

Jörg Franke

*Integrierte Entwicklung neuer Produkt-
und Produktionstechnologien für
räumliche spritzgegossene
Schaltungsträger (3-D MID)*

Jörg Franke

*Integrierte Entwicklung neuer
Produkt- und Produktionstechnologien
für räumliche spritzgegossene
Schaltungsträger (3-D MID)*

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:	09. Januar 1995
Tag der Promotion:	10. April 1995
Dekan:	Prof. Dr. Dr. h. c. F. Durst
Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann Prof. Dr.-Ing. G. W. Ehrenstein

Die Deutsche Bibliothek - CIP - Einheitsaufnahme

Franke, Jörg:

Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und
Produktionstechnologien für räumliche spritzgegossene
Schaltungsträger (3-D MID) / Jörg Franke. - München :
Hanser, 1995

(Fertigungstechnik - Erlangen ; 50)

Zugl.: Erlangen, Nürnberg, Univ., Diss., 1995

ISBN 3-446-18448-1

NE: GT

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 1995

Herstellung: Gruner Druck GmbH, Erlangen-Eltersdorf

Printed in Germany

Vorwort

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

Herrn Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann, dem Leiter dieses Lehrstuhls am Institut für Fertigungstechnik, danke ich für die engagierte Förderung meiner Arbeit sowie für sein Vertrauen und den Freiraum, die er mir zur Bearbeitung dieses komplexen und aussichtsreichen Technologiefeldes zuteil werden ließ.

Herrn Prof. Dr.-Ing. G. W. Ehrenstein, Leiter des Lehrstuhls für Kunststofftechnik am Institut für Fertigungstechnik, danke ich für die wohlwollende Übernahme des Korreferates sowie die wertvollen fachlichen Anregungen.

Weiterhin danke ich meinen Kollegen, ohne deren fachliche und persönliche Unterstützung eine erfolgreiche Bearbeitung dieser vielschichtigen interdisziplinären Arbeit nicht möglich gewesen wäre: Herrn Jürgen Sturm für seine fundierten Anregungen und den intensiven und konstruktiven Gedankenaustausch, Herrn Stefan Krug für die aufmerksame Korrekturlesung, Herrn Wolfgang Schlögl für seinen tatkräftigen Einsatz bei der Durchführung dieser Arbeit, Herrn Stefan Walter für seine geduldige Hilfestellung bei allen technischen Problemen sowie allen Mitarbeitern der Gruppe Elektronikproduktion, deren spezieller Beitrag an den betreffenden Textstellen im einzelnen gewürdigt wird.

Die vorliegende Dissertation entstand in enger Zusammenarbeit mit einer Vielzahl innovativer Unternehmen, die in der MID-Technologie ein bedeutendes Zukunftspotential sehen. Allen industriellen Kooperationspartnern, insbesondere den Mitgliedern der Forschungsvereinigung Räumliche Elektronische Baugruppen (3-D MID) e. V., sei hiermit herzlich gedankt. Namentlich möchte ich an dieser Stelle insbesondere den Herren Peter Botzler (von Ardenne Anlagentechnik GmbH), Richard Haller (Mitsui-Pathtek Cor.), Günter Schult (VKW GmbH), Werner Theissig (BMW AG) und Vic Zaderej (Circuit-Wise, Inc.) für ihre Unterstützung danken. Herrn Uli Hartmann möchte ich dabei besonders hervorheben, der mit seinem Engagement einen wesentlichen Beitrag für die Anwendung der MID-Technologie geleistet hat.

Mein herzlichster Dank gilt jedoch meinen Eltern, die mich in meiner Arbeit bestärkt und unterstützt haben, und meiner Partnerin Gabriele Finger, die mir trotz ihrer eigenen starken beruflichen Anforderungen stets den Rücken frei gehalten und mich moralisch aufgebaut hat.

Jörg Franke

Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3-D MID)

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	1
2.	Neue Herausforderungen und Möglichkeiten durch räumlich geformte spritzgegossene Schaltungsträger	5
2.1	Grundlegende Begriffsbestimmung und geometrische Klassifizierung	6
2.2	Grenzen konventioneller Aufbautechnologie elektronischer Produkte	8
2.3	Analyse realisierter MID-Applikationen	12
2.4	Technisch-wirtschaftliche Analyse des MID-Marktpotentials	15
3.	Strukturierte Metallisierung von Kunststoffformteilen	21
3.1	Auswahl und Einsatz geeigneter Basismaterialien	22
3.1.1	Method. Vorgehensweise zur Auswahl von Kunststoffen für MID-Anwendungen	22
3.1.2	Basismaterialien für Molded Interconnect Devices	23
3.2	Prozeßtechnische Kombination von Strukturierung und Metallisierung	25
3.2.1	Galvanische Verfahren	26
3.2.2	Auftrag von Leitmaterialien	27
3.3	Strukturierte physikalische Beschichtung von Kunststoffkörpern	29
3.3.1	Anforderungsanalyse physikalischer Beschichtungstechniken für MID	31
3.3.2	Systematische Vorbereitung der experimentellen Untersuchungen	32
3.3.3	Wärmebelastung der Kunststoff-Substrate beim Aufdampfprozeß	32
3.3.4	Prozeßentwicklung zur Beschichtung haftfester, dicker Schichten	34
3.3.5	Verfahren zur Strukturierung	38
3.3.6	Kostenvergleich PVD versus galvanischer Metallisierung	41
3.4	Verfahrensentwicklung für die Trennung von Kunststoff und Metall	42
3.4.1	Charakteristische Eigenschaften der wiederzuverwertenden Werkstoffe	44
3.4.2	Chemisches Abätzen der Metallbeschichtung	45
3.4.3	Einsatz verschiedener Strahlverfahren zur Entfernung der Metalloberfläche	46
3.4.4	Mechanische Verfahren zur MID-Aufbereitung	47
3.4.5	Synthese zu einem Verfahrenskonzept für das MID-Recycling	49

4.	Herstellungsverfahren für Molded Interconnect Devices	51
4.1	Vergleich alternativer MID-Herstellungsverfahren	52
4.1.1	Formstrukturierungs-Verfahren	52
4.1.2	Belichtungsverfahren	54
4.1.3	Folienverfahren	55
4.2	Fertigungsgerechte Konstruktion von 2-Shot–Molding–MIDs	57
4.2.1	Auswahl geeigneter Materialkombinationen	57
4.2.2	Spritzgußgerechte Gestaltung	58
4.2.3	Berücksichtigung des Metallisierungsprozesses	61
4.2.4	Exemplarische Demonstration der erstellten Konstruktionsregeln	62
4.3	Material- und Prozeß-Optimierung für die 3D-Masken-Belichtung	63
4.3.1	Anforderungen an laserbeschriftbare Folien	65
4.3.2	Entwicklung eines optimierten Maskenmaterials	67
5.	Montage dreidimensionaler Schaltungsträger	69
5.1	Räumliche Bestücktechnologie	70
5.1.1	Validierung konventioneller Bestücksysteme	70
5.1.2	Grenzen herkömmlicher Bestücktechnologie	72
5.1.3	Entwicklung spezifischer Montagesysteme für räumliche Schaltungsträger	75
5.2	Prozeßuntersuchungen zur Adhäsion in pastösen Verbindungsmedien	79
5.2.1	Entwicklung der Versuchsumgebung und systematische Versuchsplanung	80
5.2.2	Analyse der eingesetzten Lotpasten, Fixier- und Leitkleber	81
5.2.3	Experimentell ermittelte Winkellagen elektronischer Bauelemente	85
5.3	Verbindungstechnologien für MID	86
5.3.1	Evaluierung verfügbarer Reflow-Massenlötverfahren	87
5.3.2	Experimentelle Untersuchung selektiver Lötverfahren	89
5.3.3	Entwicklung alternativer Montagetechnologien für MIDs	91

6.	Holonische Entwicklungsumgebung für elektronisch-mechanisch – integrierte Produkte	94
6.1	Wissensbasierte Auswahl von Produktaufbautechnologien	96
6.1.1	Systematisierung der Vorgehensweise bei der Technologie-Selektion	97
6.1.2	Realisierung in einem wissensbas. System zur Entscheidungsunterstützung	99
6.2	Simultane Elektronik-Mechanik–Entwicklung	101
6.2.1	Produktbestimmte Grenzen und Rationalisierungspotentiale	102
6.2.2	Prozeßbestimmte Grenzen und Rationalisierungspotentiale	104
6.2.3	Anforderungen an mechatronische Entwicklungssysteme	105
6.3	Rechnergestützte Kopplung von Entwurfswerkzeugen für elektronische und mechanische Anwendungen	106
6.3.1	Definition der ECAD/MCAD–Schnittstelle ENIF	107
6.3.2	Ablauf des elektronisch-mechanisch–simultanen Entwurfprozesses	109
6.3.3	Konzeption einer fachbereichsübergreifenden Konstruktions-Bauelemente–Bibliothek	112
6.4	Konzipierung des systemtechnischen Entwicklungswerkzeuges	114
6.4.1	Systemaufbau und Datenrepräsentation	114
6.4.2	Funktionen zum 3D-Plazieren von Bauelementen	117
6.4.3	Rechnergestütztes interaktives 3D-Routing	120
6.4.4	On-line Überprüfung von Konstruktions- und Fertigungsregeln (DRC)	121
7.	CAD/CAM-Verfahrensketten für mechatronische Produkte	123
7.1	CAD/CAM-Verfahrenskette für die 3D-Laser-Strukturierung	124
7.1.1	Koordinierter Verfahrensablauf von Gelenkarmroboter und Laser	124
7.1.2	Entwicklung einer durchgängigen CAD/CAM-Verfahrenskette	126
7.2	Rechnerintegrierte Produktdatenverarbeitung für die Bestückung	128
7.2.1	Kollisionskontrollierte Bestücksequenzgenerierung	128
7.2.2	Kinematische Simulation automatisierter Montagesysteme	132
7.2.3	Entwicklung einer spezifischen CAD/CAM–Kopplung für die Bestückung	134

8.	Wirtschaftliche Bewertung neuer Produktionstechnologien	137
8.1	Entwicklung eines prozeßorientierten Bewertungsverfahrens	138
8.1.1	Wirkungskettenbetrachtung und Prozeßübergangskostenrechnung	139
8.1.2	Verfahrensschritte zur wirtschaftlichen Bewertung der MID-Technologie	142
8.2	Entwicklung eines hypertextgestützten Systems zur Vorkalkulation	143
8.2.1	Evaluierung verfügbarer Methoden zur Vorkalkulation	144
8.2.2	Kostenstrukturen ausgewählter MID-Herstellverfahren	146
8.3	MID-Technologieeinführung am Beispiel eines Kfz-Elektronik-Moduls	149
8.3.1	Analyse der konventionellen Aufbautechnik	149
8.3.2	Anforderungs- und Zielanalyse	151
8.3.3	Konstruktive Entwicklung der MID-Lösung	151
8.3.4	Wirtschaftlichkeitsvergleich	153
8.3.5	Zusätzliche Einsparungseffekte durch weitergehende Integration	154
9.	Zusammenfassung und Ausblick	156
10.	Literaturverzeichnis	158

1. Einleitung

Der Wohlstand, der insbesondere durch die industrielle Produktivitätssteigerung erreicht werden konnte, basiert auf Grundsätzen, die teils vor mehr als zweihundert Jahren formuliert wurden¹ [1]. Trotz der ungebrochenen Dynamik des technischen Fortschritts leidet heute die Leistungsfähigkeit der Unternehmen insbesondere unter schwerfälligen Organisationsstrukturen [2, 3]. Zusätzlich ist die Prosperität der europäischen Wirtschaftsnationen durch eine dramatische Verschärfung der Wettbewerbsbedingungen gefährdet: Traditionelle und damit meist stagnierende Märkte werden zunehmend durch neu aufstrebende Regionen besetzt; wachsende zukunftssträchtige Märkte können nur durch immens hohen Aufwand an technischer Entwicklungsleistung besetzt werden [4].

Die verschärften Wettbewerbsbedingungen fordern neue Ansätze zur Optimierung der Produktionsabläufe² [5] oder auch zur Nachahmung der Unternehmensphilosophien erfolgreicher Wirtschaftsnationen³ [6]. Hammer proklamiert gar das wirtschaftliche Ende aller konventionell aufgebauten Firmen und fordert durch "Business Re-Engineering" einen radikalen Neubeginn⁴ [7].

Doch nicht nur die betriebswirtschaftlichen Abläufe sind zu überdenken. In gleichem Maße und mit genauso weitreichenden Konsequenzen gelten die genannten Paradigmen auch für den Aufbau der Produkte selbst: Die Komplexität moderner elektronischer Produkte als auch die scheinbare Steigerung der Produktivität der Arbeitsprozesse durch Aufteilung in voneinander separierte Bereiche hat zu einer allgegenwärtigen Spezialisierung geführt, die allzu oft Innovationen hemmt und Rationalisierungspotentiale verdeckt. Diese Spezialisierung manifestiert sich in den Unternehmen deutlich in der Trennung der verschiedenen Aufgabenbereiche in der technischen Auftragsabwicklung: Konstruktion, Arbeitsvorbereitung und Fertigung bearbeiten streng voneinander abgegrenzte Aufgaben mit Hilfe von Werkzeugen, die nur spezifisch auf diese Probleme zugeschnitten sind, und mit spezialisierten ausgebildeten Mitarbeitern. Durch den Ansatz des *Simultaneous Engineering* [8] soll das Zusammenwirken dieser unterschiedlichen Bereiche parallelisiert und damit beschleunigt werden.

Weiterhin kann, gesamtheitlich betrachtet, durch die gegenwärtige stringente Trennung der Zielfunktionen für Produktgestaltung und Produktion von den Wiederverwertungs- und Entsorgungsproblemen nur ein Teilloptimum erzielt werden. Die Problematik schwindender Depotkapazitäten bei gleichzeitiger Sensibilisierung des Konsumenten für umweltverträgliche Produkte zwingt die Unternehmen zu einer weiteren Synthese bislang getrennter

¹ In "Der Wohlstand der Nationen" beschrieb Adam Smith 1776 die Spezialisierung der Arbeitstätigkeiten und begründete damit die erste industrielle Revolution.

² Warnecke konzipiert in die "Fraktale Fabrik" autonome, produktorientierte Fertigungsstrukturen.

³ In "The Machine that changed the World" analysiert Womack detailliert und akribisch die Unternehmensstrukturen japanischer Automobilkonzerne und rät amerikanischen und insbesondere westeuropäischen Betrieben diese "schlanken" Fertigungsstrukturen zu adaptieren.

⁴ Business Reengineering steht für das fundamentale Überdenken und radikale Redesign von Unternehmen und deren wesentlichen Unternehmensprozessen.

Produktsichtweisen: von der rein produktionskostenorientierten Ausrichtung zu einer Betrachtungsweise in geschlossenen Produktlebenszyklen [9].

Mit viel weiter reichenden Auswirkungen auf die Gestalt der Produkte und damit deren Leistungsfähigkeit, die Herstellungskosten und letztendlich auch die Wettbewerbsfähigkeit der sie herstellenden Unternehmen hat sich eine weitere Spezialisierungsrichtung herausgebildet: die Trennung der in einem Produkt synthetisierten Funktionsbereiche, insbesondere der Elektronik und der Mechanik.

Auch hier arbeiten speziell ausgebildete Ingenieure (Elektrotechniker, Maschinenbauer, Informatiker etc.) mit für diese eindimensionale Aufgabenstellung ausgerichteten Werkzeugen (ECAD, MCAD, CASE etc.) und sind im Unternehmen in getrennten Abteilungen organisiert (Elektronik-, Mechanik-, Softwareentwicklung etc.). Ergebnis dieser fachbereichsspezifischen Aufgabenteilung sind zumeist hochoptimierte Einzelprozesse und damit auch nur linear optimierte Baugruppen in den elektronischen Produkten. Da dies jedoch nicht zwangsläufig zu einer optimalen Gesamtsystemgestaltung führen muß, liegt demgegenüber in der funktionsintegrierten Betrachtung der Konstruktionsaufgabe ein beträchtliches, noch ungenutztes Rationalisierungspotential [10]. Um dieses tradierte Vorgehen zur Reduzierung der Produktkomplexität durch Separierung in singuläre Produktsichtweisen aufzubrechen, müssen sowohl in der institutionellen Forschung als auch in der industriellen Praxis signifikante, bestehende Defizite beseitigt werden. Nur durch eine umfassende, ganzheitliche Betrachtung des Problemfeldes kann die Vereinfachung des Gesamtaufbaus elektronischer Geräte erreicht werden.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist daher die Entwicklung und Etablierung vereinfachter Produktstrukturen und angepaßter Produktionsprozesse zur Integration unterschiedlicher Funktionssysteme. Dazu müssen Methoden, Verfahren und Werkzeuge für die integrative Entwicklung produktbestimmender Funktionen (Elektronik, Mechanik etc.), die produkterzeugende Prozesse (Entwicklung, Fertigung etc.) sowie für die produktspezifischen Lebenszyklen (Gebrauch, Entsorgung etc.) von *Multidisziplinären Funktionssystemen*⁵ konzipiert, realisiert sowie in praxisrelevanten Anwendungen evaluiert werden.

Zur exemplarischen Ausführung dieser Arbeiten wird ein neues Aufbaukonzept für elektronische Produkte ausgeführt und weiterentwickelt, daß die bisher getrennten Bereiche Elektronik und Mechanik in funktionsintegrierten Bauteilen vereint: Die Technologie der *räumlichen elektronischen Baugruppen (Three-Dimensional Molded Interconnect Devices MID)*. MIDs ermöglichen es, im Gegensatz zur konventionellen, rein planaren Leiterplattentechnologie, in räumlichen Strukturen sowohl Strom zu führen als auch abschirmende oder sendende Flächen zu bilden, elektronische Bauelemente zu tragen sowie mechanische Elemente zu integrieren.

⁵ Als Multidisziplinäre Funktionssysteme werden hierbei solche Systeme bezeichnet, die Funktionen aus mehreren unterschiedlichen Bereichen (Mechanik, Elektronik, Optik, Informationsverarbeitung etc.) in sich vereinen.

Während die Mikrosystemtechnik⁶ Anwendungen *Multidisziplinärer Funktionssysteme* im Mikrometerbereich bietet, eröffnet die MID-Technologie für funktionsintegrierte Systeme in der Größenordnung konventioneller elektronischer Geräte völlig neue Möglichkeiten. Ein breiter Einsatz dieser Produktionsinnovation wird jedoch einerseits durch die manifestierten, arbeitsteiligen und spezialisierten Strukturen, andererseits durch mangelnde Transparenz der vielfältigen Werkstoff- und Verfahrensalternativen sowie durch ungenügende Kenntnis möglicher Anwendungsbereiche behindert.

Im folgenden werden existierende Lösungsansätze aus dem gesamten Bereich der MID-Technologie strukturiert, analysiert und vergleichend bewertet. Daraus werden bestehende Entwicklungspotentiale abgeleitet, verfügbare Verfahren weiterentwickelt sowie neue Prozesse und Methoden konzipiert und realisiert. Die detailliert betrachteten Prozeßketten werden abschließend am Beispiel einer realisierten Produktkonstruktion verifiziert und in ihrer wirtschaftlichen Einsetzbarkeit evaluiert.

Zur Untermauerung der wirtschaftliche Relevanz werden eingangs die Ergebnisse der weltweit durchgeführten Markt- und Applikationsanalysen vorgestellt sowie die Strukturierung und Darstellung des daraus ermittelten Prozeß- und Anwendungsknowhows in einem Hypertext-basierten MID-Informationssystem beschrieben (2. Kapitel).

Die Einführung der hochtemperaturbeständigen Thermoplaste in den frühen 80er Jahren hatte nachhaltige Initialwirkung auf die MID-Technologie. Ausgangspunkt für die weiteren Entwicklungen ist daher eine eingehende Analyse der Anforderungen aus Herstellung, Einsatz und Entsorgung an einsetzbare Werkstoffe sowie die Beschreibung und experimentelle Evaluierung deren Eigenschaftsprofile. Daraus abgeleitet wird ein angepaßter Ansatz zur Werkstoffauswahl vorgestellt. Zentrales Element der MID-Technologie ist die strukturierte Metallisierung thermoplastischer Formkörper. Während die galvanischen Verfahren bereits Serienreife besitzen, bergen insbesondere physikalische Metallisierungsverfahren (*Physical Vapour Deposition, PVD*), die für die Anwendung in der MID-Technologie wissenschaftlich noch nicht untersucht wurden, noch große Rationalisierungspotentiale. In umfangreichen experimentellen Versuchen werden verschiedene PVD-Verfahren analysiert und deren Eignung für die Beschichtung räumlicher Schaltungsträger erweitert. Danach wird auch die im Aufbau dieser Verbundwerkstoffe implizierte Frage nach deren Wiederverwertungs- und Entsorgungsmöglichkeiten beantwortet (3. Kapitel).

Erst aus der intelligenten Verknüpfung teils neuer, teils erprobter Verfahren zur Kunststoff-Verarbeitung, -Metallisierung und -Strukturierung können alternative Prozeßketten zur MID-Herstellung gebildet werden. Die bestehende Vielfalt solcher Kombinationsmöglichkeiten wird detailliert analysiert, prägnant gegliedert und verbleibende Entwicklungspotentiale herausgearbeitet. Daraus folgend wird im 4. Kapitel einerseits das Mehrfachspritzgießen genauer untersucht, dessen äußerst komplexer Konstruktionsvorgang systematisiert, sowie dessen wesentliche Gestaltungsparameter in Form eines Kataloges zur fertigungsgerechten

⁶ Mikrosystemtechnische Produkte integrieren Funktionen unterschiedlicher Bereiche wie z. B. Elektronik, Mechanik, Optik etc. in einem systemtechnischen Bauteil in der Größenordnung von Bruchteilen von Millimetern.

Konstruktion dokumentiert. Andererseits werden die eingesetzten Materialien und Prozesse für die Technologie der 3D-Maskenbelichtung optimiert und zur Serienreife weiterentwickelt.

Das größte Entwicklungspotential in der Produktionskette räumlicher Schaltungsträger liegt in der Montage der elektronischen Komponenten auf dreidimensionale Prozeßflächen. Zu den Einzelprozessen Lotpasten- und Kleberauftrag, Bestückung und Löten werden experimentelle Untersuchungen und konstruktive Entwicklungen ebenso vorgestellt wie die Konzeption neuer Lösungsansätze zur mechanischen und elektrischen Verbindung von Schaltungsträger und elektronischem Bauteil (5. Kapitel).

Ein weiterer Schwerpunkt dieser Arbeit ist die Realisierung rechnergestützter Werkzeuge zur Konstruktion *Multidisziplinärer Funktionssysteme*. Aufbauend auf den Erfahrungen, die bei der Kopplung der verschiedenen Software-Werkzeuge für die Gestaltung elektronisch-mechanischer Produkte gewonnen werden konnten, wird im 6. Kapitel die Implementierung einer durchgängigen Entwicklungsumgebung für räumliche Schaltungsträger präsentiert. Danach wird die Entwicklung von Werkzeugen und Methoden für die rechnergestützte Ableitung der produktionsrelevanten Daten aus den Konstruktionssystemen, deren Optimierung und Simulation für die zwei Schlüsselprozesse Laserstrukturierung und räumliche Bestückung beschrieben (7. Kapitel).

Die Unzulänglichkeiten konventioneller Methoden der Kostenrechnung zur Bewertung funktionsintegrierter Produkte führen im 8. Kapitel zur Entwicklung eines Ansatzes zur wirtschaftlichen Analyse neuer Produkt- und Produktionstechnologien. Zur konstruktionsbegleitenden Kalkulation wird ein hypertextgestütztes Software-Tool realisiert, daß bereits in einem sehr frühen Stadium der Produktgestaltung für die wichtigsten MID-Herstellungsverfahren eine rasche Kostenabschätzung ermöglicht. Die erarbeiteten Ergebnisse werden abschließend anhand einer ausgewählten Applikation konstruktiv umgesetzt, veranschaulicht und evaluiert.

2. Neue Herausforderungen und Möglichkeiten durch räumlich geformte spritzgegossene Schaltungsträger

Die dramatische Dynamik der technologischen Veränderung elektronischer Produkte verdeutlicht sich insbesondere in der Innovation des Schaltungsaufbaus. Der Zwang zu weiterer Funktionalität und höherer Produktivität insbesondere der elektronischen Module führte zu Aufbautechniken, die speziell auf die Anforderungen der Elektronik zugeschnitten sind. Sowohl die Herstellung hochintegrierter Mikro-Chips als auch die Verarbeitung miniaturisierter elektronischer Bauelemente steht unter dem immensen Druck, steigende Qualitätsanforderungen in höherer Ausbringung erfüllen zu müssen. Weltweit konkurrierende Lieferanten und der anhaltende Preisverfall vermindern die Möglichkeiten für europäische Unternehmen, sich in diesem Produktfeld ausschließlich durch Optimierung konventioneller Fertigungseinrichtungen und der Produktionsorganisation Wettbewerbsvorteile zu erarbeiten. Konkurrenzfähige elektronische Produkte müssen sich darüberhinaus durch die intelligente Gestaltung des Produktgesamtaufbaus sowie durch die Anwendung fortschrittlicher Herstellungstechnologien abgrenzen.

Durch die Zusammenführung der elektronischen und mechanischen Funktionen in integrierten Bauteilen eröffnet die Technologie der spritzgegossenen Schaltungsträger neue Chancen zur Rationalisierung und Leistungssteigerung elektronischer Produkte. Entscheidender Hemmschuh für eine zügige Verbreitung dieser Produktionsinnovation ist die fehlende Kenntnis über die technischen Möglichkeiten und wirtschaftlichen Anwendungsbereiche der MID-Technologie. Eine umfassende wissenschaftliche Abhandlung zu dieser Thematik ist bisher nicht bekannt. Die verwendete Begriffswelt ist unexakt und verwirrend, klare Definitionen bestehen nur in einzelnen Teilgebieten, mögliche geometrische Ausprägungen räumlicher Schaltungsträger müssen erst noch systematisch klassifiziert werden.

Basierend auf einer weltweit durchgeführten Applikationsanalyse liefert das folgende Kapitel eine umfassende Untersuchung der bisher in MID-Technologie realisierten Produktideen, eine fundierte Aufarbeitung der Möglichkeiten und Grenzen verfügbarer Herstellungsprozesse sowie eine umfassende Übersicht der in diesem Bereich angemeldeten Patente. Diese komplexe Informationsfülle mit ihren vernetzten Querbeziehungen kann über das Medium Papier nicht adäquat dargestellt werden. Stattdessen wurde im Rahmen dieser Arbeit das Hypertext-Informationssystem *MID/IS* entwickelt, das alphanumerische und graphische Daten in einer relationalen Datenbank strukturiert verwaltet, in multimedialer Weise dem interessierten Benutzer präsentiert und über ein globales Rechnernetz weltweit zugänglich macht. Abschließend wird auch die kommerzielle Relevanz räumlicher Schaltungsträger durch eine Marktpotentialanalyse belegt.

2.1 Grundlegende Begriffsbestimmung und geometrische Klassifizierung

Die Idee, elektrische Verbindungselemente auf Basis thermoplastischer Materialien im Spritzgußverfahren herzustellen, wurde erstmals bereits in einem Patent von E.W. Lethonen im Jahr 1965 [11] erwähnt. Aber erst die technologischen Fortschritte neuerer Zeit im Bereich der einsetzbaren Kunststoffe, der haftesten Metallisierung sowie der Leiterbildstrukturierung ermöglichen einen wirtschaftlichen Einsatz dieses vielversprechenden Ansatzes.

Seither ist durch die Fülle der verschiedenen Veröffentlichungen und Patente eine Vielzahl konkurrierender Begriffe entstanden. Die Bezeichnung "spritzgegossene Leiterplatte" kann der sehr viel weiter reichenden Bedeutung dieses neuen Konzeptes nicht gerecht werden. Es besteht daher die Notwendigkeit, die zahlreich vorhanden und zweifellos verwirrenden Umschreibungen zu vereinheitlichen. Beispiele sind:

- Molded Printed Wiring Board (MPCB) [12],
- Molded Circuit Interconnects (MCI) [13],
- Molded Circuit Boards (MCB) [14],
- Selectively Conductive Molded Devices [15].
- Molded Electronic Assemblies [16] oder
- Spritzgußteile mit integrierten Leiterbahnen (SIL) [17],

Der vom IPC Molded Board Subcommittee (IPC-MB-380) [18] empfohlene Begriff "Molded Interconnects" wurde vom internationalen Verband der MID-Hersteller MIDIA exakter als "Molded Interconnect Devices (MID)" spezifiziert.

Im folgenden soll folgende Definition gelten:

Molded Interconnect Devices (MID)
sind spritzgegossene Formteile mit strukturiertem Leiterbild.

Die Herstellung im Spritzgußverfahren definiert auch die einsetzbaren Basismaterialien. Auf Grund ihrer hervorragenden Eignung kommen überwiegend Thermoplaste zum Einsatz. Es können jedoch auch Elastomere, Duromere oder sogar Keramiken [19] spritzgußtechnisch verarbeitet werden. Für die Zukunft ist daher auch diesen Materialien Aufmerksamkeit zu widmen.

Der wesentliche Unterschied der MIDs zu konventionellen Gehäusen auf der einen und abgeschirmten Kunststoffteilen auf der anderen Seite ist die Kombination mit einem auf unterschiedliche Weise realisierbaren strukturierten Muster aus leitfähigen Materialien zur Abbildung einer elektronischen Schaltung. MIDs können damit Funktionen aus unterschiedlichen technologischen Bereichen, insbesondere aus Elektronik und Mechanik, integrieren. Im Gegensatz zur konventionellen, rein planaren Leiterplattentechnologie ermöglichen es MIDs, in räumlichen Strukturen sowohl Strom zu führen als auch abschirmende oder sen-

dende Flächen zu bilden, elektronische Bauelemente zu tragen als auch mechanische Elemente zu integrieren.

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

Tabelle 1: Geometrische Klassifizierung räumlicher Schaltungsträger

Zur exakten geometrischen Klassifizierung spritzgegossener Schaltungsträger ist eine eindeutige Definition der verschiedenen räumlichen Ausprägungen sinnvoll. Mit Hilfe der vorgestellten Einteilung werden Anordnung und Form der applizierten Prozeßflächen betrachtet, die eine Aussage über den Schwierigkeitsgrad in Bezug auf die notwendigen kinematischen Fähigkeiten macht [20]. Aufgrund der unterschiedlichen räumlichen Anforde-

rungen kann die Definition eines bestimmten geometrischen Typs genau genommen immer nur für einen spezifischen Herstellungsschritt definiert werden (Tabelle 1). Prinzipiell gilt die vorgestellte Strukturierung jedoch für alle Produktionsschritte. Für die Einteilung in eine bestimmte Klasse ist immer das kennzeichnende Element der höchsten Klasse maßgebend.

Typ 0 beschreibt Anwendungen mit rein planarer Prozeßfläche und definiert damit auch die konventionellen Leiterplatten. Ausprägungen dieses Typs können ein- oder zweiseitig sein. *Typ 1* ist durch ebene oder plan-parallele Prozeßflächen gekennzeichnet, besitzt jedoch bereits geometrische Elemente, die eine deutliche Ausdehnung in z-Richtung aufweisen. Zur Abgrenzung gegenüber konventionellen Flachbaugruppen spricht man hier von 2½-dimensionalen Schaltungsträgern. Innerhalb dieser Typengruppe können noch detailliertere Unterscheidungen vorgenommen werden: *Typ 1A* läßt sich noch auf das ebene Problem reduzieren. Die relativ zum betrachteten Prozeß gegenüberliegende Seite enthält dagegen räumliche Elemente. *Typ 1B* kann dagegen auch auf der Prozeßfläche räumliche Strukturen aufweisen. *Typ 1C* enthält darüberhinaus Prozeßflächen auf zueinander plan-parallelen Ebenen. Dem *Typ 2* werden solche MIDs zugeordnet, bei denen die elektrische Schaltung oder die Bauelemente auf mehrere, winklig angeordnete Ebenen verteilt sind. Dieser Anwendungsfall kann auch als $n \times 2D$ bezeichnet werden. Schaltungsträger, bei denen die elektrischen Funktionen nicht mehr auf Ebenen angeordnet sind, werden im *Typ 3* zusammengefaßt. Dabei ist eine Anordnung sowohl auf Regelflächen (*Typ 3A*), wie Zylinder- oder Kegelflächen, als auch auf Freiformflächen (*Typ 3B*) denkbar.

2.2 Grenzen konventioneller Aufbautechnologie elektronischer Produkte

Die konventionelle Aufbautechnik elektronischer Geräte ist in vielen Bereichen an die Grenzen sowohl ihres technischen als auch ihres wirtschaftlichen Potentials gestoßen. Die herkömmliche planare Leiterplatte aus laminierten Epoxidharzen behindert die weitere Miniaturisierung, verursacht unnötige Montageschritte und gilt in Entsorgung und Recycling als äußerst kritisch. Elektromechanische Komponenten verursachen durch hohe Marktpreise beachtliche Ausgaben für Zukaufteile und vermindern dadurch die eigene Wertschöpfung insbesondere bei relativ einfachen Produkten. Bisher notwendige Verbindungselemente sind potentielle Schwachstellen für die Zuverlässigkeit. Die vielfach vorhandenen Kabelstränge verstärken unnötig die Aufbau-Komplexität, ihre Handhabung ist schlecht automatisierbar, langwierig und teuer. Die starke Spezialisierung auf solch atomarisierte Funktionen führt zu einer technisch unbegründet hohen Anzahl an Einzelteilen. Die genannten Probleme werden verstärkt durch den harten internationalen Wettbewerb, der nahezu den gesamten Spielraum zur Reduzierung der Herstellungskosten aufgezehrt hat.

Dieser Status Quo führt zwingend zu Entwicklung und Einsatz völlig neuer Aufbautechnologien. Produktionstechnischen Grundlagen folgend bietet sich als Alternative zur bestehenden Lösung, nach der eine komplexe Gesamtfunktionalität aus einer Vielzahl an Bausteinen

mit minimaler Teilfunktion zusammengesetzt werden, die Integralbauweise an. So können elektronische Produkte durch die neuen Möglichkeiten der MID-Technologie in einer Vielzahl von Aspekten vorteilhafter gestaltet werden. Bild 1 illustriert dazu die wichtigsten Verbesserungspotentiale, die im folgenden detailliert analysiert werden.

