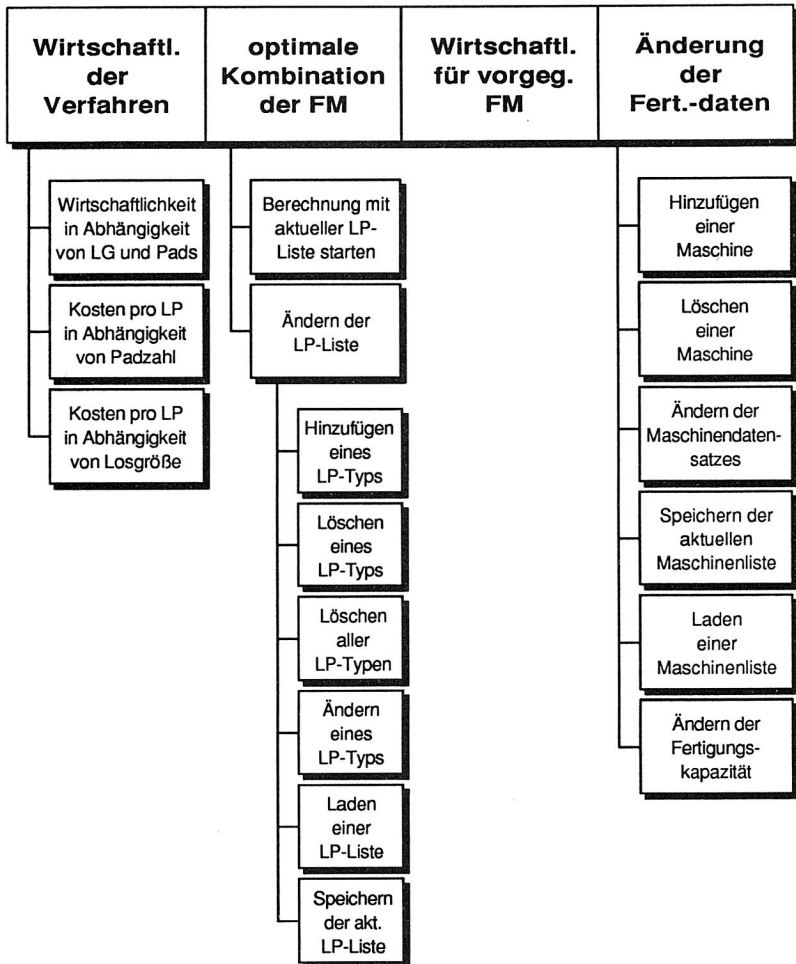


Bild 5.15: Menüführung durch das Programm "Paste"

Das Hauptmenü bietet folgende Alternativen:

1. "Überblick über die Wirtschaftlichkeit der einzelnen Verfahren"

Damit kann das wirtschaftlich günstigste Lotpastenauftragsverfahren für einen Leiterplattentyp ermittelt werden bzw. die günstigen Bereiche der unterschiedlichen Techniken in Abhängigkeit von Padzahl (Abszisse) und Losgröße (Ordinate) für Leiterplatten mit vorgegebener Gesamtstückzahl und zu produzierender Stückzahl pro Monat ersehen werden.

2. "Auswahl einer optimalen Verfahrenskombination"

Für ein vorgegebenes zu fertigendes Baugruppenspektrum kann die wirtschaftlich optimale Kombination von Fertigungsmitteln zum Lotpastenauftrag berechnet werden. Der Vergleich dieser Kosten mit dem Ergebnis von

3. "Berechnung der Kosten für eine vorgegebene Verfahrenskombination"

ist für Unternehmen sehr interessant um den Stellenwert der Wirtschaftlichkeit der momentanen Fertigungsmittelkonstellation beim Lotpastenauftrag einschätzen zu können.

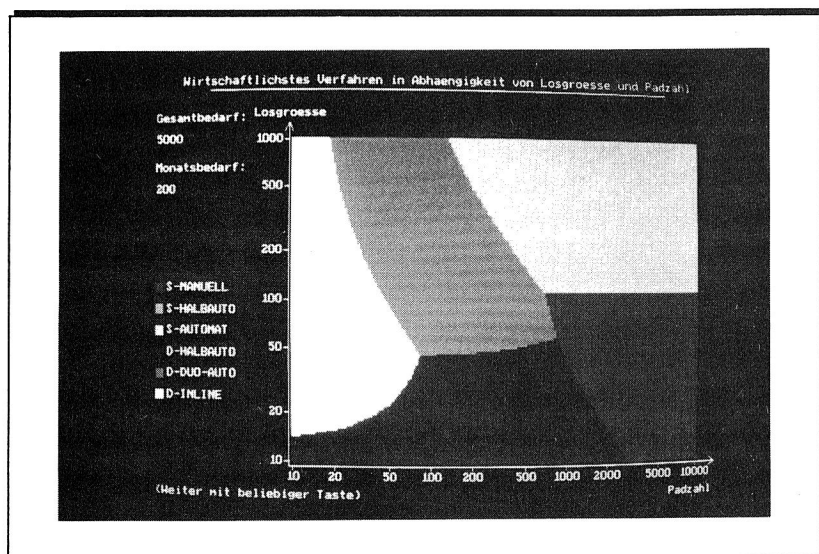
4. "Ändern der Fertigungsdaten"

Hier kann die abgelegte Maschinenliste modifiziert werden. Außerdem besteht die Möglichkeit, die Fertigungskapazität (Arbeitsstunden pro Jahr) beim Lotpastenauftrag vorzugeben.

### 5.4.3 Überblick über die Einsatzbereiche der Verfahren

Ausschlaggebend für die Wahl zwischen Dispensen und Siebdruck sind die Anzahl der Pads pro Leiterplatte, da die Bearbeitungszeit beim Dispensen entscheidend von dieser Größe abhängt, sowie die Losgröße, weil die Umrüstzeit beim Siebdruck bei kleinen Losgrößen maßgeblich in die Bearbeitungszeit eingeht (Bild 5.16). [20]

Für eine Leiterplatte, die nur 2 Pads aufweist und die mit Losgröße 1 gefertigt werden soll, ist deshalb sicher das Dispensieren wirtschaftlicher. Bei einer Platine mit 1000 Anschlüssen und Losgröße 10.000 ist der Siebdruck vorzuziehen.

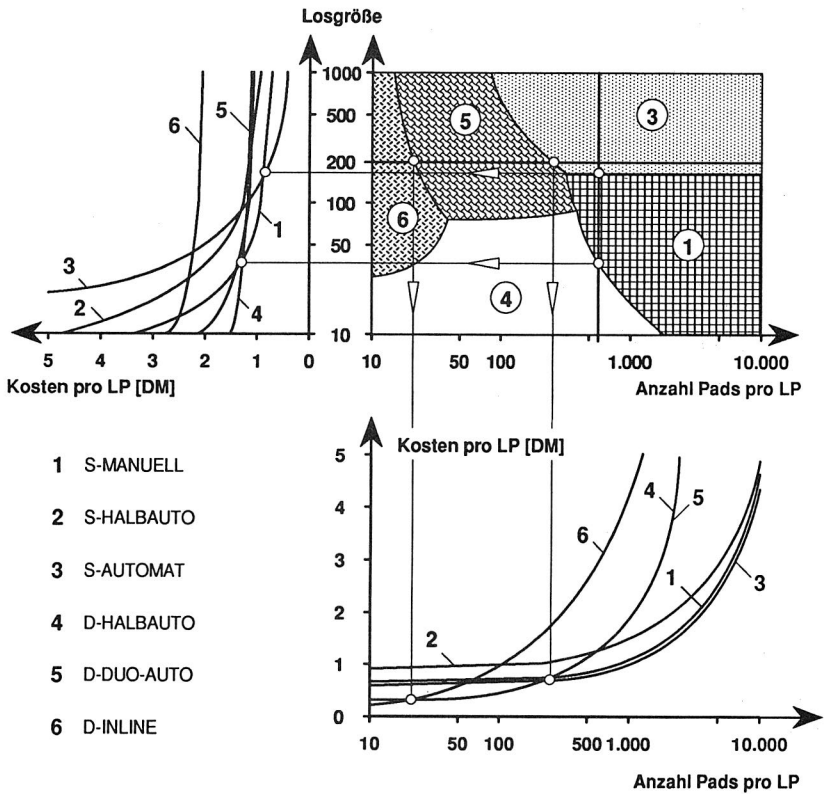


**Bild 5.16:** Beispielhafte Maske auf dem Bildschirm

Für den Anwender ist der Verlauf der Grenze zwischen Siebdruck und Dispensieren in Abhängigkeit von Losgröße und Padzahl interessant. Darüberhinaus sind die Bereiche für die jeweiligen Maschinentypen von Bedeutung im Hinblick auf eine grobe Abschätzungen zur Wirtschaftlichkeit.

Die Hauptgrafik von Bild 5.17 gibt eine Übersicht, welches Verfahren in Abhängigkeit von den Parametern Padzahl und Losgröße am wirtschaftlichsten ist, d.h. am wenigsten Kosten pro Leiterplatte für den Lotpastenauftrag verursacht. Beide Koordinatenachsen besitzen logarithmische Teilung, um eine große Parameterbandbreite übersichtlich darzustellen.

Die Grafik wurde an den gekennzeichneten Stellen geschnitten (600 Pads bzw. Losgröße 200), und die Kosten für das Beloten einer Leiterplatte durch die unterschiedlichen Verfahren in den beiden Nebengrafiken dargestellt. Auffällig ist die große Steigung der Siebdruckkurven bei kleinen Losgrößen. Dies lässt sich durch die langen Umrüstzeiten erklären.



**Bild 5.17:** Vergleich der Verfahren zum Pastenauftrag

In der industriellen Fertigung von SMD - Leiterplatten tritt ein breites Spektrum unterschiedlicher Gesamtstückzahlen, monatlicher Stückzahlen und Losgrößen auf. Deshalb sollen drei typische Fertigungssituationen miteinander verglichen werden:

- > Kleinstserienfertigung (50 LP / Typ, 5 LP / Monat, 1 - schichtig)
- > Serienfertigung (5.000 LP / Typ, 200 LP / Monat, 2 - schichtig)
- > Massenfertigung (500.000 LP / Typ, 20.000 LP / Monat, 3 - schichtig)

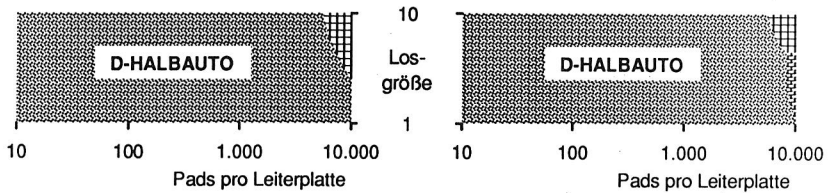
Bild 5.18 enthält in der linken Spalte eine Grafik für jede dieser Fertigungssituationen. Bei der Erstellung der Grafiken auf der rechten Seite wurden die beiden Neuentwicklungen "Siebdruckvollautomat" und "Inline - Dispenser mit Nadelventil" berücksichtigt.

Für die Kleinstserienfertigung zeigt sich eine deutliche Dominanz der Dispenserverfahren, was in den hohen Siebkosten pro Leiterplatte und im hohen Umrüstaufwand bei kleinen Losgrößen begründet ist.

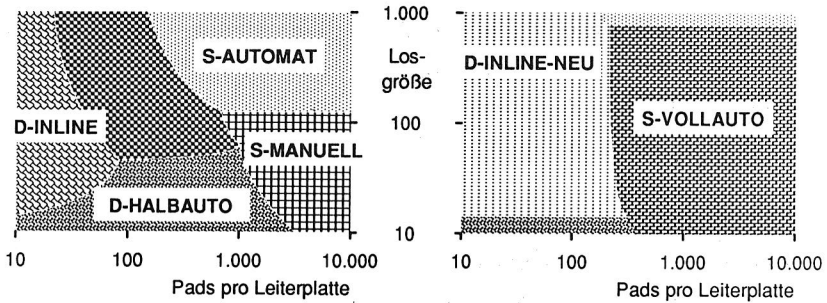
In der Serienfertigung decken die Siebdruckverfahren durch die größeren Losgrößen (Umrüstaufwand pro Leiterplatte wird geringer) und die höheren Gesamtstückzahlen (Siebkosten pro LP werden geringer) größere Flächen ab. Aufgrund der höheren Fertigungsdauer bei der Serienfertigung im Zweischichtbetrieb, gewinnen auch Maschinen an Bedeutung, bei denen mehr Funktionen automatisiert sind und die damit weniger manuelle Arbeit, jedoch auch höheren Investitionsaufwand erfordern.

In der Massenfertigung dominieren aus wirtschaftlicher Sicht die Siebdruckverfahren. Durch die Fertigung im Dreischichtbetrieb sowie die hohen Stückzahlen und Losgrößen, treten die oben genannten Vorteile des Siebdruckens noch deutlicher in den Vordergrund.

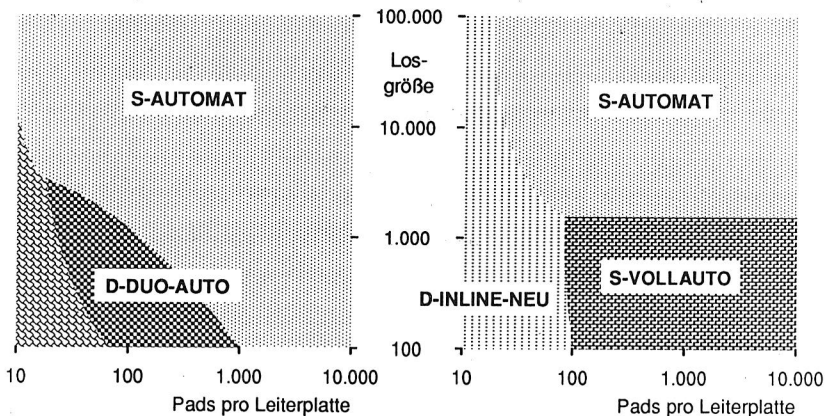
### Kleinstserienfertigung



### Serienfertigung



### Massenfertigung



**Bild 5.18:** Lotpastenauftragsverfahren für unterschiedliche Fertigungstypen

Entscheidender Vorteil des Siebdruckvollautomaten gegenüber herkömmlichen Siebdruckmaschinen ist der weitgehend automatisierte Umrüstvorgang, der in einem Bruchteil der bislang erforderlichen Zeit abläuft. Dadurch verdrängt dieser Automat auf den Grafiken (rechte Spalte) die bisher eingesetzten Siebdruckverfahren. Durch die kurze Umrüstzeit kann der Siebdruckvollautomat auch in der flexibler Fertigung mit kleinen Losen, die bisher für das Dispensen prädestiniert waren, wirtschaftlich eingesetzt werden. Voraussetzung ist allerdings eine gute Auslastung des Automaten [19].

Vorteile des Dispenserkopfes mit Nadelventil gegenüber den bisherigen Dispensern sind die geringeren Lotpastenkosten und die kürzere Dispenszeit pro Pad (vgl. Bild 5.13). Dadurch werden weite Bereiche in den Grafiken von Inline - Maschinen mit Nadelventildispensern abgedeckt.

Bei Einsatz der neuen Verfahren können die Kosten für die Belotung von Leiterplatten reduziert werden. Außerdem wird höhere Flexibilität geboten, da die wirtschaftliche Fertigung von großen Losgrößen- und Padzahlbereichen möglich ist. Aus diesem Grunde werden diese beiden Verfahren sicherlich Marktanteile gewinnen.

#### **5.4.4 Auswahl einer optimalen Verfahrenskombination**

Der zweite Punkt des Hauptmenüs bietet die Möglichkeit zur Berechnung der kostengünstigsten Maschinenkombination für ein vorgegebenes Leiterplattenpektrum. Hierzu kann eine Leiterplattenliste eingegeben, abgespeichert oder modifiziert werden. Für jeden Typ müssen Gesamtstückzahl, Anzahl pro Monat, Losgröße und Padzahl hinterlegt werden.

Entscheidend bei der Berechnung ist der zugrundegelegte Algorithmus: Das Ergebnis ist keine Auflistung der für jeden Typ ermittelten Maschinen, wie vom Hauptmenüpunkt 1 geliefert wird, da hier von voller Auslastung der

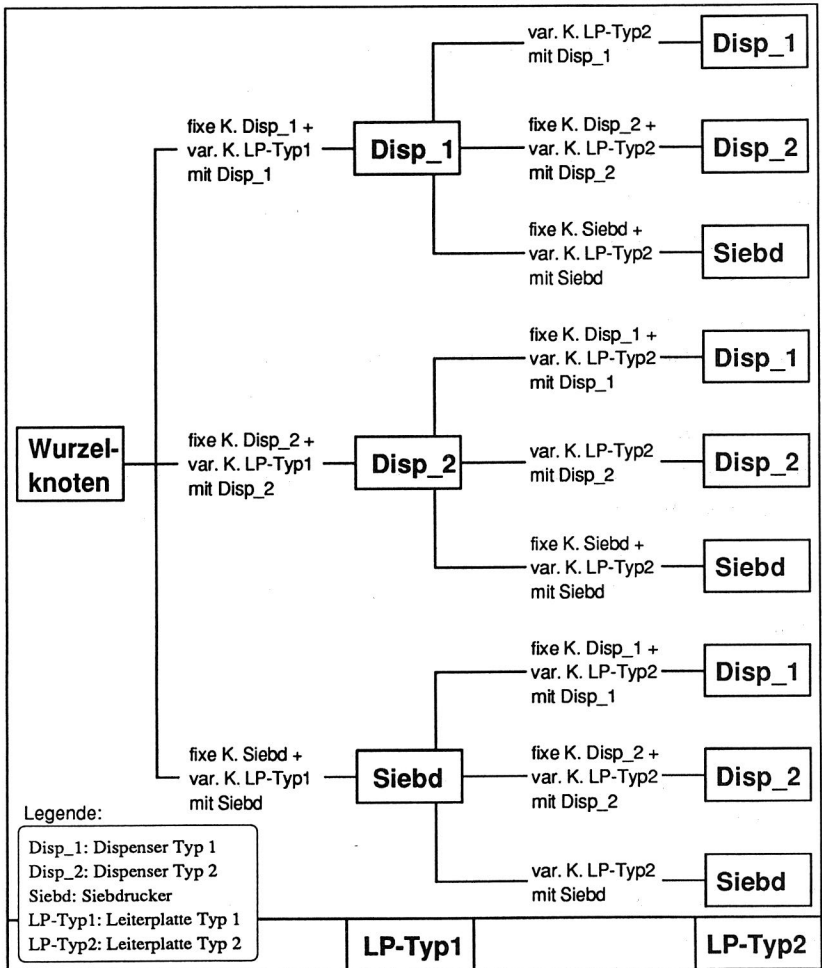
Fertigungsmittel zum Lotpastenauftrag ausgegangen wird, vielmehr wird die durch den jeweiligen Leiterplattentyp bewirkte Auslastung der Maschinen berücksichtigt. Dadurch kann nach dem Durchlaufen aller möglichen Kombinationen von Betriebsmitteln und Leiterplattentypen die kostengünstigste Kombination angegeben werden.

Bei der Berechnung der optimalen Verfahrenskombination werden eine gewisse Anzahl von Leiterplattentypen und für jeden Typ mögliche Belotungsmaschinen vorgegeben. Aufgrund der Berechnung soll ermittelt werden, welche Leiterplatte mit welcher Maschine belotet werden muß, damit die insgesamt entstehenden Kosten minimal sind. Die Berechnung erweist sich als relativ aufwendig, da die bei der Belotung eines Leiterplattentyps entstehenden Kosten davon abhängen, mit welchen Maschinen die anderen Typen belotet werden. Bei den erforderlichen Rechenoperationen kann nicht voneinander unabhängig die jeweils günstigste Maschine ausgewählt werden, sondern es müssen immer alle Leiterplatten- und Maschinentypen als Gesamtheit betrachtet werden.

Das Problem wird anhand einer Baumstruktur abstrahiert und gelöst. Bild 5.19 zeigt beispielhaft einen Baum mit zwei Leiterplattentypen, die jeweils mit drei verschiedenen Maschinen gefertigt werden können.

Der Baum beginnt beim Wurzelknoten, der keinen Leiterplattentyp enthält, und verzweigt sich von dort aus in drei Äste für den LP - Typ 1, da dieser mit drei verschiedenen Maschinen belotet werden kann. Die Kosten für die Belotung von LP - Typ 1 stehen im Bild neben den Astlinien. Sie setzen sich zusammen aus den fixen Kosten, die bei der Beschaffung der jeweiligen Maschine entstehen, und den variablen Kosten für die Belotung auf der jeweiligen Maschine.

Auch LP - Typ 2 kann auf den drei Maschinen gefertigt werden, die auch für LP - Typ 1 möglich sind. Von jedem Knoten des LP - Typ 1 gehen deshalb drei Äste aus. Die Kosten sind wiederum neben den Astlinien eingetragen.



**Bild 5.19:** Abstraktion des Problems der optimalen Verfahrenskombination in Form einer Baumstruktur

Dabei gibt es zwei Möglichkeiten: Wird LP - Typ 2 mit einer Maschine belotet, mit der auch schon ein weiter unten im Baum aufgeführter LP - Typ belotet

wird und ist auf dieser Maschine noch genügend Kapazität frei, so entstehen nur die variablen Kosten. Ist dies nicht der Fall, so fallen zusätzlich zu den variablen Kosten auch noch die fixen Kosten für die Maschine an.

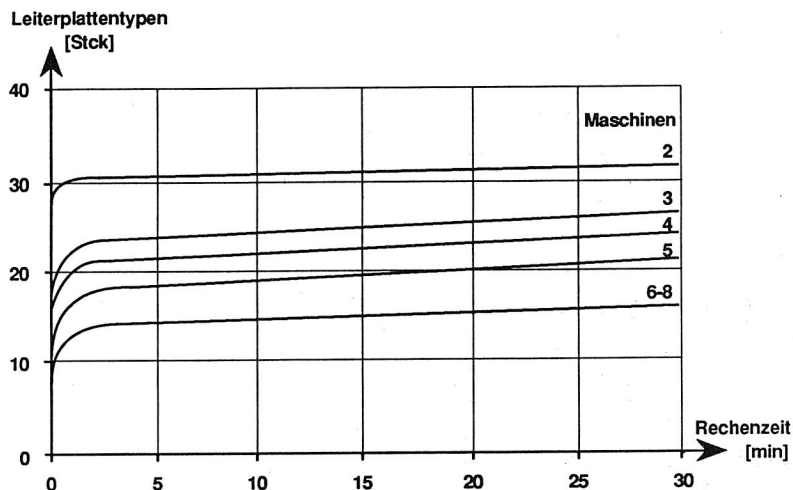
Nach diesem Prinzip wird aus allen Leiterplattentypen und Maschinen ein Baum zusammengestellt, wobei jeder Blattknoten des Baumes eine bestimmte Fertigungsmöglichkeit oder Verfahrenskombination für das gesamte Leiterplattenspektrum repräsentiert. Die Kosten für eine Verfahrenskombination ist die Summe aller Kosten an den Astlinien auf dem Weg zum Blattknoten. Zu bestimmen ist der Knoten, für den diese Summe minimal ist.

Um den Knoten mit den geringsten Kosten zu finden, könnten die Kosten für alle möglichen Kombinationen berechnet und der günstigste bestimmt werden. Dieses Vorgehen erweist sich als wenig sinnvoll, da selbst bei relativ wenigen Leiterplattentypen eine riesige Anzahl von Blattknoten entsteht (z.B. hat ein Baum für 15 LP - Typen mit jeweils 5 möglichen Maschinen ca. 30 Milliarden Blattknoten). Dies führt zu nicht akzeptablen Rechenzeiten.

Eine Möglichkeit, die Suche nach dem günstigsten Blattknoten zu beschleunigen, bietet der "Branch and Bound Algorithmus" [61]. Die kürzere Rechenzeit beruht darauf, daß nicht für alle Blattknoten des Baumes die Kosten exakt berechnet werden müssen.

Innerhalb des Baumes existiert für jeden Knoten eine Kostenfunktion, die die minimalen Kosten für einen Pfad vom Wurzelknoten durch den Knoten zu den Blattknoten des Teilbaumes angibt, der dem Knoten untergeordnet ist. Da diese Kostenfunktion normalerweise jedoch nicht bekannt ist, muß sie durch eine geeignete Schätzfunktion angenähert werden. Ist für einen Knoten die Abschätzung der minimalen Kosten höher als die bereits gefundenen minimalen Kosten für den Weg durch einen anderen Teilbaum, der dem Knoten ebenfalls untergeordnet ist, so braucht der komplette Teilbaum nicht mehr durchlaufen zu werden.

Bild 5.20 verdeutlicht den Zusammenhang von Rechenzeit, Anzahl der Leiterplattentypen und Anzahl der Maschinentypen nach Einbeziehung des "Branch and Bound Algorithmus" in die Berechnung der kostengünstigsten Verfahrenskombination.



**Bild 5.20:** Zusammenhang von Rechenzeit, Leiterplattentypen und Maschinentypen

Als Beispiel für die Auswahl einer optimalen Verfahrenskombination zum Beloten von Leiterplatten soll eine kleine aber flexible Baugruppenfertigung dienen. Bestückt wird auf zwei SMD - Linien mit Pick- and Place - Maschinen für IC's und Chipshootern für passive Bauelemente.

Bei einer mittleren Padzahl von 6 Pads / BE und einer durchschnittlichen Umrüstzeit von 30 min. sind die beiden Linien im Zweischichtbetrieb voll ausgelastet. Das Leiterplattenspektrum beinhaltet Aufträge vom Labor- bis zum Mittelserienbereich. Das Programm "PASTE" empfiehlt zur Belotung einen manuellen Siebdrucker und einen Dispenserhalbautomaten (Bild 5.21).

LP-Nr.	Gesamtbedarf	Bedarf pro Monat	Losgröße	Padzahl	günstigstes Verfahren für Typ alleine	Verfahren
1	5	5	5	1.500	D-HALBAUTO	D-HALBAUTO
2	10	10	10	800	D-HALBAUTO	D-HALBAUTO
3	30	2	5	1.550	D-HALBAUTO	D-HALBAUTO
4	50	5	10	550	D-HALBAUTO	D-HALBAUTO
5	100	10	10	1.100	D-HALBAUTO	D-HALBAUTO
6	200	15	15	980	D-HALBAUTO	D-HALBAUTO
7	300	20	10	1300	D-HALBAUTO	D-HALBAUTO
8	300	20	10	960	D-HALBAUTO	D-HALBAUTO
9	500	25	10	880	D-HALBAUTO	D-HALBAUTO
10	500	25	10	240	D-HALBAUTO	D-HALBAUTO
11	600	30	15	720	D-HALBAUTO	D-HALBAUTO
12	800	50	25	500	D-HALBAUTO	D-HALBAUTO
13	1.200	80	20	2.000	S-MANUELL	S-MANUELL
14	2.000	100	20	750	D-HALBAUTO	D-HALBAUTO
15	2.000	100	20	1.150	D-HALBAUTO	D-HALBAUTO
16	4.000	200	25	1.500	S-MANUELL	D-HALBAUTO
17	5.000	250	25	1.200	D-HALBAUTO	D-HALBAUTO
18	5.000	250	25	1.450	S-MANUELL	D-HALBAUTO
19	8.000	500	50	2.500	S-MANUELL	S-MANUELL
20	10.000	500	50	1.400	S-MANUELL	S-MANUELL
21	12.000	800	80	1.800	S-MANUELL	S-MANUELL
22	12.000	800	80	1.450	S-MANUELL	S-MANUELL
23	15.000	1.000	200	600	S-AUTOMAT	D-HALBAUTO
24	20.000	1.000	100	1.220	S-MANUELL	S-MANUELL
25	25.000	1.200	100	1.360	S-MANUELL	S-MANUELL
26	30.000	1.500	150	1.000	S-AUTOMAT	S-MANUELL
27	40.000	2.000	200	1.150	S-AUTOMAT	S-MANUELL
28	40.000	2.000	200	1.50	D-DUO-AUTO	D-HALBAUTO
29	50.000	2.000	100	1.600	S-MANUELL	S-MANUELL
30	50.000	2.500	250	1.200	S-AUTOMAT	S-MANUELL
<b>Maschinenbedarf:</b>						
S-MANUELL: 1 Maschine; 106 h/Monat freie Kapazität für andere LP-Typen						
D-HALBAUTO: 1 Maschine; 5 h/Monat freie Kapazität für andere LP-Typen						
Gesamtkostenkosten pro Monat (fixe und variable): 20.319 DM						

**Bild 5.21: Ermittelte Maschinenkombination**

Auf dem manuellen Siebdrucker werden zum einen die Leiterplattentypen mit großer Stückzahl und Lösgröße gefertigt, und zum anderen Typen mit großer Padzahl, für die der parallele Siebdruckprozeß gegenüber Dispensern im Vorteil ist.

Die ausgewählte Kombination hat folgende Vorteile:

- + Die Investitionssumme liegt mit ca. DM 80.000.- relativ gering, so daß das Risiko nicht allzu hoch ist.
- + Die Kombination bietet ein hohes Maß an Flexibilität.

Wenn davon ausgegangen wird, daß im Augenblick mit einem halbautomatischen Siebdrucker belotet wird, ergeben sich durch den Einsatz des Dispensers in Verbindung mit dem manuellen Siebdrucker folgende Vorteile:

- + Bei Einsatz eines manuellen Siebdruckers in Verbindung mit einem halbautomatischen Dispenser kann um 20 % günstiger als bei Verwendung eines halbautomatischen Siebdruckers produziert werden (Einsparung von 5 TDM pro Monat bzw. 60 TDM pro Jahr!).
- + Bei Einsatz eines Siebdruckhalbautomaten verbleiben 57 h freie Kapazität pro Monat; die andere Alternative bietet 111 h pro Monat frei Kapazität für andere Typen und beinhaltet dadurch wesentlich mehr Kapazitätsreserve.

Das Ergebnis belegt die Wichtigkeit der durchgeführten Berechnung, da sich entgegen der allgemeinen Erwartung herausgestellt hat, daß das Dispensieren für Klein- bis Mittelserien deutliche Kostenvorteile gegenüber dem Siebdruck haben kann.

## 6 Datenbankgestützte Auswahl von Lötanlagen

Wie in Kapitel 2 aufgezeigt, kann es nicht zu einer vollständigen Substitution der bedrahteten Technik durch die Oberflächenmontage kommen. Dies ist einerseits in dem noch relativ geringen SMD - Spektrum und andererseits in den thermischen Problemen der SMT bei der Leistungselektronik begründet. So werden die unterschiedlichen zur Zeit in der Fertigung eingesetzten Löttechnologien weiterhin ihre Daseinsberechtigung haben.

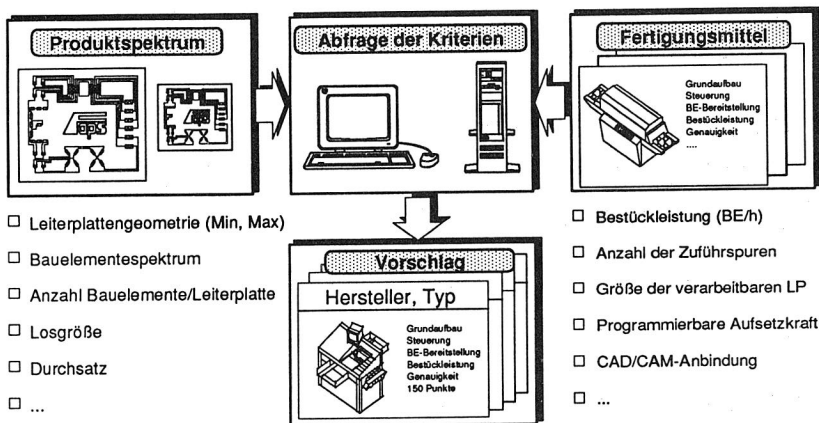
Mit leichten Verschiebungen der prozentualen Anteile einzelner Verfahren ist zu rechnen. So wird z.B. die IR - Technologie auf Kosten des Dampfphasenlötens relative und absolute Steigerungsraten verzeichnen. Das Laserlöten wird den im Augenblick verschwindend geringen Anteil etwas steigern können, wenn der Prozeß besser reproduzierbar und von den Investitionskosten her günstiger wird.

Mindestens 95 % aller Lötstellen auf Elektronikbaugruppen werden mit einem der drei Verfahren Wellen-, Infrarot- oder Dampfphasenlötens realisiert. Aufgrund des großen Marktangebotes und der vielen Anbieter auf dem Markt ist der Einsteiger in die SMT vor das Problem gestellt, für welches Lötverfahren und für welche Anlage er sich konkret entscheiden soll. Um dem Anwender eine gewisse Hilfestellung zu geben, wurde auf der Basis einer Datenbank ein Programmpaket<sup>3</sup> entwickelt, mit dem durch interaktive Abfrage von Randbedingungen geeignete Lötmaschinen (Welle, IR und VP) aus dem Marktspektrum ausgefiltert werden. Ziel dieser rechnergestützten Anlagenauswahl kann und soll nicht die Abnahme der Kaufentscheidung für oder gegen eine bestimmte Lötanlage sein (Bild 6.1).

---

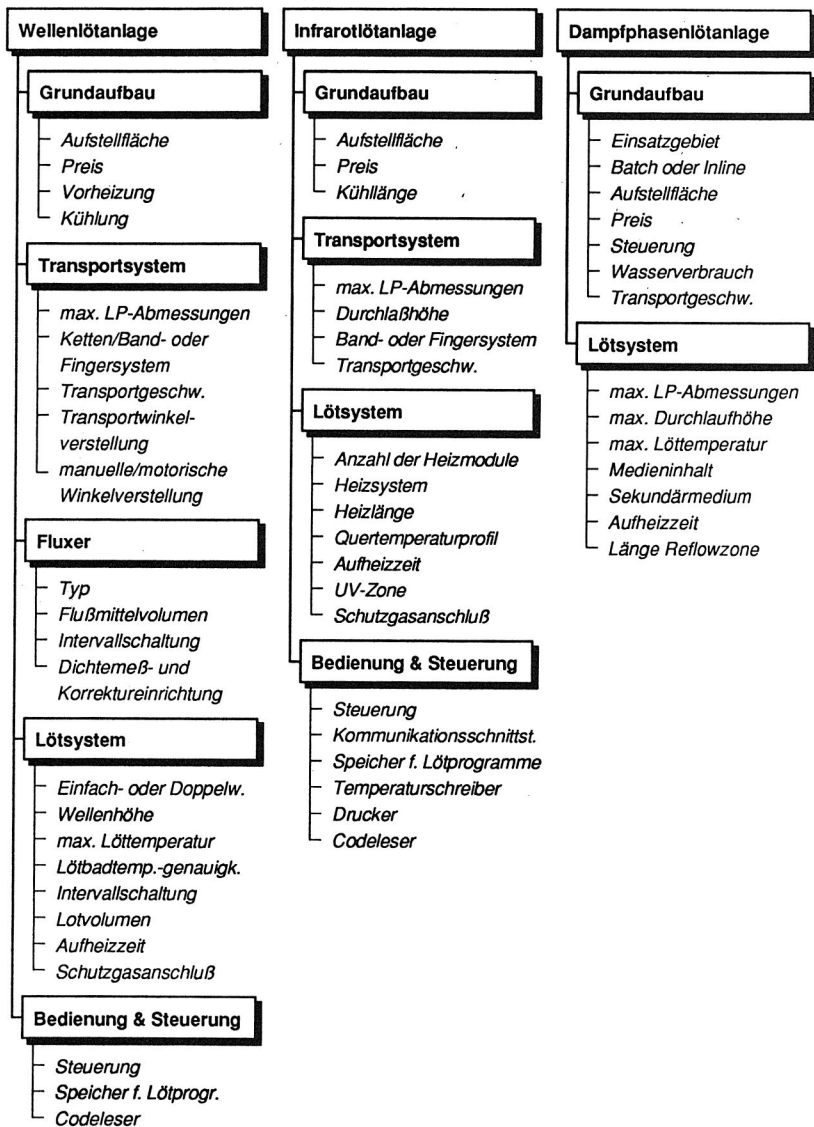
<sup>3</sup> Bei der Erstellung des Programms wurde der Verfasser von Herrn cand. Ing. M. Gerhard unterstützt.

Die Wahl zwischen den Alternativen hängt erfahrungsgemäß zum Teil von Faktoren ab, die sich nicht in eine Datenbankstruktur einbinden lassen, wie z.B. Qualität der Lötung, technische Verfügbarkeit und Wirtschaftlichkeit. Wie sich in einer durchgeführten Marktanalyse zeigte, ist der Aufbau der Anlagen zum Teil sehr unterschiedlich. Da keine einheitlichen Begriffsdefinitionen existieren, sind die einzelnen Daten und Kenngrößen nicht oder nur näherungsweise vergleichbar.



**Bild 6.1:** Datenbankgestützte Auswahl von Fertigungsmitteln zur Elektronikproduktion

Somit ist das Programmpaket als ein Hilfsmittel bei der Vorselektion zu sehen, um die Planungsphase bei der Systemauswahl zu verkürzen. Daten, die nicht als Auswahlkriterium dienen, die aber trotzdem für den Anwender von Interesse sind (z.B. Aufheizzeit, Transportgeschwindigkeit ...), wurden systematisch geordnet unter den technischen Daten der jeweiligen Lötanlage aufgenommen. Bild 6.2 gibt den Aufbau und die Kenngrößen der wichtigsten Lötanlagentypen wieder.







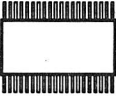


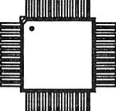
**Bild 6.2:** Aufbau und Kenngrößen der wichtigsten Anlagentypen

## 6.1 Lötmethoden für SMD - Gehäuseformen

Unter löttechnischen Gesichtspunkten können die SMDs in zwei Hauptgruppen unterteilt werden:

1. sowohl schwall- als auch reflowfähige
2. nur reflowfähige.

Bild 6.3 zeigt eine Auflistung von SMDs mit der jeweils möglichen Lötmethode. Dabei ist unter "optimalen Lötbedingungen" ein gutes Wellenprofil, ein geeigneter Anstiegswinkel, eine nicht zu hohe Transportgeschwindigkeit und eine korrekte Orientierung der Bauteile in Transportrichtung zu verstehen.

mini-melf		Welle, Reflow
Chip 1206		Welle, Reflow
SOT 23		Welle, Reflow
SO 14		Welle, Reflow
VSO 40		(Welle), Reflow
PLCC 20		(Welle), Reflow
CLCC 28		Reflow
QFP 48		Reflow

**Bild 6.3:** Zusammenhang zwischen SMD - Bauform und möglichem Lötverfahren (nach [89])

Die mangelnde Eignung mancher Bauelemente für das Schwallöten hat folgende Ursachen [59]:

- > Hohe Temperaturbelastungen.
- > Gehäuse sind nicht hinreichend dicht und können dadurch nicht vollständig ins Lot eingetaucht werden.
- > SMD - Anschlüsse sind eng oder ungünstig angeordnet, so daß Lotbrücken entstehen können.
- > Auf der Rückseite der SMD sind Lotabschattungen, die einwandfreie Lotzufuhr verhindern.
- > Gehäuse lassen sich wegen zu großem Bodenabstand mit dem Kleber nicht einwandfrei auf der Leiterplatte fixieren.

Die Art der Bestückung und das Bauelementespektrum können ein k.o. - Kriterium für ein bestimmtes Verfahren darstellen. Allerdings spielen bei der endgültigen Entscheidung für oder gegen eine Löttechnologie, durch die Komplexität des thermischen Vorganges, noch viele andere Faktoren eine entscheidende Rolle. Hier sind die Produktionskapazität, der Wartungsaufwand, die Umweltverträglichkeit, mögliche Lötfehler, Kosten usw. zu nennen.

Diese Faktoren lassen sich nur schlecht quantifizieren und müssen jeweils von Fall zu Fall neu beurteilt werden. Deshalb werden bei der rechnergestützten Auswahl die beiden eindeutigen Vergleichskriterien "Bestückung" und "Bauelementespektrum" herangezogen.

## **6.2 Auswahlkriterien zur Abgrenzung**

In Bild 6.4 sind die k.o. - Kriterien aufgelistet, die bei der Auswahl einer geeigneten Anlage abgefragt werden. In die Abfrage wurden nur technische Kenngrößen berücksichtigt, für die ein Vergleich sinnvoll erscheint. Für die

Dampfphasenanlagen wurden relativ wenig Kriterien aufgenommen, da das Angebot auf dem Markt leicht überschaubar ist.

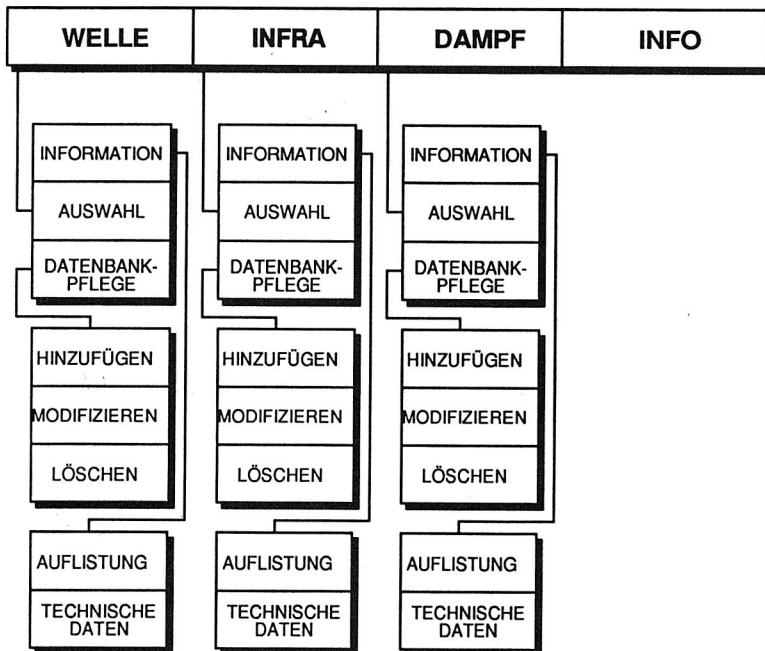
	Welle	Dampfphase	Infrarot
Ferti- gung		<input type="checkbox"/> Batch oder Inline <input type="checkbox"/> Serie oder Labor	<input type="checkbox"/> Serie oder Labor
Geo- metrie	<input type="checkbox"/> maximale LP-Breite	<input type="checkbox"/> max. LP-Abmessungen <input type="checkbox"/> maximale LP-Breite	<input type="checkbox"/> maximale LP-Breite
Technologie	<input type="checkbox"/> Doppelwelle J/N <input type="checkbox"/> Fingertransport J/N <input type="checkbox"/> Sprühfluxer J/N <input type="checkbox"/> Kühlzone J/N <input type="checkbox"/> Mikroprozessor- steuerung J/N <input type="checkbox"/> Schutzgas J/N		<input type="checkbox"/> Fingertransport J/N <input type="checkbox"/> UV-Zone J/N <input type="checkbox"/> Anzahl Heizmodule <input type="checkbox"/> Mikroprozessor- steuerung J/N
Optionen	<input type="checkbox"/> motorische Winkel- verstellung J/N <input type="checkbox"/> Flußmittelkontrolle J/N <input type="checkbox"/> Transportwinkel verstellbar J/N <input type="checkbox"/> Intervallschaltung für Lotwelle J/N <input type="checkbox"/> Intervallschaltung für Fluxer J/N		<input type="checkbox"/> Drucker J/N <input type="checkbox"/> Barcodeleser J/N <input type="checkbox"/> Quertemperaturprofil J/N <input type="checkbox"/> Schutzgasanschluß J/N

Bild 6.4: K.o. - Kriterien bei der rechnergestützten Auswahl von Lötanlagen

## 6.3 Programmablauf

Das Hauptmenü bietet fünf Optionen "WELLE", "INFRA", "DAMPF", "INFO" und "ENDE" (Bild 6.5), wobei in den Untermenüs der Lötanlagen die Optionen

"INFORMATION", "AUSWAHL" und "DATENBANKPFLEGE" angeboten werden. Unter "INFORMATION" wird eine Auflistung aller enthaltenen Anlagen der jeweiligen Löttechnologie erstellt. Des weiteren sind alle technischen Daten zu den einzelnen Anlagentypen einzusehen. Lötanlagen können im Menüpunkt "DATENBANKPFLEGE" hinzugefügt, gelöscht oder modifiziert werden.