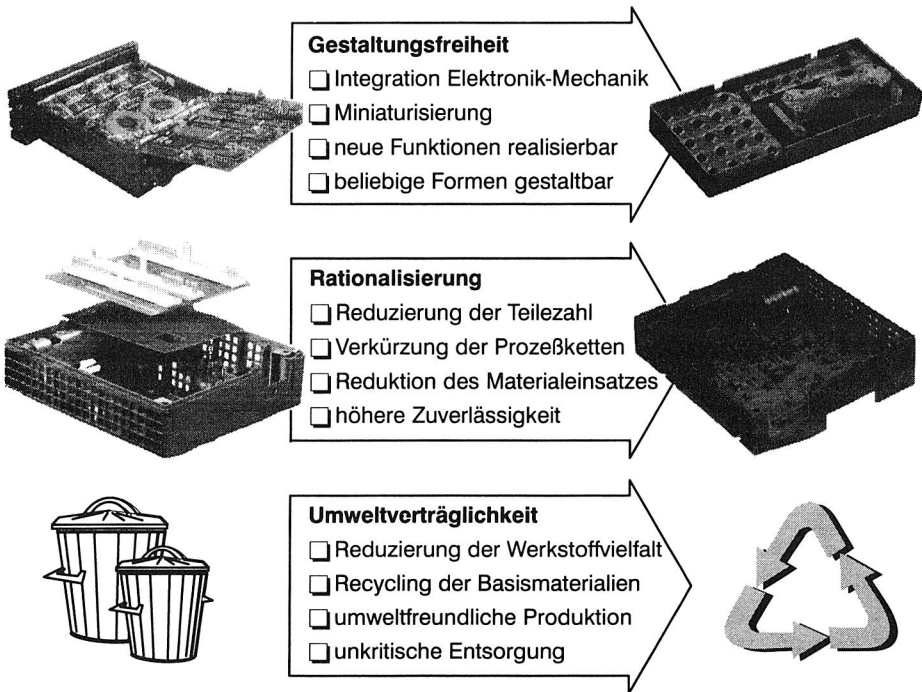


Bild 1: Verbesserungspotentiale durch Einsatz der MID-Technologie

Bisherige Versuche, elektronische Baugruppen in dreidimensionalen Strukturen zu realisieren sind dadurch gekennzeichnet, daß zuerst in bekannter planarer Technologie sowohl metallisiert, strukturiert als auch die Bauelemente gesetzt werden. Erst bei der Endmontage werden die elektronischen Baugruppen in das Gerät gefaltet. Diese Verfahren (wie z. B. flexible und starrflexible Leiterplatten oder biegbare Basis-Materialien) repräsentieren noch die konventionelle Modulbauweise und sind in ihrem räumlichen Aufbau stark eingeschränkt. Erst der Einsatz thermoplastischer Kunststoffe zur Herstellung von Schaltungsträgern eröffnet für die Konstruktion elektronischer Baugruppen die fast unbegrenzte Gestaltungsfreiheit der Spritzgußtechnik. Darüberhinaus können auf diese Weise auch mechanische Funktionen in den Schaltungsträger integriert werden, wie z. B. (siehe Bild 2):

- das **Gehäuse**, in dem das betrachtete Funktionsmodul zusammenfaßt wird,

- *Versteifungen*, zur mechanischen Stabilisierung der Baugruppe sowie
- *Montagehilfen*, wie Fügefasen, Schnappverbindungen etc. zur Befestigung von Bauteilen.

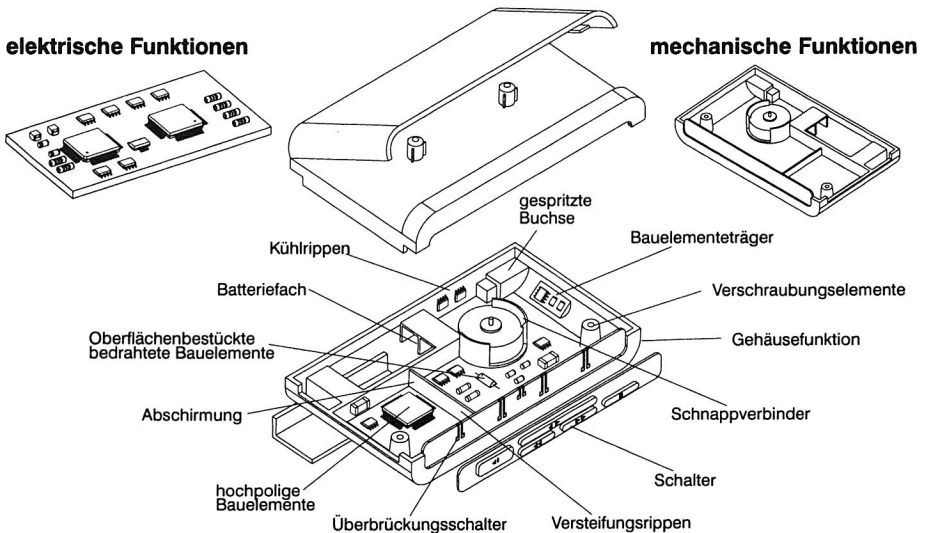


Bild 2: Integration mechanischer und elektrischer Funktionen [21]

Durch die strukturierte Metallisierung dieser Kunststoffformteile können darüberhinaus auch elektrische Funktionen in den Basisträger integriert werden, die bisher von separaten Teilen übernommen werden müssen, wie (siehe auch Bild 2):

- die *Leiterplatte* zur Aufnahme der elektronischen Bauelemente und zu deren Verdrahtung,
- *Kabelstränge*, zur Verbindung räumlich getrennter elektronischer Funktionen,
- *Stanzgitter*, die den elektrischen Strom innerhalb gespritzter Kunststoffteile führen,
- *Abschirmungen*, zum Schutz vor elektromagnetischer Ein- und Ausstrahlung,
- *Antennen*, zum Senden oder Empfangen elektromagnetischer Wellen,
- *Kühlflächen*, zur Abführung von elektrischer Verlustleistung,
- *Steckverbindungen*, z. B. zur elektrischen Kontaktierung mit anderen Baugruppen,
- *Fassungen, Schnappverbindungen, Sockel* etc. zur lösbaren Aufnahme und Kontaktierung elektrischer und elektronischer Bauteile,
- *Kontaktflächen*, zur Realisierung von Schaltern, Potentiometern oder Sensoren sowie
- *passive elektrische Funktionen*, wie Kapazitäten, Induktivitäten oder Widerstände.

Durch das enorme Potential zur Reduzierung der Teileanzahl, durch die Erschließung zusätzlicher Prozeßflächen z. B. zur Kühlung, Verdrahtung oder Plazierung von Bauelementen sowie durch die uneingeschränkten Möglichkeiten der geometrischen Gestaltung können elektronische Geräte damit kleiner und leichter gebaut werden.

Durch die Umgestaltung elektronischer Produkte in MID-Technologie kann so ein enormes Rationalisierungspotential erschlossen werden. Durch die Reduktion der Teileanzahl entfallen die Kosten für Material, Herstellung, Beschaffung und Logistik der substituierten mechanischen oder elektro-mechanischen Bauteile. Die miniaturisierten und leichteren MID-Baugruppen verringern den notwendigen Materialeinsatz. Teure Basiswerkstoffe für elektronische Anwendungen können teils durch günstigere Massenkunststoffe ersetzt werden. Der Spritzgießprozeß erzeugt Formteile bereits in der gewünschten Endform und in hervorragender Oberflächenqualität. Durch den Wegfall nachfolgender Bearbeitungsschritte, insbesondere das bisher notwendige Bohren der Durchgangslöcher und das Fräsen der Leiterplattenausschnitte, werden Prozeßketten zur Herstellung verkürzt und damit bereits bei planaren Schaltungsträgern mit komplexer Kontur deutliche Einsparungen erzielt. Die Montage wird sowohl durch die geringere Anzahl an Teilen als auch durch mögliche Vereinfachung in Form mechanischer Montagehilfen oder Fügefasen rationalisiert. Die Funktionsintegration in MID-Baugruppen vermindert die Zahl der notwendigen Verbindungsstellen zwischen unterschiedlichen Modulen. Potentielle Fehlerquellen werden damit vermieden sowie die Zuverlässigkeit erhöht.

Neue Produktionsinnovationen müssen von Beginn an auf ihre Auswirkungen auf die Umwelt überprüft werden. Die MID-Technologie zeichnet sich bezüglich ihrer Umweltverträglichkeit durch eine Reihe längst geforderter Verbesserungen aus. Bei der Vorbehandlung der wichtigsten MID-Kunststoffe zur haftfesten Metallisierung kann meist auf stark oxidierende Säuren (wie z. B. Chrom-Schwefel-Säure) verzichtet werden. Der physisch bedenkliche Glasstaub, der bisher bei der spanenden Bearbeitung der Leiterplatten entsteht, entfällt mit dem Wegfall dieser Prozeßschritte. Im Gegensatz zu den konventionell als Leiterplattenwerkstoff eingesetzten Schichtpreßstoffen auf Basis duroplastischer Kunststoffe sind die thermoplastischen MID-Basismaterialien nicht nur technisch, sondern auf Grund ihres Materialwertes auch wirtschaftlich sinnvoll wiederverwertbar. Die verwendeten hochtemperaturbeständigen Thermoplaste sind in der Regel bereits inhärent flammhemmend. Die umweltgefährdenden Zusätze wie z. B. die halogenierten Flammhemmer entfallen damit. Nicht zuletzt reduziert die geringere Anzahl an Teilen auch insgesamt die Werkstoffvielfalt, was ein späteres Recycling vereinfacht.

Die Summe der Vorteile verbessert die Wettbewerbsfähigkeit der Produzenten elektronischer Geräte auf der einen Seite durch kostengünstigere Produkte, effizientere Prozesse und gestraffte Logistik. Auf der anderen Seite erhöht sich der Kundennutzen durch miniaturisierte, ergonomischere und umweltfreundlichere Produkte.

2.3 Analyse realisierter MID-Applikationen

Vor der Definition durchzuführender Entwicklungsarbeiten muß der bestehende Stand der Technik eingehend untersucht werden, sowohl um unnötige Doppelarbeit zu vermeiden, als auch um auf Basis bestehender Lösungen schneller zu verbesserten Ergebnissen zu kommen. Zur Beherrschung des zu erwartenden Informationsvolumens, das eine komplexe Produktionsinnovation beschreibt, die wie die MID-Technologie von der Erforschung neuer Werkstoffe über die Entwicklung einer Vielzahl teils alternativer, teils sich ergänzender Herstellungs-, Montage- und Entsorgungsprozesse bis hin zur Realisierung rechnergestützter Werkzeuge reicht, muß eine streng systematisierte Vorgehensweise angewendet werden.

Ausgehend von der zu diesem Zweck weltweit durchgeführten, umfassenden Analyse der bisher in MID-Technologie realisierten Applikationen können Art und Eigenschaften der aktuell eingesetzten Materialien sowie technologische Beschreibungen und Grenzen der verwendeten Prozesse abgeleitet werden. Eine statistische Auswertung der untersuchten Produkte zeigt die Breite der Anwendungen in allen elektrotechnischen Industriezweigen und die Vielfalt der eingesetzten Verfahren auf⁷.

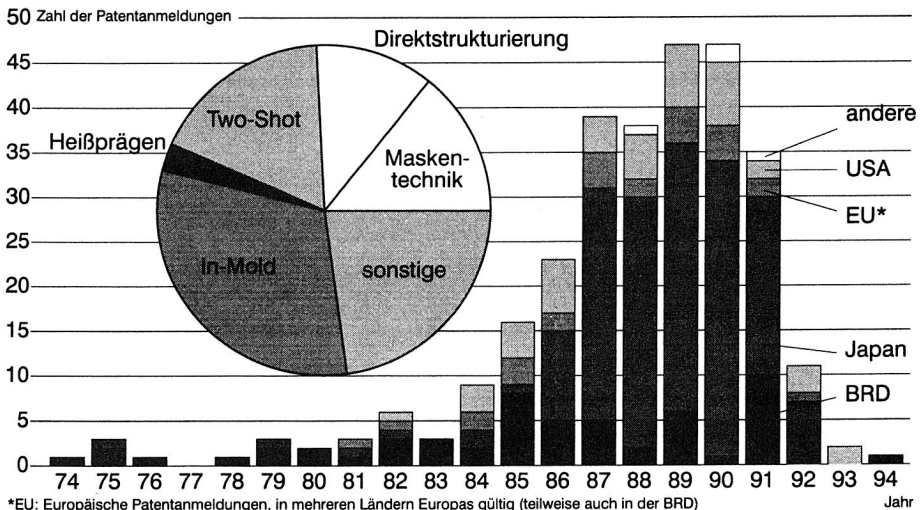


Bild 3: MID-relevante Patentanmeldungen nach Verfahren und Ländern

Mit der Durchführung einer ebenfalls weltweiten Recherche der die MID-Technologie betreffenden Offenlegungsschriften, Patentanmeldungen und -veröffentlichungen (weit über 300 analysierte Druckschriften) wurde eine weitere Möglichkeit genutzt, den derzeitigen dokumentierten Stand der Technik zu ermitteln. Bild 3 zeigt die zeitliche Entwicklung der Anmel-

⁷ Bei der MID-Applikationsanalyse wurde der Verfasser von Herrn cand. Ing. Markus Flierl unterstützt.

dungen, aufgeteilt nach Ländern und Prozeßketten. Japan meldete mit 162 Patenten die größte Anzahl an, obwohl sein Einstieg in die MID-Technologie erst relativ spät erfolgte. Bis etwa 1986 entwickelten Europäer und Amerikaner praktisch allein, während dann Japan sehr schnell zum aktivsten Anmelder wurde.⁸

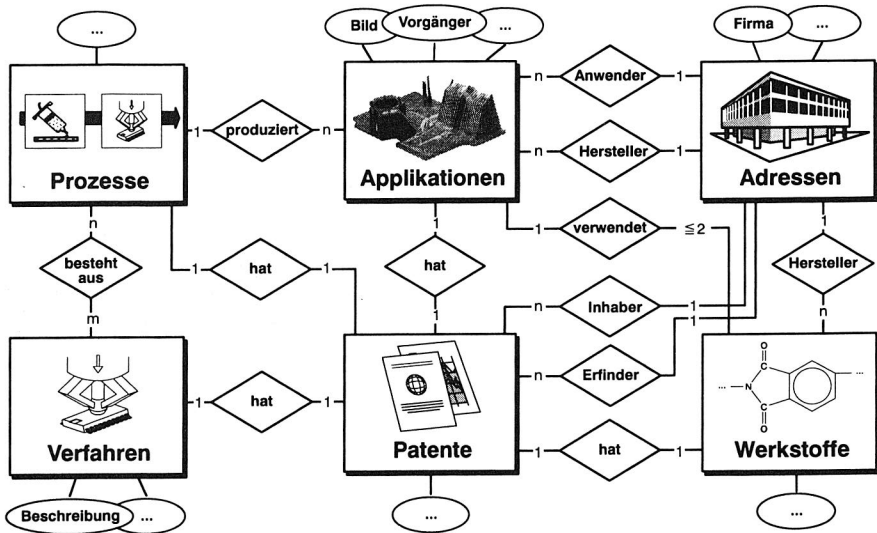


Bild4: E/R-Diagramm der MIDIS-Informationsbereiche

In der nach Prozessen strukturierten Übersicht in Bild 3 beinhaltet der Bereich *Direktstrukturierung* sowohl Verfahren der Laserstrukturierung von Resist- oder Metallschicht, als auch direktes Aufbringen von leitendem Material (z. B. durch Siebdruck) sowie das Recessed-Circuit-Verfahren. Die starke Dominanz der In-Mold-Anmeldungen korreliert mit dem starken Anstieg japanischer Anmeldungen, da es vor allem von japanischen Firmen angewendet wird. Maskentechnik und Direktstrukturierung dagegen wurden primär in den USA bzw. in Europa zur Serienreife entwickelt.

Um diese komplexe Informationsfülle adäquat strukturieren und verwalten zu können, wurde im Rahmen dieser Arbeit das rechnerbasierte MID-Informationssystem *MIDIS* entwickelt. Grundlage des Software-Werkzeuges stellt eine relationale Datenbank dar, die in der Lage ist, die vielfältigen Querbeziehungen der einzelnen Informationsbereiche abzubilden. In Bild 4 sind die Hauptmodule *Applikationen*, *Prozeßketten*, *Einzel-Verfahren*, *Werkstoffe*, *Patente* und *Adressen* sowie deren Interdependenzen in einem Entity-Relationship-Diagramm verdeutlicht. Um die komplexen technischen Zusammenhänge anschaulich darstellen zu können, werden neben alphanumerischen Daten insbesondere auch graphische Informationen zur Verfügung gestellt [vgl. 22].

⁸ Die Abnahme der Zahl der Patentanmeldungen ab 1990 liegt in der zeitlich versetzten Verfügbarkeit der Anmeldeschriften begründet.

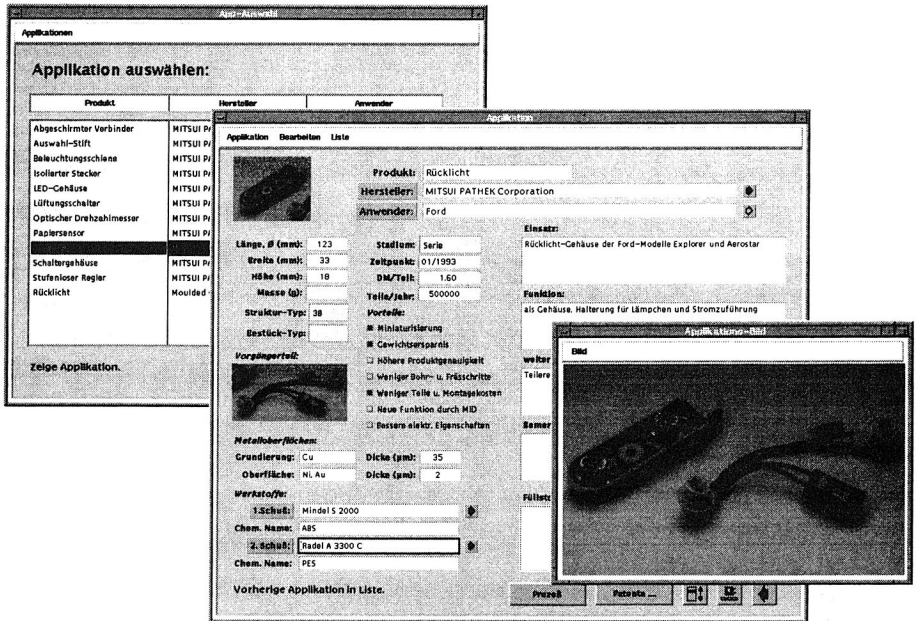


Bild 5: Informationsverwaltung über Applikationen in MIDIS

Um die für die Weiterentwicklung der MID-Technologie etablierte, fachübergreifende Zusammenarbeit vieler Forscher in weit auseinanderliegenden Unternehmen und Forschungseinrichtungen effizient mit relevanten und aktuellen Daten unterstützen zu können, wurde eine Informations-Distributions-Strategie entwickelt, die auf unterschiedlichen Datenkanälen basiert. Selbstverständlich kann das abgelegte Wissen in regelmäßigen Abständen ausgedruckt und auf dem Postwege versandt werden. Die umfangreichen Möglichkeiten der strukturierten Abfrage und der implementierten Querbeziehungen gehen dadurch jedoch verloren. Der allgemeinen hohen Durchdringung mit Personal-Computern Rechnung tragend, wurde weiterhin ein automatisierter Update-Dienst implementiert, der zu beliebigen Zeitpunkten den neuesten Informationsstand auf CD-ROM extrahieren kann, die wiederum mit Hilfe eines eigens dafür entwickelten PC-basierten Multimedia-Systems gelesen werden kann. Die aktuellsten Informationen erhält man durch direkten Zugriff auf die Datenbankinhalte. Privilegierte Benutzer, denen ein Zugriffsrecht eingeräumt wird, können über die Fourth-Generation-Language-Oberfläche direkt auf MIDIS zugreifen. Schließlich ermöglicht ein Gateway auf das globale Rechnernetz Internet über einen sogenannten Daten-Browser des World Wide Webs von beliebigen, weltweit verteilten Standorten den gespeicherten Text und Grafik abzufragen⁹.

⁹ Bei der Entwicklung des MID-Informationssystems MIDIS wurde der Verfasser von Herrn cand. Inf. Fred Neumann, Herrn cand. Inf. Michael Schlundt und cand. Inf. Miltiadis Vidalis unterstützt.

2.4 Technisch-wirtschaftliche Analyse des MID-Marktpotentials

Die aufgezeigten neuen Konstruktions-Konzepte und Produkt-Ideen motivieren innovative Entwickler zu einer euphorischen Aufnahme der MID-Technologie. Daraus lässt sich intuitiv ein enormes Marktpotential ableiten. Wissenschaftlich fundierte Analysen über die Marktrelevanz dieser Produktionstechnologie liegen bislang jedoch nicht vor. Die von der *Molded Interconnect Devices International Association (MIDIA)* veröffentlichte Statistik aller in MIDIA organisierten MID-Hersteller (siehe Bild 6) [23] sagt zwar durch die prognostizierte jährliche Verdopplung des weltweiten Umsatzes ein expotentielles Wachstum voraus, das allerdings noch auf relativ niedrigem Niveau basiert. Die unterschiedlichen Größenordnungen werden durch Vergleich der weltweiten Marktzahlen für Leiterplatten (1993 ca. 20Mrd.US\$ [24, 25]) und MIDs (12,5Mio.US\$ [23]) deutlich. Nach den aktuellen Zahlen beträgt der MID-Markt damit nur etwa 0,7‰ des Leiterplattenmarktes.

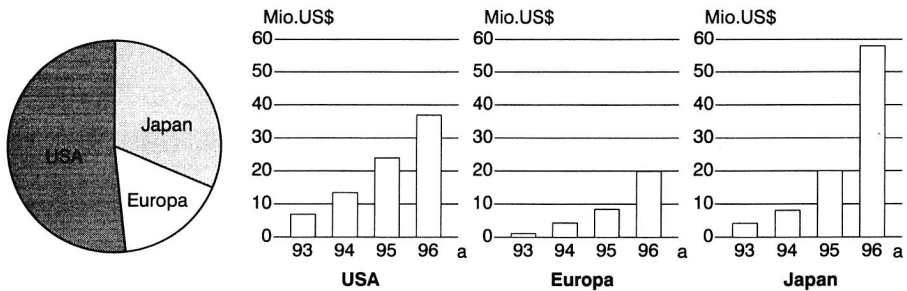


Bild 6: Der internationale MID-Markt 1994 in Mio.US\$ (nach [23])

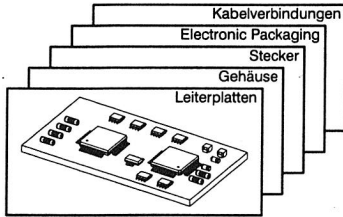
Um aufbauend auf den relativ gesicherten Prognosen der aktiven MID-Hersteller den potentiellen MID-Markt abzuschätzen, werden im folgenden geeignete MID-Einsatzgebiete exakt definiert und deren charakterisierende Eigenschaften herausgearbeitet. Die aus diesen Hauptanwendungsgebieten abzuleitenden Marktvolumina werden analysiert und zu einem Gesamt-Marktpotential subsummiert. Bild 7 zeigt die systematische Vorgehensweise zur Ermittlung des MID-Marktpotentials, in der alternierend auf der einen Seite technisch-wirtschaftliche Grundlagen erarbeitet werden, die auf der anderen Seite dann in ihrem Marktvolumen quantifiziert werden¹⁰ [26].

Der erste Schritt dient zur technischen Selektion spezifischer Elektronikteilbereiche, in den MIDs vielversprechend eingesetzt werden können. Aus der Analyse existierender MID-Applikationen sowie den Möglichkeiten der MID-Technologie werden räumliche Schaltungsträger insbesondere in den Bereichen *Leiterplatten*, *Gehäuse* und *EMV-Abschirmungen*, *elektromechanische Komponenten* (insb. Steckverbinder und Schalter), *Kabelverbindungen* sowie *IC- und MCM-Packaging* signifikante Marktanteile übernehmen können.

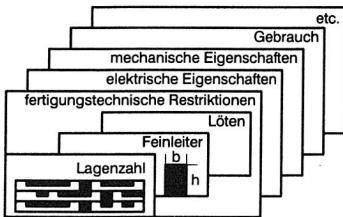
¹⁰ Bei der Analyse des MID-Marktpotentials wurde der Verfasser von Herrn Dipl.-Ing. Frank Pöhlau unterstützt.

Technische-wirtschaftliche Analysen

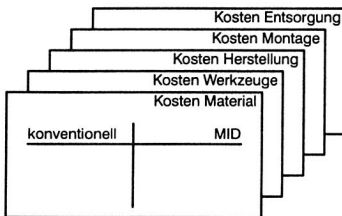
1. Analyse der MID-Hauptanwendungen



3. Analyse der technolog. Restriktionen

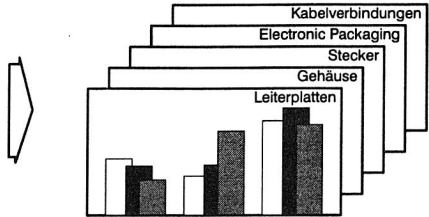


5. Prüfung wirtschaftl. Konkurrenzfähigkeit

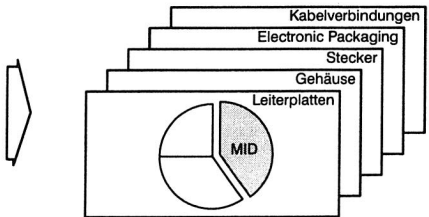


Quantifizierung der Märkte

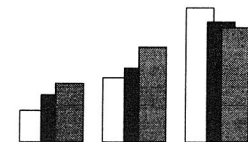
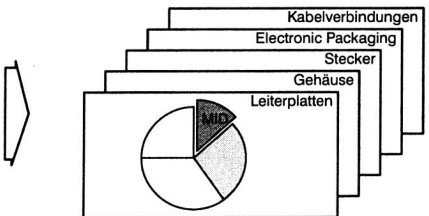
2. Quantifizierung Märkte und Wachstum



4. Selektion des technolog. MID-Potentials



6. Deduktion der realistischen MID-Potential



7. Gesamtmarktpotential



8. Regionale Verteilung



9. Technologierelevanz

Bild 7: Vorgehen zur technisch/wirtschaftlichen Analyse des MID-Marktpotentials

Diese ausgewählten Märkte wurden in Bezug auf absolute Größen, deren zeitliche Veränderung, mögliche technische Aufteilungen und auf regionale Verteilung quantifiziert. Da oftmals die zu dieser Vorgehensweise notwendigen Detailinformationen nicht verfügbar sind, müssen teilweise Werte approximiert werden (Bild 8 zeigt die Marktdaten im Überblick). In

einer weiteren Analyse wurden die technologischen Restriktionen der MID-Technologie in den spezifizierten Anwendungen herausgearbeitet. Daraus abgeleitet wurden die vorher detailliert aufgegliederten Marktvolumina dementsprechend reduziert. Ergebnis dieses Schrittes ist der monetär bewertete Umfang des technologischen Potentials der MID-Technologie.

In einer dritte Stufe wird abschließend noch geprüft, in welchen der technisch erschließbaren Bereiche der Einsatz der MID-Technologie auch wirtschaftlich sinnvoll ist. In dieser Abschätzung wurde versucht, auch Einschränkungen (Sicherheitsfaktoren) zu berücksichtigen, die auf Grund psychologischer Vorbehalte oder Marketingstrategien den potentiellen MID-Markt reduzieren könnten (Bild 9). Abschließend werden die ermittelten Werte zu einem realistischen MID-Marktpotential zusammengefaßt, das jährliche Wachstum prognostiziert sowie die Anteile der verfügbaren MID-Herstellungstechnologien geschätzt.

Der Leiterplattenmarkt kann technisch in ein- und doppelseitige Leiterplatten, Multilayer und flexible Schaltungsträger strukturiert werden. Da kommerziell bisher noch keine Multilayerapplikation in MID-Technologie existiert und auch unter technisch-wirtschaftlichen Kriterien für den definierten Analyse-Zeitraum noch keine mehrlagigen MIDs erwartet werden, wird deren Marktanteil aus den weiteren Betrachtungen ausgenommen. Damit bleibt ein technisch in MID realisierbares Marktpotential von ca. 50% des Gesamt-Leiterplattenmarktes übrig. Analysiert man das verbleibende Marktvolumen weiterhin nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten erkennt man, daß spritzgegossene Schaltungsträger konventionelle ein- und zweiseitige Leiterplatten insbesondere dann substituieren können, wenn entweder komplexe spanende Bearbeitungsschritte eingespart oder aus verschiedenen Gründen bereits dreidimensionale Elemente integriert werden können. Die positiven Effekte zur Miniaturisierung elektronischer Geräte prädestinieren MIDs auch zu einem Einsatz in Bereichen, die bisher von flexiblen Schaltungsträgern dominiert waren. Das in dieser Weise detaillierter aufgegliederte MID-Potential im Bereich planarer Leiterplatten kann konservativ zu etwa 10% des technisch realisierbaren Marktvolumens und damit zu circa 5% des Gesamt-Leiterplattenmarktes abgeschätzt werden.

Strukturiert metallisierte Kunststoffformteile bieten sich weiterhin zur Abschirmung gegen elektromagnetische Strahlung an. Um aus diesem Gesamtmarkt das MID-Potential ableiten zu können, wird dieser nach fertigungstechnologischen Kriterien gegliedert. Alle elektrochemisch metallisierten Gehäuse könnten demnach mit relativ geringem Zusatzaufwand für die Strukturierung der Beschichtung zu MIDs aufgewertet werden. Gehäuse, die bisher durch leitfähige Lacke oder durch Vakuumverfahren metallisiert werden, eignen sich auf Grund der geringen erzielbaren Leitfähigkeiten nur bedingt zur Übertragung elektrischer Ströme. Daraus kann ein Anteil technisch sinnvoller Anwendungen von etwa 30% abgeleitet werden. Der fließende Übergang zwischen EMV-geschirmten Gehäusen und "echten" MIDs läßt ein relativ großes wirtschaftliches Potential von etwa einem Drittel des technisch möglichen erwarten.

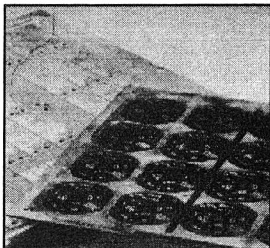
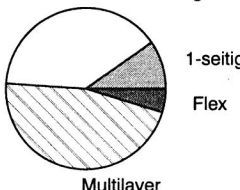
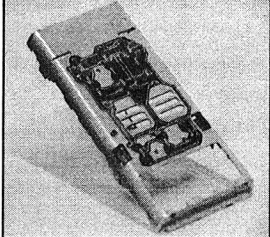
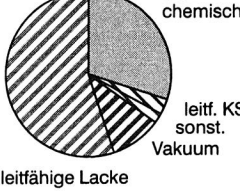
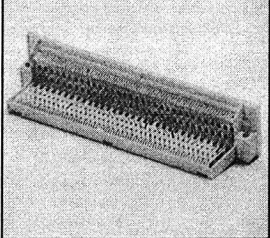
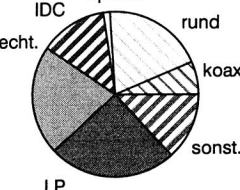
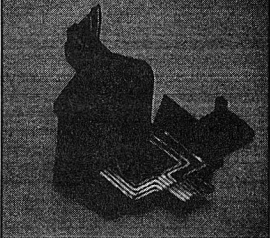
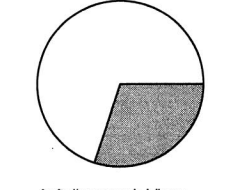
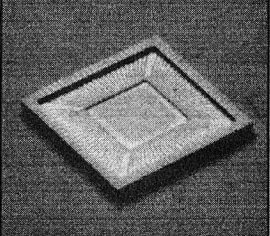
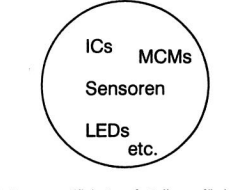



Leiterplatten		 <p>2-seitig 1-seitig Flex Multilayer</p>	<p>Gesamt: ca. 4 Mrd\$ Technisch: ca. 50 % Wirtschaftl: ca. 5 %</p> <p>(Quelle [24])</p>
Gehäuse und EMV		 <p>elektrochemisch leitfähige Lacke leitf. KS sonst. Vakuum</p>	<p>Gesamt: ca. 0,5 Mrd\$ Technisch: ca. 30 % Wirtschaftl: ca. 10 %</p> <p>(Quelle: div. Firmenstudien)</p>
Stecker		 <p>IDC optisch rund koax sonst. LP rech.</p>	<p>Gesamt: 3,31 Mrd.\$ Technisch: ca. 45 % Wirtschaftl: ca. 5 %</p> <p>(Quelle:[27])</p>
Kabelverbindungen		 <p>Aufteilung nach Länge</p>	<p>Gesamt: ca. 2 Mrd. \$ Technisch: ca. 30 % Wirtschaftl: ca. 5 %</p> <p>(Quelle:[28])</p>
IC-Packaging		 <p>ICs MCMs Sensoren LEDs etc.</p> <p>keine quantifizierten Anteile verfügbar</p>	<p>Gesamt: ca. 1 Mrd. \$ Technisch: ca. 5 % Wirtschaftl: ca. 1 %</p> <p>(Quelle:[29])</p> <p>  MID geeignet  MID bedingt geeignet  MID nicht geeignet </p>

Bild 8: MID – Hauptanwendungsbereiche (Marktzahlen für Europa)

Schwieriger abzuschätzen ist der sehr vielschichtige Markt für Steckverbinder. Da fast alle analysierten MID-Applikationen in irgendeiner Weise Funktionen zur elektrischen Verbindung mit anderen Modulen integriert haben, ist jedoch auch dieses Gebiet von besonderer Bedeutung. Technisch äußerst schlecht zu realisieren sind davon die optischen, coaxialen und die Rundstecker. Obwohl bereits ein Patent für einen IDC¹¹-Steckverbinder in MID-Technologie existiert, wird diese spezielle Art, zusammen mit den sonstigen Steckverbindern, als bedingt geeignet eingestuft und daher nicht zu dem potentiellen MID-Markt hinzugezählt. Von den technisch möglichen Leiterplatten- und Rechtecksteckverbindern (zusammen ca. 45%) wird derjenige Teil abgezogen, der die federnden Elemente besitzt (-50%). Von den verbleibenden 25% des Gesamtmarktes wird einem Fünftel die Chance eingeräumt, kostengünstiger in MID-Technologie hergestellt werden zu können (=5%).