**Bild 6.5:** Aufbau der Menüs zur datenbankgestützten Lötanlagenauswahl

Bild 6.6 enthält einen beispielhaften Ausdruck als Ergebnis einer durchgeführten Datenbankrecherche. Zusätzlich zu den Namen des jeweiligen Herstellers und der Typenbezeichnung der verbliebenen Anlagen sind die Auswahlkriterien auf dem Protokoll aufgelistet.

Durch die datenbankgestützte Auswahl kann so dem Einsteiger schnell ein Marktüberblick verschafft und eine gewisse Vorselektion des Marktangebotes ermöglicht werden. Wichtigste Voraussetzung für eine maximale Effektivität ist - wie bei jeder Datenbank - die sorgfältige Pflege der Daten und ein möglichst aktueller Datenbestand.

Einschränkende Kriterien		verbleibende Anlagen
		69
Einsatzgebiet	: Serieneinsatz	60
maximale Leiterplattenbreite	: 300 mm	38
Fingertransportsystem	: nein	30
UV-Zone	: nein	28
einstellbares Quertemperaturprofil	: nein	28
Heizmodulanzahl	: 8	24
Schutzgasanschluß	: ja	17
Rechnersteuerung	: ja	15
Druckeranschluß	: ja	15
Codeleser	: nein	15



**Datenbankgestützte Lötanlagenauswahl**

Auflistung der möglichen Anlagen	
Hersteller	Typ
SUPERSOLDER	SUSO 344
THERMO	911 S
INFRATEC	IT 0815
IRS	MODEL 4711
usw.	

Bild 6.6: Ergebnisprotokoll einer beispielhaften Recherche

## 7 CAD / CAM - Verfahrenskette für das Infra-rotlöten

### 7.1 CAD / CAM - Verfahrensketten

Die Entwicklung von CAD / CAM - Verfahrensketten soll die durchgängige Verwendung von Daten der Konstruktion über Fertigungsplanung bis zur Produktion ermöglichen.

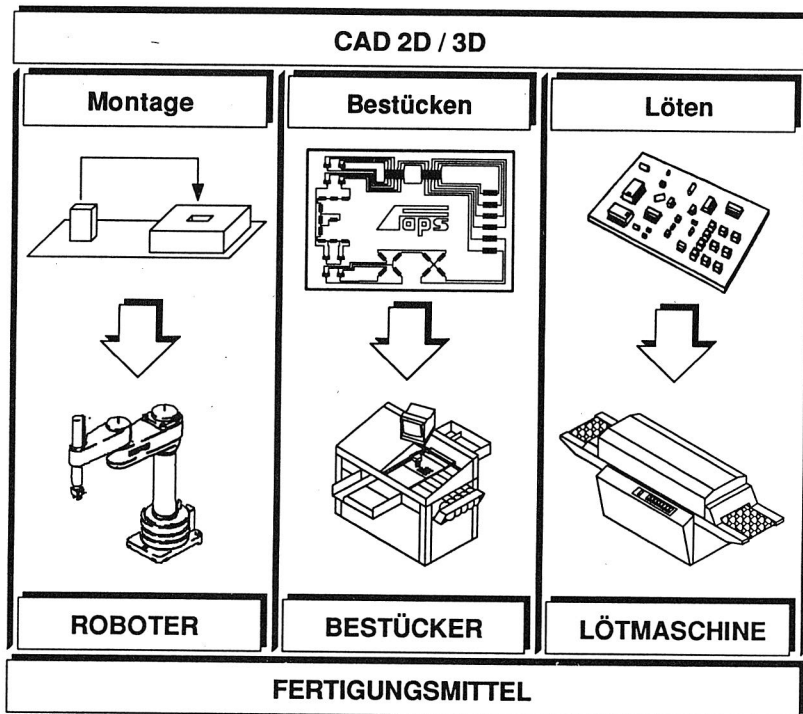


Bild 7.1: CAD / CAM - Verfahrensketten

Nach der Realisierung von NC-Verfahrensketten, wenden sich nun die Bemühungen dem wesentlich komplexeren Gebiet der Montage bzw. der Elektronikproduktion zu (Bild 7.1). Ein breites Anwendungsfeld für CAD / CAM - Kopplungen ist bei der Herstellung von bestückten Leiterplatten gegeben, worauf in diesem Kapitel detailliert eingegangen wird.

Anhand von Analysen von CAD / CAM - Anwendungen in Unternehmen und durchgeführten Expertenbefragungen wurden von Wildemann [95] die originalen Ziele bei der CAD / CAM - Einführung festgehalten (Bild 7.2). Um diese Ziele zu realisieren, müssen die Komponenten zur rechnerintegrierten Produktion, die für sich isoliert betrachtet einen hohen Entwicklungsstand erreicht haben, in einer Fabrikumgebung vernetzt werden.

Im Fertigungsvorfeld stehen CAD- und CAP - Systeme zur Erzeugung und Verarbeitung von Geometrie- und Technologiedaten, PPS - Systeme zur Erfassung und Verarbeitung von Auftrags- und Betriebsdaten und CAM - Systeme zur Steuerung und Überwachung der Betriebsmittel im Fertigungs- und Montageprozeß zur Verfügung. Im den Bereichen Arbeitsplanung und -steuerung besteht die Aufgabe darin, CAD - Systeme mit NC - Programmiersystemen und PPS - Systemen zu koppeln.

Beim Einsatz von CAD in der Konstruktion und NC - Programmierverfahren in der Fertigungsplanung besteht die Forderung nach einer Mehrfachverwendung der im Konstruktionsbereich erstellten Geometriedaten, um sie bei der Arbeitsplanung mit Technologie- und Betriebsdaten zu ergänzen. Dazu müssen die Geometriedaten von entsprechenden CAD / CAM - Verfahrensketten im Format der jeweiligen NC - Programmiersprache zur Verfügung gestellt werden, damit die erneute Geometriedefinition bei der Teileprogrammierung vermieden wird.

Heutige CAD / CAM - Systeme bestehen aus einer Sammlung mehr oder weniger unabhängiger Subsysteme, die häufig von unterschiedlichen Herstellern angeboten werden, so daß der Anwender gezwungen ist, sein System

aus diesen heterogenen Modulen zusammenzusetzen. In der Regel müssen die Eingabedaten für verschiedene Module in unterschiedlichem Format vorliegen, die jeweils in ein Ausgabeformat konvertiert werden. Sollen die Daten eines Moduls an einen anderen übergeben werden, müssen die Daten entsprechend umstrukturiert oder übersetzt werden [69].

ORIGINÄRE ZIELELEMENTE	DERIVATIVE ZIELELEMENTE 1. ORDNUNG		
	Höhere Reaktions- geschwin- digkeit	Qualitäts- steigerung	Kosten- senkung
1. Verkürzung der Entwicklungszeit	●		●
2. Verkürzte Produkthanlaufzeiten	●		●
3. Automatisierung der NC-Fertigung	●		●
4. Erhöhung der Produktqualität		●	
5. Reduzierung der Testkosten		●	●
6. Reduzierung von Ausschuß		●	●
7. Verringerung von Übertragungsfehlern		●	●
8. Bessere Ressourcennutzung durch Systematische Konstruktionsalternativen			●
9. Mehrfachverwendung von Konstruktionsdaten	●		●
10. Vollständige Informationsbereitstellung am Konstruktionsarbeitsplatz	●	●	●
11. Bessere Kostenplanung und -kontrolle	●		●
12. Reduzierung der Routinetätigkeiten	●	●	
13. Vergrößerung des Entscheidungsfeldes des Konstrukteurs		●	
14. Abbau von Kapazitätsengpässen im Konstruktionsbereich	●		
15. Schnelle, umfassende Angebotserstellung	●	●	
16. Zunehmende Flexibilität bei kurzfristigen Änderungswünschen	●		
17. Durchlaufzeitreduzierung	●		●

**Bild 7.2:** Originäre und derivative Zielelemente bei der CAD / CAM - Einführung

Jeder Modul arbeitet mit einem ihm eigenen Modell und beinhaltet Prozeduren zur Verwaltung seiner Daten. Diese Modelle können als verschiedene Schichten desselben Objektes aufgefaßt werden. So repräsentieren z.B. die Layoutbeschreibung oder die funktionelle Beschreibung dieselbe Schaltung. Eine wichtige und nicht leicht zu lösende Aufgabe ist es, die verschiedenen, zusammengehörenden Schichten zueinander konsistent zu halten.

Nach einer formalen Änderung der funktionellen Beschreibung muß dafür gesorgt werden, daß sich alle anderen, von der funktionellen Beschreibung abgeleiteten Schichten auch ändern, um die Konsistenz des Datenmodells wiederherzustellen. Damit man dies erreicht, werden alle Schichten von einem zentralen Datenverwalter gehandhabt, der die Konsistenz des Gesamtmodells überprüft [69].

## **7.2 CAD / CAM - Verfahrensketten in der Elektronik**

Der Bereich Konstruktion ist als erste Stelle im Lebenszyklus eines Produktes für die Qualität und Marktfähigkeit von größter Wichtigkeit, da hier die Produktdaten erstellt werden. Die Qualität, Vollständigkeit und Zugänglichkeit der Produktinformationen ist entscheidend für die folgende Weiterverarbeitung.

CAD - Systeme zur Konstruktion von Leiterplatten mit der heute üblichen Komplexität (beidseitig SMD, Multilayer) bedienen sich rechnergestützter, vielfach ähnlicher Entwurfsmethoden. Dabei finden folgende Prinzipien Anwendung: das der Abstraktion (Reduktion der beschreibenden Eigenschaften), der hierarchischen Modularisierung (Zerlegen des komplexen Gesamtsystems in überschaubare Teilsysteme) und der Strukturierung des Systementwurfs in Aufgabenschritte [15].

Beim physikalischen Entwurf wird - durch Platzierung von elektronischen Bauelementen und mechanischen Komponenten - die im Logikentwurf festgelegte Funktion in eine physikalisch realisierbare Schaltung umgesetzt. Dazu werden die Schritte

- > Partitionierung (Abbildung der logischen Schaltelemente auf physikalische Bauelemente),
- > Positionierung (Platzierung der Bauelemente auf physikalischen Trägern) und
- > Routing (kurzschlußfreie Verdrahtung der Anschlüsse)

durchlaufen. Aufgrund der engen Wechselwirkungen untereinander können diese Stufen nicht sequentiell ablaufen. Die daraus resultierende Komplexität führte schon sehr früh zum Einsatz rechnergestützter Werkzeuge für die Entwicklung elektronischer Schaltungen.

Um höhere Flexibilität in der elektronischen Fertigung erreichen zu können, muß die Vernetzung und Kopplung der einzelnen Komponenten und Instanzen durchgeführt werden. Angefangen von der Entwicklung elektronischer Schaltungen bis hin zum Bestück- und Lötprozeß wird der durchgehende Datenfluß zwingend notwendig.

Am naheliegendsten und dringendsten ist die Kopplung vom Entwicklungssystem zum Bestückautomaten, um schnellere und effizientere Übertragung der Bestückpositionen zur Maschine zu ermöglichen. Vielfach wird die Programmierung noch an der Maschine durchgeführt, d.h. der Maschinenbediener erhält eine komplett bemaßte Zeichnung vom Leiterplattenlayout und muß sämtliche Positionen der Bauelemente mit ihren Aufsetzwinkeln und Namen manuell mit Hilfe eines Editors eingeben. Dieses Verfahren benötigt erheblichen Zeitaufwand sowohl für die genaue Bemaßung der einzelnen Bauelemente als auch für die Eingearbeiten an der Maschine und birgt damit viele Fehlermöglichkeiten in sich.

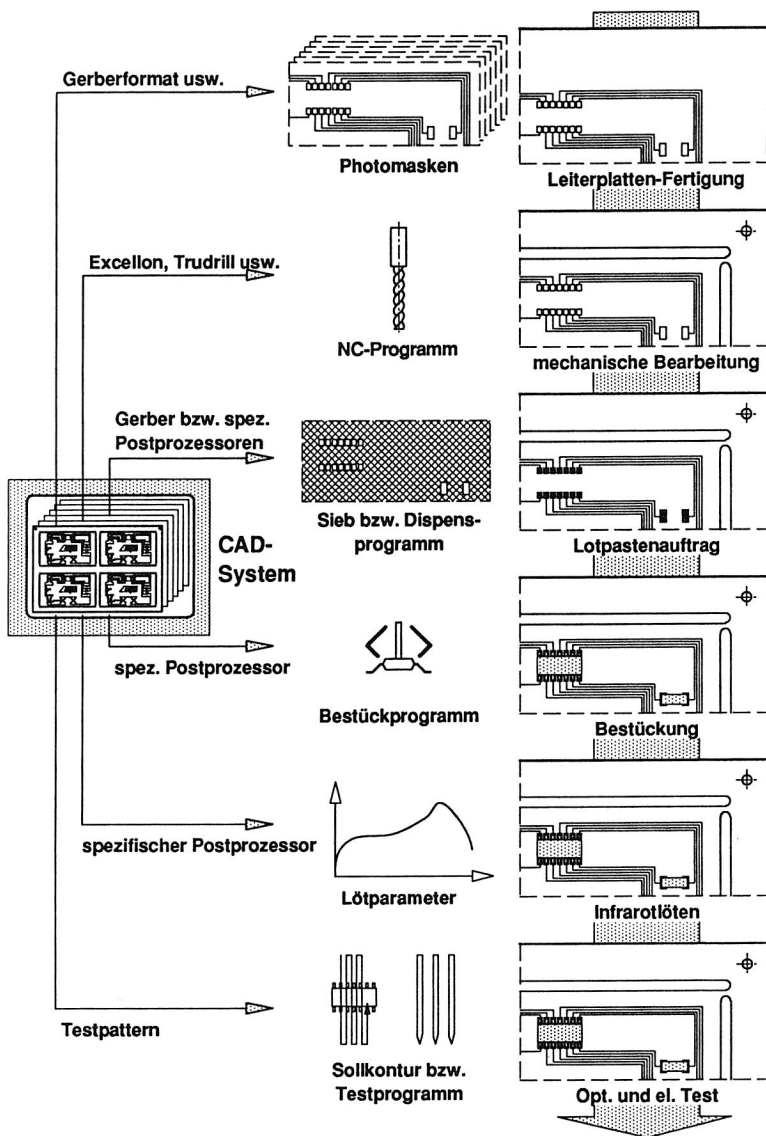


Bild 7.3: CAD - Verfahrensketten in der Elektronikproduktion

Heute wird der Datenaustausch zwischen CAD - System und Fertigungsmittel häufig mit Hilfe eines Datenträgers (z.B. Diskette) vorgenommen. Aus dem am CAD - System generierten Layout müssen die relevanten Daten extrahiert und unter einem bestimmten Dateiformat auf dem Datenträger abgespeichert werden.

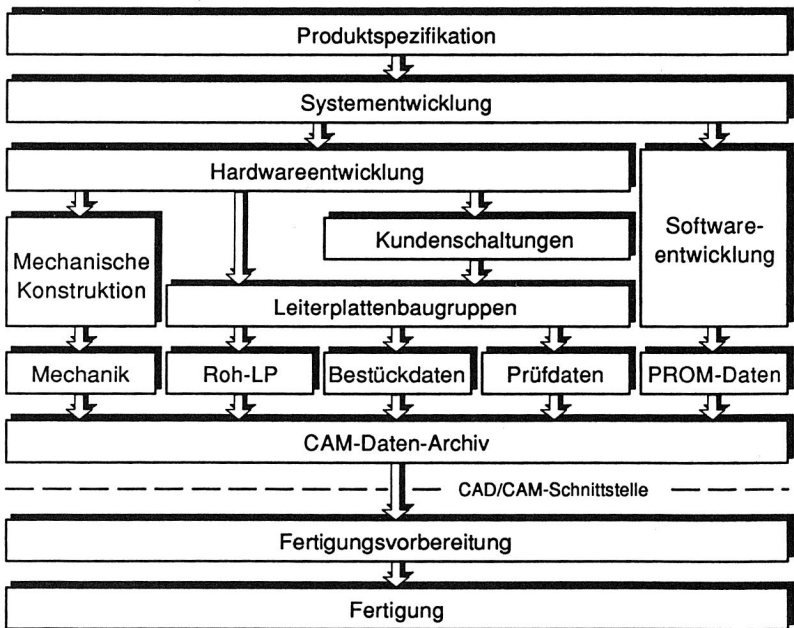
Von dem Steuerungsrechner der Bestückmaschine können die Daten eingelesen und in ein lauffähiges Programm eingebunden werden. Probleme treten bei unterschiedlichen Datenträgerformaten von den Partnern auf, da spezielle Formatier- bzw. Konvertierprogramme nötig werden. Sehr aufwendig gestaltet sich auch die Archivierung und die Aktualisierung der Datenträger für jedes Fertigungsmittel, da bei geringfügigen Layoutänderungen für alle Leiterplattenprozesse neue Dateien an den Fertigungsmaschinen bereitgestellt und eingelesen werden müssen.

Für die heutigen Anforderungen an die Produktionsflexibilität stellt die direkte Anbindung der Fertigungsmittel über Datenleitung an das CAD - System (CAD / CAM - Kopplung) die beste Lösung dar. Die Nachteile der manuellen Eingabe und der Übertragung mittels Datenträger können dadurch eliminiert werden. Aufgrund der kurzen möglichen Reaktionszeit auf Layoutänderungen, können Labormuster und Platinen für Test- und Entwicklungszwecke auf den Fertigungsmaschinen gefahren und somit schneller und praxisnah auf ihre Eignung geprüft werden.

Besonders wichtig für die flexible Herstellung auch geringer Stückzahlen ist die automatisierte Ableitung der Bestückdaten aus den Produktinformationen und die direkte Übermittlung an den Bestückautomaten. Dieses Verfahren reduziert die Programmierzeit an der Maschine erheblich und vermeidet Fehler durch falsche Dateneingabe von Hand. Stand der Technik ist die spezifische Anpassung der CAD - Systeme an bestimmte Bestückmaschinen durch Postprozessoren. Nachteilig dabei ist die Notwendigkeit der Entwicklung und Pflege einer Vielzahl von Postprozessoren, da der Maschinenpark üblicherweise aus

Anlagen verschiedener Hersteller zusammengesetzt ist und häufig unterschiedliche CAD - Systeme in der Konstruktion zum Einsatz kommen.

Von besonderer Bedeutung für die Qualität der produzierten elektronischen Produkte ist eine optimale Einstellung der Parameter beim IR - Löten. Dies geschieht heute noch in heuristischen Vorgehensweisen und ist damit zeitaufwendig und schlecht reproduzierbar. Die optimale Einstellung dieser Geräte ist deshalb sehr stark von Erfahrung und Wissen des Maschinenbedieners abhängig. Diese Bedingungen eröffnen einer rechnergestützten Ableitung der Lötparameter aus den CAD - Produktinformationen große Rationalisierungspotentiale.



**Bild 7.4:** Informationsflüsse in der technischen Auftragsabwicklung eines Leiterplattenherstellers

Die über optische Prüfverfahren (Lasertriangulation, Röntgenverfahren o. ä.) ermittelten Prozeßdaten werden für die Qualitätskontrolle mit den im CAD - System abgelegten Geometriedaten verglichen. Die Datenübertragung kann man auch in diesem Bereich noch über firmenspezifische Kopplungen realisieren.

Bild 7.4 veranschaulicht die Datenflüsse in der technischen Auftragsabwicklung eines Bestückbetriebes. Hierbei werden die gesamten CAM - Daten in einem zentralen Archiv der Fertigungsvorbereitung zur Verfügung gestellt.

### **7.3 Steuern und Regeln beim Infrarotlöten**

Die Entwicklung von immer aufwendigerer Software zur Steuerung und Visualisierung von Anlagenzuständen am Steuerungsrechner für Reflow-lötstrecken gibt dem Benutzer ein falsches Sicherheitsgefühl. Im Grunde genommen müssen die meisten Lötparameter (Geschwindigkeit, Strahlertemperaturen) nach wie vor durch Versuchsreihen für jeden Leiterplattentyp ermittelt werden.

Der Steuerungs - PC bietet lediglich die Möglichkeit, Lötprogramme zu speichern, zu modifizieren und aufzurufen [2]. Diese Tatsache gilt auch für die Anlage, an der die Versuche gefahren wurden. Die umfangreiche Software besitzt drei Schnittstellen zur Lötanlage: Die erste für den Temperaturregler, die zweite für den Geschwindigkeitsregler und die dritte für alle Schaltfunktionen sowie für die Temperaturerfassung über Pyrometer und Thermoelemente.

Die Sollwerte für die Prozeßparameter werden entweder von Hand eingegeben oder aus einer abgespeicherten, bereits vorher generierten Datei eingelesen. Die zur vollständigen Steuerung der Lötanlage nötigen Informationen sind in einer Programm- und einer Profildatei gespeichert:

Die Programmdatei enthält:

- Sollwerte der Temperaturregler
- Sollwert des Geschwindigkeitsreglers
- Sollwert des Kühlluftreglers
- Emissionswert
- Werte der Digitalausgabe
- Name des Programms

Die Profildatei enthält:

- Alle Informationen der Programmdatei
- Bearbeiter, Datum und Uhrzeit
- Anzahl der aufgenommenen Kurven
- Kurvenwerte in Sekunden, Zentimetern und Anzahl

Daraus geht hervor, daß es sich bei den üblichen Lötanlagen lediglich um Steuerung des Prozesses handelt. Aus Gründen der Prozeßsicherheit und der Qualität wird die Prozeßregelung immer mehr zum Fokuspunkt der Entwicklungen. Am naheliegendsten wäre dazu ein Qualitätsregelkreis, der direkt nach dem Lötprozeß geschlossen wird. Dazu muß aber das Problem der optischen Detektion von aufgetretenen Fehlern mit Rückschlüssen auf die Fehlerursache gelöst werden. Kamerasysteme bzw. Scanner sind nach dem heutigen Stand der Technik wegen der hohen Rechenzeit noch nicht schnell genug, die ganze Leiterplatte nach Fehlern abzusuchen.

Deshalb werden i.a. sogenannte kritische Fenster auf der Leiterplatte definiert, die nach Fehlern abgesucht werden. Falls Mängel geortet werden, müssen diese anhand eines Diagnosesystems eindeutig einer Anlage bzw. einem Fügepartner (z.B. Bestücker, Siebdrucker, Bauelement, Leiterplatte) zugeordnet (vgl. Bild 4.7) und Fehlerbehebungsstrategien vorgeschlagen bzw. die Fehlerursache direkt automatisch behoben werden. Konkret würde dies für die Lötanlage be-

deuten: bei Detektion von eindeutig dem Prozeßschritt "Löten" zuzuordnender Fehler (z.B. nicht gelötete Zonen auf der Leiterplatte infolge zu niedriger Temperatur) werden die Lötparameter automatisch korrigiert (z.B. wird die Transportgeschwindigkeit erniedrigt). Dies setzt allerdings das Vorhandensein eines entsprechend komplexen Diagnosesystems voraus. Die Entwicklungen, speziell beim Löten, sind noch lange nicht so weit gediehen, daß an eine Realisierung des angesprochenen Qualitätsregelkreises gedacht werden kann.

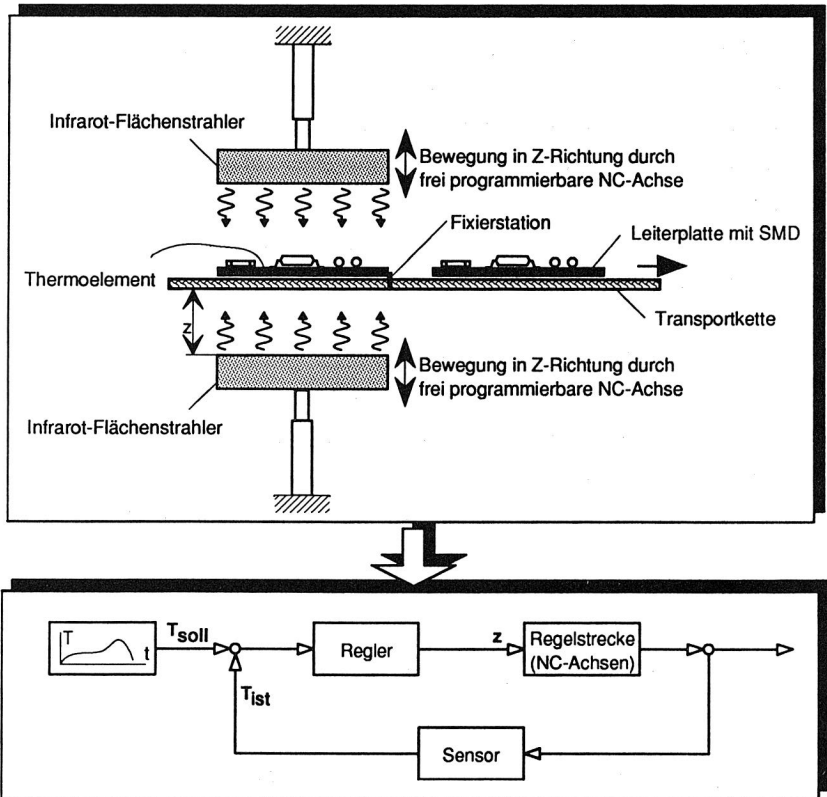
Sinnvoller erscheint der Temperaturregelkreis, mit dem ein vorgegebenes Temperaturprofil für jeden Leiterplattentyp ohne aufwendige Versuchsreihen realisiert werden kann.

Zu diesem Thema wurden bereits in mehreren Veröffentlichungen Konzepte bzw. Realisierungen vorgestellt. Von O. Winteler wurde ein IR - Ofen entwickelt, der mit einer Temperatursteuerung ausgerüstet ist [96]. Wesentliches Element der entwickelten Anlage ist die berührungslose Temperaturmessung über einen Infrarotsensor, dessen Anzeige durch Korrektur über einen Emmissionsfaktor auf das Lötgut eingestellt werden kann. Dabei wird der am Lötgut beobachtete Schmelzpunkt der Lotpaste zur Kalibrierung verwendet. Die gemessenen Temperaturwerte werden zur Regelung der dem Lötgut zugeführten Heizleistung durch Regelung des IR - Strahlerstromes benutzt.

Die Anlage weist im Unterschied zu herkömmlichen Lötstrecken folgende Besonderheiten auf:

- Das Lötgut bleibt in der jeweiligen Heizphase in Ruhe, d.h. es wird von Phase zu Phase getaktet.
- Das Lötgut kann während der gesamten Prozeßdauer durch ein Glasfenster beobachtet werden.
- Nach Erreichen der Löttemperatur an den Lötstellen werden die Wärmequellen schlagartig abgeschaltet.

Das vorgegebene Temperaturprofil wird durch Messung der Leiterplatten-temperatur während des gesamten Lötprozesses reproduziert. Die Temperatursignale werden kontinuierlich im Prozeßrechner ausgewertet und in Steuersignale für die Strahlungsquelle umgesetzt.



**Bild 7.5:** Schema einer IR - Lötanlage mit Temperaturregelung

Ein anderes Konzept wurde von R. Diehm vorgestellt [6]. Kernpunkt des Systems ist die Vermeidung der thermischen Trägheit von langwelligen IR -

Lötstrecken durch Anordnung automatisch in Z - Richtung verstellbarer Strahler. Dieses System soll die Möglichkeit bieten, über eine Verstellvorrichtung prozessorgesteuert den Abstand während des Durchlaufs einer Platine unter dem Heizelement zu variieren.

Als Alternative zu den oben beschriebenen Verfahren, könnte das Temperaturprofil durch Bewegung jeweils eines IR - Strahlers über und unter dem Lötgut in Z - Richtung erzeugt werden (vgl. Bild 7.5). Bei dieser Variante wäre die Regelung des Temperaturverlaufs auf dem Lötgut realisierbar. Durch die Fixierung der Leiterplatte in einer festen Position, ist die Möglichkeit geschaffen, an einer kritischen Stelle auf der Leiterplatte einen Temperatursensor (z.B. Thermoelement) anbringen zu können. Die beiden IR - Strahler werden von jeweils einer NC - Achse in Z - Richtung verfahren. So kann nach Ermittlung eines geeigneten Regelalgorithmus ein vorgegebenes Temperaturprofil für einen kritischen Punkt auf der Leiterplatte realisiert werden.

Da die temperaturgeregelten Anlagen erst im Entwicklungs- bzw. Prototypenstadium sind, wird im folgenden Kapitel ein Postprozessor zur Berechnung der leiterplattenspezifischen Lötparametereinstellungen für herkömmliche IR - Lötstrecken vorgestellt.

## **7.4 Vorüberlegungen und experimentelle Untersuchungen zur Realisierung CAD / CAM - Verfahrenskette für das Infrarotlöten**

### **7.4.1 Ausgangslage und Handlungsbedarf**

Beim IR - Löten muß jedem Lotpastendepot auf der Leiterplatte soviel Energie zugeführt werden, daß die Paste kurzzeitig aufschmelzen kann, um die Bau-

elementeanschlüsse mit den Pads der Leiterbahnen zu verbinden. Bevor die Paste aufschmilzt, sollte sie gewisse Zeit auf einem höheren Temperaturniveau gehalten werden, damit das Flußmittel seine Aktivität entfalten kann und die Reduktionsvorgänge an den Anschlußflächen der Fügepartner und an den Lotpartikeln in der Paste auslöst.

Nach dem Verflüssigen muß die Leiterplatte möglichst schnell abgekühlt werden, damit die Baugruppe nicht unnötig thermischen Belastungen ausgesetzt wird. Der Temperaturverlauf über der Zeit für ein Lotpastendepot wird mit Temperaturprofil bezeichnet.

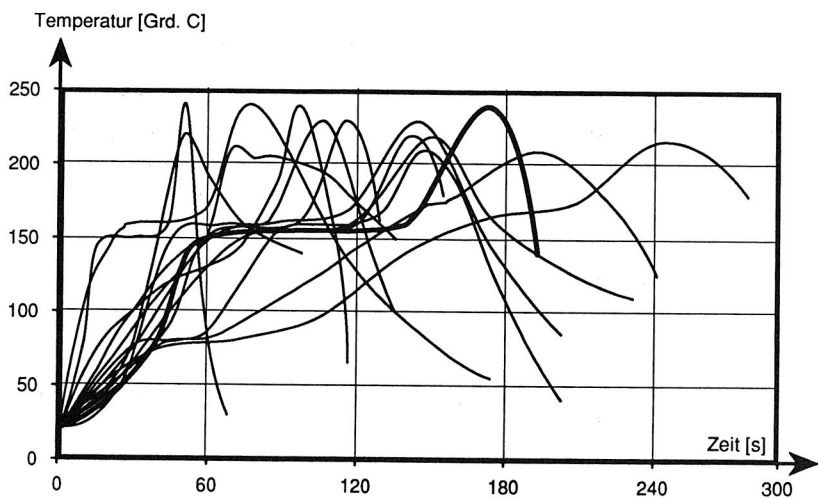
Über die Ausprägung dieses Temperaturprofils bestehen, je nach Lötanlagenhersteller und Anwender, unterschiedliche Auffassungen. Die realisierbaren Profile sind sehr stark anlagenabhängig: bei Maschinen für die Massenproduktion, die aus Gründen des Durchsatzes mit wesentlich mehr Strahlerpaaren ausgerüstet sein müssen als Laboranlagen, kann ein vorgegebenes Profil sehr exakt im Prozeß nachgebildet werden.

Die Problematik beim IR - Löten besteht darin, für alle zu lötenen Baugruppentypen das vorgegebene Solltemperaturprofil an allen Lotpastendepots zu erreichen. Der Temperaturverlauf an einer Lötstelle ist dabei von einer Vielzahl von Parametern abhängig:

- > Strahlertemperaturen
- > Transportgeschwindigkeit
- > Leiterplattengeometrie
- > Leiterplattenmaterial
- > Leiterplattenbeschichtung (Lötstoplack)
- > zu lötender SMD - Gehäusotyp
- > Lotpastenbeschaffenheit
- > Bestückdichte

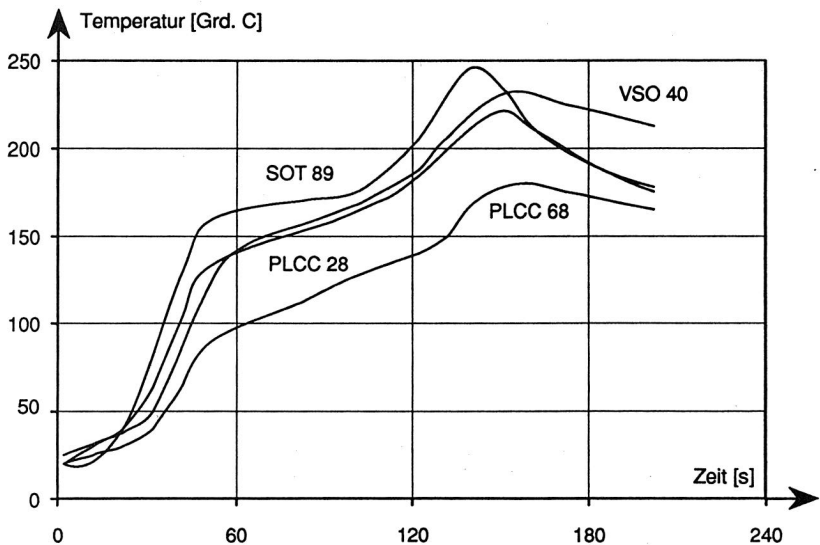
Einfluß auf die Umsetzbarkeit eines vorgegeben Profiles hat auch der Typ der eingesetzten Strahler, da z.B. kurzwellige Strahler wesentlich höhere Oberflächentemperaturen aufweisen als langwellige. Einige als "ideal" bezeichnete Temperaturprofile sind in Bild 7.6 zusammengestellt [1] [5] [10] [77] [79] [97]. Deutlich ist das markant ausgeprägte Plateau bei ca. 150 °C zu erkennen. Die Zeitdauer bis zum Erreichen des Scheitelpunktes ist vom Ofentyp abhängig.

Der Zusammenhang dieser Parameter ist zur Zeit nur durch die Erfahrung des Bedieners subjektiv erfaßt. Wieviele Lötversuche für einen neuen Leiterplattentyp erforderlich sind, daß einerseits an den kritischen Bauelementen (Wärmesenken) gerade Lötung stattfindet, andererseits die Leiterplatte aber nur der unbedingt erforderlichen Wärmebelastung ausgesetzt wird, ist ausschließlich von Geschick und Wissen des Anlagenbedieners abhängig. Bei großvolumigen Bauelementen treten erfahrungsgemäß Wärmesenken auf, d.h. das Bauelementgehäuse absorbiert soviel Wärme, daß u.U. nicht genügend Energie bis an die Pastendepots gelangt und der Reflow-Prozeß nicht stattfinden kann.



**Bild 7.6:** "Ideale" Temperaturprofile

Anzustreben sind möglichst wenig Versuche angesichts der hohen Bauteilkosten, die pro Platine einige 10 TDM betragen können. In Bild 7.7 sind die Temperaturverläufe, gemessen jeweils im Bauelement, dargestellt. Aufgrund der größeren Gehäusemasse und der größeren Abmessungen weisen die Temperaturprofile im Inneren der PLCC - Bauelemente einen geringeren Temperaturgradienten als die kleineren SOT - Bauelemente auf. Für ein befriedigendes Lötresultat auch an den PLCC - Bauelementen müßte die Durchlaufgeschwindigkeit etwas verringert werden, damit die zum Verflüssigen des Lotes erforderliche Wärme an den Anschlußbeinchen aufgebracht werden kann.



**Bild 7.7:** Temperaturbelastung unterschiedlicher Bauelemente beim Infrarotlöten.

Wenn die Formate und Bestückdichten der Leiterplatten eines Fertigungsspektrums nicht zu sehr variieren, können alle Baugruppen erfahrungsgemäß

ohne Änderung der Anlageneinstellung gelötet werden. Bei hochflexibler Fertigung von stark in Geometrie und Bestückdichte variierenden Platinen müssen die Strahlertemperaturen und die Transportgeschwindigkeit unbedingt dem jeweiligen Leiterplattentyp angepaßt werden.

Darin liegt der Ansatz begründet, die im Augenblick rein empirisch zu ermittelnden Voreinstellungen durch analytische Vorgehensweisen zu ersetzen. Hierzu sind prinzipiell zwei verschiedene Lösungsansätze denkbar:

1. Berechnung der Lötparameter über ein mathematisches Rechenmodell, das auf den physikalischen Gesetzmäßigkeiten beim Löten basiert.
2. Bestimmung der Maschinenparameter durch rechnergestützte Auswertung von Erfahrung und subjektivem Wissen der Anlagenbediener sowie analytischer Erfassung der Zusammenhänge von Lötgut- und Maschinenparameter bei bereits erfolgreich gelöteten Leiterplatten.

Der erste Lösungsansatz wurde von M. Verguld und M. de Langen aufgegriffen und in [55] vorgestellt. Als Grundlage für die Überlegungen dienen das Planck'sche Strahlungsgesetz, das Wien'sche Verschiebungsgesetz und das Stefan - Boltzmann'sche Strahlungsgesetz. Im Laufe der Berechnungen können etliche Einflüsse infolge ihrer Komplexität nicht berücksichtigt werden bzw. müssen vernachlässigt werden, so daß die Qualität des Ergebnisses für die Anwendung in der Industrie in Frage zu stellen ist. Ein Ansatz, der in die gleiche Richtung zielt, wurde von C. Morgenstern präsentiert [65].

Sinnvoller erscheint der zweite Weg, das "Expertenwissen" zu sammeln und auszuwerten, um so zu einem hinreichenden Ergebnis zu gelangen. Die Alternative wurde im Rahmen dieser Arbeit favorisiert und realisiert. Der Algorithmus zur Berechnung der Maschinenvoreinstellungen ist auf dem PC - Zellenrechner der IR - Lötanlage implementiert. Da dieser Algorithmus als Eingabe-Größen u.a. geometrische Daten der Leiterplatte und Layoutdaten benötigt,

wurde die datentechnische Kopplung vom ECAD - System zum Zellenrechner der Lötanlage verwirklicht und damit die CAD / CAM - Kopplung für das IR - Löten [13]. Die Verfahrenskette wurde mit den im Labor vorhandenen Geräten umgesetzt:

- > Elektronik - CAD - System auf einer Workstation
- > Infrarotlötstrecke der oberen Leistungsklasse mit 4 Strahlerpaaren und PC - Zellenrechner zur Programmverwaltung (Bild 7.8).

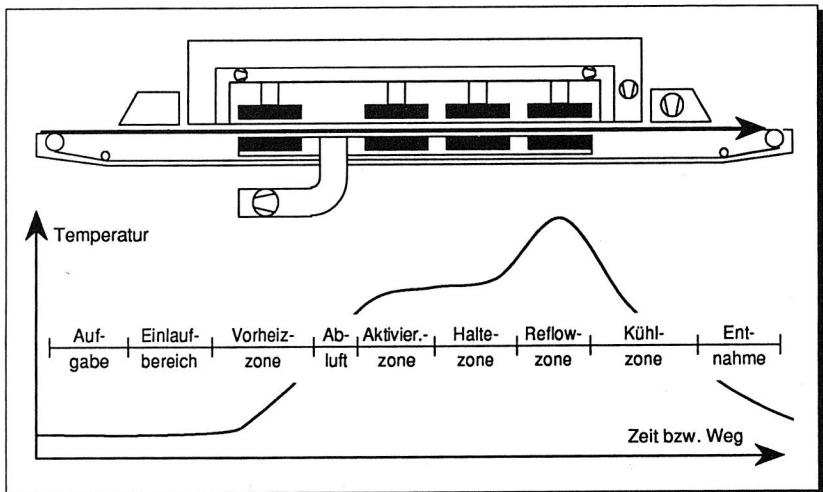


Bild 7.8: Prinzipieller Aufbau der Lötanlage

Die Realisierung der Verfahrenskette gliedert sich in sechs Teilaspekte: Datenaustausch ECAD - Zellenrechner, Aufbereitung der Daten im Zellenrechner, experimentelle Ermittlung der Parameterzusammenhänge, Auswertung von Expertenwissen, Erstellung eines Algorithmus' zur Berechnung der Lötanlagenvoreinstellungen, Testphase.

### 7.4.3 Experimentelle Untersuchungen

Anhand experimenteller Untersuchungen an der Lötanlage im Labor wurden durch Parametervariation die Zusammenhänge zwischen Strahlertemperaturen, Geschwindigkeit, Bestückdichte und Leiterplattengeometrie ermittelt und in einen Algorithmus umgesetzt. Durch die Untersuchungen<sup>4</sup> konnte die Grundlage für die Realisierung eines vorgegebenen Temperaturprofils an einem beliebigen Leiterplattentyp (Geometrie, Bestückdichte) geschaffen werden.



Bild 7.9: Versuchsanlage mit Zellenrechner

Bei der IR - Maschine handelt es sich um eine Anlage der oberen Leistungsklasse, die für den Einsatz in Mittel- bis Großserien aufgrund des hohen Durchsatzes geeignet ist (Bild 7.9). Die Lötstrecke ist mit 8 IR - Flächen-

---

<sup>4</sup> Bei der Durchführung der Versuche an der Lötanlage wurde der Verfasser von Herrn cand. Ing. H. Reinelt unterstützt.

strahlern und mit einem Kettenband ausgerüstet (Leistung je Strahler: 3.000 W, Abmessungen eines Strahlers: 300 x 560 mm, Emissionsbereich: 2,5 - 7,9  $\mu\text{m}$ , Emissionsmaximum bei 5,1  $\mu\text{m}$ , Temperaturbereich: 0 - 400 °C). Die Anlage wird über einen PC bedient, der über eine RS 232 und RS 485 mit der Steuerung der Lötanlage kommuniziert. An diesem Rechner können Lötprogramme erstellt, modifiziert und archiviert werden. Die von Thermoelementen auf der durchlaufenden Leiterplatte gemessenen Temperaturverläufe können auf dem Bildschirm visualisiert werden.

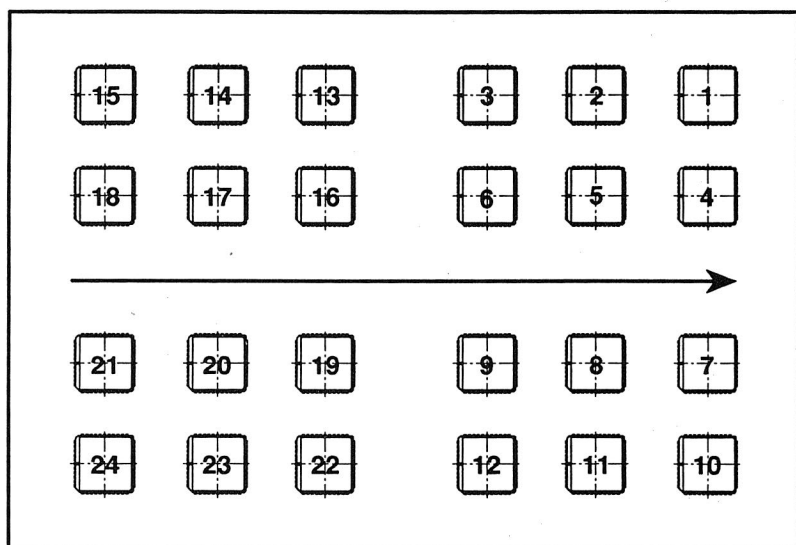


Bild 7.10: Layout der Versuchsplatte

Zur Aufnahme von Temperaturprofilen kann auch ein sogenannter "DATA-PAQ", ein speziell für IR - Lötstrecken entwickelter 4 - Kanal - Temperaturschreiber, eingesetzt werden. Das Gerät folgt der Leiterplatte in ca. 50 cm Entfernung auf dem Kettenband durch den Ofen und zeichnet dabei die vier aktuellen Temperaturwerte jeweils alle 0,2 s auf.

Durch die Versuchsreihen sollte die als ideal definierte Kurve, die in Bild 7.5 herausgehoben dargestellt ist, für möglichst alle Bestückdichten realisiert werden. Dieses Profil erscheint als das optimalste und wird vom Anlagenhersteller in etwas modifizierter Form empfohlen: Das Plateau sollte bei ca. 150 bis 160 °C liegen und nach ca. 60 s erreicht werden. Die Maximaltemperatur darf 230 °C nicht übersteigen. Die 200 °C Marke sollte etwa 25 s lang überschritten werden.