Technisch/wirtschaftliches Potential: ca. 500 Mio.\$
Umsatzprognose aktiver Hersteller: ca. 14 Mio.\$

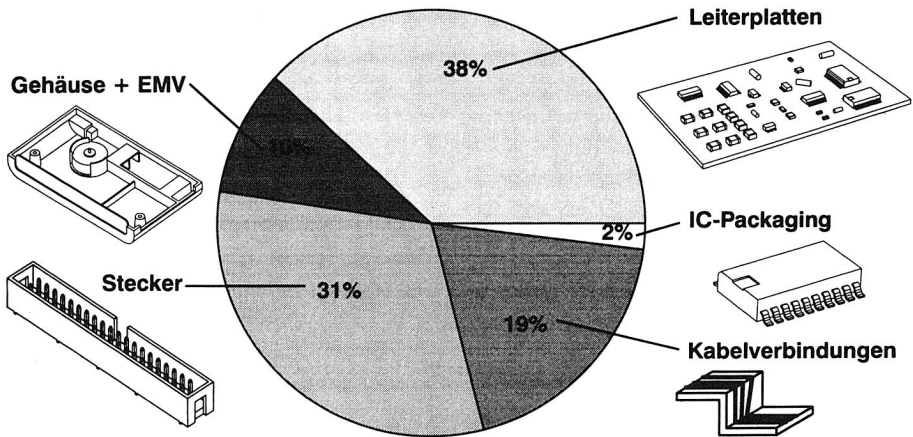


Bild 9: MID-Marktpotential Europa 1995

Ein weiteres, sehr dynamisches Marktfeld (seit 10 Jahren durchschnittliche Wachstumsraten von über 10%) für MIDs ist das der Kabelverbindungen. Durch Einsatz der MID-Technologie könnten nicht nur Herstellungskosten reduziert, sondern auch der Einbau der elektrischen Verbindungen stark vereinfacht werden kann. Technische Restriktionen ergeben sich insbesondere aus den geforderten Leitungsquerschnitten, -längen etc. Prognosen für die hier erreichbaren Produktionszahlen lassen sich nur sehr schwer anstellen, da MIDs in diesem Bereich zumeist nicht nur die Kabel ersetzen, sondern gleichzeitig auch Stecker, Ge-

¹¹ IDC: Insulation Displacement Connectors, Schneidklemmtechnik

häuse oder weitere Funktionen mit übernehmen. Daher wird das technisch-wirtschaftliche Potential hier vorsichtig auf 5% geschätzt.

Ein in Europa und den Vereinigten Staaten von den MID-Anwendern bisher stark vernachlässigtes Gebiet, auf dem in Japan bereits große kommerzielle Erfolge verbucht werden, ist das Packaging von elektronischen Komponenten. Verschiedene Firmen stellen dort Gehäuse für Integrierte Schaltungen und optische Bauteile (LEDs, Optokoppler, Fotosensoren etc.) in MID-Technologie her. Nach deren Angaben wird 1996 der Markt allein in diesem Bereich dort über 50Mio.US\$ betragen. Basierend auf diesen positiven Erfahrungen aus Japan wird auch für den europäischen Markt mit einer gewissen Akzeptanz gerechnet (1% des gesamten Packaging-Marktes).

Nach dieser ersten vorsichtigen Analyse zufolge kann man bereits 1995 mit einem technisch möglichen und wirtschaftlich sinnvollen MID-Marktpotential in Europa von ca. 500 Mio.US\$ rechnen. Diese Zahl wird von den bisher aktiven MID-Herstellern sicherlich nicht realisiert werden können. Daraus resultiert auch die große Diskrepanz zu dem vom internationalen Verband der MID-Hersteller (MIDIA) geschätztem Umsatz von ca. 14 Mio.\$.. Wenngleich darüberhinaus die Möglichkeit besteht, daß zusätzliche Produzenten spritzgegossener Schaltungsträger die MIDIA-Prognose nach oben korrigieren werden, bleibt abzuwarten, wie schnell potentielle Anwender dieser Produktionsinnovation die offenliegenden Einsparungspotentiale ausnutzen und damit die Lücke zwischen Rationalisierungspotential und -umsetzung schließen werden.

Die in diesem Kapitel einleitend aufgezeigten technischen Verbesserungsmöglichkeiten sowie das hier abgeleitete kommerzielle Marktpotential begründen die Notwendigkeit, die Innovation der räumlichen spritzgegossenen Schaltungsträger weiterzuentwickeln und damit weitere Anwendungsgebiete zu erschließen. Dies soll im folgenden Ziel der vorliegenden Arbeit sein.

3. Strukturierte Metallisierung von Kunststoffformteilen

Der wichtigste Prozeßschritt zur Herstellung spritzgegossener Schaltungsträger ist die haftfeste und strukturierte Metallisierung von Kunststoffformteilen. Genau dieser Prozeßschritt hebt MIDs von zum Zwecke der Abschirmung ganzflächig beschichteten Kunststoffgehäusen ab und eröffnet die im vorangegangenen Kapitel beschriebenen neuen Gestaltungsmöglichkeiten für elektronische Geräte. Dieser Prozeß zeichnet sich weiterhin durch dessen hohen technologischen Anspruch aus: Leiterbahnen müssen mit sehr großer Schälffestigkeit ($> 1\text{N/mm}$), in feinsten Struktur (bis ca. $100\mu\text{m}$) und auf räumlich geformten Flächen aufgebracht werden. Da letztendlich speziell dieser Prozeßschritt in der Vergangenheit Gegenstand intensiver Untersuchungen zum Thema MID war [30], sind heute bereits Verfahren verfügbar, die unter industriellen Maßstäben einsetzbar sind [31].

Vor einer genauen Analyse der Möglichkeiten zur strukturierten Metallisierung wird einleitend auf die einsetzbaren Werkstoffe eingegangen. Dazu wird eine auf die neuen Randbedingungen angepaßte Methode zur Materialauswahl vorgeschlagen. Danach werden Anforderungen aus Herstellung und Anwendung für MID-Basismaterialien analysiert und strukturiert sowie relevante, insbesondere thermoplastische Kunststoffe vorgestellt und Möglichkeiten zu deren Verarbeitung aufgezeigt.

Die Verfahrensketten zur Fertigung von Molded Interconnect Devices setzen sich häufig aus bereits bekannten Einzelprozessen zusammen. Die Innovation liegt deshalb oft vor allem in ideenreichen Applikationen und insbesondere der sinnvollen Kombination der Hauptprozesse Formgebung, Metallisierung und Strukturierung. Auf Grund der engen prozeßtechnischen Verbindung der Schritte zur Erzeugung des Leiterbildes werden die Möglichkeiten zur Metallisierung und Strukturierung integriert betrachtet. Die zum Stand der Technik am häufigsten angewendeten galvanischen Verfahren [32] sowie weitere alternative Technologien werden beschrieben und vergleichend bewertet.

Wesentliche Vorteile im Hinblick auf Flexibilität gegenüber unterschiedlichen Substratmaterialien, Prozeßrobustheit, Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit könnten physikalische Beschichtungsverfahren bieten. Aufgrund noch ungelöster Probleme zur Erzeugung dicker und hafter Schichten auf temperaturempfindlichen Substraten sowie deren Strukturierung auf dreidimensionalen Flächen existieren bisher noch keine Anwendungen für räumliche Schaltungsträger. Schwerpunkt dieses Kapitels liegt daher in der Entwicklung von Lösungsansätzen für die Herstellung strukturierter Leiterbilder auf thermoplastischen Basismaterialien mittels PVD. Im letzten Teil dieses Kapitels wird der Frage nachgegangen, inwieweit diese innigen Verbünde aus Kunststoffsubstraten und metallisierten Oberflächen zum Zwecke einer ökologisch vertretbaren Wiederverwertung wieder getrennt werden können.

3.1 Auswahl und Einsatz geeigneter Basismaterialien

Die Erforschung neuer Materialien begründet zu einem wesentlichen Teil die Fortschritte in der Leistungssteigerung elektronischer Produkte. Insbesondere moderne Kunststoffe haben sich ein breites Feld von Anwendungen in der Elektronik erschlossen. So gingen maßgebliche Impulse für die Entwicklung der MID-Technologie von der Einführung der Hochtemperaturthermoplaste aus [33].

3.1.1 Methodische Vorgehensweise zur Auswahl von Kunststoffen für MID-Anwendungen

Auf Grund der hohen Anzahl an Typen und Einstellungen der Kunststoffe ist deren Auswahl äußerst komplex, und die Vergleichbarkeit wegen der vielen unterschiedlichen Eigenschaften schwierig. Dies wird durch Besonderheiten und Abhängigkeiten erschwert, die beim Einsatz zu berücksichtigen sind. Um eine unabhängige Werkstoffauswahl zu erleichtern, wurden Werkstoffdatenbanken aufgebaut¹². Demgegenüber stehen sogenannte Applikationsdatenbanken¹³, in denen Erfahrungswissen über den Einsatz von Kunststoffen verwaltet wird.

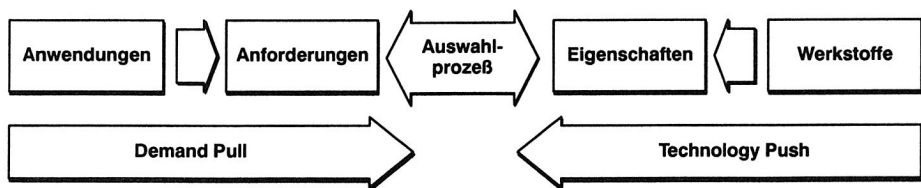


Bild 10: Spannungsfeld Auswahl von Werkstoffen

Resultierend aus einer definierten Anwendung muß die Gestaltung von Produkten, deren Baugruppen und Teile genau spezifizierte Anforderungen erfüllen, letztendlich zu dem Anforderungsprofil für die einzusetzenden Werkstoffe führen. Auf der anderen Seite ist jeder Werkstoff mit bestimmten, nach technischen Gesichtspunkten meßbaren Eigenschaften behaftet, dem Eigenschaftsprofil. Ziel eines methodischen Auswahlprozesses ist eine möglichst eindeutige Zuordnung von Anforderungen und Eigenschaften. Dieses unter realistischen Randbedingungen nur sehr schwer zu erreichende Ziel kann von der technischen Anwendung aus gegangen werden, um einen passenden Werkstoff zu finden (demand pull) oder umgekehrt, startend bei einem, meist neuen Werkstoff, um geeignete Anwendungen zu suchen (technology push). Letztere Strategie war zu Beginn der MID-Technologie insbesondere von den betreffenden Kunststoffherstellern verfolgt worden.

¹² z. B. CAMPUS Werkstoffinformationssystem der kunststoffverarbeitenden Industrie

¹³ z. B. POLYDATA.

Die bisherige Vorgehensweise zur Auswahl geeigneter Werkstoffe stellt die Konstruktion der geometrischen Gestalt der Werkstoffauswahl voran und geht damit von einer existierenden Funktionsstruktur aus [34]. Eine detailliert durchgeführte Analyse der Anforderungen an zu realisierende Kunststoffkonstruktionen zeigt jedoch, daß die Mehrzahl der zu erfüllenden Kriterien zu einem wesentlichen Teil vom Polymer beeinflusst werden. Daraus folgt zwangsläufig, daß das werkstoffneutral gestaltete Produkt nicht optimal auf die Eigenschaften und Verarbeitungsspezifika des später eingesetzten Kunststoffes angepaßt sein kann. Demgegenüber erfordert insbesondere die komplexe Aufgabenstellung an den thermoplastischen MID-Grundkörper eine zum Konstruktionsprozeß parallele Werkstoffauswahl, die durch eine grobe Vorauswahl des Materials angenähert werden kann. Die an die Funktionsstruktur gestellten Anforderungen müssen dazu für den Werkstoff und die konstruktiven Möglichkeiten abgeleitet werden. Wirtschaftliche Kriterien werden in beiden Stadien der Werkstoffauswahl mit unterschiedlicher Gewichtung beachtet.

3.1.2 Basismaterialien für Molded Interconnect Devices

Die wichtigsten Auswahlkriterien für Basismaterialien elektrischer Schaltungsträger werden im folgenden in folgende Bereiche strukturiert:

- mechanische Eigenschaften
- thermische Eigenschaften
- elektrische Eigenschaften
- Verarbeitbarkeit,

Diese Eigenschaften dürfen jedoch nicht nur isoliert betrachtet werden, da nahezu sämtliche Kenngrößen sich gegenseitig beeinflussen. Aufgrund der vielfältigen Einsatzmöglichkeiten von Kunststoffen und der zahlreichen zu berücksichtigenden Einflußfaktoren wurden von Herstellern und Anwendern verschiedene Prüfverfahren entwickelt. Dies führte jedoch zu einer eingeschränkten Vergleichbarkeit der Kenngrößen. Die genaue Angabe des verwendeten Verfahrens (z. B. DIN, ANSI etc.) sowie die genaue Spezifikation der Umgebungsparameter ist daher essentiell.

Durch den Einsatz der Materialien sowohl für Schaltungsträger als auch für Gehäuse ergibt sich eine erhebliche Bedeutung der mechanischen, elektrischen und thermischen Eigenschaften. Einerseits muß die Funktion der Schaltung sichergestellt werden – hierzu sind vor allem die Isoliereigenschaften (Durchgangs- und Oberflächenwiderstand) und die Metallisierbarkeit des Materials wichtig – andererseits soll das Gehäuse der Schaltung Schutz bieten, die mechanischen Eigenschaften (Zug-, Biegefestigkeit, E-Modul, Schlagfestigkeit) spielen also ebenso eine wichtige Rolle [35].

Im Hinblick auf die Verarbeitung (insbesondere den Lötvorgang), aber auch auf den späteren Gebrauch, sind die thermischen Eigenschaften Schrumpfung, Temperatur-Zeit-Verhalten, Schmelz- und Dauergebrauchstemperatur und Wärmeausdehnungskoeffizient hervor-

zuheben. Neben diesen Eigenschaften sind wiederum die Möglichkeiten der Metallisierbarkeit (Haftfähigkeit von Leiterbahnen und Lotpads) und –besonders bei Einsatz des Kunststoffes als Gehäusematerial– Kriterien wie Oberflächenbeschaffenheit, Einfärbbarkeit oder Lackierbarkeit zu berücksichtigen. Letzendlich ist auch schon bei der Gestaltung auf die spätere Wiederverwertung oder Entsorgung zu achten [36]. Die zahlreichen Anforderungen, die bei der Auswahl und Verarbeitung des richtigen Substratwerkstoffes beachtet werden müssen, lassen sich anhand des Lebenslaufs des Produktes darstellen (Bild 11).

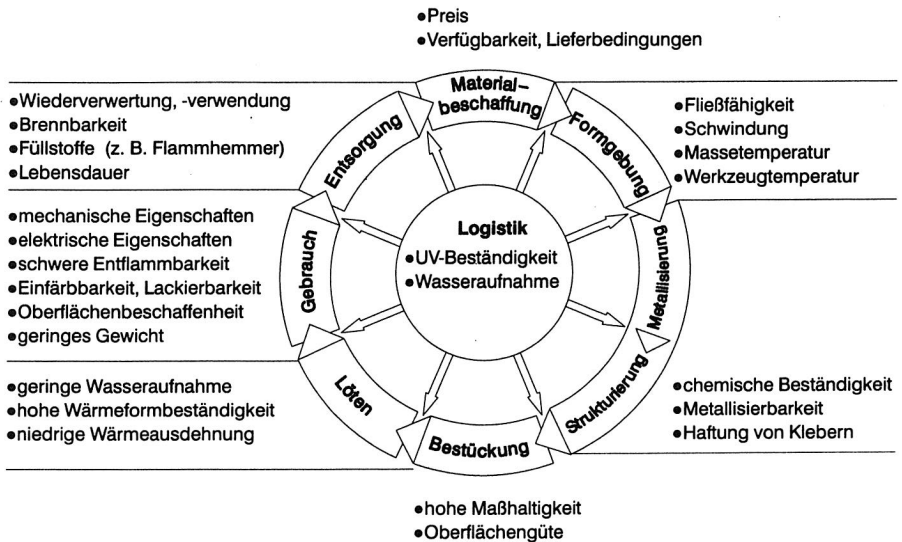


Bild 11: Anforderungen an thermoplastische Basismaterialien

In der verfügbaren Fachliteratur werden die Eigenschaften herkömmlicher Substratmaterialien für elektronische Schaltungsträger wie Keramik für Hybridbaugruppen oder glasfaserverstärkte Epoxidharzlaminate (FR4) mit potentiell geeigneten Thermoplasten für spritzgegossene Schaltungsträger (insb. Liquid Cristal Polymer LCP, Polyetherimid PEI etc.) eingehend verglichen [z. B. 39, 40, 41, 42]. In Abhängigkeit von Applikation sowie ausgewähltem Herstellungsverfahren und eingesetzter Montagetechnologie läßt sich eine große Vielfalt unterschiedlicher Thermoplaste anwenden. Grundsätzlich kann aufgrund der hervorragenden Verarbeitbarkeit der Thermoplaste die Formgebung räumlicher Schaltungsträger in allen zur Verfügung stehenden Technologien der Ur- und Umformung [37] sowie der weiteren trennenden, füllenden oder beschichtenden Verfahren durchgeführt werden [38].

3.2 Prozeßtechnische Kombination von Strukturierung und Metallisierung

Metallisierung und Leiterbildstrukturierung für Molded Interconnects sind prozeßtechnisch eng miteinander verknüpft. Je nach Abfolge der einzelnen Verfahrensschritte kann unterschieden werden zwischen additiver, semiadditiver und subtraktiver Leiterbilderzeugung (siehe Bild 12). In additiven Verfahren werden nur die zu metallisierenden Bereiche der Substrat-Oberfläche selektiv in einem Schritt bis zur gewünschten Schichtstärke aufgebaut. Der Strukturierungsprozeß muß dazu folglich vor oder spätestens während der Beschichtung stattfinden. Subtraktive Verfahren sind dadurch gekennzeichnet, daß zuerst vollflächig metallisiert wird und danach selektiv die Beschichtung an den Stellen entfernt wird, die keine elektrische Funktion tragen sollen. Semiadditive Verfahren verbinden diese beiden Vorgehensweisen, indem zuerst ganzflächig metallisiert, danach strukturiert und die bereits aufgebrauchte Schicht selektiv verstärkt wird. Durch die unterschiedlichen Schichtdicken kann in einer ganzflächigen Differenz-Subtraktion, die nur eine gezielt eingestellte Schichtstärke abträgt, das gewünschte Leiterbild erzeugt werden.

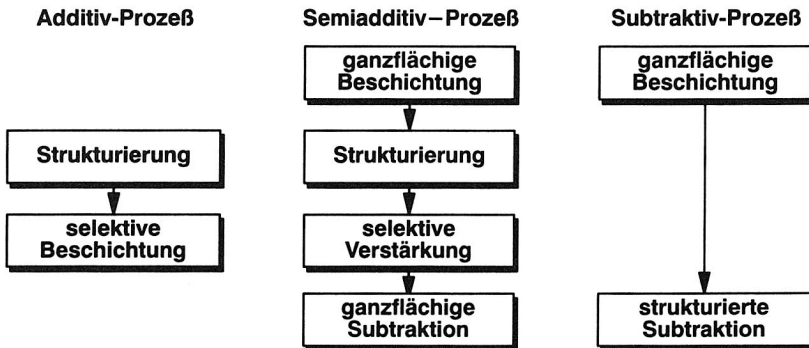


Bild 12: Kombination von Metallisierung und Strukturierung

Wie diese Gliederung der Verfahren zeigt, kann der Strukturierungsprozeß fast allen Stufen der Metallisierung zwischengeschaltet werden, wie z. B. im Spritzgußprozeß durch Formgebung des Werkzeuges, durch aufgelegte Masken oder Resiste sowie über phototechnische Belichtung. Die Analyse der MID-Herstellungsverfahren im 4. Kapitel wird diesen Sachverhalt weiter verdeutlichen. Diese vor allem in der galvanischen Leiterplattenherstellung gebrauchte Definition soll im folgenden auch für die Eingruppierung anderer Verfahren zur Erzeugung von Leiterbildern verwendet werden. Aufgrund der Vielfalt der möglichen Alternativen sollen im folgenden nur die wichtigsten heute eingesetzten sowie zusätzlich technisch vielversprechende Verfahren kurz erläutert und miteinander verglichen werden, um daraus Entwicklungspotentiale für die physikalische Beschichtung in der Dampfphase abzuleiten.

3.2.1 Galvanische Verfahren

Die Vorteile einer Kombination von elastischen, leichten und einfach herzustellenden Kunststoffformteilen mit der Verschleißfestigkeit, den elektrischen Eigenschaften und dem optischen Eindruck von Metallen durch chemo-galvanische Beschichtung werden bereits seit den sechziger Jahren kommerziell genutzt. Die dadurch vorhandene breite Erfahrungsbasis auf diesem Gebiet ist auch der Grund, daß heute nahezu alle aktuell laufenden MID-Applikationen mit Hilfe galvanischer Verfahren metallisiert werden. Die Prozeßkette setzt sich aus der Vorbehandlung des Kunststoffes, der Aktivierung, der chemischen und schließlich der elektrolytischen Metallabscheidung zusammen [43].

In der Vorbehandlung werden die Substrate, an die sehr hohe Anforderungen an Material-Qualität und Sauberkeit gestellt werden, in vielstufigen chemischen Prozessen gebeizt und teilweise auch zusätzlich angequellt, um Oberflächenstrukturen zu erzeugen, die eine mechanische Verankerung der Metallschicht begünstigen [44]. Da viele der zu metallisierenden Kunststoffe chemikalienbeständig sind, müssen häufig sehr aggressive Oxidationsmittel (z. B. Chromschwefelsäure, Phosphorsäure etc.) eingesetzt werden. Die Notwendigkeit einer exakten Abstimmung auf die spezifischen Kunststoffe macht diesen Verfahrensschritt gegenüber unterschiedlichen Materialien äußerst unflexibel¹⁴.

Auf den so vorbereiteten Oberflächen werden Edelmetallkeime (meist Palladium) aus einer Aktivatorlösung haftfest verankert, die als Katalysatoren die chemische Metallabscheidung starten. Danach werden die im elektrolytischen Bad vorhandenen, positiv geladenen Metallionen (meist Kupfer- oder Nickelionen) neutralisiert und an den Metallkeimen abgelagert, während gleichzeitig das ebenfalls an der Reaktion beteiligte Reduktionsmittel oxidiert wird. Insbesondere in Japan wird diese rein stromlose Metallisierung verstärkt eingesetzt [45].

In dem abschließenden elektrolytischen Metallisierungsprozeß werden die nur wenige Mikrometer starken chemisch aufgebracht Kupfer- oder Nickelüberzüge mit höheren Abscheideraten verstärkt, indem das leitend gemachte Kunststoffteil als Kathode geschaltet wird, an dem sich die im Elektrolyten vorhandenen Metallionen unter Aufnahme der aus der Stromquelle zur Verfügung gestellten Elektronen ablagern.

Die aufwendige, unflexible und umweltkritische Vorbehandlung der Kunststoffe kann alternativ durch sogenannte Primer, die z. B. aus Bindemitteln (z. B. Polyurethan, Polyacrylat), Füllstoffen (z. B. TiO_2 , Talkum, Ruß, Aerosil, Bariumsulfat), Hilfsstoffen, Lösemitteln sowie einem organometallischen Aktivator besteht, ersetzt werden [46]. Durch unterschiedliche rheologische Einstellungen des Primers kann er wahlweise aufgesprüht, -gedruckt oder -gerakelt werden. Nach einem Trocknungsprozeß werden sehr gute Haftfestigkeiten zwischen Primer und Substrat erzielt; durch einen Verwurzelungseffekt ergeben sich ebenfalls akzeptable Ergebnisse für die Haftung der Metallschicht.

¹⁴ vgl. auch [32]: Vergleich verschiedener Vorbehandlungsmethoden speziell für PEI.

Intrinsisch leitende Polymere (Intrinsically Conducting Polymers ICP) begründen ihre Leitfähigkeit nicht durch leitfähige Additive, sondern aus der besonderen Anordnung deren elektronischer Zustände, der Elektronenenergie bzw. -beweglichkeit des Polymers. Gemeinsam ist den ICPs der Aufbau aus möglichst ausgedehnten Molekülketten mit konjugierten Doppelbindungen, die durch Dotieren von Überschußladungen fast metallische Leitfähigkeit bekommen können [47, 48]. Diese Leitfähigkeit reicht aus, um ICP-beschichtete Leiterplattenbohrungen elektrolytisch zu verkupfern. Auf diese Weise spart man den Vorbehandlungs-, Aktivierungs- und chemischen Beschichtungsprozeß ein. Dieses Verfahren wird zur Zeit auch für größere Entfernungen zur Stromquelle weiter entwickelt und könnte damit auch für die Metallisierung größerer Oberflächen eingesetzt werden.

Der LAD(Laser Assisted Deposition)-Prozeß basiert auf der Verwendung metallorganischer Palladiumverbindungen die mit Hilfe eines Excimerlasers selektiv belichtet werden [49]. Die thermoplastischen Werkstoffe werden zuerst mit Hilfe der konventionellen Vorbehandlung ähnlicher Methoden der Bekeimung vorbereitet. Danach wird ein Pd-haltiger Precursor z. B. durch Sprühen oder Tauchen in einer sehr dünnen Schicht (100–1000Å) auf das Substrat aufgebracht, der durch die Belichtung mit einem Excimerlaser ($\lambda=248\text{nm}$) durch eine Maske selektiv zersetzt wird. Dabei werden die im Precursor enthaltenen Palladiumatome freigesetzt, die wiederum als Katalysatoren für die nachfolgende chemische Metallisierung dienen.

3.2.2 Auftrag von Leitmaterialien

Im Gegensatz zur relativ aufwendigen galvanischen Metallisierung werden bei der sogenannten *Polymer Thick Film* – Technik (PTF) [50] leitfähige Pasten durch Druckverfahren (meist Siebdruck) auf das Substrat aufgebracht und bei ca. 130°C in konventionellen Trockenöfen ausgehärtet (ca. 1h). Durch die eingesetzten Materialien und den einfachen Herstellungsprozeß ist die PTF-Technik sehr wirtschaftlich [51]. Die relativ niedrigen Investitionskosten sowie die geringe Umweltbelastung ermöglichen eine problemlose Integration in die Baugruppenfertigung eines Elektronikproduzenten.

Die verwendeten Pasten erhalten ihre Leitfähigkeit durch dem polymeren Trägermaterial zugemischte Graphit- oder Metallpartikel (meist Silber, aber auch z. B. versilberte Nickelpartikel), die sich gegenseitig berühren. Der Widerstand der Pasten ist in hohem Maße auch abhängig von den Aushärteparametern Temperatur und Dauer. Durch abwechselnden Druck von leitfähigen und isolierenden Materialien können auch einfache mehrlagige Schaltungen realisiert werden. Wie in der Hybridtechnik bereits seit langem angewendet, können durch Einsatz spezieller Medien elektrische Widerstände direkt auf dem Schaltungsträger aufgetragen und damit konventionelle Bauelemente ersetzt werden. Auf die gleiche Weise können auch Kontakte für Tasten oder Verbindungsstellen kostengünstig hergestellt werden. Das Auffüllen von Bohrungen mit leitfähiger Paste erzeugt kostengünstige Durchkon-

taktierungen. Die Summe der Vorteile macht die PTF-Technik zu einem wirtschaftlichen Verfahren, das hervorragend mit thermoplastischen Basismaterialien zu kombinieren ist.

Die Nachteile liegen in der im Vergleich zu Kupferleiterbahnen geringeren Leitfähigkeit der Bahnen, der eingeschränkten Lötbarkeit der Leitpasten sowie der für den spezifischen Anwendungsfall nachzuweisenden Langzeitzuverlässigkeit. Die eingesetzten Drucktechniken begrenzen sowohl die geometrische Gestaltungsfreiheit des Schaltungsbildes auf die Typen der Klassen 0 – 2 (siehe Tabelle 1), als auch die Strukturfeinheit des Leiterbildes.

Eine spezielle Ausprägung leitfähiger Pasten stellen sogenannte organisch-metallische Leitpasten dar. Analog zu den keramisch-metallischen Pasten, die in der Hybridtechnik eingesetzt werden, bestehen sie aus einer organischen Komponente (Epoxidharze) und einem Gemisch aus einer niedrigschmelzenden Legierung (z. B. Zinn-Blei) und einem Metall mit hohem Schmelzpunkt (z. B. Kupfer). Im Härungsprozeß ($>210^{\circ}\text{C}$) umschmilzt die Zinn-Blei-Legierung die Kupferpartikel. Dabei entsteht ein kompakter metallischer Leiter aus einer Zusammensetzung neuer Legierungen, deren Schmelzpunkte sowohl höher als die der SnPb-Legierung, als auch der üblichen Löttemperaturen liegen. Durch die sehr kurze Aushärtezeit (ca. 60s), die am sichersten in Dampfphasenöfen erzielt werden kann, wird erreicht, daß das Harz erst dann polymerisiert, wenn der Verschmelzungsprozeß der Metalle abgeschlossen ist. Das Harz erzeugt eine innige Verbindung zwischen metallischem Leiter und Basissubstrat. Die enthaltenen Fluxe schützen die Kupferpartikel vor Oxidation vor und während des Sinterprozesses. Gegenüber konventionellen leitfähigen Pasten besitzen sie weitaus höhere Leitfähigkeit, gute Lötbarkeit, höhere Haftfestigkeit sowie verbesserte Langzeitzuverlässigkeit [52].

Bereits 1985 wurde ein trocken-additiver Prozeß zur Metallisierung spritzgegossener Schaltungsträger vorgestellt, bei dem lose aufgebraute Kupfer-Flakes mit Hilfe eines metallischen Stempels, der erhaben das Leiterbild trägt, durch Druck und Temperatur mit dem thermoplastischen Basismaterial verpreßt werden [53]. Metallpulver, das mit Kleber umhüllt oder auf eine Kleberschicht auf dem Substrat aufgebracht wurde, kann alternativ auch mit Hilfe eines Lasers durch das Aufschmelzen des Klebers gleichzeitig strukturiert und ausgehärtet werden [54].

Das in der planaren Leiterplattentechnik am häufigsten angewendete Metallisierungsverfahren ist das Aufkaschieren galvanisch hergestellter Metallfolien. Grundsätzlich ist diese Technologie auch für thermoplastische Grundkörper einsetzbar. Aufgrund der größeren z-Ausdehnung spritzgegossener Schaltungsträger hat sich im Gegensatz zu dem Walzenverfahren der planaren Technik ein Prägeverfahren etabliert. Bei diesem sogenannten Heißprägen wird mit einem beheizten Metallklischee das Leiterbahnlayout aus einer Kupferfolie gleichzeitig ausgestanzt und über einen hitzeaktivierten Kleber mit dem Substrat verbunden [55].

3.3 Strukturierte physikalische Beschichtung von Kunststoffkörpern

Aus vorangehenden Ausführungen wird deutlich, daß die heute zur Metallisierung von MIDs eingesetzten Verfahren zum weitaus größten Teil auf galvanischen Prozessen basieren [31]. Ein großer Nachteil der galvanischen Metallisierung ist jedoch die aufwendige Vorbehandlung der Kunststoffe, für die eine lange Kette sequentieller Einzelprozesse notwendig ist, die zudem spezifisch an die Eigenschaften der zu beschichtenden Basismaterialien angepaßt werden müssen [43, 56]. Damit kann jeweils nur eine stark limitierte Anzahl unterschiedlicher Kunststofftypen behandelt werden. Die Folge ist eine äußerst geringe Flexibilität bei der Umstellung auf alternative Basismaterialien. Die chemischen Stoffe zum Beizen und Anquellen der Oberflächen der meist besonders chemikalienbeständigen Kunststoffe sind unter Gesichtspunkten sehr bedenklich. Die aufwendigen Maßnahmen zur Arbeitssicherheit und Abwasseraufbereitung verursachen einen bedeutenden Teil der Beschichtungskosten. Weiterhin läßt sich die aus der Anwendung als spritzgegossene Schaltungsträger geforderte hohe Qualität für die Haftfestigkeit der Metallschichten nur bei Einhaltung sehr enger Prozeßfenster beim Spritzgießen und in den galvanischen Bädern gewährleisten [31, 32].

Stand der Technik

- Umweltbelastung durch naßchemische Verfahren
- Unflexible Vorbehandlung durch werkstoffspezifische Prozesse
- PVD-Schichtdicken $< 1\mu\text{m}$
- ganzflächige Metallisierung
- bisher Anwendungen in Shielding, Dekor, Sanitär

Entwicklungsziele

- Umweltfreundlichkeit durch alternative physikalische Verfahren
- Flexible Vorbehandlung durch werkstoffunabhängige Verfahren
- PVD-Schichtdicken $> 1\mu\text{m}$
- strukturierte Metallisierung
- Erweiterung der Anwendungsbreite um *Molded Interconnected Devices*

Bild 13: Entwicklungsziele zur PVD-gestützten Metallisierung für MIDs

Grundsätzlich bieten physikalische Verfahren zur Kunststoffmetallisierung aus der Dampfphase das Potential, die oben genannten Problemfelder zu lösen. Die in der naßchemischen Galvanik notwendigen zahlreichen Vorbehandlungsstufen lassen sich in nur einer Vakuumkammer durchführen. Die Prozeßkette wird dadurch eminent verkürzt. Zusätzlich können Kunststoffe beschichtet werden, die galvanisch überhaupt nicht metallisierbar sind. PVD(Physikal Vapour Deposition)-Verfahren benötigen keine flüssigen chemischen Medien, könnten aufgrund des höheren theoretischen Wirkungsgrads weniger Energie verbrauchen und sind damit besonders umweltfreundlich. Die physikalischen Vorbehandlungsmethoden sind universeller anwendbar und besitzen eine höhere Prozeßrobustheit. Letzendlich wird ein Kostenvergleich zeigen, daß auch unter Wirtschaftlichkeitsaspekten großes Potential in dieser Technologie steckt.

Diesen interessanten Vorteilen stehen jedoch noch wesentliche, ungelöste Probleme gegenüber, die die Tatsache begründen, daß bisher noch keine MID-Applikationen auf dieser Technologie basieren. Die heute unter technisch-wirtschaftlichen Kriterien erreichbaren Schichtdicken für die temperaturempfindlichen Kunststoffe liegen weit unter den Forderungen für Leiterbahnen. Die Haftfestigkeiten genügen bisher lediglich für optische oder EMV-Anwendungen. Zur grundsätzlich effizientesten Voll-Additiv-Metallisierung werden bisher noch nicht verfügbare Strukturierungstechniken benötigt. Aus dem Stand der Technik leiten sich die in Bild 13 gezeigten Entwicklungsschwerpunkte ab.

Legende:
 RT: Rezipiententemperatur
 ↓ 0,01-0,03DM/cm²·µm
 ⇔ 0,03-0,30DM/cm²·µm
 ↑ 0,30-1,80DM/cm²·µm

		Beschichtungsrate /nm/s	Substrattemperatur /mbar	Kosten /relativ	
<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">Thermische Verdampfung</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">PVD-Verfahren</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Kathoden-Zerstäubung</div> </div>	elektrische Widerstandsheizung	0,1-0,5	500-1500	10 ⁻⁴ -10 ⁻⁸	RT ↓
	Elektronenstrahlverdampfung	0,1-0,5	200-600	10 ⁻⁴ -10 ⁻⁸	RT ⇔
	Lichtbogenverdampfung	50-150	500-1500	10 ⁻⁴ -10 ⁻⁸	RT ↑
	Laserstrahlverdampfung	–	<500	10 ⁻⁴ -10 ⁻⁸	RT ↑
	Ionenplattieren	<40	0,5-15	10 ⁻² -10 ⁻³	>RT ⇔
	konventionelle Zerstäubung	40-100	800	5·10 ⁻³	>RT ⇔
	Hochleistungszerstäubung	1-100	60-200	10 ⁻⁴ -10 ⁻⁸	200-500 ↑

Bild 14: Übersicht alternativer PVD-Verfahren [57, 58, 59]

Zur Vermeidung von Kollisionen und den daraus folgenden Verunreinigungen in der Beschichtung werden physikalische Abscheidungsverfahren entweder im Hochvakuum oder unter kontrollierter Zufuhr reaktiver Gase durchgeführt [57]. Dabei werden feste Beschichtungsmaterialien in den dampfförmigen Aggregatzustand überführt, die anschließend auf den Substratoberflächen kondensieren¹⁵. Im wesentlichen unterscheiden sich die einzelnen PVD-Verfahren durch ihre Art, die Beschichtungsmaterialien in den dampfförmigen Zustand zu überführen (Bild 14). Sie finden hauptsächlich zur Erzeugung optischer Schichten (z. B. Kfz-Reflektoren, Compact Discs etc.), zur Folienbeschichtung (Dekoration, Barriereeigenschaften), zur elektromagnetischen Abschirmung von Kunststoffgehäusen sowie zur Herstellung elektronischer Funktionsschichten (Halbleiter, Hybride etc.) Anwendung [60].

¹⁵ In der englischsprachigen Literatur werden diese Verfahren demzufolge als *Physical Vapour Deposition* PVD bezeichnet.

3.3.1 Anforderungsanalyse physikalischer Beschichtungstechniken für MID

Wenngleich sich prinzipiell eine Vielzahl von Kunststoffen mit Hilfe physikalischer Verfahren metallisieren läßt, spielen deren Eigenschaften eine bedeutende Rolle für den Beschichtungsprozeß. Relevante Kriterien sind dabei insbesondere die spezifische Entgasungsrate, die Wärmeleitfähigkeit und Temperaturbeständigkeit, die Homogenität des Materials, die Beschaffung der Oberfläche sowie die enthaltenen Füllstoffe des thermoplastischen Substrates. Die Dicke der aufzutragenden Metallbeschichtung wird vor allem durch deren notwendige elektrische Leitfähigkeit bestimmt. Ab einer Schichtstärke von $3\mu\text{m}$ kann trotz der Neigung zu stäbchenförmigem Aufwachsen der Metallschicht bei herkömmlichen Bedampfungswerkstoffen (wie Cu, Al, Au, Ag etc.) von ausreichender Leitfähigkeit ausgegangen werden [58]. Ziel der Entwicklungen ist das Erreichen von Schichtdicken, die für elektrische Leiterbahnen eingesetzt werden können ($> 5\mu\text{m}$). Um die Widerstandsfähigkeit der Schicht gegen mechanische Beanspruchung und anderer Umwelteinflüsse gewährleisten zu können, muß eine Abschäl-Haftfestigkeit von etwa 1N/mm erreicht werden. In diesem Bereich liegen auch die Werte galvanischer Verfahren. Unter diesen Voraussetzung sollte eine möglichst große Auswahl unterschiedlicher Kunststoffe einsetzbar sein.

Die Anzahl der notwendigen Prozeßschritte kann effizient vermindert werden, wenn die Metallschicht selektiv nur dort aufgebracht wird, wo die elektrische Funktion gefordert ist. Es müssen daher Verfahren zur Maskierung entwickelt werden, die diese Volladditiv-Technik wirtschaftlich ermöglichen. Als Ziel für die Strukturfeinheit werden Leiterbahnbreiten und -abstände von $0,2\text{mm}$ definiert. Der Vorteil thermischer Verdampfungsquellen liegt auch darin, daß die Metallatome sich auf einem direktem, geradlinigen Weg auf das Substrat zubewegen und sich daher nur auf der der Beschichtungsquelle zugewandten Seite ablagern. Die Außenseite abschirmender Gehäuse muß damit nicht extra abgedeckt werden. Dieser lineare Partikelstrom wird zum Nachteil, wenn, wie bei spritzgegossenen Schaltungsträgern gefordert, auch komplizierte räumliche Strukturen gleichmäßig beschichtet werden sollen. Aus dem hier gültigen Kosinusetz¹⁶ kann abgeleitet werden, das homogene Schichtstärken praktisch nicht realisierbar sind und Hinterschneidungen oder Löcher schwierig zu metallisieren sind (gefordertes Aspektverhältnis > 1). Durch Erhöhung des Arbeitspartialdruckes (z. B. mit Argon) kann infolge statistisch verteilter Stöße diese geradlinige Ausbreitungsrichtung beeinflußt werden [61]. Weiterhin können entsprechende konstruktive Maßnahmen an Produkt oder Bedampfanlage dieses Problem jedoch minimieren. So können z. B. mehrere Verdampferquellen installiert oder das Substrat (bzw. das Target) bewegt werden [62].

¹⁶ "Auf einem planen Substrat ist die Menge n des an einem beliebigen Punkt kondensierte Materials proportional zu dem reziproken Quadrat der Entfernung von der Verdampferquelle und dem Kosinus des Winkels α zwischen der Senkrechten zum Substrat und der Verdampferquelle führenden Linie ($n \sim \cos\alpha/r^2$)" [59].

3.3.2 Systematische Vorbereitung der experimentellen Untersuchungen

Die Beschichtungsversuche wurden an zwei unterschiedlichen PVD-Anlagen durchgeführt: Eine Laboranlage, die mit einer Glimm-, Sputter- und Verdampfungseinrichtung ausgerüstet ist und eine mit einer Hochfrequenzreinigungsstufe ausgestattete, vollautomatisch gesteuerte Magnetronsputteranlage¹⁷.

Die Versuche wurden mit planaren Platten folgender Thermoplaste durchgeführt:

- Polypropylen PP mit 40% Talkum (Novolen 1111LX von BASF)
- Polyamid PA6/6 (Ultramid T von BASF)
- Polyethersulfon unverstärkt (Ultrason E 2010 von BASF)
- Polyethersulfon mit 40% Glasfaseranteil (Ultrason E 2010 G4 von BASF)
- Polyethersulfon mit mineralischen Füllstoffen (Ultrason E KR 4110 von BASF)
- Polyetherimid (Uitem 1000 von GEPlastic)

Die Oberflächenrauigkeit (R_a , R_{zISO} , R_{zDIN}) der gespritzten Kunststoffproben wurde vor den Versuchen mit einem Oberflächenmeßgerät bestimmt. Die Dicken der bedampften Metallschichten wurden einerseits mit einem Potentialmeßgerät ermittelt, andererseits über die Gewichtsdifférenz vor und nach dem Beschichten über folgenden rechnerischen Ansatz bestimmt¹⁸ (nach Stichprobenüberprüfung ca. 10% geringer als der gemessene Wert):

$$\text{Schichtdicke Kupfer } s_{Cu}: \quad s_{Cu} = \frac{\Delta m}{A \times \rho_{Cu}} \quad \begin{array}{l} \Delta m \text{ Massendifferenz} \\ A \text{ beschichtete Kunststofffläche} \\ \rho_{Cu} \text{ Dichte Kupfer (8,933g/cm}^3\text{)} \end{array}$$

Die Haftfestigkeiten wurden sowohl mit Hilfe der Gitterschnittprüfung (nach DIN 53.151 [63]) ermittelt als auch die nötige Abzugskraft eines 150µm breiten Streifen mit Hilfe eines Bondtesters gemessen. Die Leitfähigkeit der Kupferschicht wurde durch eine Wheatstonesche Meßbrücke mit einem Ohmmeßgerät bestimmt [siehe 64].

3.3.3 Wärmebelastung der Kunststoff-Substrate beim Aufdampfprozeß

PVD-Verfahren werden auch als Dünnschicht-Technologie bezeichnet. Der Einsatz der aufgetragenen Metallschichten zur Führung des elektrischen Stroms fordert jedoch ausreichende Schichtstärken. Diese Forderung wird durch die direkte Abhängigkeit der Leitfähigkeit vom Querschnitt der Leiterbahn begründet und zusätzlich verstärkt durch die Tatsache, daß dünne Schichten durch mögliche Defekte höhere elektrische Widerstände besitzen

¹⁷ Bei der Durchführung der Beschichtungsversuche wurde der Verfasser von Herrn Dipl.-Ing. Gunter Beitinger unterstützt.

¹⁸ Diese Methode zur Schichtdickenmessung wurde auf Grund ihrer einfachen Durchführbarkeit gewählt, obwohl thermoplastische Kunststoffe zur Wasseraufnahme vor bzw. -abgabe während des Bedampfungsprozesses neigen, und dadurch nach dem Beschichten ein geringeres Gewicht haben können. Da diese Methode jedoch einerseits durch parallele exakte Messungen kalibriert wurde, und andererseits die Wasseraufnahme vorher geringer ist als die Abgabe im Vakuumprozeß können die über die Gewichtsdifférenzmethode bestimmten Werte als Mindestschichtdicken angesehen werden.

können als massives Material (nach [57, 60] liegt die Leitfähigkeit aufgedampfter Schichten bei ca. 70% der des reinen Metalls). Für die Anwendung spritzgegossener Schaltungsträger wurden deshalb neue Methoden entwickelt, die im folgenden vorgestellt werden.

Die Schichtbildung beginnt mit der Entstehung von Keimen an bestimmten Stellen, z. B. Kanten oder Störstellen des Gefügebauaus, durch Kondensieren der Metallpartikel, die sich zu Inseln verbinden und anschließend in atomaren Monolagen zusammenwachsen. Entgegen dem Partikelfluß baut sich die Schicht bei den meisten Metallen polykristallin auf. Je höher das erzeugte Vakuum ist, desto weniger Störstellen können sich bilden und desto besser wird die Leitfähigkeit.

Neben den häufig sehr unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten von Kunststoffsubstrat und Metallschicht sind die limitierenden Faktoren für die Aufdampfrate die Temperaturbelastbarkeit der zu metallisierenden Kunststoffsubstrate sowie deren begrenzte Fähigkeit, die Wärme abzuführen. Vernachlässigt man die emittierende Strahlungsenergie des Verdampfers (<10% [65]) kann die zu absorbierende Wärmeenergie pro Fläche über folgende Zusammenhänge berechnet werden [abgeleitet aus 57, 58]:

Die notwendige Leistungsdichte kann über die Sublimationsenergie h_s berechnet werden:

Für Kupfer gilt [66]: $h_s = 339,3 \text{ kJ/Mol}$

Mit einer Molmasse von 63,55g [64] folgt für die Sublimationsenergie:

$$\eta_s = 5,339 \text{ kJ/g}$$

Mit der Dichte von Kupfer ($\rho_{Cu} = 8,933 \text{ g/cm}^3$ [64]) kann die notwendige Energie für ein vorgegebenes Volumen aufzudampfendes Material abgeleitet werden:

$$W_V = 8,933 \text{ g/cm}^3 \cdot 5,339 \text{ kJ/g} = 47,693 \text{ kJ/cm}^3$$

Bei einer Schichtstärke von $1 \mu\text{m}$ ergibt sich eine notwendige Flächenenergie von:

$$W_A = 4,769 \text{ J/cm}^2$$

Da zusätzlich zur Kondensationsenergie etwa 10-20% andere Energiebeiträge berücksichtigt werden müssen (Strahlung etc.) ergibt sich für eine $5 \mu\text{m}$ starke Kupferschicht theoretisch eine gesamte thermische Last von ca. 26 J/cm^2 .

Diese auf die Oberfläche aufgebrachte Energie muß fast vollständig über Wärmeleitung in das Substrat abgeleitet werden, da einerseits aufgrund des Vakuums keine Kühlung über Konvektion stattfinden kann und andererseits die Abstrahlung durch die geringen Tempera-

turen relativ niedrig ist. Über die Wärmeleitung kann damit die Wärmeverteilung im Substrat in Abhängigkeit der Einstrahlungszeit ermittelt werden und mit Hilfe eines Berechnungsprogrammes [61] grafisch dargestellt werden. Die mit diesem Verfahren berechneten Werte sind idealisiert. Bild 15 zeigt beispielhaft die Wärmebelastung von PES bei einer aufgetragenen Schichtstärke von $5\mu\text{m}$.

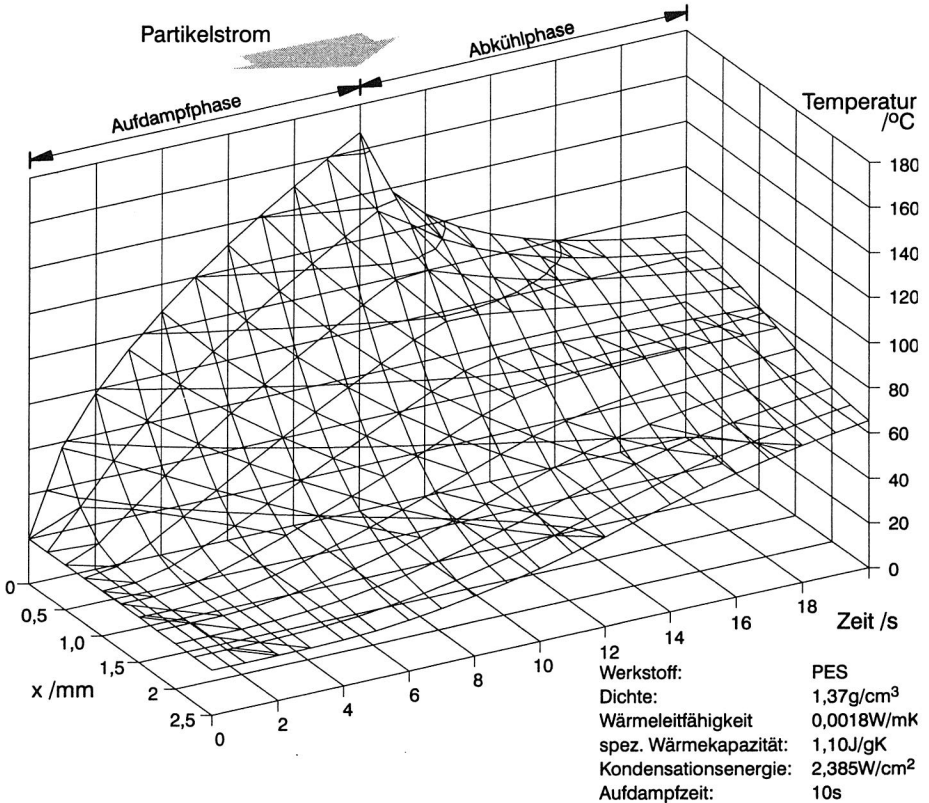


Bild 15: Berechnete Temperaturverteilung in PES

3.3.4 Prozeßentwicklung zur Beschichtung haftfester, dicker Schichten

Für die Ausbildung einer haftfesten Metallschicht sind nicht nur eine Vielzahl von physikalischen, chemischen und mechanischen Mechanismen verantwortlich, sondern insbesondere auch deren Wechselwirkungen untereinander. Die theoretische Überprüfung der Adhäsionshypothesen ist auch naturwissenschaftlich bisher nur unvollständig nachgewiesen und kann damit auch nicht Thema dieser Arbeit sein [vgl. 44, 67, 68]. In ingenieurwissenschaftli-

cher Vorgehensweise sollen vielmehr mögliche Effekte zur Steigerung der Haftfestigkeit konzeptionell aufgezeigt, im folgenden experimentell nachgewiesen und deren Eignung für die Anwendung räumlicher Schaltungsträger evaluiert werden.

Intermolekulare Bindungskräfte zwischen Adhärent (Substrat) und Adhesiv (Beschichtungsmaterial) treten nur im Abstandsbereich von 0,1-0,5nm auf und setzen folglich eine nicht durch Verunreinigungen gestörte Grenzfläche voraus. Das Wirken von Haupt- oder Nebervalenzkräften hängt primär von der chemischen Struktur des Substrates, also von Art und Anzahl dessen funktioneller Gruppen, ab. Wasserstoffbrückenbindungen oder Dipol-Bindungen spielen dabei eine besondere Rolle. Durch elektrischen Ladungstransport, der durch unterschiedliche chemische Potentiale an der Grenzfläche entsteht und im allgemeinen vom Metall zum Polymer stattfindet, kommt es zu einer elektrostatischen Anziehungskraft zwischen den beiden Schichten. Die mechanische Adhäsion basiert auf einer Verkrallung der geschlossenen Metallschicht in Hinterschneidungen oder Kapillaren. Sie hängt im wesentlichen von Anzahl, Tiefe, Radius und Winkel zur Oberfläche der Verankerungspunkte ab. Besonders günstig ist die Ausbildung tropfenförmiger Kapillare. Man spricht dann vom sogenannten Druckknopfeffekt. Da die Metallkondensation aus der Dampfphase auch als Benetzung eines Festkörpers durch einen Flüssigkeitstropfen betrachtet werden kann, treten weiterhin Grenzflächenspannungen auf.

Aus der Analyse der Haftmechanismen folgt die Notwendigkeit einer definierten Substratoberfläche und damit zwingend deren Vorbehandlung, die innerhalb oder außerhalb des Rezipienten durchgeführt werden kann. Beim Reinigen des Kunststoffes (z. B. mit verschiedenen Reinigungsmittel oder Ultraschall) kurz vor der Beschichtung werden Verunreinigungen entfernt, innere Spannungen gelöst sowie die Oberfläche reaktiviert. Eine mechanische Vorbehandlung der Oberfläche (z. B. durch Schleifen, Bürsten, Strahlen oder Skelletieren) hat zwangsläufig Einfluß auf die Möglichkeit der mechanischen Verzahnung der Metallschicht und muß daher im folgenden untersucht werden. Dabei ist darauf zu achten, daß die Oberflächenrauigkeit deutlich unter der aufzubringenden Schichtstärke liegt.

Zwei Phasen haften dann am besten aneinander, wenn ihre Oberflächenspannungen und Polaritäten möglichst gleich sind [69]. Die Anpassung der Kunststoffoberflächen an die Eigenschaften des Kupfers kann z. B. durch selektiven Angriff durch oxidierende Gase oder Säuren, thermische Vorbehandlung durch Gas- oder Plasma-Beflammen, Bestrahlung mit Excimer-Laser oder Corona-Ionisierung erreicht werden.

Auch innerhalb des Rezipienten kann die Kunststoffoberfläche gereinigt werden, z. B. durch thermische Behandlung, Glimmen oder Plasmaätzen. Im Gegensatz zu den oben beschriebenen Verfahren zur Oxidation der Substratoberfläche, wird durch Einsatz der Niederdruckplasma-Behandlung der Kunststoff thermisch weniger stark belastet (30-100°C), die Eignung für komplexe 3D-Bauteile verbessert und teilweise sogar die Haftwerte naßchemischer Vorbehandlungsmethoden überstiegen [70]. Mit Hilfe dieses Verfahrens ist es auch möglich, einen polymeren Überzug durch plasmainduzierte Pfropfung aufzubringen, der als

Haftvermittler dient. Nachteilig sind jedoch die komplizierte Führung und die hohen Kosten des Prozesses.

Da das thermische Aufdampfen mit vergleichsweise niedrigen Partikelenergien (0,1-0,5eV) arbeitet, lassen sich mit diesem Verfahren hohe Schichtdicken am effizientesten aufbringen. Der Nachteil der daraus folgenden niedrigen Haftfestigkeiten läßt sich durch Kombination mit anderen PVD-Verfahren (Sputtern 10-40eV, Magnetron-Sputtern 40-100eV) egalisieren. Bringt man vor der Kupferschicht eine Zwischenschicht eines reaktiven Metalls (Ti, Ta, Al, Cr, Cr/Ni) auf, kann die Haftfestigkeit ebenfalls deutlich verbessert werden. Auf diese Weise wurden bereits Schichtdicken um 5µm bei Gold und 10µm bei Kupfer erzielt [71].

Die experimentellen Versuche bestätigten die theoretische Annahme, daß der Sputterprozeß aufgrund der höheren Teilchenenergien bessere Haftfestigkeiten als das thermische Verdampfen erwarten läßt. Ebenfalls durchweg bessere Ergebnisse konnten durch längeres Plasmaätzen erzielt werden. Die in Bild 16 dokumentierten Versuche beziehen sich daher nur auf das Magnetronsputtern (45 Minuten, 2x2000W Targetleistung), vor dem 15 Minuten lang mit Argonplasma (10^{-5} mbar) gereinigt wurde.

Steigende Oberflächenrauigkeit der Substrate, die durch Strahlen mit Glaskugeln oder Karbidkörnern sowie durch Schmirgeln erzeugt wurden, führten ebenfalls zu einer verbesserten Haftung der Metalloberfläche. Im Gegensatz zu dünnen Schichten (<1µm), bei denen nur von einem geringen Beitrag der mechanischen Adhäsion zur Haftfestigkeit ausgegangen wird, kann aus den durchgeführten Versuchen abgeleitet werden, daß sich bis zu einem R_a -Wert von ca. 2µm die Haftfestigkeit wesentlich verbessern läßt. Dieser zusätzliche, schlecht kontrollierbare Prozeßschritt verschlechtert jedoch neben der Oberflächengüte insbesondere auch die Leitfähigkeit der aufgetragenen Metallschicht und ist daher für einen Serieneinsatz für MID nur bedingt geeignet.

Durchgeführte Versuche zur Steigerung der Adhäsion zwischen Metallbeschichtung und Kunststoffsubstrat mit Hilfe der Plasmapolymersation, einer Vorbehandlung mit Excimer-Laser, einer Beflammung der Substrat-Oberflächen oder durch Niederdruckplasmabehandlung mit Stickstoff erbrachten keine allgemeine Verbesserung. Durch das Aufbringen einer Zwischenschicht aus Chrom bzw. Chrom-Nickel (ca. 0,2-0,3µm) läßt sich jedoch bei allen verwendeten Kunststoffen sowohl beim thermischen Verdampfen als auch im Sputterprozeß eine deutliche Erhöhung der Haftfestigkeiten erzielen. Gleichartige Versuche mit Titan-Aluminium zeigten dagegen dessen schlechtere Eignung als Haftvermittler auf.

Aus den Untersuchungen folgt, daß dicke Schichten (>1µm) sich in einem dreistufigen Prozeß genügend haftfest metallisieren lassen [61]:

1. Vorreinigen des Substrates durch kathodisches Glimmen
2. Aufbringen einer haftvermittelnden Zwischenschicht (z.B. Cr) durch Magnetronsputtern
3. Beschichtung durch thermisches Verdampfen

Substrat (Werte in N/150µm)	galvan.	Plasmaätzen		mechanische Vorbehandlung			Haftvermittler	
		5min	15min	Glas	Karbid	Schliff	Cr	TiAl
PES unverstärkt	–	0,16	0,22	0,21	0,18	0,18	0,28	0,28
PES 40% Glas	–	0,18	0,22	0,18	0,20	0,18	0,18	0,12
PES Mineral	–	0,17	0,19	0,18	0,14	0,22	0,34	0,18
PEI unverstärkt	–	0,17	0,18	0,19	0,32	0,28	0,22	0,15
PA 6/6	–	0,24	0,17	–	–	0,18	0,34	0,18
PEI 40% Glas (Ref.)	0,28	–	–	–	–	–	–	–
Balken								

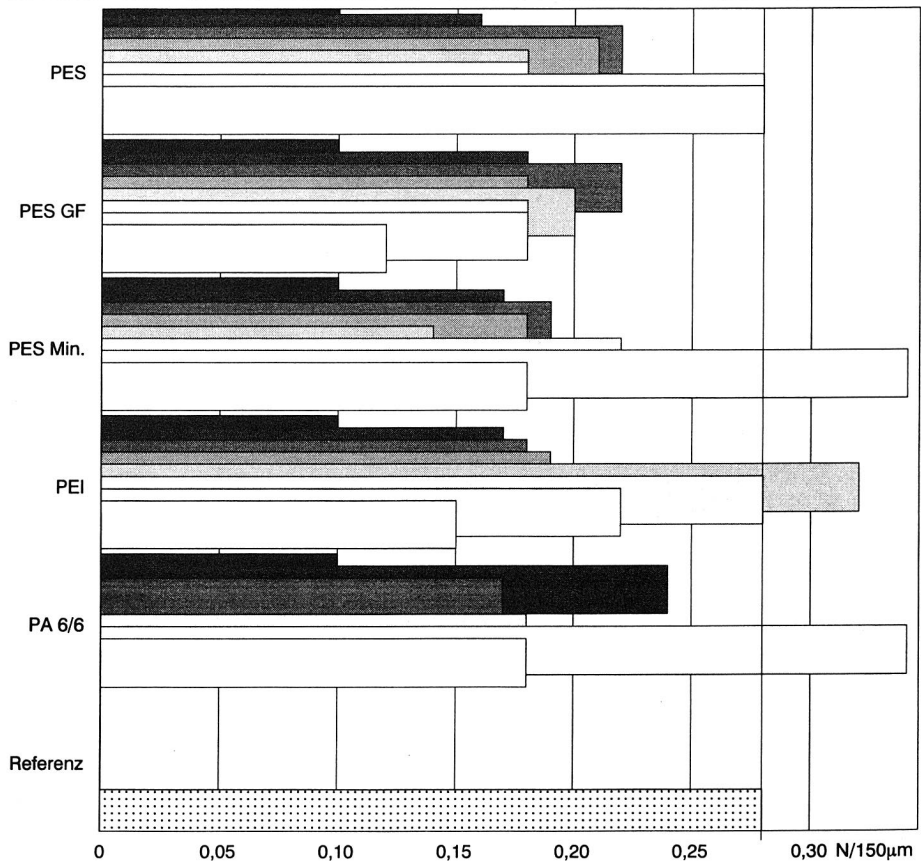


Bild 16: Versuchsergebnisse zur Steigerung der Haftfestigkeit

3.3.5 Verfahren zur Strukturierung

Wesentliche Anforderung an die Eignung der PVD-Verfahren für die Anwendung räumlicher Schaltungsträger ist die Strukturierbarkeit der Beschichtung. Bild 17 zeigt konzeptionell die Möglichkeiten der Strukturierung PVD-beschichteter Kunststoffsubstrate. Die Erzeugung des Leiterbilds nach der Metallbedampfung ist analog zu der sowohl bei Leiterplatten [56] als auch bei MIDs [32] bereits angewendeten Subtraktivtechnik (siehe Kapitel 3.2) und muß daher hier nicht explizit ausgeführt werden. Eine partielle Beschichtung, deren geometrische Informationen erst während des Aufdampfprozesses (Voll-Additiv) definiert werden, müßte entweder durch gezieltes Ablenken der Atom- bzw. Ionenströme oder durch räumliche Bewegung des Substrates unter einem fokussierten Partikelstrahl gesteuert werden. Die Realisierbarkeit dieser technisch interessanten Alternative konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht werden. Schwerpunkt bilden im folgenden daher die Verfahren zur Strukturierung, die außerhalb des Rezipienten und zeitlich vor dem Metallisierungsprozeß durchgeführt werden.

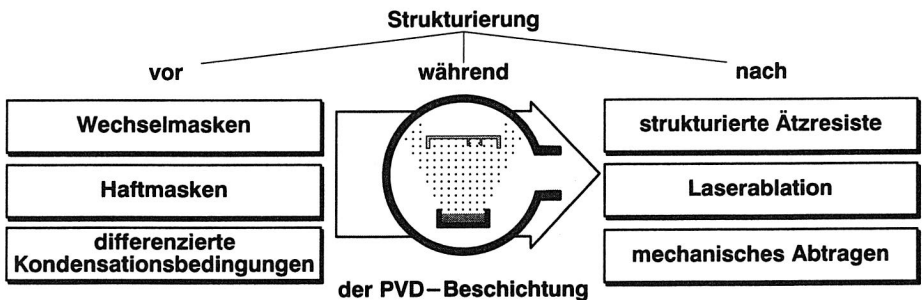


Bild 17: Möglichkeiten der strukturierten PVD-Beschichtung

Die einfachste Möglichkeit, ein strukturiertes Leiterbild auf dem Kunststoffsubstrat zu erhalten, ist das Abdecken der nicht zu metallisierenden Bereiche durch feste, mehrfach verwendbare Masken. Neben der Möglichkeit, auch mit Hilfe photosensitiver Gläser Maskenstrukturen herzustellen, können insbesondere verschiedene Metalle dazu Anwendung finden. Während mit Hilfe von Ätzprozessen Masken nur für einfache geometrische Formen (Typen 0-1B) realisierbar sind, können durch Laserschneiden vorher tiefgezogener Bleche auch kompliziertere räumliche Strukturen beherrscht werden. Die metallischen Wechsellmasken stoßen jedoch an die Grenzen ihrer Einsatzfähigkeit, wenn komplexe Schaltungs-layouts (insbesondere geschlossene Strukturen) abgebildet werden sollen. Das Problem der dadurch notwendigen Inselstrukturen in der Maske kann durch Anpassung der beim Siebdruck angewendeten Maskentechnik, die auf einer Trägerschicht aus Stahlgewebe basiert, gelöst werden.

Beim Einsatz metallischer Wechselmasken ist die erhöhte Temperaturbelastung zu beachten, die zu Beschädigungen insbesondere feiner Stege sowie zu Spannungen und Toleranzproblemen durch unterschiedliche Wärmeausdehnungen zwischen Substrat- und Maskenmaterial führen kann. Diese Stabilitätsprobleme können durch dickere Wandstärken ausgeglichen werden, die allerdings die Kantenunschärfe verstärken. Bei mehrmaliger Verwendung wird auch die Oberfläche der Wechselmasken mit Metall beschichtet, die in Abhängigkeit der Strukturfeinheit folglich regelmäßig gereinigt werden muß.

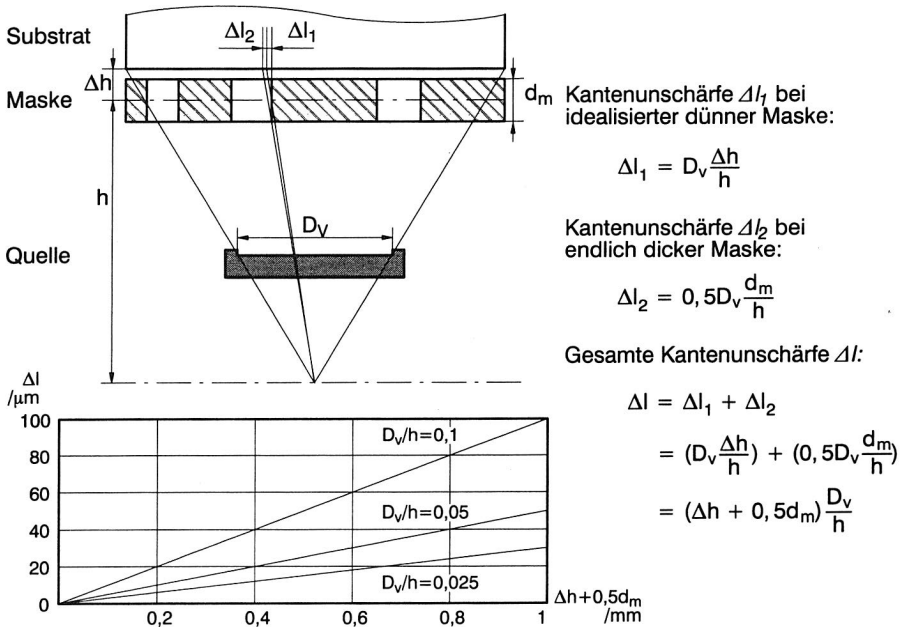


Bild 18: Kantenunschärfe durch Maskenstrukturierung [74]

Die nicht zu beschichtenden Bereiche des Substrates können alternativ mit einer haftenden Abdeckschicht abgeschirmt werden. Zum Auftrag und zur Strukturierung können hier auch bekannte Verfahren wie z. B. Sieb- oder Tampondruck sowie auch Belichtungstechniken (wie 3D-Masken) bei photosensitiven Materialien eingesetzt werden. Die verwendeten Materialien müssen dazu die thermischen Belastungen des PVD-Prozesses standhalten [vgl. 72, 73]. Um unerwünschte Randeffekte (siehe Bild 18) zu vermeiden, und das Strippen der Abdeckmaske zu erleichtern, sollte der Beschichtungsresist dicker als die zu erzeugende Metallschicht sein.