Für die Versuche wurde eine Leiterplatte im Doppeluropaformat (160 x 233 mm) mit Bestückpositionen für maximal 24 Bauelemente vom Typ PLCC 44 (Bild 7.10) gewählt. Im Verlauf der Meßreihen wurden zunächst die Sollwerte für die acht Strahler, die Transportbandgeschwindigkeit und die Bestückdichte variiert.

#### a) Temperaturverteilung auf der unbestückten Leiterplatte

Um die charakteristischen Eigenschaften der Lötanlage quantifizieren zu können, wurden die Temperaturprofile an einer zunächst unbestückten Leiterplatte aufgenommen. Ein Teil der Ergebnisse sind in den Bildern 7.11 und 7.12 zusammengestellt.

Die Strahlertemperaturen und die Transportgeschwindigkeit wurden bei diesen Durchläufen nicht variiert. Deutlich erkennbar ist das leichte Temperaturgefälle von den Seiten zu Mitte hin. Die erreichten Maximaltemperaturen liegen an den Rändern um ca. 10 °C höher als in der Mitte. Anders stellt sich die Situation entlang der x - Achse dar: Unter Beachtung der Verschiebung infolge des späteren Eintritts in die Wärmezone läßt sich hier eine Abnahme der jeweiligen Temperatur einschließlich des Peaks entgegen der Durchlaufrichtung, gemessen über die gesamte Leiterplattenlänge, um etwa 10 °C erkennen.

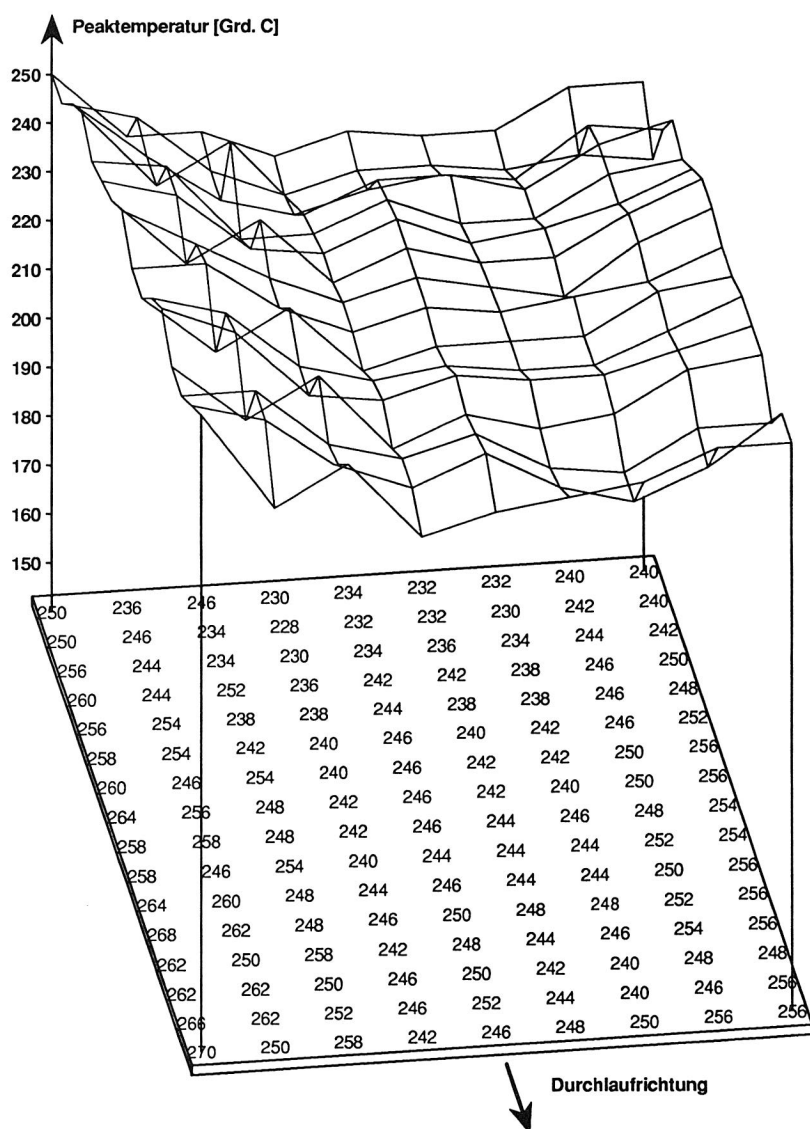


Bild 7.11: Verteilung der erreichten Temperaturpeaks auf einer unbestückten Leiterplatte im Doppeleuropaformat

Der Grund dafür liegt in der schlechten thermischen Leitfähigkeit des Leiterplattenmaterials (FR 4). Diese Erkenntnisse fließen später in den Algorithmus mit ein.

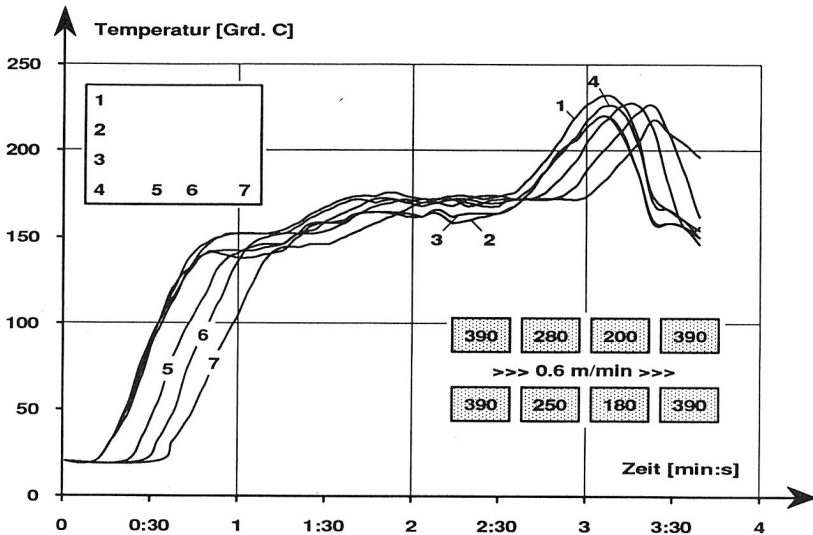


Bild 7.12: Temperaturprofile auf einer unbestückten Leiterplatte im Doppeleuropaformat

## b) Variation der Durchlaufgeschwindigkeit

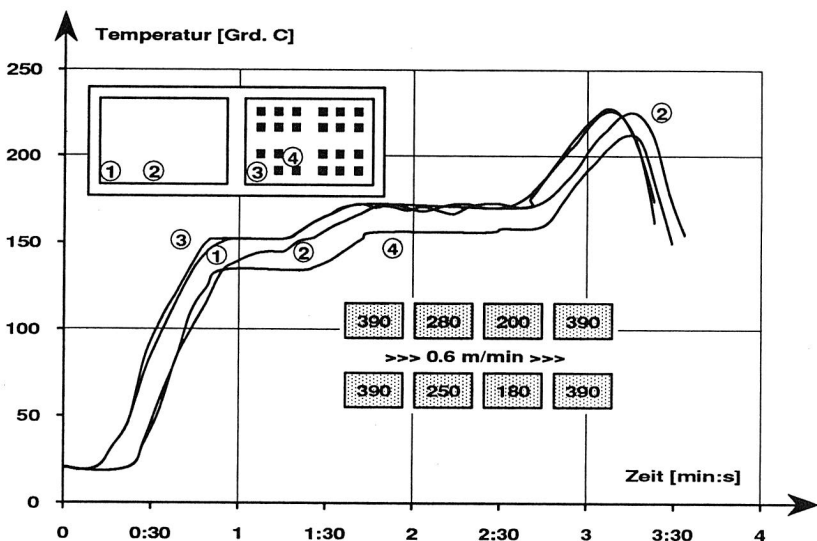
Um den Einfluß der Durchlaufgeschwindigkeit auf das Lötprofil zu erhalten, wurden die Temperaturen auf drei Platinen an derselben Meßstelle aufgenommen. Die beiden Diagramme von Bild 7.13 zeigen ein beispielhaftes Ergebnis, wobei  $T = f(t)$  und  $T = f(s)$  dargestellt sind. Erwartungsgemäß ist die erreichte Peaktemperatur bei schnellerer Geschwindigkeit geringer, da der Leiterplatte weniger Energie zugeführt wird.



Die Energiebilanz bei höheren Durchlaufgeschwindigkeiten durch höhere Strahlertemperaturen auszugleichen scheidet als Möglichkeit aus, da die Maximaltemperatur auf der Strahleroberfläche 400 °C beträgt. Die Zufuhr der erforderlichen Wärmemenge muß also fast ausschließlich durch Variation der Geschwindigkeit erfolgen. Durch Änderung der Strahlertemperaturen kann lediglich die Form des Profils beeinflußt werden.

### c) Variation der Bestückdichte

Der Zusammenhang von Bestückdichte und Temperaturverlauf wurde anhand der mit 24 PLCC44 - Bauelementen bestückten Musterleiterplatte (18 % der Platinenfläche ist von Bauelementen überdeckt) ermittelt.



**Bild 7.14:** Temperaturprofile auf einer leeren und vollbestückten Leiterplatte

Der Einfluß der Bestückdichte auf die Ausbildung der Temperaturprofile ist in Bild 7.14 dargestellt. An der Leiterplattenvorderseite macht sich der Einfluß der Bauelemente nicht bemerkbar. In der Leiterplattenmitte verläuft die Temperatur bei der vollbestückten Platine um ca. 10 bis 20 °C nach unten versetzt annähernd parallel zu dem Profil einer unbestückten Leiterplatte. Die Temperaturdifferenz ist noch krasser am Ende der Leiterplatte ausgeprägt (bis zu 30 °C). Die Bestückdichte ist somit ein entscheidender Parameter bei der Formulierung des Algorithmus'.

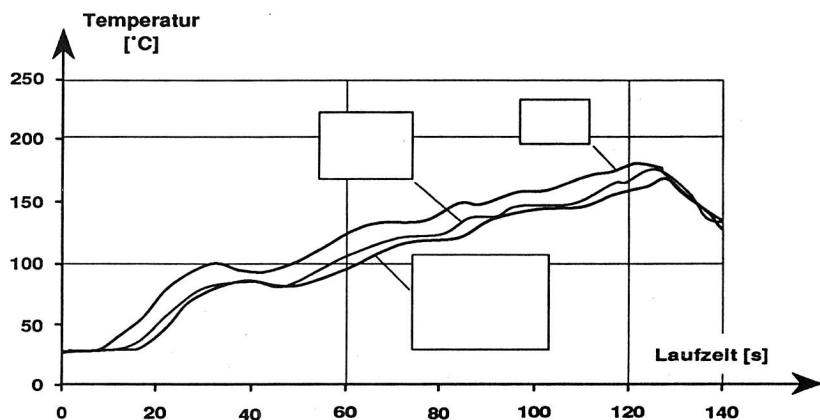


Bild 7.15: Zusammenhang von LP - Größe und Temperaturprofil

Weiteres Ergebnis der Versuche a), b) und c) ist die Eingrenzung der Intervalle für die vorzugebenden Sollwerte an der Lötanlage für Leiterplatten im Doppelpaformat. Die Höhe des Temperaturniveaus kann dabei hauptsächlich über die Transportgeschwindigkeit beeinflusst werden:

- 1: 370 - 390 °C 2: 260 - 280 °C 3: 190 - 240 °C 4: 380 - 390 °C  
 > > > > > TRANSPORTBAND > > > > >  
 5: 370 - 390 °C 6: 240 - 260 °C 7: 170 - 190 °C 8: 380 - 390 °C

#### d) Einfluß der Leiterplattengröße

Aufgrund von Messungen wurde der Zusammenhang von Leiterplattengröße und Temperaturverlauf ermittelt. In Bild 7.15 ist, beispielhaft für drei Formate, dieser Zusammenhang dargestellt. Erwartungsgemäß verlaufen die Profile der größeren Platinen um ein  $\Delta T$  nach unten versetzt, wobei bei verdoppelter Fläche die erreichte Peaktemperatur um ca 5 °C abnimmt.

### 7.4.4 Daten von industriellen Anwendern

Anhand einer Umfrage bei allen industriellen Anwendern<sup>5</sup> von IR - Anlagen des gleichen Typs, konnten zusätzlich zu den experimentellen Ergebnissen die Daten von ca. 100 Leiterplatten bei der Erstellung des Algorithmus berücksichtigt werden. Bild 7.16 zeigt einen Ausschnitt aus den erhaltenen Daten.

Interessante Größen sind dabei jeweils die Strahlertemperaturen und das zugehörige Temperaturprofil sowie die Dicke, das Material und die Geometrie der Leiterplatte. Aus Platzgründen wurde auf die Darstellung der Profile verzichtet. Die Anlagen vom Typ ERS 300 und 350 sind mit nur 3 Strahlerpaaren und einer Vorheizung ausgerüstet. Werte dieser Anlagentypen konnten trotzdem mit berücksichtigt werden, da sie das gleiche Wärmeübertragungsverhalten wie die Maschinen vom Typ ERS 450 aufweisen.

---

<sup>5</sup> Der Autor dankt den Firmen System-Kontakt, ARISTO, Wandel & Goltermann sowie Stephan Elektronik für die Bereitstellung von Daten.

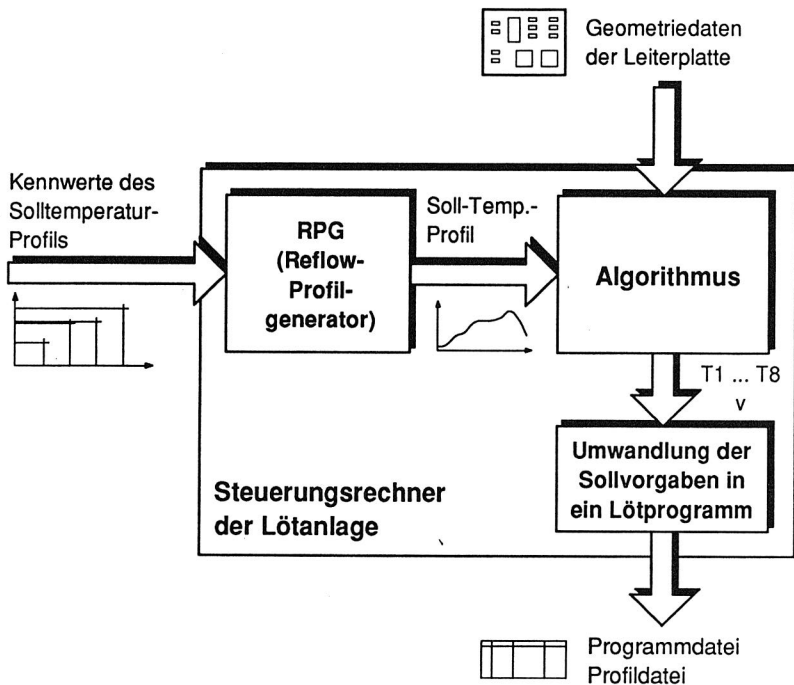
Anlagen- typ	LP- Material	Strahlertemp	Band- geschw.	LP-Größe	1-seitig 2-seitig	Anzahl Lagen
ERS 300	FR 4	370 260 300 399 260 300 399	0,45	130*120 2,5	2	8
ERS 300	FR 4	390 290 320 399 290 320 399	0,45	260*100 3,2	2	0
ERS 300	FR 4	300 220 235 360 220 235 360	0,50	100*100 0,9	2	0
ERS 300	FR 4	300 220 235 360 220 235 360	0,50	160*100 1,2	1	1
ERS 300	FR 4	390 310 345 380 160 270 325	?	226*30 0,15	1	1
ERS 300	Epx	390 260 280 390 260 280 390	0,30	125*270 2,0	1	1
ERS 450	Epx	400 240 230 430 400 220 210 430	0,52	249*145 1,9	1	10
ERS 450	Epx	400 240 230 430 400 220 210 430	0,55	249*145 1,9	1	10
ERS 450	Epx	400 240 230 430 400 220 210 430	1,25	40*15 0,6	1	1
ERS 450	Epx	400 240 230 430 400 220 210 430	0,70	76*76 1,6	1	4
ERS 450	Epx	400 240 230 430 400 220 210 430	0,68	150*95 1,6	1	4
ERS 450	Epx	400 240 230 430 400 220 210 430	0,58	150*95 1,6	1	6
ERS 350	FR 4	350 360 300 300 320 320 320	0,42	160*100 1,6	1	1
ERS 350	FR 4	365 365 280 399 230 255 284	0,52	125*180 2,0	1	4

**Bild 7.16:** Ausschnitt der Leiterplattendaten mit zugehörigen Lötparametern aus der Industrie

## 7.5 Realisierung der CAD / CAM - Verfahrenskette

### 7.5.1 Postprozessor zur Bestimmung der Prozeßparameter

Durch die Umsetzung des gesammelten Wissens in einen Algorithmus<sup>6</sup>, der rechnerintern im Steuerungsrechner der Lötanlage abläuft, wurde eine Bestimmung der leiterplattenspezifischen Lötanlagenvoreinstellungen ermöglicht [21].



**Bild 7.17:** Einbindung des Algorithmus in den Zellenrechner

<sup>6</sup> Bei der Algorithmus-Erstellung wurde der Autor von Herrn cand. Ing. H. Seelmann unterstützt.

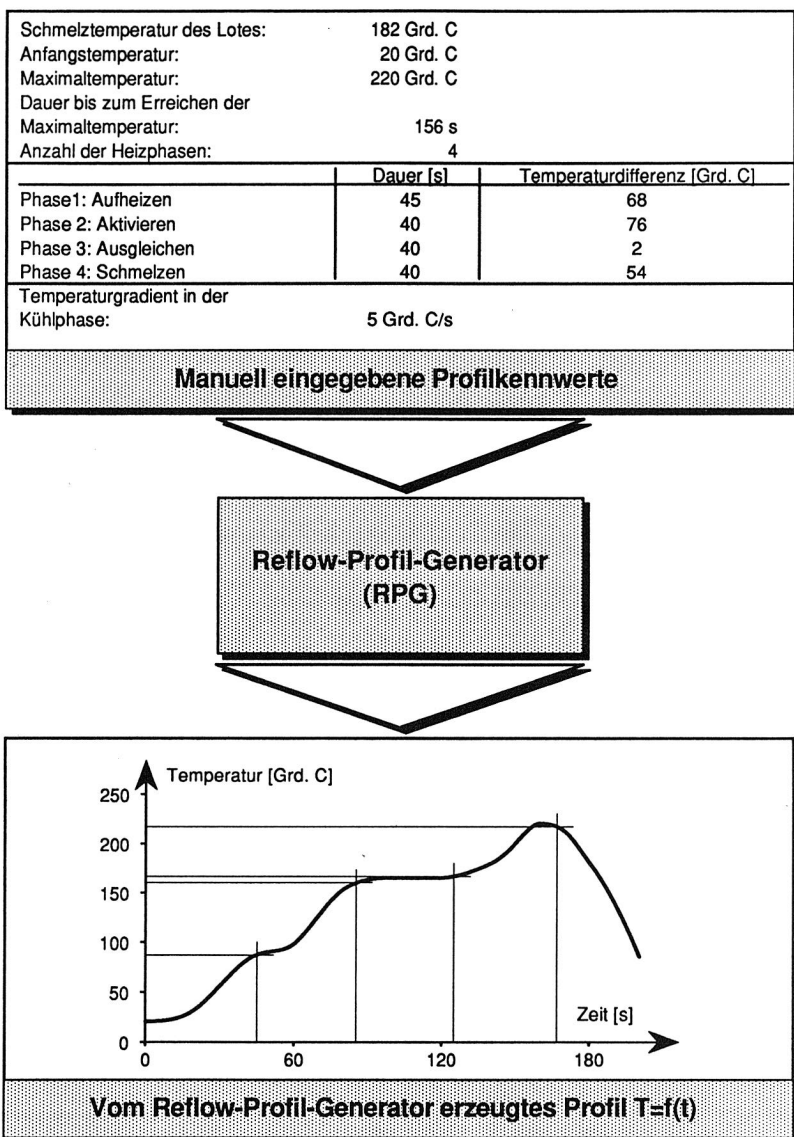
Als Eingabegrößen für den Algorithmus sind Geometrie- und Bestückdaten der Platine sowie das Solltemperaturprofil bereitzustellen (Bild 7.17). Im ersten Schritt erfolgen diese Eingaben über die Tastatur. Nach der Realisierung der CAD / CAM - Verfahrenskette kann die Dateneingabe weitgehend über Datenleitung geschehen. Im sogenannten Reflow - Profil - Generator (RPG) werden die vorgegebenen charakteristischen Kennwerte des Sollprofils in eine Funktion  $T = f(t)$  umgesetzt.

#### a) Der Reflow - Profil - Generator

Im vorhergehenden Kapitel wurde erläutert, wie Temperaturprofile entstehen und wie sie beschrieben werden. Die exakte mathematische Beschreibung des Profils als Funktion der Zeit  $T = f(t)$  würde hohen Aufwand bei der Eingabe erfordern. Es hat sich gezeigt, daß durch Angabe wichtiger Kennwerte, wie z.B. Anfangstemperatur, Dauer einer Phase und Temperaturdifferenz nach Abschluß einer Phase, das zu realisierende Profil ausreichend beschrieben werden kann.

Diese Kennwerte sollten für eine Baugruppe, unabhängig von der Lötanlage, vom Bediener des Programms interaktiv eingegeben und abgespeichert werden können. Über den Reflow - Profil - Generator können charakteristische Werte des angestrebten Profils eingegeben werden. Diese Daten werden rechnerintern aufbereitet und dem im Steuerungsrechner implementierten Algorithmus in der Form  $T = f(t)$  zur Verfügung gestellt.

Im Gegensatz zum RPG arbeitet der Algorithmus lötanlagenspezifisch und setzt das Profil auf die zur Verfügung stehende Lötanlage um. Die Lötanlage bietet aufgrund der vier unterschiedlichen Heizbereiche die Möglichkeit, praktisch jedes sinnvolle Profil zu realisieren. Grenzen sind bei den Strahlertemperaturen gegeben, da die Maximaltemperatur 400 °C beträgt.