Die Erzeugung definierter Kondensations- oder Haftbedingungen für die Metallpartikel ist die wohl eleganteste Möglichkeit, bestimmte Bereiche des Substrates vor einer Metallisie-

rung zu schützen. Die Vorteile liegen insbesondere im Wegfall nachträglicher Arbeitsgänge (z. B. Resiststrippen) sowie der kantenscharfen Leiterbild-Übertragung. So können z. B. durch strukturierte Vorbehandlung mit Hilfe eines Excimers-Lasers unterschiedliche Adhäsionsbedingungen erzeugt werden.

In experimentellen Versuchen wurden verschiedene Möglichkeiten der Strukturierung auf ihre praktische Einsetzbarkeit hin überprüft. Bei der strukturierten Beschichtung mit Hilfe einer Blechmaske (Dicke 0,1mm), in die mit einem Excimer-Laser Bahnen mit Abständen zwischen 0,2 und 2mm geschnitten wurden, zeigte sich, daß aufgrund der Temperaturbelastung des PVD-Prozesses und der dadurch verursachten Verformung der Maske Strukturfeinheiten nur bis etwa 500µm erzielbar sind.

Analog zu einer galvanischen Voll-Additiv-Metallisierung können photosensitive Resiste auch im PVD-Prozeß eingesetzt werden. Aufgrund der hohen Temperaturbeständigkeit (bis 260°C) und der geringen Gasung im Hochvakuum wurde für diesen Einsatz ein spezieller Lötstopplack ausgewählt. Im Curtain-Coating-Verfahren wurden Probeplatten der ausgewählten Kunststoffe beschichtet (ca. 20µm) und anschließend mit einer Teststruktur belichtet. Im PVD-Prozeß wird die gesamte Oberfläche, einschließlich der senkrechten Kanten der Haftmaske, gleichmäßig metallisiert. Die geringe Haftfestigkeit der Kupferschicht auf dem Lötstopplack ermöglicht ein einfaches selektives Entfernen der unerwünschten Metallflächen.

Weiterhin wurde zur Abbildung einer Struktur das Substrat über eine Maske zur besseren Trennung zuerst mit einem Trennmittel (PTFE), danach mit Silikonharz beschichtet und anschließend im Ofen (30min bei 50°C) ausgehärtet. Im Aufdampfprozeß wird das Bauteil gleichmäßig metallisiert. Auch auf den senkrechten Kanten des Silikonharzes lagert sich Metall an. Aufgrund der Scherbelastung in der dicken Metallschicht kommt es beim mechanischen Strippen der Haftmaske aus Silikonharz jedoch zu Einrissen in die Leiterbildstruktur. Anschließend Versuche, auf die relativ dicke Schicht (ca. 5mm) aus Silikonharz ganz zu verzichten und unterschiedliche Haftbedingungen nur mit Hilfe des Trennmittels aus PTFE (Polytetrafluorethylen) zu erzeugen, ergaben dagegen sehr gute Ergebnisse. An den Stellen, die mit PTFE abgedeckt waren, konnte sich bei der Beschichtung kein Metall anlagern. Die PTFE-Schicht kann einfach mechanisch (z. B. durch Druckluft) abgelöst werden.

Die durchgeführten Versuche zeigen, daß die Anforderungen an eine strukturierte Metallisierung von Kunststoffformteilen für Molded Interconnect Devices mit Hilfe der PVD-Technologie technisch erfüllt werden. Damit wird eine Alternative zu konventionellen, naßchemischen Verfahren unter den eingangs definierten Entwicklungszielen aufgezeigt. Die im Rahmen dieser Arbeit erzielten Schichtdicken bis 5µm sind zur Übertragung geringer Ströme oder bei hohen zulässigen Übergangswiderständen ausreichend. Die Kombination aus PVD-Beschichtung und Verstärkung mit Hilfe elektrolytischer Verfahren sichert die Vorteile der Umweltfreundlichkeit und Substratmaterial-Flexibilität und nutzt die wirtschaftliche Herstellung dicker Schichten über 5µm.

3.3.6 Kostenvergleich PVD versus galvanischer Metallisierung

In einer Kostenvergleichsrechnung soll überprüft werden, inwieweit die erzielten technischen Vorteile auch wirtschaftlich umsetzbar sind. Dazu soll eine PVD-Batchanlage mit dreistufigem Beschichtungsprozeß (Glimmen, Sputtern, Haftvermittler, Verdampfen) mit einer konventionellen, vertikalen Galvanik-Anlage verglichen werden. Da die Strukturierung im Subtraktivverfahren in physikalischen und in naßchemischen Verfahren technisch wie wirtschaftlich vergleichbar ist, sollen die Unterschiede der reinen Beschichtung herausgestellt werden. Die Beschichtungskosten werden über eine angepaßte Platzkostenrechnung quantifiziert und auf die zu metallisierende Oberfläche bezogen. Die Maschinenkosten wurden nach eingeholten Angeboten, die Zykluszeiten auf Basis der experimentell ermittelten Beschichtungsraten (Sputtern 1,2nm/s, Verdampfen 14nm/s) berechnet. Die Kosten der galvanischen Beschichtung wurden ebenfalls auf der Grundlage konkreter Angebote für Anlagen und Materialien ermittelt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 dargestellt:

Kostenart	Einheit	PVD	stromlos	elektrolyt.
Platzkostensatz	DM/h	100,00	500,00	
Kapazität	m ²	16	200	
Zykluszeit Vorbehandlung	h	0,8	1	–
Platzkosten Vorbehandlung	DM/m ²	5,00	2,50	–
Materialkosten Vorbehandlung	DM/m ²	<1,00	7,00	–
Kosten Vorbehandlung	DM/m ²	<6,00	9,50	–
Zykluszeit Metallisierung 1µm Cu	h	0,02	0,5	0,05
Platzkosten Metallisierung 1µm Cu	DM/m ²	0,13	1,25	0,13
Materialkosten 1µm Cu	DM/m ²	0,40	2,50	1,00
Kosten 1µm Cu	DM/m ²	0,53	3,75	1,13
Gesamtkosten 5µm Cu	DM/m ²	8,65	28,25	15,15

Tabelle 2: Kostenvergleich PVD versus galvanische Metallisierung

Diese idealisiert ermittelten Pauschalwerte sollen lediglich die Rationalisierungspotentiale der PVD-Technologie aufzeigen. Sie sind für spezifische Anforderungen praktischer Applikationen im einzelnen technisch wie wirtschaftlich zu evaluieren. Durch Einsatz einer Durchlaufanlage könnten die Nebenzeiten für Chargieren, Pumpen und Abkühlen, die mehr als 80% der gesamten Zykluszeit betragen, deutlich verringert werden, womit zusätzliche Kostenreduzierungen zu erzielen sind. Für dickere Schichten bietet sich die bereits unter rein technischen Kriterien geforderte Kombination mit der elektrolytischen Metallisierung an, durch die die wirtschaftliche Kunststoffvorbehandlung und Anschlagmetallisierung im Vakuum und die technisch ausgereifte galvanische Metallisierung dicker Schichten verknüpft werden können.

3.4 Verfahrensentwicklung für die Trennung von Kunststoff und Metall

Molded Interconnect Devices werden als besonders umweltverträglich eingestuft [z. B. 75]. Vor allem die Recyclingfähigkeit der ausschließlich thermoplastischen Basismaterialien wird hervorgehoben [76, 77]. Wie vorangehend beschrieben, führen die heute vorwiegend angewandten Herstellungsverfahren jedoch zu einer metallischen Beschichtung der Substrate, die einer einfachen Wiederverwertung der einzelnen Werkstofffraktionen Kunststoff und Metall entgegenwirkt. Dies wird durch Produkt-Spezifikationen, die durch einen möglichst hohen Gebrauchswert vorgegeben werden und damit eine innige Verbindung von Basissubstrat und metallischem Leiterbild fordern, verstärkt.

Steigende Bedeutung umweltverträglicher Produkte, Akzeptanz der Konsumenten und nicht zuletzt die Gesetzgebung [78] zwingen zu einer präponierten ökologischen Betrachtung neuer Aufbautechnologien für elektronische Produkte. Deren Produktionsprozesse müssen simultan zur Entwicklung auf ihre Auswirkungen im Hinblick auf Ressourcenverbrauch und Umweltbelastung bei Herstellung und Gebrauch überprüft, sowie mögliche technisch und wirtschaftlich sinnvolle Konzepte zum Recycling untersucht werden [79].

Die gesamtheitliche Problemstellung zur Verwertung von Elektronikschrott wird wissenschaftlich intensiv bearbeitet [80, 81]. Ansätze aus der Forschung beginnen bei der recyclinggerechten Produktgestaltung [9, 82, 83], widmen sich sowohl der automatisierten Demontage von elektronischen Geräten [84], als auch Massenstromverfahren zur Verwertung der Wertstoffe oder betrachten die logistischen Anforderungen an effiziente Entsorgungssysteme. Industrielle Anstrengungen werden oft aus branchenspezifischer Sicht angegangen, wie z. B. im Bereich der Informationstechnik [85], der Haushaltsgeräte [86] oder der Unterhaltungselektronik.

Auf Grund der integrativen Wirkung der in MID-Technologie gefertigten Produkte spielen für die Beurteilung ihrer Recyclingfähigkeit prinzipiell alle oben angesprochenen Verfahren eine Rolle. In vielen der im einzelnen notwendigen Aufbereitungsschritte können Verfahren für konventionell aufgebaute elektronische Produkte eingesetzt werden. Im Rahmen dieser Arbeit sollen deshalb insbesondere die durchgeführten Arbeiten vorgestellt werden, die spezifisch auf MIDs ausgerichtet sind: die Evaluierung effizienter Trennungungsverfahren für Metalloberfläche und Kunststoffsubstrat [87].

Im Vergleich zu duroplastischen Leiterplatten, deren Basismaterialien technisch nicht sinnvoll wiederverwertbar sind, bieten sich die thermoplastischen Kunststoffe räumlicher Schaltungsträger für einen zweiten Einsatz als Sekundärrohstoff oder zur Energiegewinnung an [88]. Gegenüber der allgemeinen Recyclingstrategie für glasfaserverstärkte Epoxidharzlaminate der konventionellen Leiterplatten, die letztendlich nur nach einer technisch realisierbaren und für die Umwelt akzeptablen Entsorgung sucht, gilt bei MIDs auch das wirtschaftliche Interesse einer Wiederverwertung der zumeist sehr wertvollen Hochtemperaturthermoplaste [89].

Nach einer vollständigen Evakuierung von eventuell montierten Bauteilen [vgl. 90] muß überprüft werden, inwieweit die thermoplastischen Substratmaterialien in einem zweiten Produktlebenszyklus wiederverwertet werden können. Neben der Möglichkeit, den Kunststoff-Metall-Verbund ohne vorherige Trennung kunststofftechnisch weiterzuverarbeiten, sollen im folgenden versucht werden, möglichst sortenreine Werkstofffraktionen zu erzeugen. Potentiell einsetzbare Verfahren für das Trennen von Metall und Kunststoff werden dazu experimentell evaluiert.

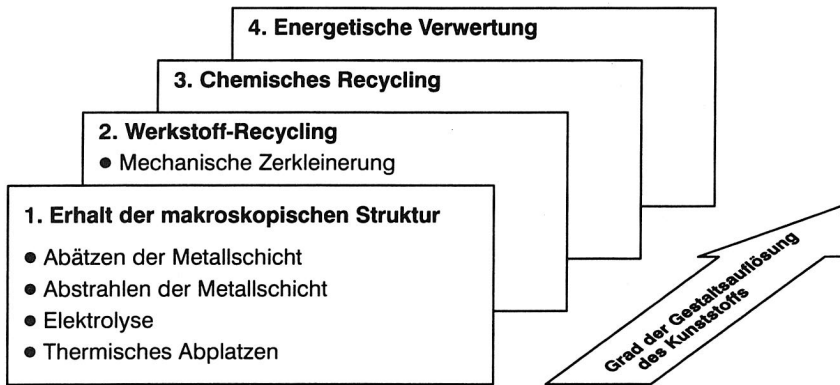


Bild 19: Ökologisch motivierte Bewertung der Trennverfahren

Anhand eines Beispielprodukts wird gezeigt, daß die Leiterbahnen vom thermoplastischen MID-Gehäuse auf unterschiedliche Weise getrennt werden können. Das Abätzen mit Säuren oder das Glaskugelstrahlen erhält die Struktur des Bauteiles. Es steht somit grundsätzlich für einen erneuten Beschichtungsvorgang mit aktualisiertem Leiterbild zur Verfügung. Die Trennung der Metallschicht vom Kunststoff durch mechanische Zerkleinerung, die in den durchgeführten Versuchen bereits nach der ersten Zerkleinerungsstufe 97% des Thermoplasten vom Metall befreit hat, ist ein kontinuierliches und wirtschaftliches Verfahren, dessen Leistungsfähigkeit noch weitere Steigerung ermöglicht.

Ein umweltfreundliches und wirtschaftlich interessantes Trennverfahren soll mit möglichst geringem energetischen und wirtschaftlichen Aufwand arbeiten und sortenreine Stoffe erzeugen, die ohne Probleme zur Herstellung von Sekundärprodukten weiter- und wiederverwendet werden können. Hierzu stehen verschiedene technologische Verfahren zur Verfügung, die nach dem Grad der Gestaltsauflösung des Kunststoffes bewertet werden können (Bild 19). Danach können sinnvolle Lösungsansätze nur bei Erhalt der chemischen Zusammensetzung und Struktur in Ebene 1 oder 2 gefunden werden. Unter diesem Gesichtspunkt können nach theoretischen und praktischen Grundlagen-Vorüberlegungen zur Trennung

der Metallschicht vom Kunststoff, konzeptionell drei vielversprechende Lösungswege herausgearbeitet werden¹⁹:

- Abätzen der Metallschicht
- Strahlen der Bauteile
- Trennung durch mechanische Zerkleinerung

Grundlegende Arbeiten dazu werden in [91] vorgestellt. Zum Einsatz dieser vielfältigen potentiellen Möglichkeiten zur Trennung von Metall und Kunststoff speziell bei thermoplastischen Schaltungsträgern bestehen bisher jedoch wenig praktische Erfahrungen und kaum wissenschaftlich untermauerte Versuche [89]. Um die Übertragbarkeit der bekannten Erfahrungen auf die Anwendung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger nachzuweisen, wurden nachfolgend beschriebene experimentelle Testreihen durchgeführt.

3.4.1 Charakteristische Eigenschaften der wiederzuverwertenden Werkstoffe

Die technischen Möglichkeiten zur Separierung des betrachteten Werkstoffverbundes werden essentiell von den eingesetzten Materialien beeinflusst. Als Substratwerkstoff kommen primär Hochtemperaturthermoplaste zur Anwendung, deren wesentliche Eigenschaften detailliert in [41] vorgestellt werden. Aus dieser Gruppe wird als wichtigster Repräsentant in den praktischen Versuchen stellvertretend das Polyetherimid (PEI) untersucht. Zur Führung des elektrischen Stromes werden die metallischen Oberflächenschichten primär aus Kupfer ausgebildet. Nickel bewährt sich dagegen als gut geeigneter Korrosionsschutz und wird deshalb in die Analysen mit aufgenommen. Bild 20 vergleicht die für verschiedene Trennverfahren relevanten Eigenschaften der betrachteten Materialien [39, 41].

Die große Differenz der spezifischen Gewichte von Kunststoff und Metall stellt eine gute Voraussetzung für eine Trennung vermischter Partikel durch Dichteklassierung dar. Wie grafisch dargestellt, beträgt die Dichte von Kupfer ($8,96 \text{ g/cm}^3$) in etwa das Vierfache des betrachteten Polyetherimid ($2,2 \text{ g/cm}^3$). Zur Erzielung einer möglichst zuverlässigen Verbindung auch bei Temperaturwechselbeanspruchung werden die Ausdehnungskoeffizienten der Polymere durch beigemengte Füllstoffe in etwa auf die Werte der Leiterbahnenmaterialien eingestellt. Ein Ablösen der Metallschicht durch unterschiedliches Dehnungsverhalten bei Erwärmung oder Abkühlen der Bauteile kann somit nicht unbedingt erwartet werden.

Da Polymere typischerweise Wasser aufzunehmen, quillt die Oberflächen bei Hitzeeinwirkung auf. Dieser im Lötprozeß höchst unerwünschte Effekt kann zum Ablösen der Metallschicht führen und damit zur Trennung der beiden Fraktionen unter Umständen positiv eingesetzt werden. Im Gegensatz zu den genannten Metallen zeichnen sich die meisten HT-Thermoplaste durch ihre hohe Chemikalienbeständigkeit aus. Diese signifikant unterschiedliche Eigenschaft kann ausgenutzt werden, um die dünnen Metallschichten chemisch abzuätzen.

¹⁹ Bei der Durchführung der Trennungsversuche wurde der Verfasser von Herrn Dipl.-Ing. Gunter Beitinger unterstützt.

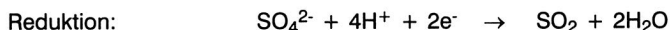
3.4.2 Chemisches Abätzen der Metallbeschichtung

Für die Gestaltung einer wirtschaftlichen Prozeßfolge zum Abätzen der Metalloberfläche, sollte das ausgewählte Ätzverfahren beide Metalle, Nickel und Kupfer, in einem Vorgang entfernen. Der Kunststoff darf von der gewählten Säure nicht angegriffen werden. Die einschlägige Literatur [56, 92, 93] weist mehrere Säuren als technisch geeignet aus. Zum definierten Ablösen von Metallschichten wird übereinstimmend *Chromschwefelsäure* ($K_2Cr_2O_7$ oder $Na_2Cr_2O_7$ in H_2SO_4 konz.) hervorgehoben. Auf Grund der problematischen Entsorgung und dem Verdacht auf cancerogene Wirkung ist die Anwendung von Chromschwefelsäure jedoch äußerst bedenklich und scheidet damit für die weiteren Überlegungen aus.

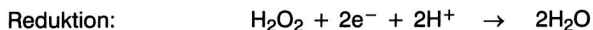
Alternativ können Flußsäure, Phosphorsäure, Salzsäure oder Schwefelsäure jeweils mit Zusatz von Oxidationsmittel eingesetzt werden. Unter Beachtung ökologischer (Verträglichkeit für Mensch und Umwelt in Gebrauch und Entsorgung) und wirtschaftlicher (Minimierung der Verweildauer im Ätzbad) Kriterien wurde für die folgenden Versuche verdünnte Schwefelsäure (10–25%) mit Zusatz eines Oxidationsmittels (H_2O_2) verwendet.

In den durchgeführten Versuchen wird das Bauteil etwa 5 cm tief in ein Glas mit 400ml Ätzlösung getaucht. Bereits nach einigen Minuten kann eine Gasentwicklung an der Bauteiloberfläche beobachtet werden. Gleichzeitig verdunkelt sich die grausilberne Nickeloberfläche unter Bildung von Nickeloxid. Auf Grund der höheren Elektronenaffinität wird die Kupferschicht erst gelöst, wenn kein Nickel mehr auf dem Bauteil vorhanden ist. Das anfänglich farblose Ätzmittel wird mit zunehmender Lösung des Kupfers tiefblau ($CuSO_4$).

Reaktionsgleichung:



H_2O_2 wirkt in sauren Medien als Oxidationsmittel und unterstützt die Reaktion nach folgender Gleichung:



Damit besteht die Möglichkeit, sowohl die Nickel- als auch die Kupferschicht getrennt voneinander definiert abzulösen. Die Metallschichten konnten vollständig vom Kunststoff getrennt werden. Die Schwefelsäure greift, wie zu erwarten war, den Kunststoff nicht an. Als

Reststoff bleibt die verdünnte Schwefelsäure mit den darin gelösten Kupfer- und Nickelverbindungen übrig.

Dadurch, daß der Kunststoff nicht wesentlich beeinträchtigt wird, kann eine Weiter- oder Wiederverwendung des Kunststoffes bzw. des Bauteiles im Sinne eines Produktrecyclings durchgeführt werden. Allerdings sind durch die langen Prozeßzeiten (im Versuch ca. 3h), die aufwendige Prozeßführung des Ätzbades sowie insbesondere die Aufbereitung der Restlösungen und des Wassers relativ hohe Kosten zu erwarten.

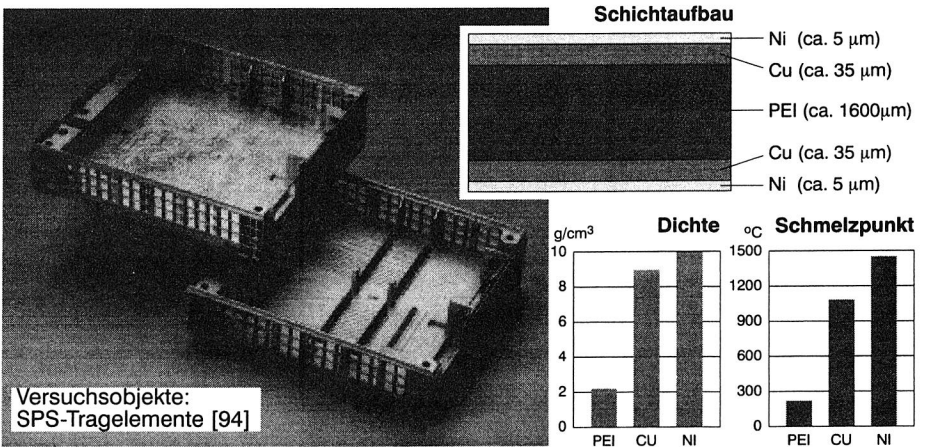


Bild 20: Charakteristische Material-Eigenschaften thermoplastischer Schaltungsträger

Diese chemische Wiederaufbereitung von MIDs kann vor allem bei den Herstellungsbetrieben bzw. Beschichtungsbetrieben spritzgegossener 3D-Leiterplatten durchgeführt werden, da dort bereits die entsprechenden Ätzbäder und Abwasserbehandlungsanlagen vorhanden sind. Eine Verschiebung des Abfallproblems in ein Abwasserproblem wird dadurch vermieden.

3.4.3 Einsatz verschiedener Strahlverfahren zur Entfernung der Metalloberfläche

Eine sehr einfache und umweltschonende Möglichkeit, die Metallschicht zu entfernen, ist das Strahlen der MID-Bauteile z. B. mit Eispartikeln, Korundkörnern oder Mikroglasskugeln. Die Versuche wurden in einer kommerziell eingesetzten, manuell bedienten Strahlkabine durchgeführt, die durch ein kontinuierlich arbeitendes Rückgewinnungssystem die wiederholte Nutzung des Strahlmittels erlaubt.

In den Versuchen wurden die besten Ergebnisse mit Glaskugeln aus Natrium-Kalk-Glas erzielt, deren Dichte etwa $2,5\text{g/cm}^3$ betrug. Die Korngröße liegt zwischen $70\text{--}110\mu\text{m}$, die

Härte zwischen 6 und 7 Mohs. Die Rundheit der Glaskugeln gewährleistet eine genaue Druckhomogenität auf die Oberfläche des Bauteiles. Durch deren hohe Elastizität wird ein Abpralleffekt erreicht, der die Säuberung auch von Hohlräumen und komplizierten Geometrien sicherstellt. Je nach Arbeitsdruck (ca. 40 N/cm^2) werden 400–500 Schläge pro Sekunde gegen die Bauteiloberfläche erzielt.

Die Metallschicht platzt sofort (Prozeßzeit etwa 1–2 min) beim Auftreffen der Glaskugeln großflächig ab. Dieser Effekt ist durch die unterschiedlichen Elastizitäten von Metall und Kunststoff zu erklären [95]. Auch an schlecht zugänglichen Stellen des Bauteiles oder gar in Sacklöchern kann nach intensiverem Strahlen die Metallschicht gelöst werden. Die Oberfläche des freigelegten Thermoplasten wird nicht beschädigt und bleibt sehr glatt. Auch bei der Betrachtung unter dem Lichtmikroskop konnten keine signifikanten Oberflächenveränderung durch das Strahlmittel oder in die Oberfläche eingedrungene Strahlpartikel nachgewiesen werden.

Das Rückgewinnungssystem der Strahlkabine trennt sehr effektiv das Kupfer und Nickel vom Strahlmittel, wobei sich großflächige Kupferplättchen in einem Grobsieb verfangen und die sehr kleinen Nickelpartikel durch die leicht ferromagnetische Eigenschaft an einem Magneten hängen bleiben. Das Strahlmittel konnte vollständig zurückgewonnen werden.

3.4.4 Mechanische Verfahren zur MID-Aufbereitung

Mechanische Aufbereitungsverfahren beginnen mit einer mehrstufigen Zerkleinerung der Bauteile zur Trennung der Stoffverbünde (z. B. Vorzerkleinerung mittels Shredder, Walzen- oder Kegelmühle, Hammermühle; Nachzerkleinerung mittels Prall- oder Schneidmühlen; Feinzerkleinerung mittels Stift- oder Doppelhammermühle), werden durch Klassierungsverfahren (Sieben, Sichten) zu Mengen mit gleichmäßig großen Partikeln aufgeteilt und abschließend auf Basis ihrer spezifischen Eigenschaften wie Dichte, magnetische oder elektrische Leitfähigkeit, Benetzbarkeit etc. in unterschiedlichen Fraktionen sortiert [96, 97, 98].

Für die experimentellen Versuche steht zur Zerkleinerung eine Schneidmühle und zur Siebung ein Taumelsieb mit 7 Siebböden (2 mm, 1 mm, $500\mu\text{m}$, $250\mu\text{m}$, $125\mu\text{m}$, $63\mu\text{m}$, $45\mu\text{m}$) zur Verfügung. Die Siebeinlage der Schneidmühle beträgt bei der Vorzerkleinerung der beiden Versuche 8 mm. Zur Nachzerkleinerung wird ein 2 mm Konidursieb in die Schneidmühle eingelegt. Der Versuch wird einmal mit einem Bauteil, das zuvor mit Hilfe von flüssigem Stickstoff auf -196°C abgekühlt wurde und mit einem nicht abgekühlten Bauteil durchgeführt. Dabei sollte die prinzipielle Eignung der Versprödung der Werkstoffe zur Abtrennung der Metallschicht überprüft werden.

Ein Vergleich der Gewichtsverteilung in den einzelnen Siebböden zeigt, daß die hauptsächlichen Masseanteile in den Siebböden 1 (2 mm; ca. 0,1%), 2 (1 mm; ca. 75%), 3 ($500\mu\text{m}$; ca. 20%) und 4 ($250\mu\text{m}$; ca. 1%) verbleiben. Durch die Bauteilversprödung wurden keine Unterschiede in der Korngrößenverteilung erreicht. Weiterhin werden die Fraktionen in den Siebböden 5 – 8 auf Grund des geringen Anteiles für die weitere Betrachtung vernachlässigt.

sigt. Diese Siebfractionen wiegen zusammen weniger als der Verlustanteil der Fraktion. Die Fraktionen der Siebböden 1 – 4 betragen zusammen 96,4 % des Ausgangsmaterials. Sie werden unter dem Lichtmikroskop miteinander verglichen (Bild 21) und ausgewertet (Tabelle 3). Folgende Verteilung wurde ermittelt:

Siebboden	reiner Kunststoff	reines Metall	Kunststoff/Metall
Sieb 1 (2,0 mm)	50 %	40 %	10 %
Sieb 2 (1,0 mm)	97 %	2 %	< 1 %
Sieb 3 (500 µm)	98 %	1 %	< 1 %
Sieb 4 (250 µm)	59 %	40 %	< 1 %

Tabelle 3: Prozentuale Volumenverteilung der Werkstoffe in den Siebfractionen

Es kann bei beiden Versuchen in den Sieben 2–4 eine hervorragende Trennung des Thermoplasten von der Metallschicht festgestellt werden. Die Siebfractionen von Sieb 1 lieferte zwar aufgeschlossene Materialien, die aber noch zu sortieren sind. Dabei müssen die verbliebenen 10% des Gemisches nochmals aufgeschlossen werden. Der Aufschluß in Sieb 4 muß ebenfalls über die Dichte getrennt werden, um als Ergebnis die gewünschten sortenreinen Fraktionen zu erzielen. Aus dem Vergleich der Gewichtsprozentverteilung der Fraktionen von unversprödeten und mit Stickstoff gekühlten Bauteilen in den verschiedenen Siebböden konnte kein signifikanter Vorteil einer Versprödung abgeleitet werden.

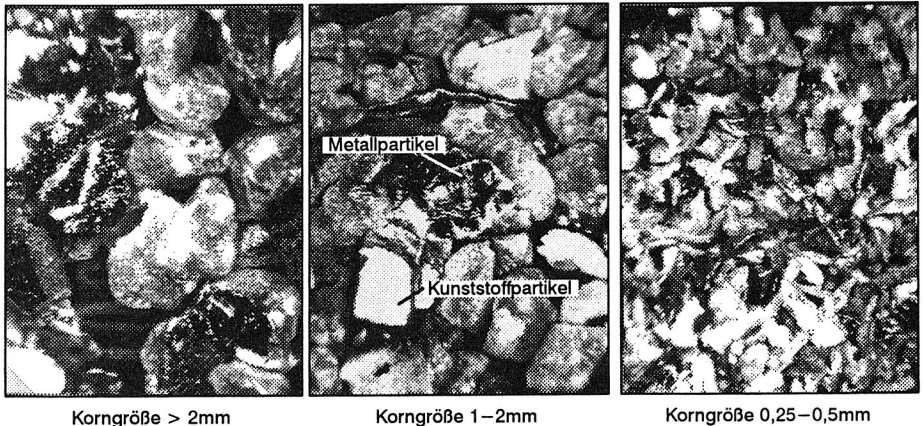


Bild 21: Getrennte Kunststoff- und Metall-Fraktion im Lichtmikroskop

Da Tabelle 3 nur eine Aussage über das anteilige Volumenverhältnis des Werkstoffes in der jeweiligen Fraktion macht und somit nicht erkennbar ist, wieviel Metall bzw. Kunststoff von der tatsächlichen vorhandenen Menge gelöst werden, soll diese Tabelle in eine Massenbi-

lanz umgerechnet werden²⁰. Da die Versuchsergebnisse des versprödeten Bauteiles nahezu identisch mit denen des unversprödeten Bauteiles sind, werden die Berechnungen nur für das unversprödete Bauteil durchgeführt. Es ergibt sich folgende berechnete Verteilung der absoluten Gewichtsanteile bezogen auf die einzelnen Siebe:

Siebboden	Metallfraktion		Kunststofffraktion		Gemischfraktion	
	Gewicht /g	Gew. – %	Gewicht /g	Gew. – %	Gewicht /g	Gew. – %
1	1,4	5,4 %	0,25	0,1 %	0,05	0,8 %
2	14,60	56,8 %	106,5	75,8 %	1,5	24,4 %
3	1,96	7,6 %	28,78	20,5 %	0,36	5,9 %
4	5,35	20,8 %	1,22	0,9 %	0,03	0,5 %
sonst. Verluste					4,2	68,4 %
Summe	23,31	90,7%	136,75	97,3 %	6,14	100 %
reales Bauteilgewicht	25,70	100 %	140,50	100 %	–	

Tabelle 4: Verteilung der absoluten Gewichtsprozente auf die jeweiligen Siebböden

Mit Hilfe dieser einfachen mechanischen Zerkleinerung konnten bereits ca. 97% sortenreiner Kunststoff und ca. 91% reine Metallfraktion getrennt werden. Somit wird gezeigt, daß eine mechanische Verfahrenstechnik sehr gut als Lösung zur Trennung der Metallschicht von MID-Kunststoffen eingesetzt werden kann. Dieses mechanische Zerkleinern ist durch Optimierung und gezielten Einsatz geeigneter Aggregate prinzipiell noch leistungsfähiger. Der Anteil der nicht gelösten Metallschichten ist sehr gering. Die Separierung der einzelnen Fraktionen kann sehr effizient durch entsprechende Schwimm-Sink-Anlagen durchgeführt werden. Der Dichtekoeffizient ist hierfür ausreichend groß²¹, da bereits Kunststoffe mit wesentlich geringeren Dichteunterschieden (bis zu 0,02 g/cm³) voneinander getrennt werden.

3.4.5 Synthese zu einem Verfahrenskonzept für das MID-Recycling

Auf Grund der guten Trennergebnisse und großen Dichteunterschiede stehen als Trennaggregate neben der Schwimm-Sink-Anlage der Hydrozyklon, Aerozyklon und alle weiteren Aggregate, die Dichteunterschiede als Trennkriterium verwenden, für ein Verfahrenskonzept zur Auswahl.

Will man den Kunststoff möglichst rein wiedergewinnen, muß auf dessen stoffliche Beschaffenheit eingegangen werden. So muß zum Beispiel berücksichtigt werden, daß mit jedem Aufheiz- und Abkühlvorgang die mechanischen Eigenschaften eines Thermoplasten stark

²⁰ Berechnet über die Dichte der Metallschicht (Cu und Ni ca. 8,9g/cm³, PEI ca. 1,35g/cm³) und die Dicke der Metallschicht (ca. 40µm).

²¹ $\Delta\rho_{\text{Gemisch/Kunststoff}} = 0,35\text{g/cm}^3$, $\Delta\rho_{\text{Gemisch/Metall}} = 7,2\text{g/cm}^3$, $\Delta\rho_{\text{Kunststoff/Metall}} = 7,55\text{g/cm}^3$

beeinträchtigt und somit die Einsatzmöglichkeiten des späteren Recyclingproduktes reduziert werden [88]. Zur Vermeidung von thermischer Überbelastung durch die Zerkleinerung kann das Aufgabegut teilweise naß in die Aggregate eingegeben werden. Auch die frühzeitige Abtrennung von größeren Nichteisenmetallpartikeln nach der Vorzerkleinerung ist wichtig, da es sonst zu Verschmelzungen zwischen Kunststoff und Metall kommen kann.

Für alle Zerkleinerungsstufen wird der Einsatz von Schneidmühlen empfohlen. In der Vorzerkleinerung liegen die Vorteile einer Schneidmühle darin, daß die Bauteile ganz aufgegeben werden können und die Einlegesiebe die Zerkleinerung auf eine gewünschte maximale Korngröße ermöglichen. Für die erste Nachzerkleinerung kann die selbe Mühle mit einem anderen Siebeinsatz verwendet werden. Dadurch können sowohl für eine Pilotanlage als auch später in der technischen Anwendung die Investitionskosten gering gehalten und die Maschine besser ausgelastet werden. In der zweiten Nachzerkleinerung benötigt man eine Schneidmühle mit Doppelschrägschnitt, die im Naßbetrieb eingesetzt werden kann.

Ein Wirbelstromscheider dient zur Abtrennung von größeren Nichteisenmetallpartikeln. Er zeichnet sich durch einen sehr geringen Fehlaustrag aus. Die beiden Klassierschritte haben jeweils die Aufgabe das Überkorn zur wiederholten Zerkleinerung abzutrennen, um verbleibende Verbindungen zwischen Metallschicht und Kunststoffpartikeln aufzulösen.

Eine Schwimm-Sink-Sortierung zwischen der ersten Klassierung und der zweiten Nachzerkleinerung ermöglicht eine saubere Trennung zwischen Kunststoff- und Metallpartikeln, da die beiden Stoffe sehr unterschiedliche Dichten haben. Als positiver Nebeneffekt erweist sich die Reduzierung der thermischen Belastung des Kunststoffes im nachfolgenden Zerkleinerungsprozeß durch eine nasse Aufgabe. Der Hydrozyklon wird in der Industrie bereits sehr erfolgreich zur Sortierung von unterschiedlichen Kunststofffraktionen und Staubpartikeln eingesetzt. Er bildet den letzten Verfahrensschritt dieses Modells.

In weiteren Versuchen muß die Qualität des rezyklierten Kunststoffes ermittelt werden, um die Auswirkungen der Herstellungs-Prozesse (Spritzguß, Metallisierung, Löten etc.) und der Gebrauchsphase des ersten Lebenszykluses auf die Eigenschaften des Thermoplasten (z. B. elektrische und mechanische Eigenschaften, Verarbeitbarkeit, Metallisierbarkeit etc.) und damit dessen Eignung für eine zweite Verwertung feststellen zu können (vgl. dazu Ergebnisse aus wissenschaftlicher Forschung z. B. in [99, 100, 101]).

Mit den durchgeführten Versuchen wird aufgezeigt, daß auch die besonders haftfest metallisierten thermoplastischen Schaltungsträger in verfügbaren Anlagen in ausreichender Reinheit getrennt und die Möglichkeit für eine wiederholte Verwertung besteht. Damit wurde dem einleitend definierten Ziel einer ganzheitlichen Betrachtungsweise neuer Produktionstechnologien, die auch die spätere Entsorgung mit einschließt, entsprochen.

4. Herstellungsverfahren für Molded Interconnect Devices

Das in Kapitel 2.4 ermittelte enorme potentielle Marktvolumen für räumliche spritzgegosene Schaltungsträger beschleunigt die Entstehung einer unübersichtliche Vielfalt an unterschiedlichen Konzepten zu deren Herstellung. Die Aktualität dieser neuen Aufbautechnik verhindert dagegen noch eine zukünftig zu erwartende Bereinigung des Technologie-Angebotes. Aus der Kumulation von Anwendungserfahrungen werden sich jedoch mit zunehmender Etablierung des MID-Ansatzes einige wenige Standardprozesse herauskristallisieren. Ziel des ersten Abschnittes des folgenden Kapitels ist es daher, bereits im Vorfeld existierende MID-Herstellungsverfahren zu strukturieren, analysieren und technisch-wirtschaftlich zu bewerten. Bild 22 zeigt eine Auswahl verschiedener Verfahrensketten, die nach der Abfolge unterschiedlicher Herstellungsprozesse für Formgebung, Metallisierung und Strukturierung gegliedert sind [102].

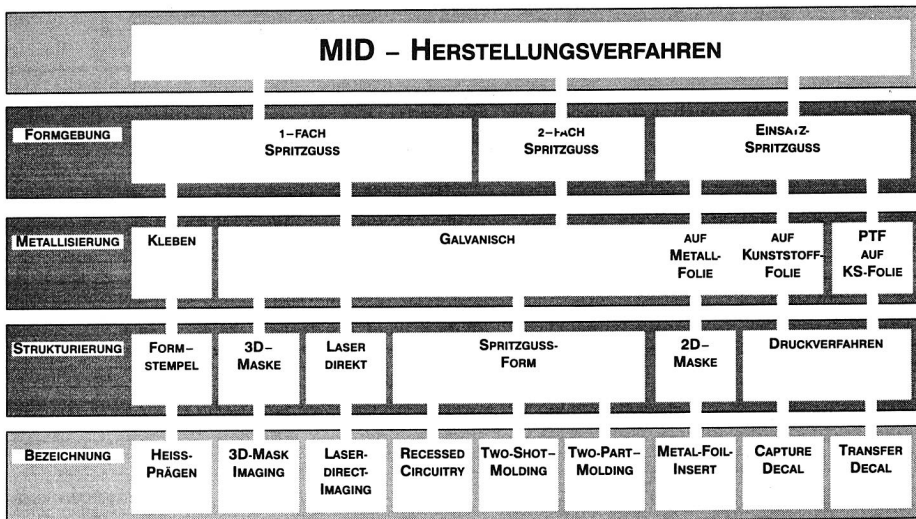


Bild 22: Alternativen zur Herstellung von MIDs

Eingegliedert in internationale Entwicklungsverbünde wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit auch zwei Projekte zur Weiterentwicklung spezifischer MID-Herstellungsverfahren durchgeführt, die im folgenden detaillierter beschrieben werden:

- Erstellung eines Kataloges zur fertigungsgerechten Konstruktion für das Two-Shot-Molding sowie
- Optimierung von Materialien und Prozessen für die 3D-Maskenbelichtung.

4.1 Vergleich alternativer MID-Herstellungsverfahren

Basierend auf der Ein- oder Mehrschußspritzgußtechnik stehen potentiellen MID-Anwendern eine Fülle verschiedener Herstellungsverfahren zur Auswahl, die in die drei Hauptgruppen *Formstrukturierungs-, Belichtungs- und Folienverfahren* gegliedert werden können (siehe Bild 23). Diese Verfahren unterscheiden sich im Erfüllungsgrad der produktabhängigen Anforderungsprofile, insbesondere jedoch in Bereichen wie

- der Komplexität der elektronischen Schaltung (Leiterbahnbreiten, Lagenzahl, Spannungs-, Strombelastbarkeit etc.),
- den Gestaltungsmöglichkeiten (3D-Eignung, Miniaturisierung, Integration Verbindungselemente, Montagetechnologien etc.) sowie
- der Wirtschaftlichkeit (Material-, Verfahrenskosten, Investitionsbedarf etc.)

Formstrukturierung	Belichtungsverfahren	Folientechnik
<ul style="list-style-type: none"> • PCK-Verfahren • SKW-Verfahren • Vertieftes Leiterbild 	<ul style="list-style-type: none"> • Laser-Strukturierung • 3D-Masken-Belichtung • Projektionsbelichtung 	<ul style="list-style-type: none"> • Heißprägen • Einspritztechnik • Leiterbild-Übertragung

Bild 23: Gliederung der MID-Herstellungsverfahren in Hauptgruppen

4.1.1 Formstrukturierungs-Verfahren

Die Formstrukturierungs-Techniken zeichnen sich dadurch aus, daß die Leiterbildstruktur bereits im Spritzguß-Werkzeug integriert ist. Im einfachsten Fall wird das Layout vertieft in die Produktoberfläche modelliert (Recessed Circuit). Nach dem normalen Einfach-Spritzgußprozeß können die Erhebungen aus der Fläche, die die Trennung zwischen den unterschiedlichen elektrischen Potentialen darstellen, nach einer vollflächigen Kupfer-Beschichtung mechanisch abgetrennt oder alternativ entweder für eine Additiv- oder für eine Semiadditiv-Metallisierung über einen Walzendruckprozeß mit Ätzwiderstand abgedeckt werden [103]. Umgekehrt können die erhabenen Strukturen durch Rollcoating mit einem Ätzwiderstand und anschließendem Ätzprozeß auch das Leiterbild darstellen.

Während dieses Recessed-Circuit-Verfahren auf dem MID-Weltmarkt praktisch keine Bedeutung genießt, finden besonders die Zwei-Schuß-Verfahren breite Anwendung. Dazu wird in einem Schuß das an der Oberfläche erscheinende Leiterbild in einem metallisierbaren Kunststoff gefertigt und in einem zweiten Schuß die Räume zwischen den Leiterbahnen aufgefüllt (oder vice versa).

Beim sogenannten PCK-Verfahren wird ein mit Palladiumkeimen katalysierter Kunststoff für die Erzeugung des Leiterbildes verwendet, die Bereiche zwischen den später leitenden

Bahnen werden dagegen mit nicht katalytischem Kunststoff hergestellt. Je nach Komplexität des Leiterbildes und der Produktstruktur kann das katalytische Material sowohl im ersten als auch im zweiten Schuß verarbeitet werden. In der darauf folgenden stromlosen Beschichtung wird so nur an der Oberfläche des katalytischen Materials Metall abgeschieden. In weiteren Schritten können auf diese erste stromlos aufgebraachte Schicht weitere Metallagen aufgebaut werden [104] (siehe Bild 24).

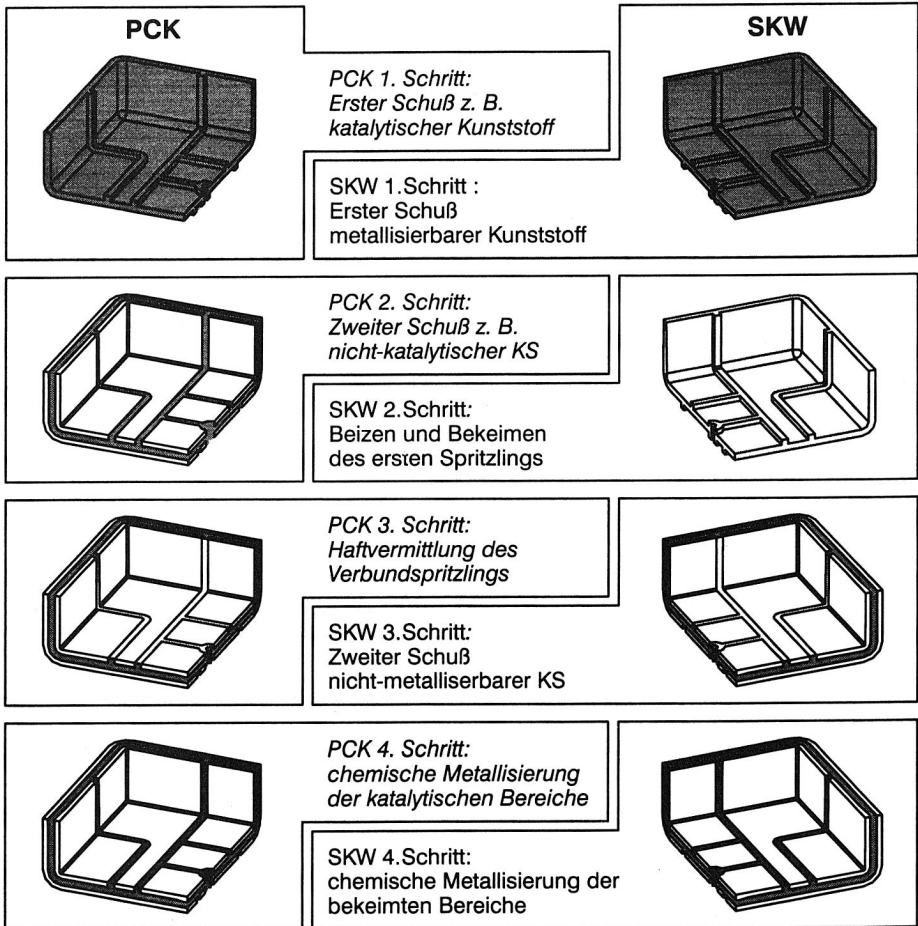


Bild 24: MID-Verfahrensvergleich Two-Shot-Molding nach PCK und SKW

Im Gegensatz dazu wird im SKW-Prozeß der Vorspritzling aus metallisierbarem Kunststoff in einer Zwischenstufe gebeizt und mit Palladiumkeimen aktiviert. Erst nach diesen chemi-

schen Prozeßschritten wird ein nicht galvanisierbarer Kunststoff um die erste Form gespritzt. Es folgen die bereits oben beschriebenen Schritte der Metallisierung [105] (siehe Bild 24). Weitere Ausprägungen des Mehrschuß-Verfahrens nutzen z. B. das unterschiedliche Verhalten verschiedener Kunststoffe in chemischen Vorbehandlungsprozessen aus. Damit können auch Thermoplaste gleicher Art, die sich nur durch deren spezifische Einstellungen (insbesondere Füllstoffe) unterscheiden, im Mehrfarbenspritzguß gemeinsam verarbeitet werden; in den folgenden chemischen Beizprozessen wird nur selektiv die Art des Kunststoffes angegriffen, die die Form des Leiterbildes trägt [106].

Allen Zwei-Schuß-Verfahren gemeinsam ist die Metallisierung der Kunststoffoberflächen in Volladditivtechnik. Die räumliche und elektrische Komplexität des Leiterbildes mit einer Vielzahl voneinander isolierter Leiterbahnen erlaubt zumeist nicht die elektrolytische Galvanisierung, die die Kontaktierung jeder einzelnen separierten Leiterbahn notwendig machen würde. Dagegen kann in einer stromlosen Metallisierung die Leiterstruktur in einem Schritt in einem chemischen Kupferbad, allerdings mit geringerer Abscheidegeschwindigkeit, bis zur vollen Dicke aufgebaut werden.

Bei einer weiteren Abwandlung des Mehrfach-Spritzgußverfahrens wird ähnlich der Stanzgittertechnologie vorgegangen: bereits metallisierte Kunststoffkörper werden entweder umspritzt oder nachträglich in einen nicht-metallisierten Kunststoffträger montiert (*3D-Multi-shot*).

4.1.2 Belichtungsverfahren

Bei den belichtungstechnischen Verfahren werden ähnliche Prozesse wie zur Herstellung konventioneller Leiterplatten eingesetzt. Die Metallisierung kann dabei im Volladditiv-, Semiadditiv- oder Subtraktivverfahren aufgebracht werden. Die Strukturierung wird durch selektive Belichtung (Masken, Laserbeschriftung) photosensitiver Materialien realisiert. In der Ähnlichkeit zur konventionellen planaren Technologie liegt auch die Tatsache begründet, daß die so produzierten MID-Applikationen meist nur eingeschränkte räumliche Ausprägungen, aber relativ komplexe elektronische Schaltungen tragen.

Beim sogenannten *SIL (Spritzgußteile mit integrierten Leiterbahnen)*-Verfahren wird auf dem Kunststoffkörper Kupfer zuerst in einer dünnen Schicht chemisch abgeschieden, dann elektrolytisch verstärkt. Ein ebenfalls elektrolytisch aufgebrachter metallischer Ätzresist (z. B. Zinn) wird mit dem Laser in sehr feinen Bahnen abgetragen. Das an diesen Stellen freigelegte Kupfer kann in einem Ätzbad bis auf das thermoplastische Basismaterial gestrippt werden. Abschließend kann der Ätzresist ganzflächig entfernt und die Oberfläche mit weiteren metallischen (SnPb, Ni, Au) oder organischen Schichten abgedeckt werden (siehe Bild 25) [94].

Das 3-D-Maskenbelichtungsverfahren verwendet räumlich geformte PVC-Masken zur Strukturierung (siehe Bild 32). In einem stromlosen Kupferbad wird zunächst auf der Oberfläche eine dünne Schicht (ca. 1–3µm) Metall abgeschieden. Danach wird ein Photoresist,

der sowohl positiv als auch negativ reagierend sein kann, in einem elektrophoretischen Prozeß aufgebracht (ca. $10\mu\text{m}$). In einer parallelen Herstellungskette werden die PVC-Folien auf ihrer Unterseite mit speziellem Lack beschichtet, dann über einem Muster-Kunststoffformteil Vakuum-tiefgezogen und anschließend der Lack mit einem Laserstrahl verdampft [107]. Es entsteht so eine räumliche Maske mit dem Abbild des Schaltungslayouts. Zur Belichtung des Photoresists wird die 3-D-Maske mit Unterdruck an das zu belichtende Teil angepaßt und durch eine trommelförmigen Kammer geführt, in der UV-Strahler am Radius verteilt angebracht sind, um für eine gleichmäßige Ausleuchtung von allen Seiten zu sorgen.

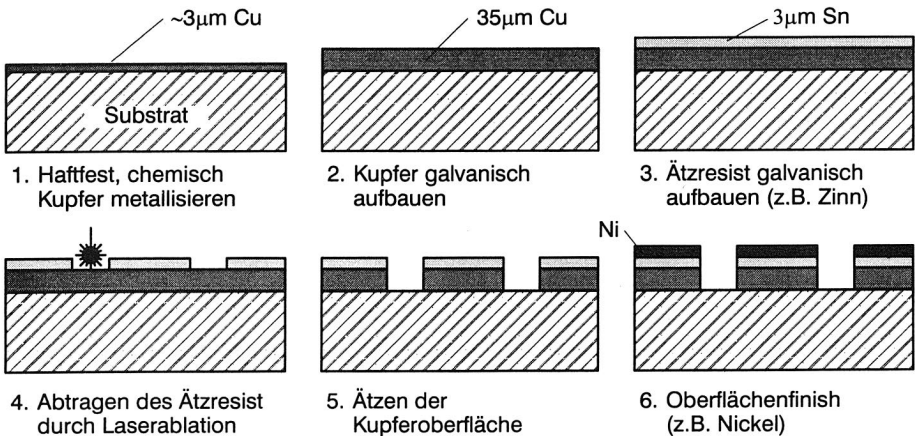


Bild 25: Prozeßkette beim Laser-Direktstrukturierung

Weitere Verfahren, die sich noch in der Entwicklungsphase befinden oder kommerziell bisher nicht eingesetzt werden, sind:

- Belichtung mittels Projektion oder Schattenwurf [108],
- Laserstrukturierung organischer Resiste [vgl. z. B. 109],
- Laseraushärtung intrinsisch leitfähiger Polymere [47] sowie
- Belichtung mittels Holographie.

4.1.3 Folienverfahren

In der Gruppe der Folienverfahren sollen alle MID-Herstellungsmethoden zusammengefaßt werden, die für die Layoutabbildung einen metallischen oder organischen, zunächst flachen Zwischenträger benutzen. Die Strukturierung kann dadurch sehr einfach über konventionelle planare Techniken wie z. B. Sieb- oder Photodruck (vgl. Kapitel 3.2) erfolgen [16]. Das

so strukturierte Schaltungslayout kann grundsätzlich auf drei unterschiedliche Wege mit dem räumlichen Kunststoffformkörper verbunden werden:

1. Flexible Leiterfolien werden nach einem möglichen Vorprägen in die Spritzgußform eingelegt und hintspritzt. Durch die Verwendung des gleichen Thermoplasten verschmelzen Folie und Gehäuse während des Einspritzprozesses (*Caputer Decal*). In ähnlicher Weise wird diese Technologie auch für das Herstellen dekorativer Kunststoffblenden eingesetzt (In-Mould).
2. Alternativ lassen sich speziell aufgedruckte Leiterbilder im Spritzgußprozeß auch vom flexiblen Trägermaterial auf den starren Schaltungsträger übertragen. Nach der Kunststoffformgebung, in der sich das Schaltungslayout auf den starren Grundkörper überträgt, wird der temporäre flexible Schaltungsträger wieder abgezogen (*Transfer Decal* [110]).
3. Letzendlich können flexible Schaltungsträger erst nach dem Spritzgußprozeß mit dem starren Schaltungsträger in geeigneter Weise, insbesondere durch Kleben, verbunden werden [vgl. z. B. 111].

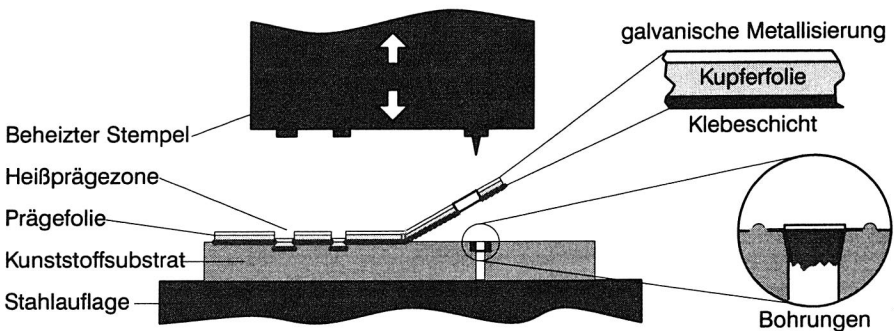


Bild 26: Heißprägen auf thermoplastischen Grundkörpern

Anstatt auf einer Trägerfolie aus Kunststoff kann die elektrische Schaltung auf einer metallischen Folie (z. B. Al) aufgebaut werden. Strukturiert wird in diesem Fall durch vorher photoelektrische oder drucktechnisch aufgebrachte Galvanoresiste und anschließende elektrolytische Kupferabscheidung. Um eine adäquate Haftung von Kunststoff und metallischer Leiterfolie zu erhalten, wird die Oberfläche der Kupferbahnen speziell behandelt. Nach dem Einspritzvorgang wird die Aluminiumträgerfolie chemisch entfernt.

Beim Heißprägen geschieht Strukturierung und Metallbeschichtung in einem Schritt durch gleichzeitiges Ausstanzen des Leiterbildes aus einer Kupferfolie und dessen Verkleben mit dem Kunststoffkörper (siehe Bild 26) mit Hilfe eines beheizten Metallklischees [55, 112].

4.2 Fertigungsgerechte Konstruktion von 2-Shot–Molding–MIDs

Mit dem Two-Shot–Molding sind Leiterbahngeometrien mit großen räumlichen Freiheitsgraden realisierbar. Eine enge Abstimmung zwischen dem konstruktiv Möglichen und dem fertigungstechnisch Sinnvollen ist somit von entscheidender Bedeutung. Da die Konstruktion dieser Two-Shot–MIDs bisher noch ausschließlich auf der persönlichen Erfahrung weniger Experten basiert, wurden in Kooperation mit einem der weltweit größten Produzenten räumlicher Schaltungsträger Richtlinien zur fertigungsgerechten Gestaltung systematisch erfaßt, analysiert und in Form eines Konstruktionskataloges dokumentiert²².

Der erzielbare Rationalisierungseffekt durch Einsatz der Two-Shot–Technologie hängt im wesentlichen von der geschickten Auswahl eines geeigneten Anwendungsfalles ab. So eignen sich Produktneugestaltungen besser als Varianten- oder Anpassungskonstruktionen. Je mehr elektrische und mechanische Funktionen in ein Teil integriert werden können oder je mehr konventionelle Teile durch ein MID ersetzt werden können, desto höher ist der Einsparungseffekt. Aus der Vielzahl verfügbarer MID-Herstellungsverfahren ist eine genaue Spezifizierung der Eignung für den Zweifachspritzguß notwendig. Folgende Randbedingungen sprechen für den Einsatz der Zweifachspritzguß-Technologie:

- Komplexe räumliche Gestalt der Schaltungsträger, insbesondere der Leiterbahnen
- Geringe Anzahl separater Leiterzüge und elektronischer Bauteile
- Wanddicken, Leiterbreiten- bzw. Abstände möglichst größer als 0.5mm
- Hohe Stückzahlen aufgrund der hohen Entwicklungs- und Werkzeugkosten

4.2.1 Auswahl geeigneter Materialkombinationen

Um die optimale Werkstoffkombination für zweifachspritzgegossene MIDs zu finden, spielen neben konventionellen Spritzgußparametern eine Reihe prozeßspezifischer Kriterien eine Rolle. Die Auswahl der katalytisch gefüllten Thermoplaste ist gegenwärtig noch begrenzt (z. B. LCP, PES, PEI) und hängt von der speziellen Verfahrensvariante des Zweifachspritzgusses ab. Der Werkstoff des ersten Schusses muß der Schmelztemperatur und dem Werkzeuginnendruck des zweiten Schusses standhalten. Deshalb sollte der Erweichungspunkt des ersten Schusses über der Schmelztemperatur des zweiten liegen. Ausnahmen von dieser Regel sind möglich, da die Stabilität des ersten Schusses im Werkzeug des zweiten von vielen weiteren Faktoren abhängt, wie z. B. der Schmelzviskosität der beiden Schüsse, dem Verhältnis der Wanddicken zwischen beiden Schüssen, der Richtung des Schmelzeflusses des zweiten Schusses oder der Größe der Kontaktfläche zwischen Schmelze, erstem Schuß und Werkzeugstahl.

Die chemische Vorbehandlung, die zur Metallisierung nötig ist, sollte die Eigenschaften des nicht zu metallisierenden Thermoplasten so wenig wie möglich beeinflussen. Für jeden zu

²² Bei Erstellung des Konstruktionskataloges wurde der Verfasser von Herrn cand. Ing. Marko Spiegel unterstützt.

metallisierenden Polymer wird ein eigens abgestimmter Beschichtungs-Prozeß verwendet. Aus der chemischen Beständigkeit folgt, daß für es für jeden metallisierbaren Thermoplasten eine spezielle Zuordnung an nicht metallisierbaren Thermoplasten gibt. Biegeeweiche Funktionselemente wie Schnapphaken oder Klemmverschlüsse können nur von dem nicht metallisierten Thermoplasten aufgenommen werden. Eine wichtige Frage für die Konstruktion von zweifachspritzgegossenen Teilen ist demnach, ob der metallisierbare Polymer im ersten oder im zweiten Schuß gespritzt wird. Diese Entscheidung wirkt sich auf nahezu alle darauffolgenden Konstruktionsschritte aus.

4.2.2 Spritzgußgerechte Gestaltung

Meist werden die beiden Schüsse als zwei getrennte Teile konstruiert. Dieser Abschnitt konzentriert sich auf die Teilgebiete, die sich von der Konstruktion herkömmlicher Spritzgußteile unterscheiden. Zunächst wird die Form der Leiterbahnen bestimmt, die erhoben, flach oder versunken sein können. Aufgrund der größeren Oberfläche können erhobene Leiterbahnen auf gleicher Breite ein Vielfaches an Stromstärke übertragen (siehe Bild 27, vgl. Bild 30). Zu beachten ist, daß die katalytischen Materialien spröde sind, und damit hohe dünne Stege leicht abbrechen. Das Verhältnis von erreichbarer Höhe und Breite ist damit limitiert.

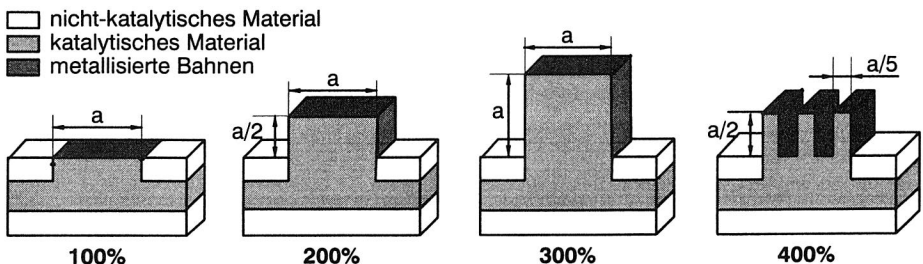


Bild 27: Abhängigkeit der Strombelastbarkeit von der Leiterbahnform

Die Geometrie des ersten und zweiten Schusses beeinflusst auch die Haftung zwischen katalytischem und nicht katalytischem Polymer. Je mehr sich der abkühlende (und schwindende) zweite Schuß um den ersten hüllt, desto stärker ist die mechanische Verhakung (*interlocks*). Generell wird eine bessere Haftung erreicht, wenn der erste Schuß metallisierbares Material ist, da der zweite Schuß den ersten besser umschließt. Oft sind zusätzlich hinzukonstruierte Hinterschneidungen oder Naben nötig, um genügend Haftung zu erzielen (siehe Bild 28). Weiterhin erweicht das flüssige Material des zweiten Schusses den Werkstoff des ersten und erzeugt Mikroverbindungsstellen an der Oberfläche. Diese spezifische

Haftung, die bei teilkristallinen Thermoplasten geringer ist als bei amorphen, ist umso größer, je mehr der erste durch den zweiten Schuß erweicht wird.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Lagerung des ersten Schusses im Werkzeug des zweiten Schusses. Das eingelegte Plastikteil des ersten Schusses wird u. a. auch mechanischer Belastung ausgesetzt, während der zweite Schuß injiziert wird. Deshalb müssen der erste Schuß und das Werkzeug des zweiten Schusses so konstruiert werden, daß die Lagerung eine Deformation des ersten Schusses verhindert. Die Höhe der Belastung wird zusätzlich bestimmt von Betrag und Richtung des Einspritzdruckes.

Eine wichtige Frage bei der Konstruktion von zweifachspritzgegossenen MIDs ist, wie die Schmelze des zweiten Schusses abgedichtet werden kann (siehe Bild 29). Diese Abdichtungen (*shot-offs*) werden durch die Geometrie der Schnittstelle zwischen der Wand des ersten Schusses, Werkzeug und der Schmelze des zweiten Schusses definiert. Dabei kommt es darauf an, daß das schließende Spritzgußwerkzeug einen definierten Druck auf die Oberfläche des ersten Schusses ausübt, der so groß ist, daß er den zweiten Schuß sicher abdichtet aber auf dem Teil des ersten Schusses keine sichtbaren Abdrücke hinterläßt.

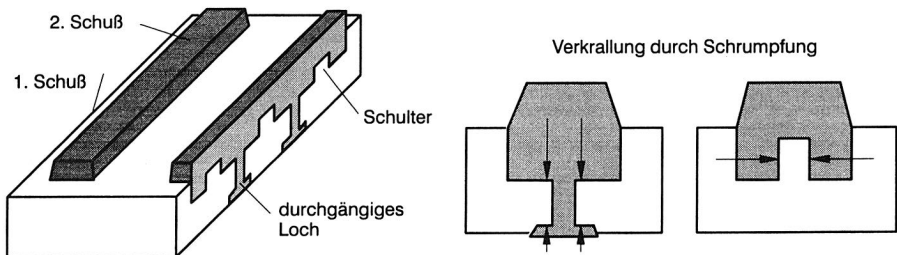


Bild 28: Verzahnung zwischen 1. und 2. Schuß (Interlocks)

Wanddicken von zweifachspritzgegossenen Teilen werden ähnlich wie herkömmliche Spritzgußteile in einem Bereich zwischen 1mm und 3mm festgelegt. Über- oder Unterschreitungen dieser Werte sind möglich, erfordern aber oft zusätzliche Maßnahmen, wie Ausgleichen der Fließwege, Verteilen der Materialzufuhr auf mehrere Angüsse etc. und somit zusätzliche Werkzeugkosten. Desweiteren sind bei dünnen Wänden von zweifachspritzgegossenen Teilen die Vektoren der Fließwege relativ zu den Wänden des ersten Schusses zu beachten. Weitere wesentlich Punkte bei der Konstruktion der Spritzgußteile sind:

- Fasen und Radien erleichtern den Schmelzefluß, vermindern Spannungen etc.,
- Lage der Auswerfer möglichst nicht auf Leiterbahnen und Funktionselementen lokalisieren,
- Typ, Anzahl und Lage der Angüsse für einen optimalen Schmelzefluß.

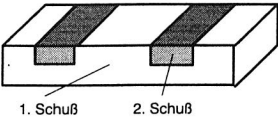
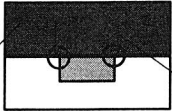
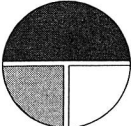
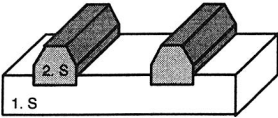
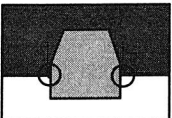
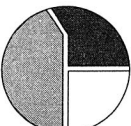
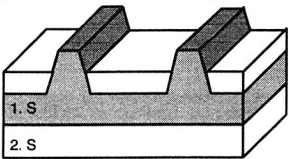
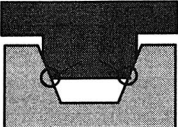
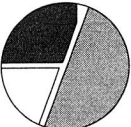
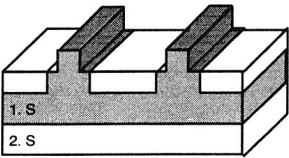
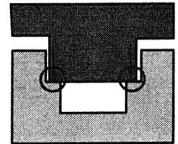
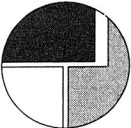
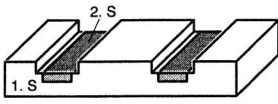
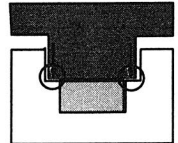
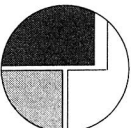
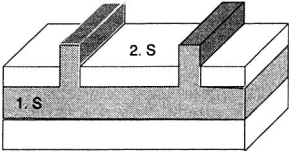
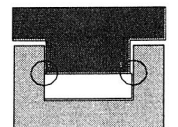
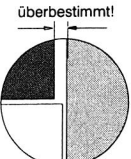
Two-Shot-Teil	Werkzeug im 2. Schuß	Vergrößerung
<p>horizontale Shot-offs, 2. Schuß metallisierbar, flach</p>  <p>1. Schuß 2. Schuß</p>	 <p>Werkzeug Dichtungskräfte</p>	 <p>gut</p>
<p>vertikale Shot-offs, 2. Schuß metallisierbar, erhobene Bahnen</p>  <p>2. S 1. S</p>		 <p>gut</p>
<p>angewinkelte Shot-offs, 1. Schuß metallisierbar, erhobene Bahnen</p>  <p>1. S 2. S</p>		 <p>gut</p>
<p>horizontale, gestufte Shot-offs, 1. Schuß metallisierbar, erhobene Bahnen</p>  <p>1. S 2. S</p>		 <p>gut</p>
<p>horizontale, gestufte Shot-offs, 2. Schuß metallisierbar, vertiefte Bahnen</p>  <p>2. S 1. S</p>		 <p>gut</p>
<p>vertikale Shot-offs, 1. Schuß metallisierbar, erhobene Bahnen</p>  <p>2. S 1. S</p>		<p>überbestimmt!</p>  <p>schlecht</p>

Bild 29: Dichtungszone zwischen Werkzeug und 1. Schuß (shot-offs)

4.2.3 Berücksichtigung des Metallisierungsprozesses

Zweifachspritzzgegossene MIDs werden gegenwärtig fast ausschließlich mit Hilfe stromloser Beschichtungsverfahren metallisiert. Damit können selbst komplex geformte Leiterzüge mit einer konstanten Schichtdicke überzogen werden, ohne jeden einzelnen Leiterzug elektrisch kontaktieren zu müssen. Nachteilig sind dagegen die längeren Metallisierungszeiten.