**Bild 7.18:** Beispielhafter In- und Output des Reflow - Profil - Generators

Basierend auf den bisherigen Erkenntnissen über die unterschiedlichen Phasen, die während eines Lötprozesses zu berücksichtigen sind, werden folgende Kennwerte festgelegt :

- > Schmelztemperatur der Lotpaste
- > Anfangstemperatur der Baugruppe (Raumtemperatur)
- > Maximale Temperatur auf der Leiterplatte
- > Gesamtzeit bis zum Erreichen des Temperaturpeaks
- > Angabe über die Anzahl der voneinander zu unterscheidenden Phasen
- > Dauer der einzelnen Phasen
- > Temperaturdifferenz zwischen Anfang und Ende einer Phase
- > Temperaturabfall in der Kühlzone

Über den Reflow - Profil - Generator werden die Kennwerte in der Art verarbeitet, daß ein Profil  $T = f(t)$  berechnet wird, das in genau fünf Phasen, entsprechend der Anzahl der vier Heizzonen und einer Kühlzone, unterteilt ist.

Die Bandgeschwindigkeit der Lötanlage kann hierbei sofort aus der Gesamtzeit bis zum Temperaturpeak und der bekannten Prozeßlänge der Anlage berechnet werden. Bild 7.18 zeigt eine beispielhafte Ein- und Ausgabe des Reflow - Profil - Generators.

## b) Der Algorithmus für die unbestückte Leiterplatte

Bei der Realisierung des Algorithmus wurde für die unbestückte Leiterplatte zunächst von physikalischen Gesetzmäßigkeiten ausgegangen, um diese dann mit der Empirik für die bestückte Leiterplatte zu verbinden. Dieses Vorgehen wurde gewählt, da es nicht sinnvoll erscheint, ausschließlich auf Erfahrungswerte zurückzugreifen, um diese dann in einem Algorithmus zu "kaschieren". Vielmehr wurde versucht, trotz der vielen Unregelmäßigkeiten beim Lötprozeß,

eine physikalisch nachweisbare Grundlage, zumindest für die unbestückte Leiterplatte, zu schaffen.

Während des Durchlaufs durch die Lötanlage wird die Leiterplatte aus glasfaserverstärktem Epoxidharz in vier Heizzonen jeweils zwischen zwei IR - Flächenstrahlern erwärmt. Bekannt sind dabei die Transportgeschwindigkeit, die Länge der einzelnen Heizzonen und der Temperaturunterschied, den die Leiterplatte in jeder Heizzone erfährt. Die Heizleistung, die benötigt wird, um eine Platte aus Kunststoff unter diesen Bedingungen um eine gewisse Temperatur zu erwärmen, ist in [73] angegeben.

Die Leistung der IR - Strahler kann über das Stefan - Boltzmann - Gesetz [53] mit

$$P = \sigma \cdot \epsilon \cdot A \cdot T^4$$

angegeben werden. Strahlungskonstante  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W / (K}^4 \cdot \text{m}^2)$

Aus den Beziehungen für den Massenstrom  $m$  auf der Leiterplatte

$$m = b \cdot d \cdot v \cdot \rho$$

und der Heizleistung  $P_H$ , die aufgebracht werden muß, um die Platte zu erwärmen

$$P_H = m \cdot dh$$

und mit den Parametern

- $v$  : Bandgeschwindigkeit [m / s]
- $b$  : Breite der Leiterplatte [m]
- $d$  : Dicke der Leiterplatte [m]
- $\rho$  : Dichte des Leiterplattenmaterials [kg / m<sup>3</sup>]
- $\epsilon$  : Emissionsverhältnis des Strahlers []

- $\sigma$  : Strahlungskonstante [ $\text{W} / (\text{K}^4 \cdot \text{m}^2)$ ]  
 $dh$  : Enthalpie bei einer bestimmten Temperaturdiff. [ $\text{J} / \text{kg}$ ]  
 und  $A_g$  : Gesamtfläche der Strahler [ $\text{m}^2$ ]

berechnet sich die Temperatur eines Strahlers zu:

$$T^4 = \frac{b \cdot d \cdot v \cdot \rho \cdot dh}{\sigma \cdot \epsilon \cdot A}$$

Die spezifische Dichte des Materials ist ebenso bekannt wie die Gesamtfläche eines Strahlerpaares. Dicke und Breite der Leiterplatte wurden manuell eingegeben; die Transportgeschwindigkeit kann aus den Kennwerten des Sollprofils hergeleitet werden. Einzige Unbekannte in der Gleichung sind die spezifische Enthalpie und der Emissionsfaktor.

In der Literatur wurden keine Angaben über den temperaturabhängigen Verlauf der Enthalpie des Materials FR4 gemacht. Es ist lediglich bekannt [73], daß bei Kunststoffen der Verlauf der Enthalpie durch ein Polynom angenähert werden kann, so daß für die spezifische Enthalpie  $h$  bei einer Temperatur  $T$  des Kunststoffes näherungsweise gilt :

$$h(T) = a_0 + a_1 \cdot T + a_2 \cdot T^2$$

Da bereits durch Mitführen eines Meßfühlers während des Durchlaufs Zusammenhänge zwischen der Erwärmung innerhalb einer Heizzone und der dafür aufgebrauchten Strahlungstemperatur bekannt sind, wurden diese Versuche gezielt ausgewertet. Dadurch können als Ergebnis die Parameter  $a_1$  und  $a_2$  angegeben werden. Da die Versuche immer ab einer Mindesttemperatur von 20 Grad Celsius durchgeführt werden, kann die Enthalpie allerdings auch nur bezogen auf diese Anfangstemperatur berechnet werden und enthält auch den Emissionsfaktor, der aber näherungsweise zu eins gesetzt werden kann.

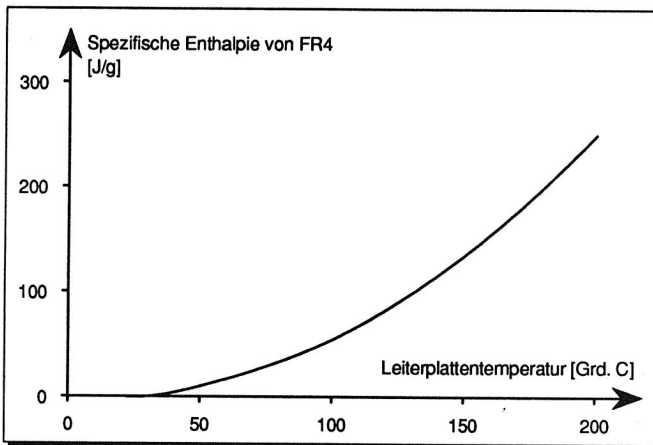
Der Parameter  $a_0$  muß nicht berücksichtigt werden, da sich die Enthalpie bei einer Temperaturerhöhung von  $T_1$  auf  $T_2$  zu

$$dh = h(T_2) - h(T_1)$$

ergibt, und damit der Faktor  $a_0$  wegfällt.

Unter der Annahme, daß die Platine ohne Bestückung die Anlage durchläuft, ist die Berechnung der Strahlertemperaturen somit möglich. Voraussetzung dafür sind die Kennwerte des Profils (Temperaturerhöhung in den einzelnen Heizzonen, Gesamtdurchlaufzeit), die vom Reflow - Profil - Generator ermittelt werden sowie die Geometrie der Leiterplatte.

In Bild 7.19 wird der 'angenäherte' Verlauf der spezifischen Enthalpie von glasfaserverstärktem Epoxidharz dargestellt. Der gezeigte Verlauf der Enthalpie für FR 4 wird im Rechner abgelegt und zur Berechnung der Prozeßparameter für die unbestückte Leiterplatte vom Postprozessor aufgerufen.

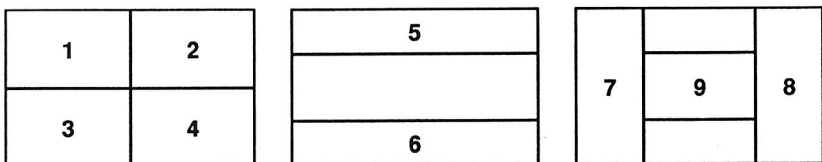


**Bild 7.19:** Spezifische Enthalpie  $h$  in Abhängigkeit von der Temperatur  $T$

### c) Algorithmus für die bestückte Leiterplatte

Der erstellte Algorithmus für die unbestückte Leiterplatte mußte insofern erweitert werden, als die Bauelemente auf der Platine Berücksichtigung finden, und folglich die Prozeßparameter entsprechend angeglichen werden. Das Istlötprofil wird u.a. auch von der Anzahl, der Art (unterschiedliche Wärmekapazitäten, unterschiedliche Kontaktanschlüsse) und der Position der Bauelemente beeinflusst. Das ideale Temperaturprofil muß unabhängig vom Leiterplattenvolumen, von Art und Position der Bauelemente immer eingehalten werden.

Bei fest eingestellten Prozeßparametern ergeben aber unterschiedliche Bestückungen oder unterschiedliche Leiterplatten auch unterschiedliche Isttemperaturprofile, d.h. es besteht die Gefahr eines schlechten Lötergebnisses, falls die Prozeßparameter nicht den Veränderungen am Lötgut angepaßt werden. Hier fließen die in Kapitel 7.4.3 gewonnen Erkenntnisse ein. Die Leiterplatte wird dazu in 9 Zonen, die sich teilweise auch überlappen können, eingeteilt (Bild 7.20).



**Bild 7.20:** Aufteilung der Leiterplatte in 9 Bereiche

Bei der Anwendung des Algorithmus wird der Bearbeiter interaktiv nach Bestückdichte, Bauelementverteilung und der Zone höchster Bestückkonzentration gefragt. Der Benutzer kann die Antworten nur durch Betrachten der Baugruppe eingeben, und Voraussetzung ist natürlich, daß die Wirkung der verschiedenen Bauelemente gut abgeschätzt werden kann. Entsprechend den

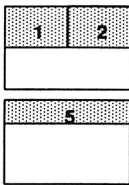
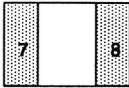
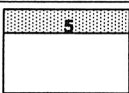
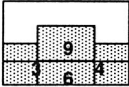
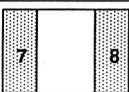
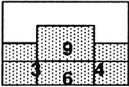
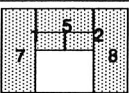
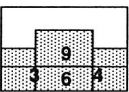
Ergebnissen dieser Berechnungen werden die Sollwerte für die Strahlertemperaturen und die Transportgeschwindigkeit korrigiert. Durch Versuche mit einer Leiterplatte im Doppelpakartenformat wurden z.B. die Auswirkungen bei Änderungen der Bestückdichte festgestellt und die Prozeßparameter an der Lötanlage dementsprechend verändert. Dies ist ein für jede Lötanlage spezifischer Vorgang, da sich die Ergebnisse der Versuche nur auf die jeweils vorhandene Lötanlage anwenden lassen.

Aus den experimentellen Arbeiten können aber auch noch einige andere, wichtige Resultate herausgelesen werden, die für den Postprozessor als Grundlage dienen:

- > Die Temperatur im Innern der Bauelemente ist deutlich niedriger als auf der Oberfläche der Leiterplatte.
- > Quer zur Durchlaufrichtung ist auf der Leiterplatte kein wesentlicher Temperaturunterschied festzustellen.
- > In Durchlaufrichtung ergibt sich bei unbestückter Platine auf eine Länge von 20 cm ein Temperaturunterschied von 10 Celsius.
- > Bei gleich eingestellten Prozeßparametern besteht kein qualitativer Unterschied zwischen leerer und voll bestückter Platine. Einzig das Temperaturniveau wird angehoben bzw. abgesenkt.
- > Die Höhe des Temperaturniveaus kann sehr gut über die Bandgeschwindigkeit gesteuert werden. Die Strahlersollwerte müssen somit nicht allzusehr variiert werden, wenn das Profil qualitativ gleich bleiben soll.

Als optimal hat es sich erwiesen, wenn die Temperaturen der unteren Flächenstrahler in folgendem Zusammenhang mit den oberen Flächenstrahlern stehen:

- > Die Strahlerpaare 1 und 5 bzw. 4 und 8 besitzen jeweils dieselbe Temperatur.
- > Die Temperaturen der Strahler 6 und 7 sind um 20 Grad niedriger einzustellen, als die dazugehörigen oberen Strahler 2 und 3.

Bestückdichte	Verteilung	Bereiche	Sollwerte
kaum bestückt	konzentriert  teilweise konzentriert		Strahler 1&5: + 0 Grd 2&6: + 0 Grd 3&7: + 0 Grd 4&8: + 0 Grd v Band - 0 m/min
kaum bestückt	konzentriert teilweise konz.		Strahler 1&5: + 5 Grd 2&6: + 5 Grd 3&7: + 5 Grd 4&8: + 2,5 Grd v Band - 0,02 m/min
	gleichm. verteilt		
zur Hälfte bestückt	konzentriert teilweise konz.		
kaum bestückt	konzentriert teilweise konz.		Strahler 1&5: + 10 Grd 2&6: + 10 Grd 3&7: + 10 Grd 4&8: + 5 Grd v Band: - 0,04 m/min
	gleichm. verteilt		
zur Hälfte bestückt	konzentriert teilweise konz.		
zur Hälfte bestückt	konzentriert teilweise konz.		Strahler 1&5: + 15 Grd 2&6: + 15 Grd 3&7: + 15 Grd 4&8: + 7,5 Grd v Band: - 0,06 m/min
	gleichm. verteilt		
stark bestückt	konzentriert teilweise konz.		
stark bestückt	konzentriert teilweise konz.		Strahler 1&5: + 20 Grd 2&6: + 20 Grd 3&7: + 20 Grd 4&8: + 10 Grd v Band: - 0,08 m/min
stark bestückt	gleichm. verteilt		

**Bild 7.21:** Veränderung der Prozeßparameter bei Variation von Bestückdichte und Bauelementverteilung

Deshalb ist es ausreichend, im folgenden die Werte der oberen Strahlertemperaturen anzugeben. Die übrigen Werte ergeben sich dann aus obigem Zusammenhang. Je nach Bestückdichte, Verteilung der Bauelemente und den Bereichen eventuell höherer Konzentration der Bauelemente werden die Prozeßparameter, wie in Bild 7.21 dargestellt, verändert.

Aus Eingabewerten des Leiterplattenlayouts werden signifikante Werte errechnet und nach Festlegung eines entsprechenden Kriteriums entschieden, wann eine Leiterplatte als kaum oder stark bestückt gilt, und welche Faktoren bei der Verteilung berücksichtigt werden müssen. Unter Bezugnahme auf das Layout und der Bestückdichte in den neun Bereichen berechnet der Postprozessor folgende Werte:

- > Fläche der Leiterplatte
- > Gesamtfläche der Bauelemente
- > Gesamtvolumen der Bauelemente
- > Fläche je Bereich
- > Fläche der Bauelemente je Bereich
- > Volumen der Bauelemente je Bereich

Daraus können Kennwerte abgeleitet werden, die ein Kriterium für die Dichte, die Verteilung u.s.w. darstellen. Bei der Bestückdichte wird zwischen kaum bestückt, etwa zur Hälfte bestückt und stark bestückt unterschieden. Die Bestückdichte kann nicht allein aufgrund der von den Bauelementen bedeckten Fläche berechnet werden, da sehr viele kleinere Chips eine andere Wirkung auf das Istprofil haben als einige größere Bauteile. Folglich muß das Gesamtvolumen der Bauelemente in Betracht gezogen werden.

Die Bestückdichte wird somit aus folgendem Verhältnis hergeleitet: Gesamtvolumen der Bauelemente / Gesamtfläche der Leiterplatte. Die Bauelemente können auf der Leiterplatte konzentriert, teilweise konzentriert oder gleichmäßig verteilt sein. Dazu wurde, wie oben bereits erwähnt, die Platine in neun

Zonen eingeteilt. Für jede Zone berechnet der Postprozessor die Fläche des Bereichs und das Volumen der Bauelemente in dieser Zone. Ist die Dichte in einem Bereich deutlich höher als die Dichte der gesamten Leiterplatte, so wird eine Konzentration der Bauelemente in diesem Bereich vorausgesetzt. Tritt dies in mehreren Zonen auf, geht man von einer teilweisen Konzentration aus. Kann sich die Dichte in keinem Bereich von der übrigen Dichte abheben, wird eine gleichmäßige Verteilung der Bauelemente auf der Platine angenommen.

Für den Fall der Konzentration oder der teilweisen Konzentration wird noch die Zone der höchsten Konzentration bestimmt und es erfolgt aufgrund dieser Berechnungen eine Korrektur der Prozeßparameter. Bei den Berechnungen der erforderlichen Strahlertemperaturen für ein vorgegebenes Temperaturprofil in Verbindung mit einer bestimmten Leiterplatte kann es mitunter vorkommen, daß Strahlertemperaturen oberhalb der Maximaltemperatur theoretisch bestimmt werden.

Die Dauer bis zum Erreichen der Maximaltemperatur wurde dann für den Reflow - Profil - Generator zu kurz vorgegeben bzw. die Transportgeschwindigkeit zu hoch angesetzt. In diesem Fall wird vom Algorithmus die Bandgeschwindigkeit entsprechend niedriger bestimmt, um die erforderliche Wärmeenergie bei Maximaltemperatur der Strahlerpaare 1 und 4 auf den Löstellen aufbringen zu können. D.h. das vom RPG erzeugte Profil wird gestreckt bzw. gestaucht.

## **7.5.2 Umsetzung in eine Verfahrenskette**

Insbesondere für Elektronikbaugruppenfertigungen mit kurzen Produktzyklen, kleinen Losgrößen und großer Typenvielfalt würde die automatisierte Eingabemöglichkeit der Leiterplattendaten und der Bestückpositionen mit den zugehörigen Gehäusetypen in den Zellenrechner der Lötanlage große Arbeitserleichterung darstellen. Dadurch könnten redundante Arbeiten vermieden

werden, da die erforderlichen Daten bereits bei der Festlegung des Layouts der Leiterplatte am ECAD - System eingegeben werden müssen und somit als Datei vorliegen.

Ein CAD - Leiterplattenlayout kann unterschiedlich strukturiert werden, d.h. die einzelnen Bestandteile eines Layouts können nicht nur aus grafischen Grundelementen, sondern auch aus Gruppen (Sammlungen, Bibliothekselementen), Ebenen und Kombinationen bestehen. Dieses Vorgehen ermöglicht nach der Konstruktion eine gruppenweise Selektion der Daten, damit sie für nachgeschaltete Arbeitsschritte, wie z.B. Bohren, Bestücken, Löten getrennt zur Verfügung stehen.

Bei der Layouterstellung werden die Namen der Bibliothekselemente in das Layout mit entsprechender Lage und Orientierung eingefügt. Die Vorgehensweise der hierarchischen Strukturierung einer Zeichnung hat den Vorteil, daß redundante Datenhaltung vermieden wird. Je nach Fertigungsschritt müssen die Daten aus dem Layout extrahiert und entsprechend des vereinbarten Formats aufbereitet werden. Normale Layouts werden im Binärcode als Archivfile auf dem Massenspeicher abgelegt, was den Vorteil des schnellen Zugriffs hat. Nachteilig gestaltet sich die Datenaufbereitung dieser Dateien, da dieses Format nur mit speziellen Prozeduren zu entschlüsseln ist. Deshalb hat sich das textuelle ASCII - Format bei vielen CAD - Systemen als Zwischenformat eingebürgert.

Das Layout muß in den CAD - Arbeitsspeicher geladen und der Archivfileprozessor muß gestartet werden, um die oben erwähnte textuelle Zwischendatei zu erhalten. Anschließend extrahiert ein Postprozessor die notwendigen Daten und erzeugt eine spezielle Austauschdatei, die für jedes Fertigungsmittel (Bestücker, Lötmaschine, Testeinrichtung) entsprechend generiert werden muß. Neben den Bestückpositionen werden auch die Daten über die Geometrie der Leiterplatte an der Lötmaschine benötigt. Diese Daten können in ähnlicher Weise aus dem CAD gewonnen werden.

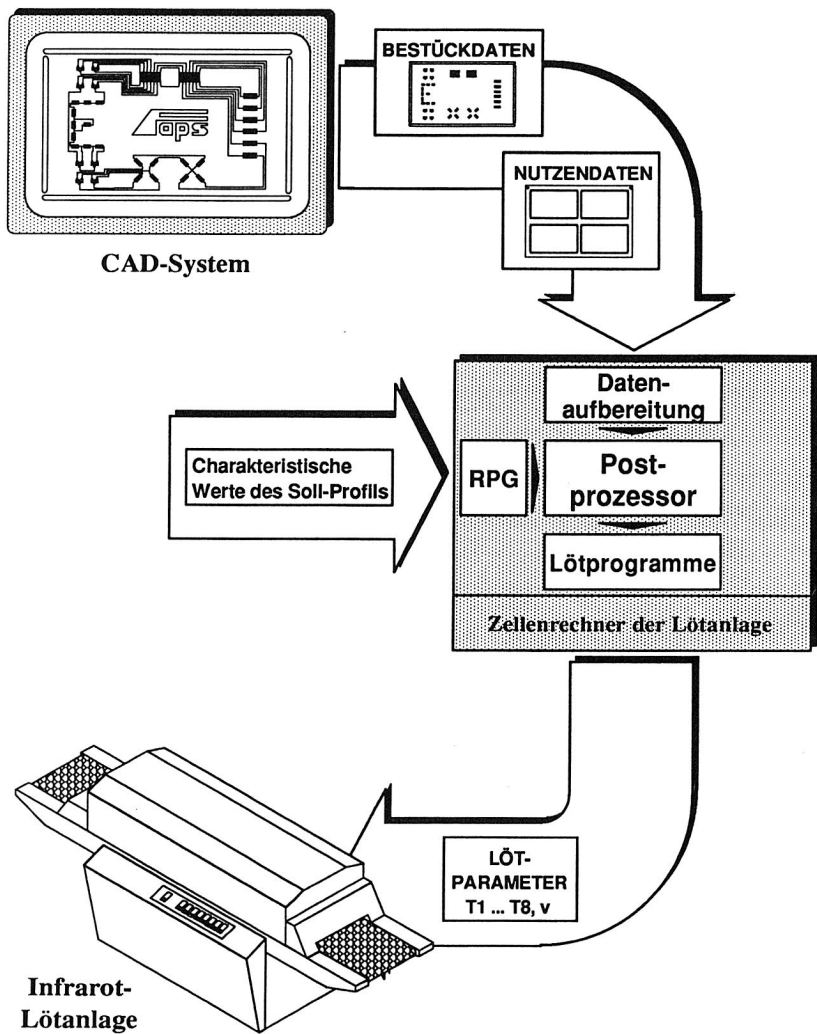


Bild 7.22: CAD / CAM - Verfahrenskette für das Infrarotlöten

## a) Konzept der realisierten CAD / CAM - Kopplung

In Bild 7.22 ist das Konzept der realisierten CAD / CAM - Kopplung für das IR - Löten dargestellt. Als CAD - System kommt das HP - EGS - System von Hewlett Packard zum Einsatz, das von Siemens durch eine SMD - Bauelementebibliothek und eine entsprechende Menüanpassung ergänzt bzw. modifiziert worden ist. Die Hardware besteht aus einer Workstation HP 9000 mit entsprechender Peripherie. Ein von HP speziell entwickelter Postprozessor generiert aus den CAD - Daten eine entsprechende Datei, die die Bestückpositionen enthält.