Die Verwendung kernkatalytischer Polymere zur selektiven Metallisierung in Kombination mit der rein mechanische Verzahnung von erstem und zweitem Schuß birgt die Gefahr des Eindringens von Metallisierungsflüssigkeiten zwischen die beiden Teile während der naß-chemischen Beschichtungsprozesse und der Verursachung von Kurzschlüssen. Auch dieses Fertigungsproblem kann durch konstruktive Maßnahmen verhindert werden, indem Absätze als sogenannte Metallisierungs-Barrieren eingefügt werden.

Temperaturanstieg /K

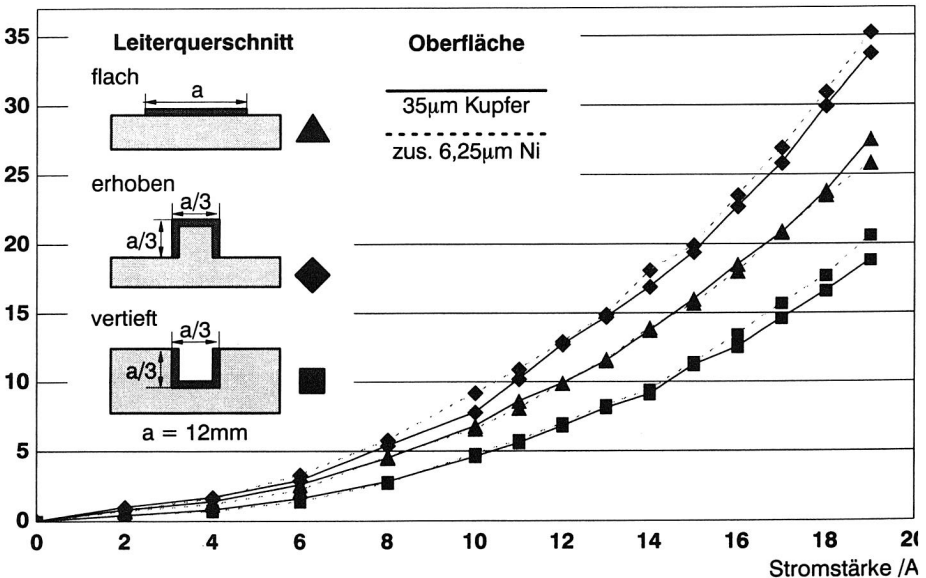


Bild 30: Strombelastbarkeit in Abhängigkeit der geometrischen Form der Leiterbahnen

Zur Bestimmung der maximalen Stromstärke, die über einen definierten Leiterbahnquerschnitt übertragen werden kann, existieren im Gegensatz zu konventionellen Leiterplatten (z. B. MIL-275D) bei MIDs weder Standards noch grundlegende Untersuchungen. Um bei einer vorgegebenen Stromstärke den erforderlichen Leiterquerschnitt von Kupferleitern bestimmen zu können, wurde während dieser Arbeit eine Testreihe durchgeführt, die den erlaubten Temperaturanstieg des FR4-Standards (30K) für die MID-Anwendung evaluieren

sollte. Dazu wurden die Auswirkungen der Parameter Querschnitt (0,5...12mm), geometrische Form (flach, erhoben, vertieft) sowie Oberflächenfinish (Ni) der 35µm-starken Leiterbahnen gemessen.

Die erzielten Ergebnisse der Temperaturerhöhungen liegen innerhalb eines im MIL-Standard zugelassenen Toleranzbereiches (25%) und sind damit mit den FR4-Werten vergleichbar (Bild 30 zeigt ausgewählte Meßwerte). Aufgrund der höheren Temperaturdauerbelastbarkeit der Hochtemperaturthermoplaste gegenüber den herkömmlichen Epoxidharzlaminate könnte auch ein größerer Temperaturanstieg zugelassen werden. Bis dieser Vorteil in Form eines speziellen MID-Standards belegt wird, muß jedoch mit den bestehenden Normen gearbeitet werden. Die geringe Verbesserung durch die zusätzliche 6,25µm dicke Nickelschicht liegt in der schlechteren Leitfähigkeit gegenüber dem Kupfer begründet. Die bei ähnlicher Konvektion vergleichsweise schlechte Wärmeabfuhr durch Wärmeleitung in das Basissubstrat führt zu einem steileren Temperaturanstieg der erhobenen Leiterbahnen.

4.2.4 Exemplarische Demonstration der erstellten Konstruktionsregeln

Anhand zweier Serien-Applikationen sollen kurz einige Richtlinien zur fertigungsgerechten Gestaltung von Two-Shot-MIDs aufgezeigt werden. Bild 31 illustriert in einer Schnittdarstellung einen Automobil-Schalter für eine automatische Klimaanlage, der Stromstärken von bis zu 16 Ampère schalten muß. Die Leiterbildgeometrie wurde im ersten Schuß aus katalytischem Kunststoff gefertigt (1. KK), der zweite Schuß umhüllt das erste Teil und stellt die isolierenden Zwischenräume, das Gehäuse sowie alle flexiblen Funktionsträger dar. Zur Übertragung der hohen Ströme sind alle Leiterbahnen erhoben ausgeführt. Durch gestufte Shut-offs wird ein definierter Druck des zweiten Werkzeuges auf die horizontale Schulter und damit eine gute Abdichtung für den zweiten Schuß erzielt (1). Obwohl vertikale Shut-offs nicht optimal sind, müssen sie wegen der engen Raumverhältnisse hier appliziert werden. Aufgrund der relativ einfachen, runden Form können sie hier jedoch in ausreichender Genauigkeit hergestellt werden (2).

Zur Abstützung des ersten Kunststoffkörpers in der zweiten Form wurden definierte Bereiche geschaffen, die durch eingefügte Stufen auch als Metallisierungsbarrieren wirken, um einen elektrischen Kontakt zwischen verschiedenen Potentialen zu verhindern (3). Auch der metallisierte Absatz (5) wurde lediglich zur Abstützung des ersten Teiles eingebracht und dient nicht als Leiterbahn. Zusätzliche Durchbrüche im ersten Teil verbessern durch lokale Verminderung des Spritzdruckes den Schmelzefluß des zweiten Schusses und erzeugen eine mechanische Verzahnung der beiden Teile (4).

In einer weiteren Applikation (Bild 31), die das tragende Element eines Digitalisierstiftes für einen tragbaren Computer (Personal Digital Assistant PDA) darstellt, wird das katalytische Material im zweiten Schuß in die Hohlräume des ersten Teils eingespritzt. Für die zweilagige Leiterbildgeometrie muß eine dreischichtige Sandwichstruktur mit Wanddicken von nur

0,3mm realisiert werden (6). Die Einspritzpunkte für die räumlich völlig frei geführten Leiterbahnen (8) liegen auf speziell dafür gestalteten Pads (7). In den unter (9) gezeigten Taschen können 4 Batterien eingeklipst werden. An den Kontaktpads (10) wird eine kleine Leiterplatte elektrisch verbunden. Weitere Kontaktflächen (11) dienen zur Realisierung von Schaltknöpfen.

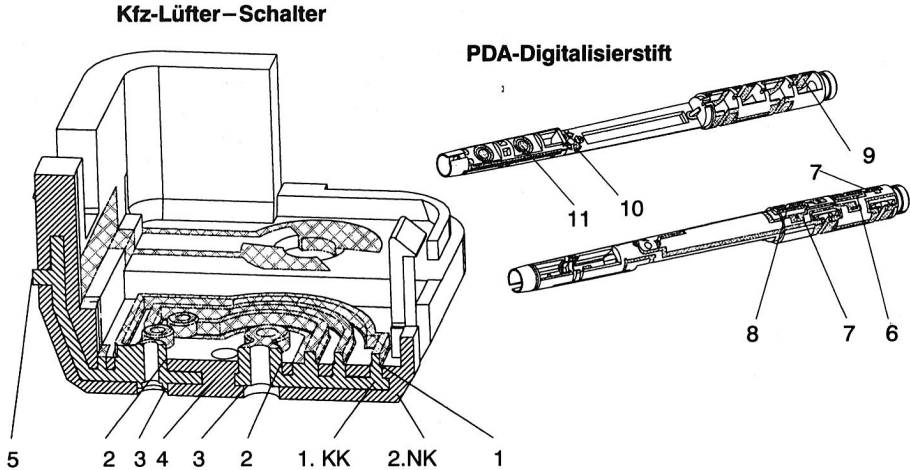


Bild 31: Applikationen in Two-Shot-Technologie

4.3 Material- und Prozeß-Optimierung für die 3D-Masken-Belichtung

Aufgrund der großen Ähnlichkeit mit der Herstellung konventioneller, planarer Leiterplatten in Semi-Additiv-Technik und eines damit verbundenen, einfacheren Umdenkenprozesses sowohl für Konstrukteure als auch für Fertigungsfachleute besitzt das vorausgehend bereits kurz beschriebene 3D-Masken-Belichtungsverfahren (patentiert in [113], siehe Bild 32) weltweit den größten Produktionsumsatz. Die Möglichkeit auch räumliche Leiterbilder in sehr feinen Strukturen (bis ca. $150\mu\text{m}$) herzustellen sowie die gegebene Änderungs-Flexibilität bei Layoutumstellungen ergeben eine hervorragende Eignung zur Produktion relativ komplexer elektronischer 3D-Schaltungen. Die Entkopplung des Strukturierungsprozesses in Form der Maskenherstellung vom eigentlichen Metallisierungsprozeß führt durch die simultane Belichtung des gesamten Leiterbildes (5–10s) zu geringeren Hauptzeiten.

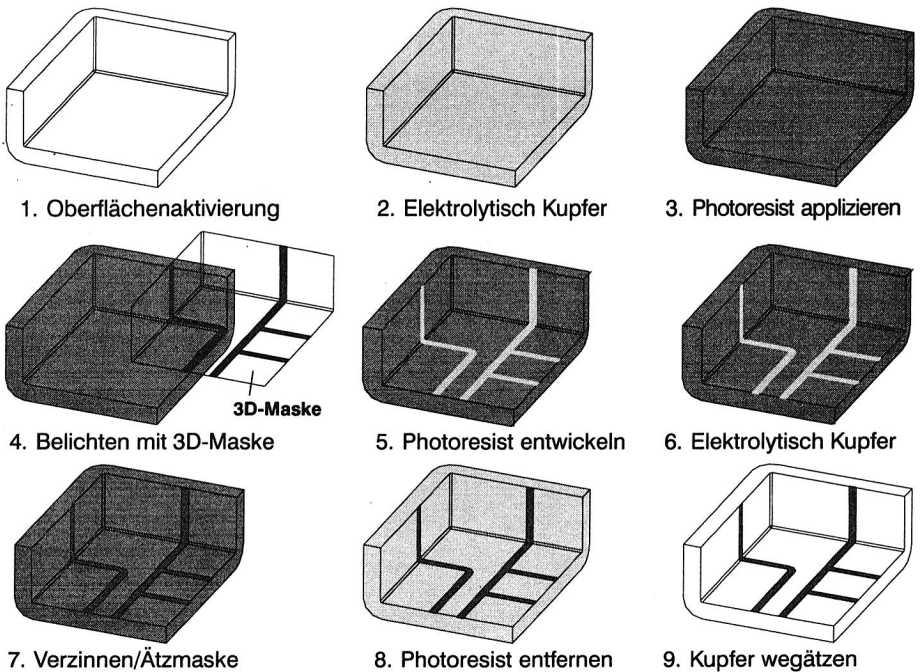


Bild 32: Prozeßkette beim Semiadditiv-Verfahren

Die Nachteile dieses Verfahrens liegen auf der einen Seite in der großen Anzahl der notwendigen Arbeitsgänge und auf der anderen Seite in den bisher noch vorhandenen Beschränkungen, die aus der Anwendung der 3D-Belichtungsmasken resultieren. Folgende Problemfelder stellen gleichzeitig die definierten Entwicklungsaufgaben dar, die in Kooperation mit einem amerikanischen MID-Hersteller im Rahmen dieser Arbeit gelöst wurden:

- Durch das zu belichtende Layoutabbild wird das maximale Tiefziehverhältnis der Masken im Vakuumtiefziehen vermindert und damit die mögliche 3D-Eignung eingeschränkt.
- Der verdampfte schwarze Lack der negativen Maske kann sich auf unbeabsichtigten Stellen des räumlichen Schaltungsträgers niederschlagen und führt damit zu Problemen bei der Belichtung des Photoresists und zu Fehlstellen der Metallisierung.
- Bei Verwendung eines lichtaushärtenden Photoresists wäre bei einem großem Verhältnis von nicht-metallisierten zu metallisierten Flächen des Leiterbildes eine positiv reagierende Maske sinnvoller einzusetzen.
- Der Lasermarkierungsprozeß für die laserschwärzbaren Folien ist grundlegend bisher noch nicht erforscht, die optimalen Werte der einzustellenden Prozeßparameter nicht er-

mittelt und deren Auswirkungen weitgehend unbekannt. Daraus folgen Qualitätsprobleme verschiedener Ausprägungen (siehe Bild 33).

- Die Programmierung des Beschriftungs-Lasers und des 6-Achs–Gelenkarmroboters für die koordinierte Beschriftung der Masken ist bisher sehr zeitaufwendig und mit den hohen Maschinenkosten sehr teuer (siehe Kapitel 7.1 *CAD/CAM-Verfahrenskette für das Laserstrukturieren*).

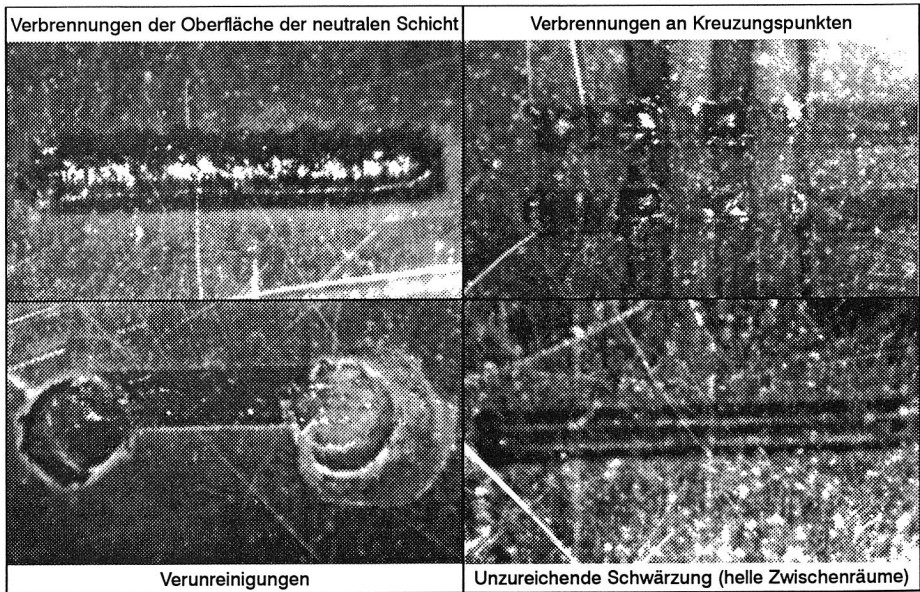


Bild 33: Fehlerarten bei konventionellem Maskenmaterial

4.3.1 Anforderungen an laserbeschriftbare Folien

Aus dem Herstellungsprozeß der dreidimensionalen Leiterplatten mit Hilfe der 3D-Maskentechnik ergeben sich vielfältige Anforderungen an das Maskenmaterial. Die wichtigsten sind die Strukturierbarkeit der Leiterbahnen, UV-Transparenz, eine gute Umformbarkeit sowie Dimensionsstabilität. Gegenüber den bislang eingesetzten metallischen Masken konnten insbesondere für die Strukturier- und Umformbarkeit wesentliche Verbesserungen erzielt werden, indem laserbeschriftbare Kunststofffolien eingesetzt werden. Neben einfachen lackgeschwärzten Folien wurden dazu anfänglich schichtweise aufgebaute PVC–Folien verwendet, wie sie aus dem Identifikationskartenbereich bekannt sind (patentiert in [114]). Derartige Folien sind aus einer 100µm starken IR-absorbierenden und gleichzeitig UV-trans-

parenten PVC-Schicht und zwei übereinanderliegenden, je 200µm dicken IR- und UV-transparenten PVC-Trägerschichten aufgebaut.

Die Strukturierung dieser Folien erfolgt durch partielle Schwärzung mit einem Infrarotlaser nach der Formgebung. Die Dunkelfärbung beruht dabei auf lokalen thermischen Abbaureaktionen des PVC [115]. Die Absorption des infraroten Laserlichts (1024nm) zur Energieeintringung in die Folie wird durch eine Dotierung feiner Rußpartikel (wenige µm groß) in der IR-absorbierenden Folienschicht erreicht, die so dicht sein muß, daß auch nach dem Tiefziehen der Folie, das zu einer Verminderung der Schichtdicken führt, noch eine ausreichende Schwärzung erfolgen kann. Demgegenüber ist eine hohe UV-Transparenz notwendig, um im UV-Belichtungsvorgang des Photoresists kurze Belichtungszeiten und geringe Erwärmung der Maske gewährleisten zu können. Um eine Unterstrahlung der geschwärzten Bereiche zu unterdrücken, muß die rußdotierte Folienschicht während der Belichtung direkt am Bauteil anliegen (siehe Bild 34).

Ihre dreidimensionale Gestalt erhält die Folie durch Vakuumformen. Dabei wird die Folie in einer Warmumformmaschine zuerst durch Wärmestrahler erhitzt, und anschließend mit Hilfe von Unterdruck an die Form gezogen (Bild 35). Die Qualität der Formgebung (Ausformung, Wanddickenschwankungen) hängt dabei sehr stark von der Qualität der verwendeten Form ab. Im einfachsten Fall kann hierfür aber auch ein mit entsprechenden Luftlöchern versehenes Originalspritzgußteil verwendet werden. Die gute Umformbarkeit des Materials gewährleistet sowohl die Herstellung feiner Strukturen als auch komplexer Formen.

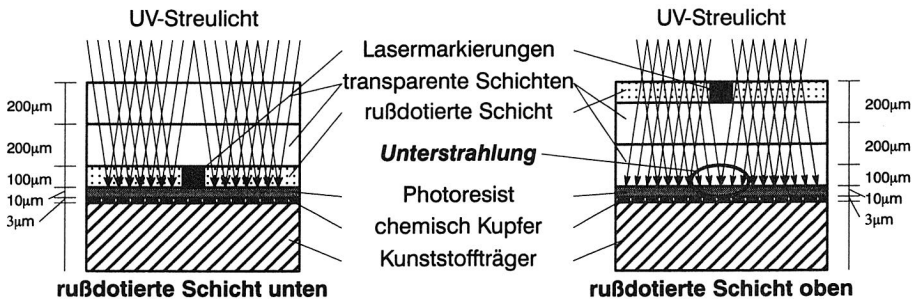


Bild 34: Unterstrahlung beim Belichten

Mechanische und thermische Formstabilität bilden zusammen die Dimensionsstabilität. Die Forderung nach mechanischer Formstabilität ergibt sich aus der Notwendigkeit einer stabilen Handhabung der Masken durch einen Industrieroboter. Weiterhin darf das Material nicht zu spröde sein, damit kein Bruch bei leichten Verformungen auftritt. Dagegen wird thermische Stabilität durch die bei der Belichtung auftretende Wärme erforderlich. So muß der Kunststoff Temperaturen von ca. 50°C ertragen können, ohne sich nennenswert verziehen, ausdehnen oder schrumpfen zu dürfen, damit eine exakte Positionierung während des Belichtens bei mehrmaligem Gebrauch gewährleistet wird. Für die exakte Positionierung der

Maske und die Gewährleistung eines engen Kontakts mit dem zu belichtenden Schaltungs-träger muß das Folienmaterial genügend flexibel sein.

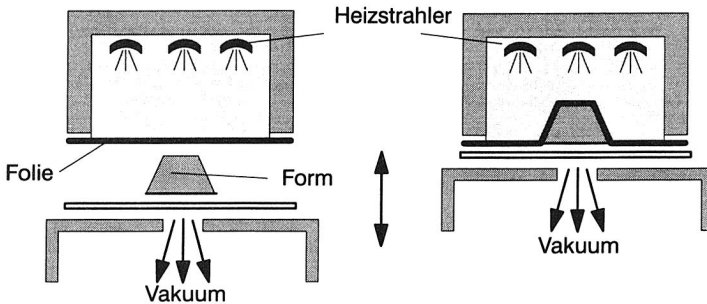


Bild 35: Vakuumformen der Maskenfolien [116]

Um einerseits eine ausreichende Formstabilität der Folie auch bei großen Umformverhältnissen zu gewährleisten, ist eine Foliendicke von 500–800 μm erforderlich, die auch nach dem Umformen eine Mindestdicke von 100 μm nicht unterschreiten darf, um die Beschriftbarkeit zu erhalten. Aus Wirtschaftlichkeitsgründen sollte die Maske eine Standfestigkeit von mindestens 500 Belichtungen besitzen.

4.3.2 Entwicklung eines optimierten Maskenmaterials

Die bisher eingesetzte Folie eignet sich zwar in Bezug auf Umformbarkeit, Standzeit sowie Handhabbarkeit und läßt sich in unverformten Zustand gut beschriften, bei vakuumgeformten Masken wird jedoch auch mit geringen Umformverhältnissen keine ausreichende Schwärzung mehr erreicht. Verunreinigungen und Ausbrüche, die während der Beschriftung entstehen, bilden weitere Probleme durch unsaubere Abbildung des Leiterbahnlayouts bei der Belichtung.

Ziel war daher die Entwicklung von Materialien mit besserer UV-Absorption bei geringen Restschichtdicken, die Möglichkeit bieten, beliebige Leiterbahnlayouts (große Flächen, überkreuzende Linien) mittels Laser ohne Schädigung der Folie zu applizieren. In Zusammenarbeit mit dem Folienlieferanten wurden dazu Untersuchungseinrichtungen und Auswertungskriterien entwickelt sowie umfangreiche experimentelle Untersuchungen zur Laserbeschriftung durchgeführt²³. Dazu wurden folgende Versuchsparameter variiert:

- Folienparameter (Zusammensetzung, Schichtdicken, Streckungsfaktoren)
- Laserparameter (Strom, Frequenz, Modenblende, Strahlaufweitung)
- Beschriftungsparameter (Linienüberdeckung, Reflexion der Unterlage, Geschwindigkeit)

²³ Bei der Durchführung der Versuchsreihen wurde der Verfasser von Herrn cand. Ing. Thomas Inderthal unterstützt.

Basierend auf diesen Testreihen wurde in Zusammenarbeit mit dem Folienhersteller ein optimales Maskenmaterial entwickelt, das aus einer 400µm starken Schicht aus Standard-Hart-PVC und einer 100µm dicken rußdotierten Folie besteht. Da die Schichten verbindungsmitelfrei miteinander verpreßt sind, wurde die Gefahr unerwünschter Wechselwirkungen des Lasers mit Fremdstoffen minimiert. Weiterhin wurde die Rußdotierung deutlich erhöht (1,2...20g Ruß pro 100 kg PVC-Masse), der dreischichtige Aufbau durch einen nurmehr zweilagigen ersetzt sowie die Zusammensetzung des PVC selbst verändert.

Mit diesem Folienmaterial konnte insbesondere die Beschriftbarkeit verstreckter Bereiche verbessert (33% größerer Streckungsfaktor) sowie eine ausgezeichnete Beschriftungsqualität, die durch das vollständige Ausbleiben von Ausbrüchen und einer sehr guten Kantenschärfe gekennzeichnet ist, erreicht werden. Beide Eigenschaften werden durch die Erhöhung der Rußdotierung in der Laserschicht und die Reduzierung der Anzahl der Folienschichten erzielt.

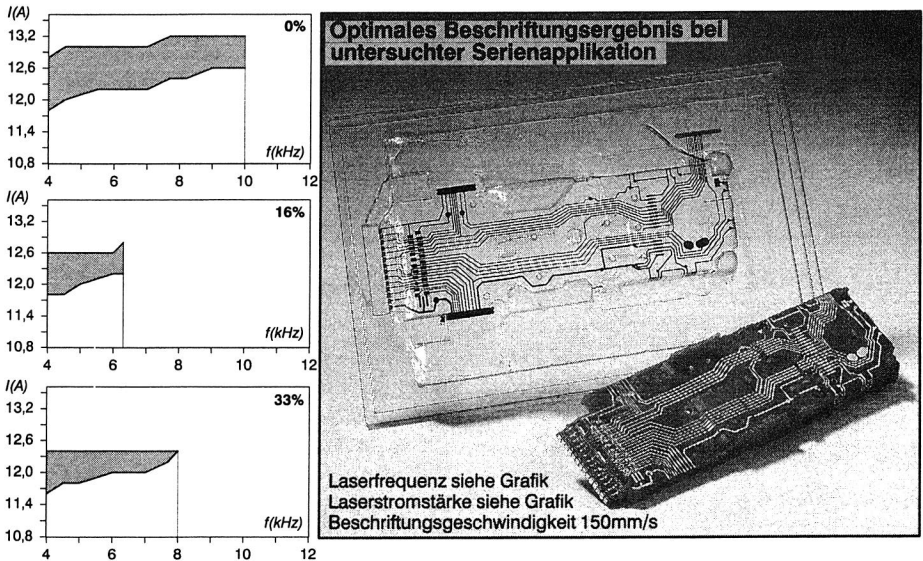


Bild 36: Ermittelte optimale Laserparameter für verschiedene Linienüberdeckungen

Die entwickelten Maskenmaterialien ermöglichen es, auch komplizierte Geometrien durch Vakuumformen herzustellen, die anschließend UV-undurchlässig beschriftbar bleiben. Die Entwicklung einer durchgängigen CAD/CAM-Verfahrenskette sowie die Optimierung des Beschriftungsprozesses werden in Kapitel 7.1 beschrieben. Prozeß-Technologie und Masken-Materialien wurden gemeinsam beim amerikanischen MID-Produzenten bereits im Produktionsbetrieb getestet. Die angelaufene Serienfertigung neuer Anwendungen mit Hilfe der optimierten Masken bestätigen den Reifegrad der Entwicklungen.

5. Montage dreidimensionaler Schaltungsträger

Die Analyse realisierter MID-Anwendungen (vgl. Kapitel 2.3) zeigt, daß zum jetzigen Stand der Technik die meisten thermoplastischen Schaltungsträger rein verbindungstechnische Funktionen erfüllen und erst ein relativ geringer Prozentsatz davon bereits elektronische Bauelemente trägt. In keiner der bekannten Serien-Applikationen sind elektronische Bauelemente dergestalt platziert, daß sie bezüglich des Bestückprozesses den Typenklassen 1C oder höher (siehe Tabelle 1) zugeordnet werden können. Durch diese vorsichtige Beschränkung auf rein planare Prozeßflächen ist bisher nur ein Bruchteil der durch die MID-Technologie eröffneten Gestaltungsfreiheit für elektronische Produkte erschlossen. Wesentliche Begründung hierfür sind die für den räumlichen Anwendungsfall bisher noch nicht geeigneten Montagesysteme, die in Produktivität und Prozeßsicherheit speziell auf die Randbedingungen flacher Leiterplatten hin ausgereizt sind [117].

Mit diesem technischen Status Quo kommt der Entwicklung stabiler Prozesse und leistungsfähiger Automaten für die räumliche Bestückung und die Verbindungstechnologie besondere Bedeutung zu. Deren Realisierung ermöglicht nicht nur eine effiziente Produktion der MIDs sondern hat darüberhinaus auch einen entscheidenden Einfluß auf die Gestaltungsmöglichkeiten räumlicher Schaltungsträger. Miniaturisierung und Kosteneinsparung elektronischer Produkte sind davon direkt betroffen. Die zu entwickelnden Montagesysteme müssen jedoch unter Beibehaltung der bisher erreichten Fähigkeiten, wie z. B. Bestückleistung und -präzision, eine Reihe gesteigerter Anforderungen erfüllen [118]. Dies betrifft für die Bestückung insbesondere die räumliche Geometrie und für die Verbindungstechnologie die geringere Temperaturbeständigkeit der thermoplastischen Basismaterialien.

Daraus leiten sich auch die im Rahmen dieser Arbeit gesetzten Ziele für die Montagetechnologie ab. Im folgenden werden nach einer umfassenden Validierung verfügbarer Automaten für die Bauelemente-Plazierung auf ihre 3D-Eignung grundlegende Prozeßuntersuchungen zum Setzen elektronischer Komponenten in Lotpaste und Fixierkleber auf geeigneten Ebenen durchgeführt. Auf Basis dieser Erkenntnisse werden für unterschiedliche Einsatzfälle folgende alternative automatisierte Bestückssysteme für räumliche Schaltungsträger konzipiert:

- Erweiterung der Kinematik und Steuerung konventioneller Bestückautomaten
- Angepaßte Gestaltung der Effektoren und der Peripherie verfügbarer Industrieroboter
- Spezifische Montagesysteme für 3-D MIDs

Ein besonders kritischer Schritt in der Prozeßkette zur Herstellung von MID-Baugruppen ist das Löten auf thermoplastischen Schaltungsträgern. Die hohen thermischen Anforderungen herkömmlicher Lötverfahren führen auch Hochtemperatur-belastbare Kunststoffe an deren Einsatzgrenzen. In Abschnitt 5.3 werden neben der Evaluierung der in der industriellen

Praxis vorwiegend angewendeten Massenlötverfahren insbesondere auch Untersuchungen zu den sogenannten selektiven Lötverfahren durchgeführt, die die Wärmeeinbringung in das Substrat zeitlich und/oder geometrisch minimieren.

Da durch das Festhalten an bestehenden Prozeßtechnologien, die für herkömmliche Produkttechnologien entwickelt und optimiert wurden, die Potentiale neuer Produkttechnologien nur unzureichend ausschöpft werden können, werden in Abschnitt 5.3.3 alternative Methoden zur Fixierung der elektronischen Komponenten in den Schaltungsträger konzipiert und analysiert. Insbesondere durch das Zusammenführen der bisher fertigungstechnisch getrennt durchgeführten Elektronik- und Mechanik-Montage können interessante logistische und wirtschaftliche Verbesserungen erschlossen werden.

5.1 Räumliche Bestücktechnologie

Der ingenieurwissenschaftlichen Entwicklung neuer Fertigungssysteme muß eine detaillierte Analyse der verfügbaren Technologien vorangestellt werden. Diese Grundregel gilt verstärkt auch für den Bereich der Elektronik-Montage, wo der hohe technische Entwicklungsstand der Produktionsmaschinen die Vermutung nahelegt, neu hinzukommende Anforderungen könnten auf Basis der bestehenden Gerätestrukturen erfüllt werden. Um einerseits weiterhin auf die leistungsfähigen Bestückautomaten möglichst zurückgreifen zu können, müssen den Konstrukteuren räumlicher Schaltungsträger die Verfahrensgrenzen der bestehenden Bestücktechnologie transparent gemacht werden. Der ermittelte Stand der Technik dient andererseits auch als Grundlage für die Ableitung sinnvoller Entwicklungspotentiale.

5.1.1 Validierung konventioneller Bestückssysteme

Die notwendige Analyse der verfügbaren Bestücktechnologie kann nur zur groben Vorselektion auf Basis technischer Informationsblätter der Automaten-Hersteller durchgeführt werden. Auf Grund der unterschiedlichen Definition und Meßmethodiken der charakteristischen Leistungskennwerte wurden die detaillierten Bewertungen in Form praktischer Versuche ermittelt. Nach einer Grobanalyse von insgesamt 29 verschiedenen Automaten wurden letztendlich vier Maschinen experimentell untersucht. Dazu wurden erstens durch Vermessung des Bestückraumes und der Verfahrswege die kinematischen Fähigkeiten explizit ermittelt und zweitens in statistischen Bestückversuchsreihen die kinematischen Freiheitsgrade verifiziert sowie Genauigkeit und Leistung bestimmt²⁴.

Im einzelnen wurden folgende Daten ermittelt (siehe Bild 38):

1. Kinematik der Bewegungsachsen und mögliche Substratgröße
- Bestücktiefe

²⁴ Bei der Validierung konventioneller Bestückssysteme wurde der Verfasser von Herrn Dipl.-Ing. Andreas Brand und Herrn cand. Ing. Thomas Schenk unterstützt.

- Abstand der Bestückerbenen
 - Bestückabstände von Wänden bei verschiedenen Bestücktiefen
 - Freiraumhöhen
2. Genauigkeit bei Fine-Pitch–Bestückung
- Positioniergenauigkeit
 - Bestückgenauigkeit
3. Bestückleistung
- im planaren Anwendungsfall
 - mit zu überbrückenden Wänden
 - mit verschiedenen Bestückerbenen

Landeplätze für Fine-Pitch–Bauelemente zur optischen Genauigkeitsprüfung

Chip-Landeplätze zur Ermittlung des minimalen Randabstandes

Leiterplattenaufnahmen im Europakartenformat

höhenverstellbarer Transportrahmen

Fixierbohrungen zur Justage der Leiterplatte

Abstandsrahmen zur Höhenverstellung des Randes und der Bestückerbenen

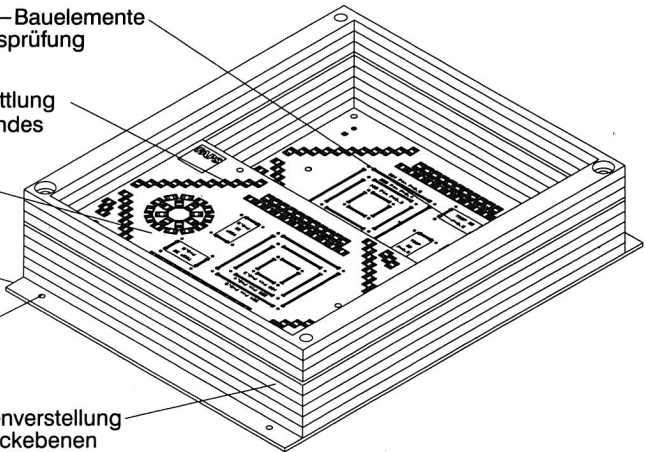


Bild 37: 2 1/2 D-Testleiterplatte zur Validierung konventioneller Bestückautomaten

Zur Durchführung der experimentellen Versuche wurde ein modular aufgebautes Trägersystem entworfen (siehe Abbildung 37). Es basiert auf einer 2 mm dicken Grundplatte aus Aluminium, die mit zwei Zentrierstiften eine Leiterplatte im Europaformat aufnehmen kann. Die Länge der Grundplatte ist mit 233,4 mm auf das gebräuchliche Doppelpackformat abgestimmt. Mit Hilfe von Kunststoffrahmen kann um die eingelegte Leiterplatte herum eine beliebig hohe Wand aufgebaut werden. Eine zweite Aluminiumplatte, die wiederum eine konventionelle Leiterplatte aufnehmen kann, simuliert eine zweite Bestückerbene und wird an beliebiger Stelle zwischen den Kunststoffrahmen eingefügt. Der Zusammenhalt dieses sandwichartig aufgebauten Trägersystems erfolgt über eine Schraubenverbindung. Die korrekte Positionierung aller Teile untereinander wird durch Paßstifte an zwei sich diagonal gegenüberliegenden Ecken sichergestellt.