Als Softwarebindeglied zwischen CAD - Workstation und dem Zellenrechner der Lötanlage kommt das speziell entwickelte Kommunikationsprogramm CAD\_CAM<sup>7</sup> zum Einsatz, das ursprünglich für die Kopplung vom ECAD - System zur Bestückmaschine diente. Hardwaremäßig handelt es sich um eine reine Zweipunktverbindung, die über eine V24 / RS 232 - Schnittstelle hergestellt wird. Nach erfolgter Datenübertragung sind die erforderlichen Daten am PC der Lötanlage verfügbar und können weiterverarbeitet werden.

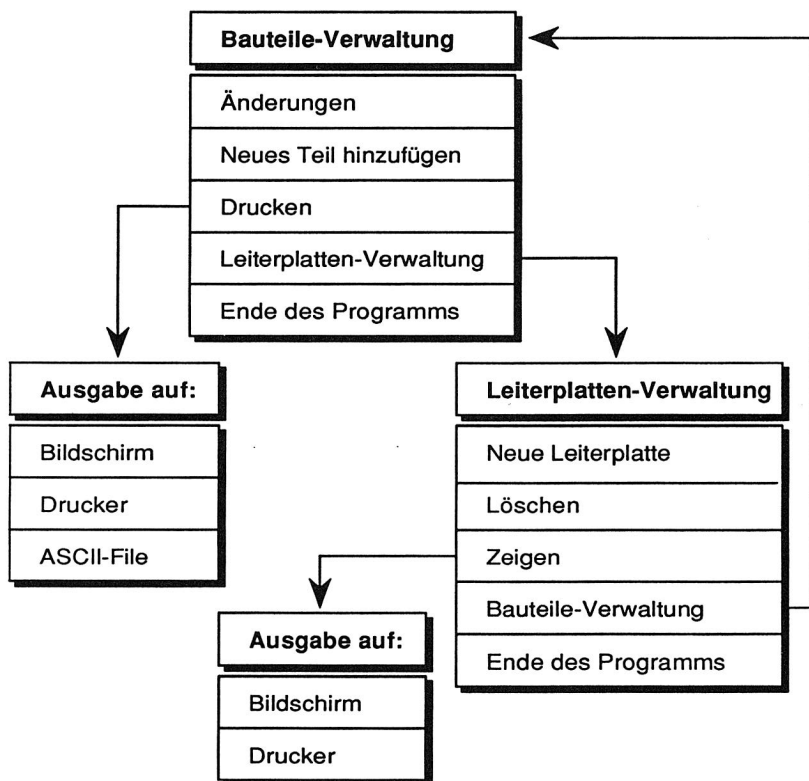
Da in der übertragenen Bauelementedatei lediglich die Koordinaten, der Bestückwinkel und die Gehäuseform vorliegen, müssen die jeweiligen Datensätze um Informationen über die geometrischen Abmessungen der Gehäusetypen erweitert werden, bevor die Daten als Input für den Algorithmus (Postprozessor) dienen können. Die manuell einzugebenden maßgeblichen Werte des Sollprofils werden im Reflow - Profil - Generator aufbereitet und stehen dann als Eingabegröße für den Postprozessor zur Verfügung. Nach erfolgreichem Postprozessing wird das Lötprogramm mit Sollvorgaben für die Strahlertemperaturen und die Durchlaufgeschwindigkeit in einer Datei abgelegt. Diese kann dann mit der mitgelieferten Lötanlagensoftware aufgerufen werden.

---

<sup>7</sup> Bei der Erstellung des Kommunikationsprogramms CAD\_CAM wurde der Autor von Herrn cand. Ing. M. Flohr unterstützt.

## b) Aufbereitung der übertragenen CAD - Daten

Zur Aufbereitung der übertragenen CAD - Daten dient ein spezielles Programm<sup>8</sup>, das die Datei um wichtige Größen ergänzt.



**Bild 7.23:** Menüüberblick zur PC - internen Bauelementeverwaltung

<sup>8</sup> Bei der Erstellung des Programms wurde der Autor von Herrn cand. Inf. G. Wörlein unterstützt.

Dazu wurde rechnerintern eine Datenbank angelegt, in der zu den gängigen Bauelementtypen geometrische Kenngrößen, wie Grundfläche und Höhe, abgelegt sind. Die Prozedur des Zuordnens der geometrischen Daten zu den jeweiligen Bauelementtypen läuft automatisch bei Aufruf des Postprozessors (Algorithmus) ab.

Da vom CAD - System auch keine Informationen über die Dicke und das Material der Leiterplatte geliefert werden, müssen die Daten manuell am PC eingegeben werden. Diese leiterplattenspezifischen Daten (Größe, Dicke, Material, Beschichtung) werden als Datei gespeichert. Bei Aufruf des Postprozessors kann diese Datei direkt mit angegeben werden. Das Menü des Programms zur PC - internen Bauteile- und Leiterplattenverwaltung ist in Bild 7.23 dargestellt.

### c) Postprocessing der Daten

Bevor der Postprozessor gestartet werden kann, müssen folgende Schritte ausgeführt sein:

- > Übertragung der CAD - Daten vom ECAD - System zum Steuerungsrechner der Lötanlage.
- > Aufbereitung der CAD - Daten.
- > Eingabe von Sollprofilkennwerten

Nach Aufruf des Postprozessors am PC der Lötanlage erscheint die in Bild 7.24 dargestellte Menüleiste. Zur optischen Kontrolle der CAD - Daten dient eine schematische Darstellung des Leiterplattenlayouts. Im nächsten Schritt werden die Kennwerte des Solltemperaturprofils durch den RPG verarbeitet. Im Hauptmenü kann nun entweder der Algorithmus gestartet (F3) oder zuerst das Solltemperaturprofil am Bildschirm grafisch dargestellt werden (F4). Der Algorithmus berechnet die Prozeßparameter zuerst für die unbestückte Leiterplatte

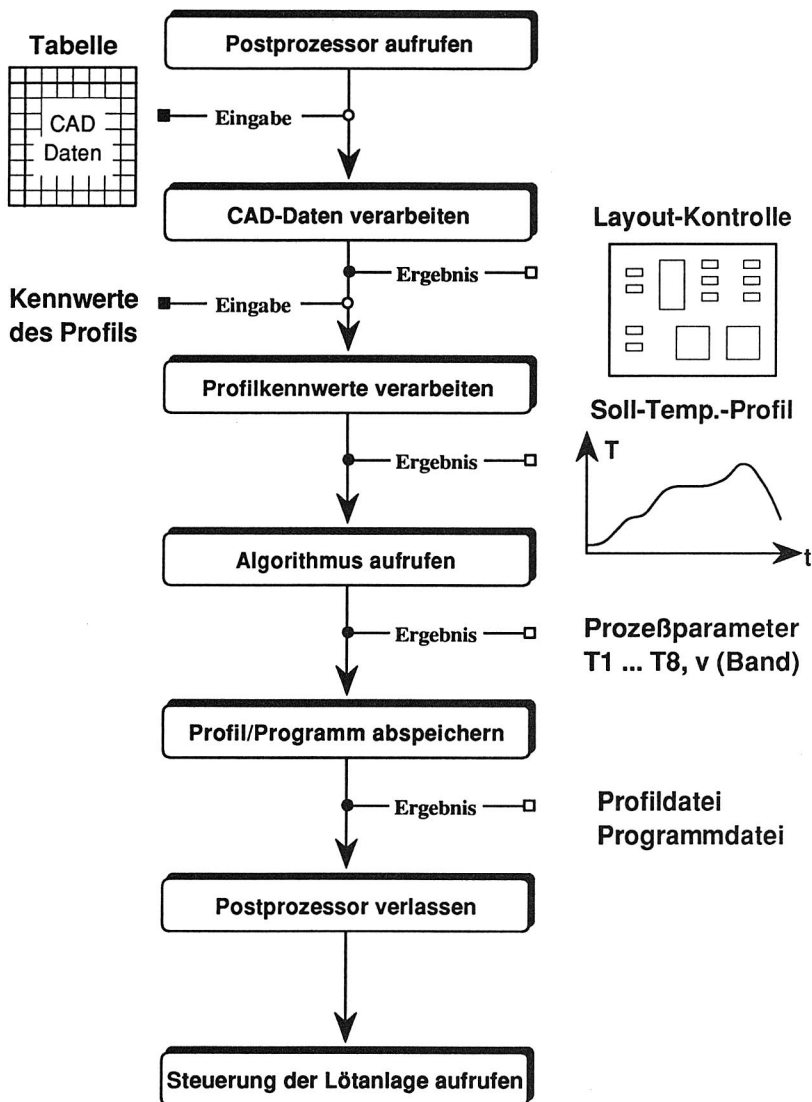
und danach unter Einbeziehung der Bestückung. Zu Beginn wird der Verlauf der Enthalpie des Materials FR4 in einer Grafik angezeigt. Nach Drücken der Taste <ESC> werden in derselben Grafik zusätzlich noch die Enthalpiewerte in Abhängigkeit der Temperaturen am Ende der vier Heizzonen für das aktuelle Temperaturprofil durch Linien markiert.

<b>F1</b>	<b>F2</b>	<b>F3</b>	<b>F5</b>	<b>F6</b>	<b>F7</b>	<b>F8</b>	<b>F9</b>	<b>F10</b>
<b>CAD</b>	<b>RPG</b>	<b>ALGO</b>	<b>ZEIGEN</b>	<b>PROFIL</b>	<b>INFO</b>	<b>LAUF</b>	<b>STOP</b>	<b>ENDE</b>

Bild 7.24: Menüleiste des Postprozessors

Danach erfolgt die numerische Ausgabe der Prozeßparameter für die unbestückte Leiterplatte. Diese Werte dienen allerdings nur als Zwischenergebnis. Im nächsten Schritt werden die CAD - Daten der Baugruppe einbezogen und die zur Anwendung des erweiterten Algorithmus wichtigen Daten, wie z.B. Bestückdichte innerhalb eines Bereiches der Leiterplatte u.s.w., aufgelistet. Im Anschluß daran werden die endgültigen Prozeßparameter durch Korrektur der bereits vorliegenden Werte ermittelt und angezeigt. Vor dem Abspeichern des Profils und der Prozeßparameter in der Programmdatei und der Profildatei sollte man sich durch Aufruf der Funktion "Zeigen" (F4), einen Überblick über das Temperaturprofil und die dazugehörigen Prozeßparameter verschaffen.

Diese Einstellung kann nach Aufruf des Menüpunktes "PROFIL" (F5) in Form einer Programm- und Profildatei abgespeichert werden. Neben der Sicherung der aktuellen Werte, besteht in diesem Menüpunkt auch die Möglichkeit, ein bereits erstelltes Profil einzulesen. Nachdem Profil und Prozeßparameter erfolgreich in den entsprechenden Dateien abgelegt wurden, kann das Programm durch Anwählen des Menüpunktes "ENDE" (F10) verlassen werden. Bild 7.25 gibt eine Zusammenfassung der bisher beschriebenen Vorgehensweise.



**Bild 7.25:** Schrittweises Vorgehen bei der Erstellung einer Profil- und Programmdatei für die Lötanlage

Der Postprozessor bietet dem Anwender noch einige zusätzliche Funktionen: Der Menüpunkt "DATAPAQ" (F6) erlaubt das Laden von Temperaturprofilen, inklusive der Einstellung der Prozeßparameter, die von dem 4 - Kanal - Temperaturschreiber "DATAPAQ" aufgezeichnet wurden. Eine kurze Einführung in das Programm bietet der Menüpunkt "INFO" (F7) an. Wird das aktuelle Profil am Bildschirm dargestellt, kann durch den Menüpunkt "TEST" (F8) ein simulierter Durchlauf der Leiterplatte durch die Anlage am Rechner beobachtet werden.

Nach Verlassen des Programms ist die Steuerung der Lötanlage aufzurufen und die vom Postprozessor erzeugten Dateien sind zu laden.

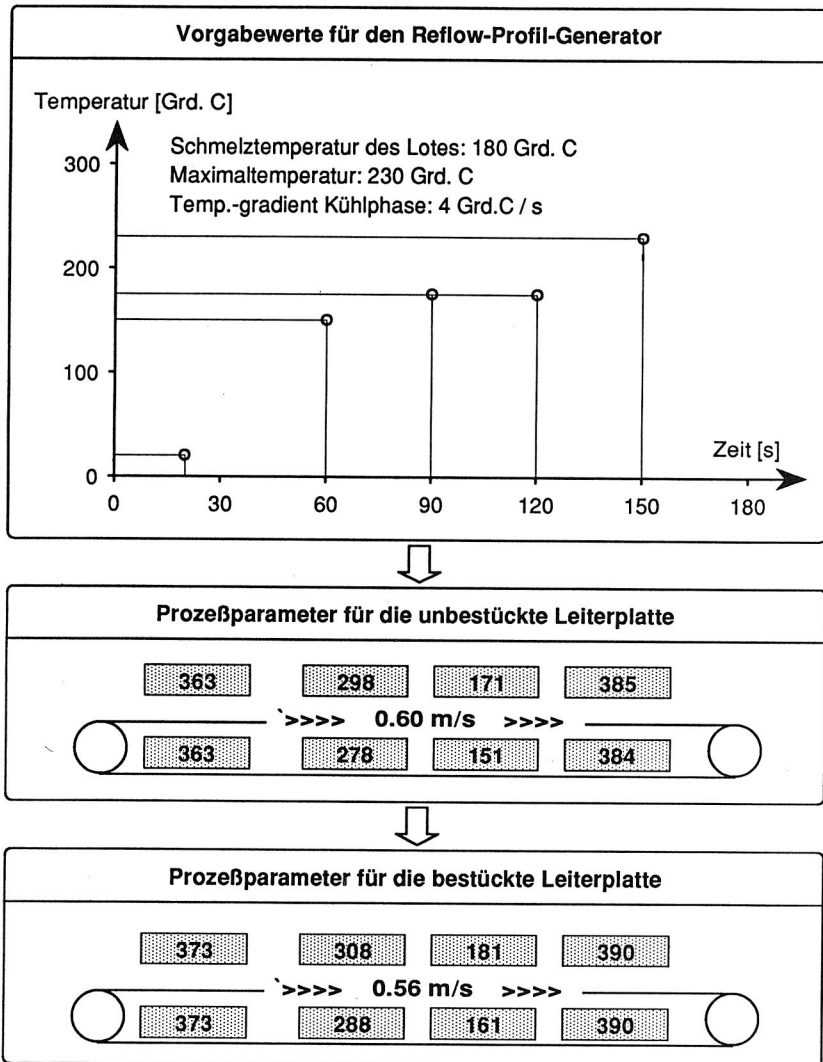
### **7.5.3 Testphase und Ergebnisdiskussion**

Im Folgenden wird anhand eines konkret durchgeführten Beispiels die Funktionsfähigkeit des Postprozessors aufgezeigt: Gewählt wird hierzu eine Leiterplatte im Doppelleuropaformat aus FR4 mit der Dicke 1,5 mm. Die Platine im 8 - fach Nutzen trägt acht Schaltungen für einen Spannungstester. Folgende Bauelemente werden bestückt: 24 MELFs, 16 mini-MELFs, 8 SO6, 40 SOT23 und 8 Potentiometer. Die Bauelemente bedecken 2,14 % der Leiterplattenfläche (991 mm<sup>2</sup>).

Die Eckdaten für das zu realisierende Temperaturprofil, die vom Reflow - Profil - Generators zu einem kontinuierlichen Sollprofil umgewandelt werden, sind in Bild 7.26 dargestellt.

Die aufgrund dieser Eingabewerte berechneten Prozeßparameter für die unbestückte Leiterplatte sind auch dieser Abbildung zu entnehmen. Unter Berücksichtigung der bestückten Bauelemente ergeben sich zu diesen Vorgabewerten die in Bild 7.26 unten festgehaltenen korrigierten Werte. Hierzu wird die von Bauelementen bedeckte Fläche, das Volumen der bestückten Bau-

elemente und die Zone mit der höchsten Bestückdichte auf der Grundlage der rechnerinternen Bauelementedatenbank berechnet.



**Bild 7.26:** Beispielhafte Anwendung des Postprozessors

Bild 7.27 zeigt den Vergleich des Sollprofils mit dem tatsächlich gemessenen Temperaturverlauf.

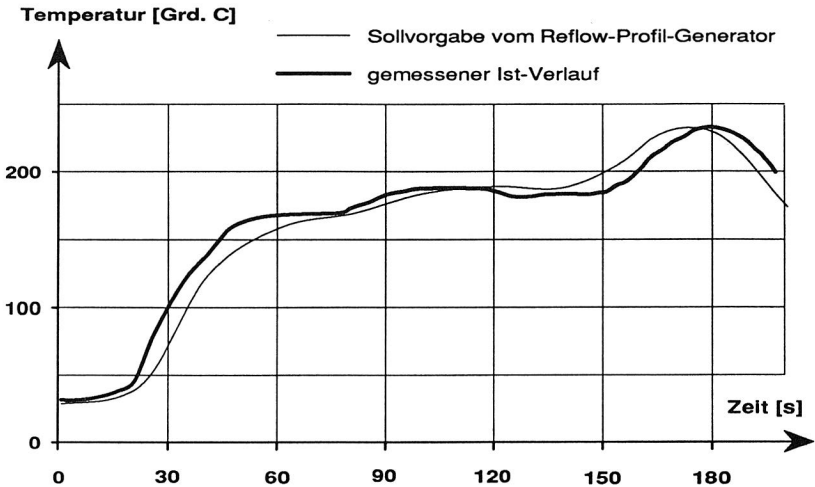


Bild 7.27: Vergleich von Ist- und Sollprofil

Der Postprozessor wurde laufend anhand von Versuchsergebnissen optimiert. Durch Vergleich der Ist- mit der vorgegebenen Solltemperaturkurve für unterschiedliche Leiterplattentypen konnten festgestellte Abweichungen direkt in eine Verbesserung des Algorithmus einfließen.

Bei der endgültigen Algorithmusfassung weicht das tatsächliche Istprofil vom vorgegebenen Sollprofil in der kritischsten Region der Leiterplatte um höchstens 5 °C ab. Damit kann die Anzahl der erforderlichen Lötversuche auf ein Minimum beschränkt werden. Bei sehr komplexen Platinen mit hoher Bestückdichte und vielen sehr eng zusammenliegenden hochpoligen Bauelementen können unter Umständen mehrere Versuche nötig werden. Die Anzahl der Versuche bleibt jedoch deutlich geringer. Vor allem für Neueinsteiger in die SMT bietet der Postprozessor Hilfestellung bei der Bestimmung der Lötparameter.

Dieser Algorithmus ist ohne großen Aufwand auf andere IR - Anlagen zu portieren. Es müssen dazu lediglich die beschriebenen Versuche mit Parametervariation gefahren werden, um die Charakteristika der jeweiligen Lötanlage in dem Algorithmus berücksichtigen zu können (z.B. Quertemperaturverlauf). Im vorliegenden Fall wurde der Algorithmus aus naheliegenden Gründen an der Anlage, die im Labor zur Verfügung stand, realisiert.

## 8 Zusammenfassung

Schaltungen auf Leiterplattenbasis können durch die Einführung der SMD - Technik wesentlich komplexer auf engstem Raum realisiert werden, als dies bei der bedrahteten Technik möglich war. Die Entwicklungen auf dem Gebiet der Bauelemente, insbesondere bei kundenspezifischen Schaltkreisen (ASIC's), bedingen Gehäuse mit zum Teil über 200 Anschlüssen. Das verdrahtungstechnische Problem, das dadurch hervorgerufen wird, kann nur durch Einsatz der Multilayertechnik gelöst werden. Für die Lösung der resultierenden verbindungstechnischen Problematik stehen jedoch weiterhin nur die beiden Leiterplattenoberseiten zur Verfügung.

Die steigende Anzahl der Lötstellen pro Leiterplatte, die Miniaturisierung der Anschlußbeinchenrastermaße, die Ausweitung der Bauelementevarianten und die zunehmende Bestückdichte stellen immer höhere Anforderungen an die Verfahren und Fertigungsmittel zur Verbindungstechnik. Andererseits besteht auch in der Elektronikfertigung der Trend zu kleineren Losgrößen und kürzeren Produktzyklen. Deshalb wird in der vorliegenden Arbeit die Verbindungstechnik in der SMT im Hinblick auf die steigenden Anforderungen aufgegriffen.

Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung, die Realisierung und die Erprobung von Lösungen zu verbindungstechnischen Problematiken in der SMT. Es sollten hierbei insbesondere fertigungstechnische Aspekte für die Planung und den Einsatz von Fertigungsmitteln in der Verbindungstechnik berücksichtigt werden.

Als Konsequenz aus den neuen Entwicklungen auf dem Gebiet des Lotpastenauftrags und der damit verbundenen Unsicherheit in den Industrieunternehmen, wurde das Programm "PASTE" entwickelt. In diesem Kapitel wird der Aufbau und die Leistungsfähigkeit des Programms beschrieben und

an einem konkreten Einsatzfall demonstriert. Die Ergebnisse lassen den Schluß zu, daß die Dispenstechnik als Alternative zum Siebdruck in Zukunft an Bedeutung gewinnen wird, da sie bei hochflexibler Fertigung wirtschaftlich angewendet werden kann.

Die rechnergestützte Auswahl von Lötanlagen ermöglicht die Vorselektion der am Markt befindlichen Anlagen für ein spezifisches Platinenspektrum. Durch die Realisierung dieses Moduls können, nachdem die rechnergestützte Auswahl von Bestückautomaten und Siebdruckern vom Autor schon implementiert wurden, komplette SMD - Linien anhand eines vorgegebenen Pflichtenheftes PC - gestützt konfiguriert werden.

In der Elektronikproduktion werden eine Reihe von CAD / CAM - Verfahrensketten, z.B. für die Maskenerstellung, schon erfolgreich eingesetzt. Ein Defizit bestand noch für das IR - Löten, da die zur Bestimmung der Lötparameter benötigten Layoutinformationen ohne Rechnerkopplung manuell eingegeben werden mußten. Die Realisierung der Kopplung vom CAD - System zur Lötanlage sowie der implementierte Algorithmus zur Berechnung der Lötparameter für ein vorgegebenes Temperaturprofil werden ausführlich beschrieben. Dadurch kann die Anzahl der erforderlichen Lötversuche auf ein Minimum beschränkt werden.

Diese Arbeit soll weiterhin motivieren und ermutigen, die entwickelten Werkzeuge in industriell einsetzbare Lösungen zu übertragen, da bei konsequenter Anwendung in der Arbeitsplanung und in der Fertigung erhebliche Rationalisierungseffekte erzielt werden könnten.

## 9 Literaturverzeichnis

- 1 Avramescu, S. The Evolution in Reflow Soldering Systems. Circuits Manufacturing 29 (1989) 11, S. 28-33
- 2 Beine, H. Löten mit Profil: Rechneinsatz beim IR-Reflow-löten. Productronic 8 (1988) 7/8, Hüthig Verlag, Heidelberg, S. 42-44
- 3 Bensieck, H. J.  
Warncke, H.-H. SMD-Löten: Lötbarkeit, Lötverfahren, Lötfehler, Kriterien für gute Lötverbindungen. Technische Information der Fa. VALVO GmbH, Hamburg 1988
- 4 Brown, D.  
Bracken, J.  
Manna, A. SMT growth. The Electronics Assembly Handbook, Hrsg.: F. Riley, Springer Verlag, London 1988
- 5 Dalderup, M.J.  
Keil, F.G. Wellenlöten von gemischt bestückten Baugruppen unter Schutzgas. Productronic 9 (1989) 11, Hüthig Verlag, Heidelberg, S. 34-37
- 6 Diehm, R. Prozeßgesteuerte Erwärmungseinrichtung / Flexibler Reflow-Ofen. SMT/ASIC/Hybrid 1990, Hrsg.: H. Reichl, A. Eder und M. Bleicher, Hüthig Verlag, Heidelberg 1990
- 7 Diehm, R. Wellen-, Infrarot- und Dampfphasenlöten im Vergleich. Productronic 10 (1990) 4, Hüthig Verlag, Heidelberg, S. 16-24
- 8 Dorbath, B.  
Hennemann, O. Elektrisch leitendes Kleben in der Elektronik. Verbindungstechnik in der Elektronik, DVS-Berichte Band 129, Düsseldorf 1990

- 9     Dorbath, B.           Materialentwicklung für die Anwendung von Leitlebern. AVT-Report, Nr. 2, S. 24-39, Hrsg.: VDI/VDE-Technologiezentrum Informationstechnik GmbH, Berlin 1990
  
- 10    Duhm, E.-J.          Infrarot-Reflow-Löten in der SMD-Technik. Feinwerktechnik und Meßtechnik 97 (1989) 5, S. 215-217
  
- 11    Eck, B.                Ein Überblick über die Verbindungstechniken in der Mikroelektronik. Verbindungstechnik in der Elektronik, 1 (1989) 4, Deutscher Verband für Schweißtechnik e.V., Düsseldorf, S. 175-179
  
- 12    Feldmann, K.  
      Flohr, R.            Rechnerintegrierte SMD-Bestückung - Forschung für die Praxis. SMD-Magazin 1/90, Hrsg. H. Fischer, Höslwang, S. 34-38
  
- 13    Feldmann, K.  
      Flohr, R.            Richtlinien zur optimalen Auslegung von Bestücksystemen. Leiterplatte '90, VDI-Berichte 805, Band 2, Düsseldorf 1990
  
- 14    Feldmann, K.  
      Eisele, R.  
      Kleineidam, G.       Verfahrenskette zur Planung und Programmierung von Montagezellen. ZWF-CIM, 9 (1987), Hanser Verlag, München, S. 521-527
  
- 15    Feldmann, K.,  
      Franke, J.          Von CAD zu CAM - ein steiniger Weg. Elektronik, 16 (1990), Franzis-Verlag, München, S.48-56
  
- 16    Feldmann, K.  
      Flohr, R.  
      Sturm, J.            Qualitätssicherung durch rechnerintegrierte Produktion in der Elektronik. SMT/ASIC/Hybrid 1990, Hrsg.: H. Reichl, A. Eder und M. Bleicher, Hüthig Verlag, Heidelberg 1990
  
- 17    Flohr, R.             Bestücktechnik: Aufbau und Einsatz von Bestückautomaten. Seminarunterlagen zum CIM-TT-Seminar "Rechnergestützte Produktion in der Elektronik" vom 21.6.89, Erlangen 1989

- 18 Flohr, R. Bestückungsautomaten für SMD und THD. Unterlagen zum VDI-Seminar "Flexibles Bestücken von Leiterplatten" vom 14. + 15.3.90, Fürth 1990
- 19 Flohr, R. Dispensen oder Siebdrucken? Wirtschaftliche Alternativen für den Lotpastenauftrag in der SMT. Technische Rundschau, 83 (1991) 9, Hallwag Verlag, Bern 1991
- 20 Flohr, R. Untersuchungen zur Wirtschaftlichkeit beim Lotpastenauftrag. Tagungsband zum Kongreß AME'91 in Essen, Hrsg.: K. Feldmann, VDE-Verlag, Offenbach 1991
- 21 Flohr, R. CAD/CAM-Verfahrenskette für das Infrarotlöten. Verbindungstechnik in der Elektronik, 3 (1991) 2, DVS-Verlag, Düsseldorf, S. 67 - 73
- 22 Friedrich, D. Ein neues Verfahren zum Tauchbeloten von Leiterplatten für das Reflowlöten von SMD-Baugruppen. Verbindungstechnik in der Elektronik, DVS-Berichte Band 129, Düsseldorf 1990
- 23 Friedrich, D. OPTIPAD. Leiterplatte '90, VDI-Berichte 805, Band 2, Düsseldorf 1990
- 24 Friedrich, D. OTIPAD - eine Leiterplattenoberfläche zur prozeßtechnischen und metallurgischen Optimierung der Reflow-Löttechniken in der SMT. SMT/ASIC/Hybrid 1990, Hrsg.: H. Reichl, A. Eder und M. Bleicher, Hüthig Verlag, Heidelberg 1990
- 25 Ginsberg, G.L. Chip-and-Wire technology. The Electronics Assembly Handbook, Hrsg.: F. Riley, Springer Verlag, London 1988
- 26 Ginsberg, G.L. TAB and Flip-Chip Technology. The Electronics Assembly Handbook, Hrsg.: F. Riley, Springer Verlag, London 1988

- 27    Gottschild, W.  
      Tackenberg, W.        Auswahl von Lötverfahren. AVT-Report, Nr. 1, S. 19-29, Hrsg.: VDI/VDE-Technologiezentrum Informationstechnik GmbH, Berlin, 1989
  
- 28    Habenicht, G.  
      Janker, A.  
      Wieczorek, A.        Optimierungsmöglichkeiten beim Weichlöten mit dem Expertensystem Lötexpert. SMT/ASIC, Hrsg.: H. Reichl und M. Bleicher, Hüthig Verlag, Heidelberg 1988
  
- 29    Haberland, D.        Technologien im Wettstreit; Hybridschaltungen zwischen ASIC und Leiterplatte. Pronic, 5 (1989) 6, Vogel-Verlag, Würzburg, S. 16-25
  
- 30    Hartmann, H.-J.        Erfahrungen beim Löten unter Stickstoff. Leiterplatte '90, VDI-Berichte 805, Band 2, Düsseldorf 1990
  
- 31    Hartmann, H.-J.        Reflowlöten von SMD-Schaltungen. Vortrag an der Technischen Akademie, Esslingen 1988
  
- 32    Häußler, G.        Optimale Lötverbindungen in der SMT. SMT/ASIC/Hybrid 1990, Hrsg.: H. Reichl, A. Eder und M. Bleicher, Hüthig Verlag, Heidelberg 1990
  
- 33    Headrick, L.G.  
      Ruffing, J.F.        Dampfphase oder Infrarot? Surface Mount Technology (D), 2 (1989) 3, VP-Verlag, Herrenberg, S. 10-16
  
- 34    Henderson, E.        Electronic Industry Forecast. Henderson Ventures & Electronic Outlook, Los Altos 1988
  
- 35    Henderson, I.        IR Plus Hot Platen Heating Offers Another Option for Reflow Soldering. Electronic Packaging & Production, 29 (1989) 9, Hrsg.: R.D. King, Des Plaines, IL, USA, S. 78-80
  
- 36    Hennemann, O.-D.        Studie zur "Klebertechnologie in der Elektronik". AVT-Report, Nr. 2, S. 3-22, Hrsg.: VDI/VDE-Technologiezentrum Informationstechnik GmbH, Berlin 1990

- 37    Hermann, F.                      Multichip - eine Perspektive für die 90er Jahre.  
Leiterplatte '90, VDI-Berichte 805, Band 2, Düsseldorf 1990
  
- 38    Herrmann, G.  
Egerer, K.                          Handbuch der Leiterplattentechnik. Band 2, Eugen  
Leuze Verlag, Saulgau, 1990
  
- 39    Hieber, H.                          Neue Verbindungstechniken. Verbindungstechnik  
in der Elektronik, DVS-Berichte Band 110, Düsseldorf 1988
  
- 40    Hieber, H.                          Physik des Weichlötens. Tagungsband zur VDI  
Fachtagung "Leiterplatte '88", Karlsruhe 2.-3. Mai  
1988, Band 2, S. 46-49
  
- 41    Hiller, V.  
Jillek, W.                          Rechnergestützte Überwachung und Optimierung  
von Wellenlötanlagen. Verbindungstechnik in der  
Elektronik, 2 (1990) 1, Deutscher Verband für  
Schweißtechnik e.V., Düsseldorf, S. 20-24
  
- 42    Hobby, A.                          Screen Printing Solder Paste: The State of the Art.  
Surface Mount Technology (UK), 3 (1989) 7,  
Elsevier Advanced Technology, Oxford, S. 17-20
  
- 43    Hobby, A.                          Screen Printing for Surface Mount Advancing  
SMT, Hrsg.: S. McClelland, IFS Publications,  
Kempston 1988
  
- 44    Horneff, P.  
Möller, W.                          Temperaturgeregeltes Lasermikrolöten. Ver-  
bindungstechnik in der Elektronik, DVS-Berichte  
Band 129, Düsseldorf 1990
  
- 45    Jenczewski, K.                      How to Control Solder Paste Deposition Using  
Stencil Metal Masks. Surface Mount Technology  
(USA), 3 (1989) 7, S. 51-55

- 46 Kayser, K.  
Rehberg, P.  
Witte, W.      Technische und wirtschaftliche Kriterien für die Systemintegration. SMT/ASIC Systemintegration, Hrsg.: H. Reichl und M. Bleicher, Hüthig Verlag, Heidelberg 1988
- 47 Keeler, R.      Chip-on-Board Technology. The Electronics Assembly Handbook, Hrsg.: F. Riley, Springer Verlag, London 1988
- 48 Keller, G.      SMT für kleinere Serien komplexer Leiterplatten. Tagungsband zur VDI-Fachtagung "Leiterplatte '88", Karlsruhe 2.-3. Mai 1988, Band 2, S. 11-19
- 49 Klatt, H.      Einsatz rechnergesteuerter Dispenser in der SMT. SMT/ASIC 1989, Hrsg.: H. Reichl, A. Eder und M. Bleicher, Hüthig Verlag, Heidelberg 1989
- 50 Klein-Wassink, R.      Weichlöten in der Elektronik. Eugen Leuze Verlag, Saulgau 1986
- 51 Kleineidam, G.      CAD/CAP: Rechnergestützte Montagefeinplanung. Dissertation, Hanser Verlag, München, 1990
- 52 Koenen, C.      Pastendruck mit Sieben und Metallschablonen in der SMD-Technik. Productronic 9 (1989) 11, Hüthig Verlag, Heidelberg, S. 50-52
- 53 Kuchling, H.      Taschenbuch der Physik. Verlag Harri Deutsch, Thun und Frankfurt/Main, 1979
- 54 Kühnhold, H.  
Leske, W.  
Starz, K.-A.      Wasserspülbare Lotpasten - eine mögliche Lösung der FCKW-Problematik in der Elektronik-Fertigung. SMT/ASIC/Hybrid 1990, Hrsg.: H. Reichl, A. Eder und M. Bleicher, Hüthig Verlag, Heidelberg 1990

- 55    Langen, M. de            Technische Rahmenspezifikation und Richtlinien  
     Verguld, M.            für Infrarot-Reflow-Löten - Teil 1. Verbindungs-  
                                  technik in der Elektronik, 2 (1990) 2, Deutscher  
                                  Verband für Schweißtechnik e.V., Düsseldorf, S.  
                                  68-72
- 56    Lea, C.                    A Scientific Guide to Surface Mount Technology.  
                                  Electrochemical Publications Ltd., Ayr, Scotland,  
                                  1988
- 57    Leenaerts, M.H.W.      Repair of Printed Circuit Boards Carrying Surface  
     Verguld, M.M.F.      Mount Components. Circuits World, 14 (1988) 2
- 58    Leicht, H.W.            Physik des Dampfphasenlötens. Tagungsband zur  
                                  VDI-Fachtagung "Leiterplatte '88", Karlsruhe 2.-3.  
                                  Mai 1988, Band 2, S. 50-59
- 59    Maiwald, W.            Löten in der SMD-Technik. Veröffentlichung der  
                                  Fa. SIEMENS AG, WMW, München 1987
- 60    Markstein, H.W.        SMT Advantages. The Electronics Assembly Hand-  
                                  book, Hrsg.: F. Riley, Springer Verlag, London  
                                  1988
- 61    Mehlhorn, K.            Data Structures and Algorithms 2: Graph Algo-  
                                  rithms and NP-Completeness. Springer Verlag,  
                                  Berlin 1984
- 62    Mengel, P.              Optische und physikalische Verfahren für die  
                                  Flachbaugruppenprüfung. Leiterplatte '90, VDI-  
                                  Berichte 805, Band 2, Düsseldorf 1990
- 63    Mieskes, H.            Ersatz von Kleben durch Löten. SMT/ASIC, Hrsg.:  
                                  H. Reichl und M. Bleicher, Hüthig Verlag, Heidel-  
                                  berg 1988
- 64    Mieskes, H.            Verfahren für die Anwendung von Leitlebern für  
                                  OMB. AVT-Report, Nr. 2, S. 40-63, Hrsg.:  
                                  VDI/VDE-Technologiezentrum Informationstechnik  
                                  GmbH, Berlin 1990

- 65    Morgenstern, C.  
      Kopp, Th.  
      Stockhaus, F.      Rechnergestützte Optimierung des Infrarot-Reflowlöt-Prozesses in der SMT. SMT/ASIC/Hybrid 1990, Hrsg.: H. Reichl, A. Eder und M. Bleicher, Hüthig Verlag, Heidelberg 1990
  
- 66    N.N.                    An Introduction to Surface Mounting Techniques. Thomson-LCC Customer Application Laboratory, Courbevoie 1989
  
- 67    N.N.                    CIM-fähiger Siebdruckautomat für SMT. Productronic 10 (1990) 9, Hüthig Verlag, Heidelberg, S. 18-19
  
- 68    N.N.                    SMT, A Critical Analysis. BPA (Technology & Management) Ltd, Feb.1989
  
- 69    Neumann, T.            Konzepte zur Erweiterung von Datenbanksystemen für die Unterstützung von CAD/CAM - Anwendungen. Dissertation, Darmstadt 1983
  
- 70    Nikolaiczek, W.        Klebetechnik in der Oberflächenmontage. Referat bei der Fa. SMW-Elektronik, Kalchreuth 1988
  
- 71    Pedder, D. J.           Future Trends in Surface Mount and High Density Interconnection Technology. Advancing SMT, Hrsg.: S. McClelland, IFS Publications, Kempston 1988
  
- 72    Prasad, R. P.           Surface Mount Technology - Principles and Practice. Van Nostrand Reinhold Ltd., New York, 1989
  
- 73    Rao, N. S.              Formeln der Kunststofftechnik. Carl Hanser Verlag, München Wien, 1989
  
- 74    Rautenberg, D.         Gut geklebt. SMD-SMT Sonderheft, 1988, S. 18-22

- 75 Reichl, H. Tape Automated Bonding. Verbindungstechnik in der Elektronik, DVS-Berichte Band 129, Düsseldorf 1990
- 76 Reichl, H.  
Zakel, E. Zuverlässigkeitsuntersuchungen an TAB-Kontaktierten Schaltungen. Verbindungstechnik in der Elektronik, 1 (1989) 3, Deutscher Verband für Schweißtechnik e.V., Düsseldorf, S. 125-128
- 77 Reithinger, M. Reflowlöttechniken für SMD-Baugruppen. SMT/ASIC/Hybrid 1990, Hrsg.: H. Reichl, A. Eder und M. Bleicher, Hüthig Verlag, Heidelberg 1990
- 78 Riemer, D. Ein Beitrag zur Untersuchung der physikalisch-technischen Grundlagen des Siebdruckverfahrens. Dissertation, Technische Universität Berlin, 1988
- 79 Ruck, P. Infrarot-Löttechnik - Theorie und Praxis. Fachbericht der Fa. Ersä, Wertheim 1988
- 80 Ruthardt, R. Die Verfahren zur Lotpulvererzeugung und deren Konsequenzen für SMT- und Fine-Pitch-Lotpasten. SMT/ASIC/Hybrid 1990, Hrsg.: H. Reichl, A. Eder und M. Bleicher, Hüthig Verlag, Heidelberg 1990
- 81 Sauer, W.  
Weigert, G. Erhöhung der Auslastung flexibler Bestückssysteme durch Simulation und Optimierung. Tagungsband zum Kongreß AME'91 in Essen, Hrsg.: K. Feldmann, VDE-Verlag, Offenbach 1991
- 82 Sautter, R. Leiterplatten mit oberflächenmontierbaren Bauelementen. Vogel Verlag, Würzburg, 1988
- 83 Schauburger, K. Qualitätsmerkmale von SMD-Klebstoffen. SMT/ASIC 1989, Hrsg.: H. Reichl, A. Eder und M. Bleicher, Hüthig Verlag, Heidelberg 1989
- 84 Scheler, H. SMD-Bestücken und Löten aus Anwendersicht. Feinwerktechnik & Meßtechnik, 97 (1989) 5, Hanser Verlag, München, S. 207-210

- 85 Schiebel, G. Bügellöten - Die alternative Technik beim Einsatz von Fine-Pitch-Devices. SMD-Magazin, (1990) 1, Hrsg.: H. Fischer, Höslwang, S. 14-18
- 86 Schraft, R.-D. Wolf, E. M. World Scene: Germany. Advancing SMT, Hrsg.: S. McClelland, IFS Publications, Kempston 1988
- 87 Schultz, P. Präziser Druck = sicheres Löten. Surface Mount Technology (D), 3 (1990) 2, VP-Verlag, Herrenberg, S. 18-22
- 88 Seitzer, D. Von der bestückten Leiterplatte zum System auf dem Chip. SMT/ASIC Systemintegration, Hrsg.: H. Reichl und M. Bleicher, Hüthig Verlag, Heidelberg 1988
- 89 Strauss, R. SMD: Oberflächenmontierte Bauelemente. Verlag für Technische Texte, Bonn, 1989
- 90 Strauss, R. Wellenlöten-Reflowlöten; Metallurgische Konsequenzen der Wahl zwischen den Verfahrensalternativen. Verbindungstechnik in der Elektronik, DVS-Berichte Band 110, Düsseldorf 1988
- 91 Verguld, M. M. F. Process Control in Soldering SMDs - Analysing and Improving the Process. Soldering and Surface Mount Technology, (1989) 2, Wela Publications, Ayr, GB, S. 49-52
- 92 Wanek, E. Neues lichttechnisches Kleben für die Oberflächenmontage (SMT). SMT/ASIC/Hybrid 1990, Hrsg.: H. Reichl, A. Eder und M. Bleicher, Hüthig Verlag, Heidelberg 1990
- 93 Weiss, D. G. Chip on Board Technologie. Feinwerktechnik & Meßtechnik, 97 (1989) 5, Hanser Verlag, München, S. 198-200

- 94    Wiczorek, A.            Rechnergestütztes Informationssystem für das Weichlöten von Leiterplatten. Schweißtechnische Forschungsberichte, Band 24, DVS-Verlag, Düsseldorf 1988
- 95    Wildemann, H.          Strategische Investitionsplanung für CAD/CAM. Schäffer Verlag, Stuttgart 1986
- 96    Winteler, O.            Prozeßsteuerung beim Reflowlöten von Leiterplatten mit SMD. Tagungsband zur VDI-Fachtagung "Leiterplatte '88", Karlsruhe 2.-3. Mai 1988, Band 2, S. 60-67
- 97    Zarrow, P.              IR Reflow Soldering Systems and Steps. Circuits Manufacturing 30 (1990) 2, p. 26, 28, 30, 32, 34-36, 38

## LEBENS LAUF

<b>Persönliches</b>	Name, Vornamen	Flohr, <u>Rainer</u> Lorenz
	Geburtsdatum	12. August 1960
	Geburtsort	Nürnberg
	Familienstand	verheiratet, 3 Kinder
	Staats-	
	angehörigkeit	deutsch
<b>Schulbildung</b>	1966 - 1970	Grundschule Cadolzburg
	1970 - 1978	Hardenberg-Gymnasium in Fürth/Bay.
	29. 6. 1978	Abschluß: Abitur
<b>Studium</b>	1978 - 1985	Technische Universität München, Maschinenwesen, Fachrichtung Betriebs- und Fertigungstechnik
	20. 3. 1985	Abschluß: Dipl.-Ing.
<b>Berufspraxis</b>	1985 - 1986	Siemens AG, München
	1986 - 1991	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik an der Universität Erlangen-Nürnberg; Leiter: Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann. Seit dem 15.1.90 Oberingenieur und Leiter der Gruppe Handhabungs- und Montagetechnik am gleichen Lehrstuhl.



# 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 Montagesysteme 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 Kleefeld  
**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**  
157 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)**

188 Seiten, 79 Bilder. 1991. Kartoniert.