Der modulare mechanische Aufbau des Versuchsschaltungsträgers dient in erster Linie zur Untersuchung von möglicher Bestücktiefe und -Ebenenabstand. Zur Ermittlung der Bestückleistung wurde die Testleiterplatte nach VDI/VDE-Richtlinie 3712 [119] in diese Rahmenstruktur eingelegt. Für alle weiteren zu bestimmenden Kriterien wurde ein geeignetes Schaltungslayout entworfen, das dazu eine Reihe spezieller geometrischer Strukturen enthält (optische Paßmarken zur Zentrierung, Landeplätze für Fine-Pitch-Bauelemente etc.).

5.1.2 Grenzen herkömmlicher Bestücktechnologie

Die ermittelten Grenzen für automatisierte Bestücksysteme können in *Kinematik, Genauigkeit, Leistung, Verarbeitbarkeit von Bauelementen, Rüstmöglichkeiten und Substratgröße* strukturiert werden [vgl. auch 120]. Wesentliche Unterschiede zur planaren Anwendung bestehen bei den drei erstgenannten Kriterien, weshalb diese im folgenden näher betrachtet werden.

Ausprägung und Zahl der Bewegungsachsen des Handhabungsgerätes, die möglichen Freiheitsgrade des Bestückkopfes und dessen geometrische Form sowie die räumliche Ausbildung von Bestückraum und Materialflußsystem bestimmen die *kinematischen Möglichkeiten* des betrachteten Bestückungssystems (siehe Bild 38). Heute verfügbare Bestückungsautomaten besitzen gewöhnlich vier gesteuerte Achsen, drei translatorische für die Bewegung entlang der Raumrichtungen und eine rotatorische zur Drehung der Bauelemente um die z-Achse. Die Gestaltungsfreiheit für räumliche Schaltungsträger ist damit bereits auf Typen der Klasse 1 ($2^{1/2}$ -D) beschränkt.

Leistungsfähige Bestückungsautomaten sind dahingehend optimiert, elektronische Komponenten von einem bestimmten Feeder auf einen spezifizierten Platz auf der Leiterplatte in möglichst kurzer Zeit abzusetzen. Da die Bewegung in z-Richtung dabei keine Wertschöpfung enthält, sind konventionelle Bestückungssysteme so ausgelegt, daß sie mögliche Hindernisse in Form bereits gesetzter Bauelemente in minimalem Abstand überwinden (Bild 38 o.r.). Allgemein besitzen sog. Pick-and-Place-Automaten nicht nur größere Flexibilität hinsichtlich verarbeitbarem Bauelementespektrum und bessere Rüstmöglichkeiten, sondern auch eine wesentlich höhere Toleranz bezüglich der Geometrie des Werkstücks. Da der mögliche z-Hub jedoch in den seltensten Fällen ganz in eine entsprechende Bestücktiefe umgesetzt werden kann, liegt die technische Grenze für die Überwindung von Hindernissen derzeit bei ca. 37mm. Die Abhängigkeit zwischen erreichbarer Bestückungstiefe und notwendigem Abstand zu seitlichen Hindernissen von ausgewählten Bestückungsautomaten ist in Abbildung 38 unten links dargestellt.

Die *Genauigkeit*, mit der automatisierte Bestückungsmaschinen elektronische Komponenten platzieren können, ist ein weiteres wesentliches Kriterium für die Beurteilung der Eignung für die MID-Montage, da zunehmend immer mehr elektronische Funktionen in immer weniger Integrierte Schaltkreise zusammengefaßt werden, deren Pin-Anzahl folglich steigen und deren Abstand weiterhin abnehmen wird. Da die Angaben in den Datenblättern der

Hersteller auf völlig unterschiedlichen Annahmen beruhen und damit eine Vergleichbarkeit nicht zulassen, wurden umfangreiche experimentelle Untersuchungen zur Genauigkeitsmessung an unterschiedlichen Automaten durchgeführt (siehe Bild 38 o.r.). Dabei wurde davon ausgegangen, daß der Bestückvorgang den Regeln einer statistischen Normalverteilung gehorcht [121]. Die im folgenden genannten Angaben beziehen sich immer auf eine Vertrauensgrenze von 4σ . Für die Qualität der Bestückung ist die Bestückgenauigkeit die maßgebliche Größe, in die einerseits alle relevanten Maschinenparameter eingehen, sowie andererseits auch die Überlagerung von Positionierfehlern und Winkelungenauigkeiten berücksichtigt wird [122]. Sie kann durch folgenden Zusammenhang hergeleitet werden:

$$\Sigma = \sqrt{(\max(\sigma_x, \sigma_y))^2 + \left(\frac{L}{2} \sin(\sigma_\Delta)\right)^2}$$

Σ	Gesamt-Bestückgenauigkeit
σ_x	Positioniergenauigkeit in x
σ_y	Positioniergenauigkeit in y
σ_Δ	Winkelgenauigkeit
L	Kantenlänge Bauelement

Beim Bestücken von Ebenen außerhalb der Null-Ebene des Automaten ergeben sich neue Aspekte zur *Bestückleistung*. In solchen Fällen wird die Länge des senkrechten Absetzwegs verändert, was bei den dabei erzielten, relativ geringen Geschwindigkeiten Einfluß auf die Bestückleistung hat (nach [119] ermittelte Ergebnisse siehe Bild 38 u. r.). In diesem Sinne wäre sogar eine Steigerung der Leistung möglich, wenn die bestückte Ebene oberhalb der Null-Lage läge. Wenn die übliche 2½D–Anwendung jedoch darin besteht, in ein Gehäuse hinein zu bestücken, wird die erreichbare Leistung eher niedriger ausfallen, als im planaren Fall. Diese Gedanken gelten jedoch nur, falls es die Steuerung des Automaten erlaubt, beliebige Bestükebenen zu programmieren. Ist dies nicht der Fall, so müssen Bestükebenen außerhalb der Null-Lage im zeitraubenden Sensor-Stop–Betrieb bestückt werden. Die Saugpipette fährt dabei mit dem Bauelement langsam nach unten, bis ein Kraftsensor das Auftreffen auf die Leiterplatte registriert.

Aus den gewonnenen Erfahrungen können für die bestückungsgerechte Gestaltung räumlicher Schaltungsträger mit konventionellen Automaten folgende Regeln abgeleitet werden:

- Die Gesamthöhe des MIDs sollte inklusive eines eventuell notwendigen Werkstückträgers 55 mm nicht überschreiten;
- Die maximale Bestücktiefe sollte nicht größer als 37mm sein;
- Der Bestückabstand zu Wänden hängt stark von der Geometrie des Bestückkopfes und der Höhe des Randes ab;
- Leiterbahnstrukturen, Fiducials und Positionen von Bauelementen dürfen sich nicht in Hinterschnitten befinden; die Zugänglichkeit für Kamera und Belichtungseinheit des Visionsystems, sowie für die Pipette muß sichergestellt sein;
- Fine-Pitch–Bauelemente sollten sich nur auf einer Bestückungsebene befinden, damit eine exakte Fokussierung durch das Visionsystem möglich ist. Um Justageaufwand zu vermeiden, sollte diese Bestückungsebene mit der Null-Ebene des Automaten übereinstimmen.

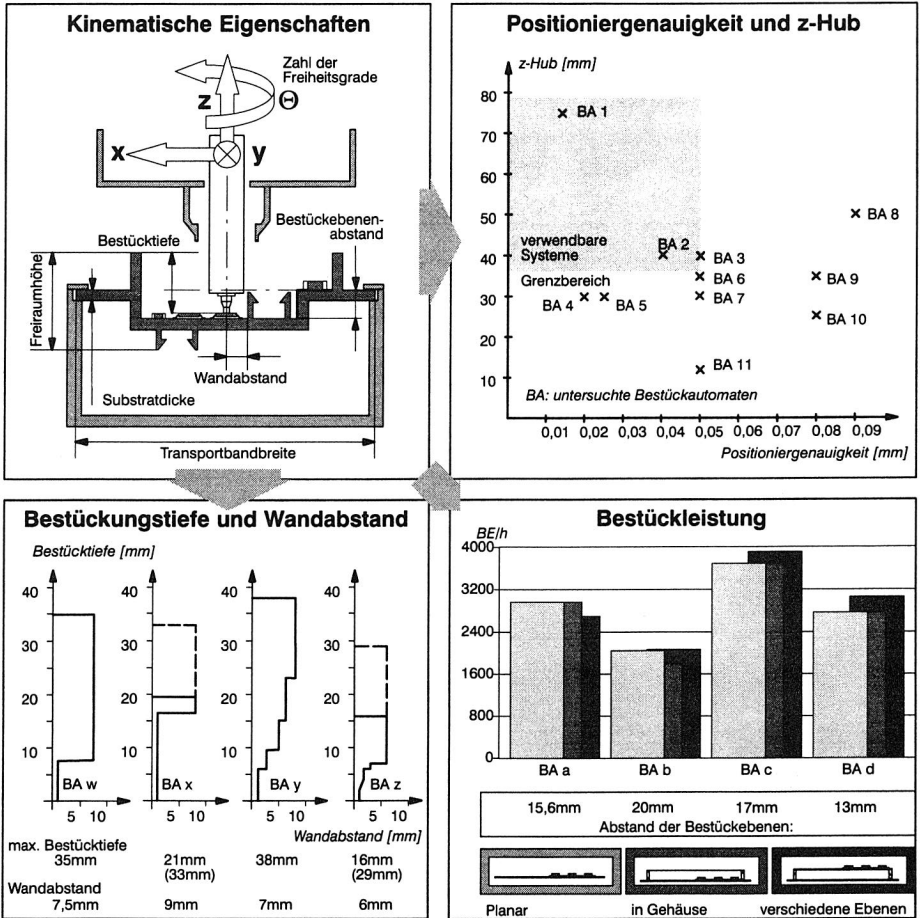


Bild 38: Kinematik und charakteristische Eigenschaften konventioneller Bestückssysteme

Die durchgeführte Evaluierung macht deutlich, daß der Stand der konventionellen Bestücktechnik nur sehr eingeschränkt in der Lage ist, die mögliche Gestaltungsfreiheit, die durch räumliche Schaltungsträger eröffnet werden, zu unterstützen. Prinzipiell sind nur Typen der Klasse 1 zugelassen, die zusätzlich durch oben beschriebene Gestaltungsregeln eingeschränkt sind.

Für die Entwicklung MID-geeigneter Bestückungssysteme leiten sich demnach folgende Entwicklungsziele ab:

1. Erweiterung der kinematischen Fähigkeiten für MID-Typen der Klassen 2 und 3,

2. Erreichen von schwer zugänglichen Bauelementepositionen,
3. Sicherung der getätigten Investitionen in Bestückerquipment,
4. Beibehaltung der Genauigkeits- und Leistungskennwerte.

5.1.3 Entwicklung spezifischer Montagesysteme für räumliche Schaltungsträger

Der herkömmliche Aufbau elektronischer Geräte ist gekennzeichnet durch einen mehrstufigen Montageprozeß (siehe Bild 39) [123]. Die elektronische Schaltung wird durch den Trend zur höherer Integration zunehmend in Form integrierter Schaltkreise (IC) realisiert. Die ICs, in großen Nutzen auf sogenannten Wafern gefertigt, werden nach der mechanischen Trennung aus der Siliziumscheibe zumeist auf Leadframes gebondet und in spezifische Bauelementegehäuse vergossen. In einem weiteren Zwischenschritt werden verschiedene elektronische Komponenten zur Gesamtschaltung durch ebene Leiterplatten elektrisch miteinander verbunden. Diese konventionelle Leiterplatte wird wiederum in das mechanische Gehäuse des elektronischen Gerätes eingebaut. Die Vorteile dieser Aufbau-technologie liegen in der möglichen Verwendung spezialisierter und damit produktiver Einzelmontageprozesse. Nachteilig wirkt sich jedoch der erhöhte Raumbedarf sowie insbesondere der aus Perspektive des Gesamtsystems hohe Montageaufwand aus. Elektronische Geräte können signifikant miniaturisiert und deren Montagekette effizient verkürzt werden, wenn auf den funktional überflüssigen Zwischenschritt der Leiterkartenmontage verzichtet werden kann.

Im folgenden werden Lösungen aufgezeigt, wie die oben bereits eingehend erläuterten, erweiterten Anforderungen an Bestückssysteme für elektronische Bauelemente in automatisierten Montagesystemen realisiert werden können. Die entwickelten Konzepte werden in weiterführenden Arbeiten konstruktiv umgesetzt und im Entwicklungs- und Fertigungslabor zur Elektronikmontage installiert [124].

Um die oben genannten Entwicklungsziele erfüllen zu können, wurde im Rahmen dieser Arbeit in einer dreistufigen Vorgehensweise vorgegangen (siehe Bild 40). In experimentellen Vorversuchen wurden die geforderten kinematischen Fähigkeiten an einem manuellen Montagesystem untersucht und quantifiziert (Stufe 1). Anforderungen und Lösungsansätze wurden in einer zweiten Stufe auf automatisierte Montagesysteme übertragen. Um in dieser Entwicklungsstufe auf existierende Handhabungsgeräte zurückgreifen zu können, wurde das Anforderungsspektrum für zwei polarisierte Szenarien aufgeteilt:

1. 2½D-MIDs mit einer großen Anzahl, teils hochpoliger, elektronischer Bauteile, die in hoher Stückzahl gefertigt werden müssen und
2. 3D-MIDs mit wenigen elektronischen und evtl. auch mechanischen Bauteilen, die in beliebigen Lagen gesetzt werden können müssen, aber nur geringe Stückzahlen fordern.

Anwendungsbereich 1 kann effizient auf Basis konventioneller Bestückautomaten realisiert werden, die jedoch grundlegend erweitert werden müssen. Deren kinematische Beschränkung auf vier Bewegungsachsen (3 lineare, 1 rotatorische) wird um zwei weitere Freiheitsgrade, die in einen Werkstück-Manipulator (siehe Simulations-Modell in Abbildung 41 r. o.) integriert werden, erweitert. Eine numerisch gesteuerte Drehachse ermöglicht das Setzen von Bauelementen auf beliebige, schräge Flächen. Eine zusätzliche z-Achse erhöht die Möglichkeit, geometrische Elemente (Stege, Wände etc.) zu überwinden und gleicht die z-Verschiebung von Bestückpositionen außerhalb der Drehachse aus. Der mechanische Aufbau ist so konzipiert, daß er direkt in den Materialfluß beliebiger Automaten eingebaut werden kann und in dessen Arbeitsbereich die räumlich angeordneten Bestückpositionen in die Bestückebene transformiert. Dieses Konzept nutzt die umfangreichen Möglichkeiten verfügbarer Bestücksysteme (Bewegungsachsen, Bauelementezuführung, -zentrierung und -test, Materialfluß etc.) und deren vorhandene Infrastruktur.

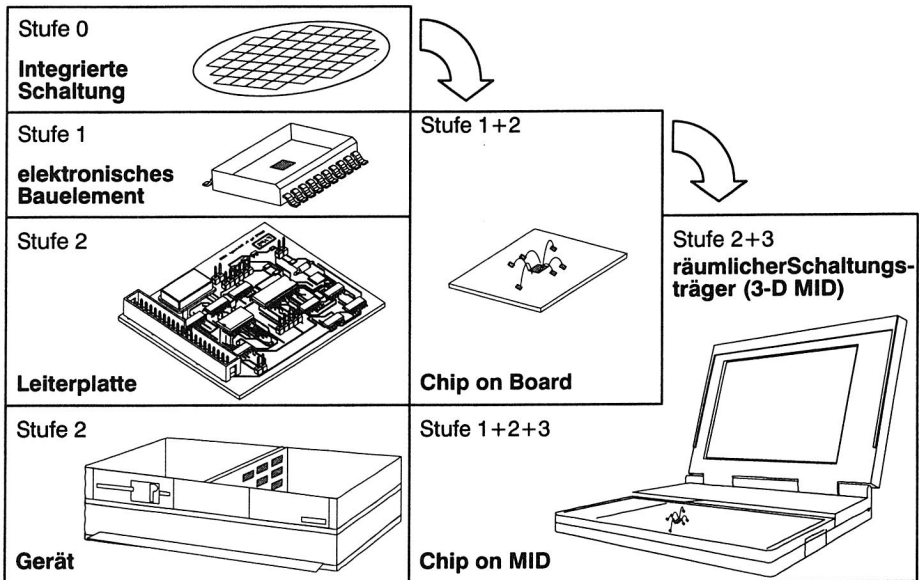


Bild 39: Montagestufen von der elektronischen Schaltung zum kompletten Gerät

Die beschriebene kinematische Erweiterung erfordert auch eine Anpassung der numerischen Steuerung des Automaten. Zwei zusätzliche Achsen müssen angesteuert und koordiniert werden. Die geometrischen Ausprägungen sowie die Drehung des Manipulators führt zu einer Kollisionsgefahr zwischen Schaltungsträger und Handhabungsgerät, die steuerungstechnisch ausgeschlossen werden muß. Die Bewegung des Greifers zu den einzelnen Bestückpositionen kann damit nicht mehr nur wegoptimiert, sondern zusätzlich kollisions-

kontrolliert geplant werden. In Kapitel 7.2 *Rechnerintegrierte Produktdatenverarbeitung für die Bestückung* werden dazu Lösungsansätze entwickelt.

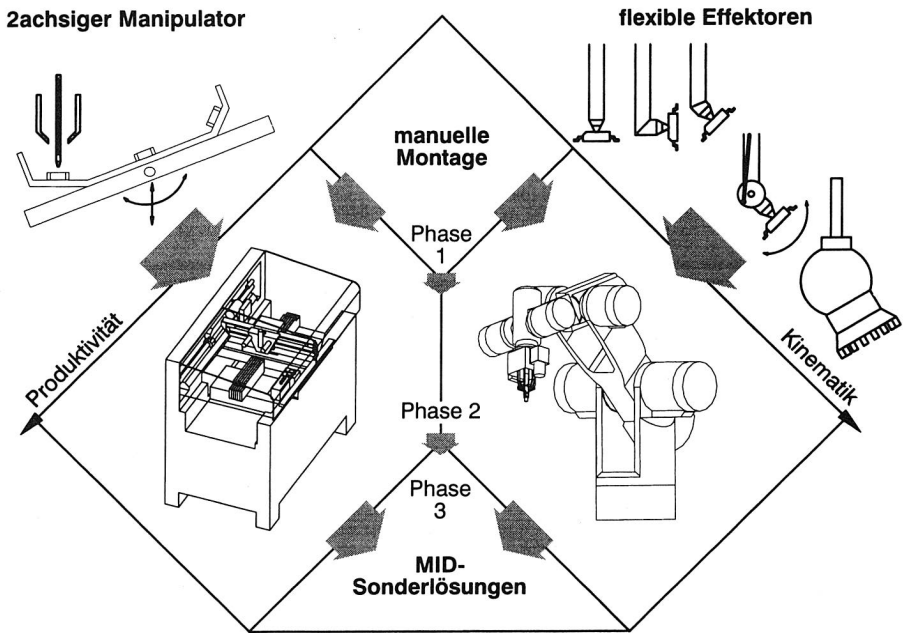


Bild 40: Entwicklung spezifischer Montagesysteme für räumliche Schaltungsträger

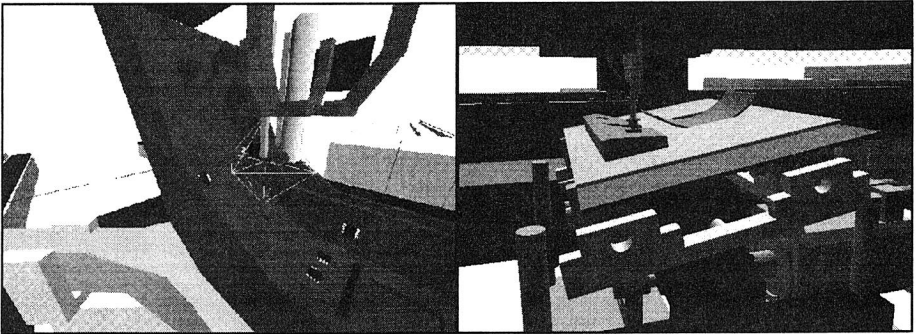
Für den zweiten Anwendungsbereich wird die kinematische Flexibilität eines 6-achsigen Gelenkarmroboters ausgenutzt, die es ermöglicht, elektronische Komponenten in beliebige Positionen (x, y, z) und Orientierungen (α, β, ξ) zu setzen. Analytische Grundüberlegungen sowie das Durchspielen dieser Variante mit Hilfe der kinematischen Simulation²⁵ (vgl. Kapitel 7.2.2) verifizierten, daß diese theoretische Fähigkeit bei konkreten Anwendungsfällen sehr stark durch eine eingeschränkte Zugänglichkeit der Bestückpositionen für die ausladenden Bewegungsachsen limitiert wird (Bild 41). Aus diesen Untersuchungen folgt, daß das Positionieren von Bauelementen auf schrägen Wänden in Hohlkörpern durch alternative Aufnahmewinkel im Greifer gelöst werden kann (siehe Abbildung 40 r.o.). Die grafische Simulation verdeutlicht weiterhin, daß zusätzliche Freiheitsgrade im Effektor selbst, die verschieden gewinkelte Pipetten einsparen können, zwar die Flexibilität erhöhen, kinematisch jedoch nicht zwingend erforderlich sind.

²⁵ Bei der Durchführung der Simulationsstudien wurde der Verfasser von Herrn cand. Ing. Jürgen Hirath unterstützt.

Unterschiedliche Effektoren (Dispenser, Greifer etc.) oder Pipetten können in einem Greiferwechselbahnhof oder, um unproduktive Verfah- und Wechselzeiten zu reduzieren, alternativ in einem Revolvergreifer vorrätig gehalten werden [125]. Dabei ist insbesondere im zweiten Fall auf eine minimale Baugröße der Effektoren zu achten. Die Aufsetzbewegung der elektronischen Bauelemente sollte normal zur Bestückfläche erfolgen. Die interpolierte Linearbewegung, die über sechs rotatorische Achsen realisiert wird, ist für präzise Mikrobewegungen ungeeignet [126]. Abhilfe kann eine z. B. pneumatisch betätigte Teleskop-Saugpipette bringen, deren gezielt eingestellte Nachgiebigkeit jedoch nicht zu Lasten der Genauigkeit führen darf.

Adaptierte Roboterzelle

Kinematisch erweiterterter Bestückautomat



- ☐ 6-Achs–Gelenkarmroboter
- ☐ Ortsfester Schaltungsträger
- ☐ Kinematisch flexible Sauggreifer
- ☐ BE-Zentrierung in Zentrierstation
- + hohe kinematische Beweglichkeit
- + einfache Anlagen-Programmierung
- + unbewegter Werkstückträger

Konzept

- ☐ 4-Achs–Handhabungsgerät
- ☐ 2-achsiger Werkstückträger
- ☐ Starre Sauggreifer
- ☐ BE-Zentrierung im Greifer

Vorteile

- + große Bestückleistung
- + hohe Genauigkeit
- + einfaches Handhabungsgerät

Bild 41: Simulationsgestützte Analyse alternativer Montagekonzepte

Während im ersten Szenario auf umfassende vorhandene Peripherie für Bauelementebereitstellung, -zentrierung, deren elektrischen Test, Materialfluß sowie automatisierte Programmerstellung zurückgegriffen werden kann, müssen diese Komponenten für die Roboterzelle größtenteils neu entworfen werden. Die erreichbaren Bestückleistungen (vgl. dazu auch [127]) sowie die relativ geringen erzielbaren Genauigkeiten der langen kinematischen Kette eines 6-Achs–Gelenkarmroboters schränken die praktische Anwendbarkeit dieses Systemkonzeptes jedoch ein.

Weiterführende Arbeiten, in denen oben beschriebene Entwicklungslinien konstruktiv umgesetzt und verfeinert wurden, zeigen die Realisierbarkeit der entwickelten Konzepte auf und demonstrieren die montagetechnischen Vorteile der MID-Technologie [128, 129]. In der dritten Phase des in Abbildung 40 beschriebenen Entwicklungskonzeptes werden die theoretischen Überlegungen und die praktischen Erfahrungen aus dem Betrieb der beiden alternativen Montagesysteme für die räumliche Montage elektronischer Bauelemente zu einem für MID-Anwendungen dedizierten Montagesystem verbunden.

Die Produktion elektronischer Geräte ist meist nach dem Prinzip der Werkstattfertigung organisiert. Die Produkte durchlaufen im Wertschöpfungsprozeß nacheinander mehrere spezialisierte Stationen, wie z. B. THD- und SMD-Montage, Test, Reparatur und Geräte-Endmontage. Durch Erweiterung des Arbeitsinhaltes der konzipierten MID-Montagezelle um Montageschritte für mechanische Bauteile (Batterien, Lautsprecher, Stecker, Deckel etc.), lassen sich organisationsimmanente Nachteile der konventionellen Fabrikstrukturierung egalalisieren und logistische Verbesserungen in folgenden Bereichen erschließen:

- Verkürzung bzw. Eliminierung von Transportvorgängen und damit geringere Nebenzeiten,
- Beschleunigung der Durchlaufzeiten durch nurmehr einstufige Montage,
- Vereinfachung der Produktionssteuerung durch Komplettmontage,
- Minimierung der Kapitalbindung durch geringere Bestände,
- Transparentere Kostenrechnung durch eindeutige Kostenzuordnung.

Die Vision dieser elektro-mechanischen Komplettmontage, in der alle notwendigen Prozesse zum vollständigen Zusammenbau elektronischer Produkte in einer einzigen Montagezelle durchgeführt werden, rückt durch verschiedene Entwicklungen in Produktaufbau und Produktionstechnologie in greifbare Nähe: Logische Funktionen der elektronischen Schaltung werden zunehmend in wenigeren, aber hochintegrierten ICs verbunden, viele der mechanischen oder elektrischen Funktionen können durch Einsatz der MID-Technologie bereits in den Schaltungsträger integriert werden und die angewandten Verbindungstechnologien müssen unter den Anforderungen der Demontierbarkeit vereinfacht und standardisiert werden. Während bisher die Montageschritte für elektronische und mechanische Elemente in stark gegensätzlich gestalteten automatisierten Anlagen durchgeführt werden, stellt sich für die elektro-mechanische Komplettmontage die Aufgabe, diese verschiedenen Anforderungen in einem flexiblen Aufbau zu vereinen.

5.2 Prozeßuntersuchungen zur Adhäsion in pastösen Verbindungsmedien

Nachdem im vorangegangenen Kapitel Technologien zum Bestücken von Bauelementen auf beliebig geneigten Flächen konzipiert wurden, muß nun ermittelt werden, ob die wirkenden Adhäsionskräfte der pastenförmigen Verbindungsmedien die auf schrägen Prozeßflächen platzierten Bauelemente bis zum Verlöten sicher in ihrer Lage halten. Im folgenden

werden die Anforderungen und Parameter beim räumlichen Montageprozeß charakterisiert und die heute eingesetzten Lotpasten, Fixier- und Leitkleber anhand dieser Bedingungen untersucht. Schwerpunkt der Untersuchungen ist die Haltekraft dieser Medien für unterschiedliche Bauelementeformen. Bedrahtete Bauelemente (THD), die durch ihre in den Bohrungen umgebogenen Anschlußdrähte fixiert werden, müssen somit nicht weiter betrachtet werden.

Bei oberflächenmontierbaren Bauteilen (SMD) kann der Verbindungsaufbau grundsätzlich auf drei verschiedenen Wegen erfolgen [130]. Im Wellenlötprozeß werden SMDs mit einem auszuhärtenden Klebepunkt an ihrer Position fixiert und anschließend durch das Wellenlötbad geführt. Dabei kommt es zu einer Lotmeniskusbildung zwischen Bauelement und Anschlußfläche der Leiterbahn [131]. Im Reflowlötprozeß wird das Lot vor dem Bestücken auf die Anschlußflächen aufgetragen. Aufgrund seiner pastösen Eigenschaft besitzt das Bauteil ausreichenden Halt für Transportbewegungen des Schaltungsträgers. Das Löten erfolgt durch Aufschmelzen des Lotpunktes. Dessen Oberflächenspannung bewirkt ein Umschließen des SMDs und bildet beim Abkühlen eine mechanisch stabile und elektrisch zuverlässige Verbindung. Eine weitere Möglichkeit ist der Einsatz von Leitklebern, die in der Elektronikproduktion immer größere Einsatzgebiete abdecken [132].

5.2.1 Entwicklung der Versuchsumgebung und systematische Versuchsplanung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde in einer systematischen Versuchsreihe untersucht, inwieweit die auf geeigneten Flächen positionierten Komponenten während der folgenden Bearbeitungs- und Transportschritte von den pastösen Verbindungsmedien sicher gehalten werden können²⁶. Bild 42 zeigt eine Auswahl der Vielzahl möglicher Einflußfaktoren. Die Forderungen an das Verbindungsmedium lassen sich durch gezielte Einstellungen seiner Parameter erfüllen. Von besonderer Bedeutung sind dabei unter anderem die Größe der Viskosität [133], der Metallgehalt, die Korngröße der Metallpartikel, die Zusammensetzung des Flußmittels und insbesondere auch die Menge des Verbindungsmediums. Weiterhin ist auch die Beschaffenheit der Fügepartner Leiterbahnpad und Bauelementanschluß, wie deren Material und Oberflächenbeschaffenheit von Relevanz. Durch eine selektive Betrachtung der Bauelemente werden die verschiedenen Einflüsse der Bauformen, des Gewichts und der Anzahl der Anschlüsse auf die Haftfähigkeit berücksichtigt.

Die Haftung eines bestückten Bauelements auf Lotpaste, Fixier- oder Leitkleber ist von der momentanen Beanspruchung der Verbindung abhängig (siehe Bild 42). Während des Bestückens müssen die Hangabtriebskraft, die Bauelemente auf schrägen Wänden nach unten zieht, sowie die Beschleunigungskräfte, die aus der Bewegung des Schaltungsträgers resultieren, von den Adhäsions- und Kohäsionskräften des Verbindungsmediums aufgenommen werden. Da sich die Leiterplatte während des Lötprozesses gleichmäßig durch die verschiedenen Heizzonen des Lötovens bewegt, muß neben der Hangabtriebskraft keine

²⁶ Bei der Durchführung der Versuchsreihen wurde der Verfasser von Herrn Dipl.-Ing. Manfred Gerhard und Frau cand. Ing. Heike Schenke unterstützt.

zusätzliche Beschleunigungskraft berücksichtigt werden. Dagegen verändern sich durch die Erwärmung des Verbindungsmediums dessen Haltekräfte: Flüchtige Zusätze der Lotpaste verdampfen und die Legierung schmilzt auf.

Fügepartner	wirkende Kräfte	Medium	Geometrie
Material Oberfläche Rauheit Oxydation	Beschleunigung Hangabtrieb Oberflächenspannung Reibung Klebekräfte	Menge Flußmittel Metallgehalt Viskosität Korngröße der Partikel Vortrocknung	Form des Anschlusses Anzahl Beinchen Auflagefläche

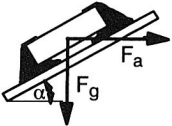
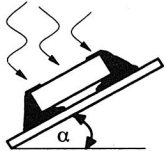
Prozeßbeanspruchung beim Bestücken	Prozeßbeanspruchung beim Löten
<p>Beschleunigung der Baugruppe $F_a = m a \cdot \cos \alpha$</p> <p>Hangabtrieb der Bauelemente $F_g = m g \cdot \sin \alpha$</p>  <p>Gesamtkraft $F = F_a \cdot \sin \alpha + F_g \cdot \cos \alpha$</p>	<p>Erwärmen der Verbindungsmediums Verflüchtigen von Lotpastenbestandteilen Veränderung der Viskosität Verschmelzen der Metallpartikel Ausbilden der Oberflächenspannung</p> 

Bild 42: Einflußfaktoren auf die Haftung von Bauelementen an schrägen Flächen

Zur Durchführung der Versuche wurde eine einfache Testschaltung entworfen, die aufgrund der Unabhängigkeit der zu untersuchenden Effekte vom Basismaterial, aus herkömmlichem Substratwerkstoff (FR4) realisiert werden konnte. Die verschiedenen Lotpasten, Fixier- und Leitkleber wurden mit einem manuellen Dispenser aufgetragen und die Bauelemente mit Hilfe eines halbautomatischen SMD-Bestückungssystems gesetzt. Die bestückten Flachbaugruppen wurden mit Hilfe eines flexiblen Werkstücktragers in verschiedenen Winkellagen in unterschiedlichen Reflowöfen (Infrarot, Konvektion, Heißgas) verlötet bzw. der Kleber ausgehärtet (siehe Abbildung 43). Die Versuche wurden nach den Richtlinien der statistischen Versuchsplanung geplant und durchgeführt [134].

5.2.2 Analyse der eingesetzten Lotpasten, Fixier- und Leitkleber

Nachfolgend soll die Zusammensetzung der in den Versuchsreihen eingesetzten Materialien untersucht werden, um die Vorgänge bei der Verlötung oder Aushärtung einordnen zu

können. Der Hauptbestandteil der Lotpasten ist das *Metallpulver* der Lotlegierung (ca. 85–92% Gewichtsanteile), das durch spezielle Verfahren in Form von kleinen Metallpartikeln gewonnen wird. Zum Auftragen der Lotpasten mit Dispensern sind runde, gleichmäßige Kugeln mit einer glatten Oberfläche nötig. *Lösungsmittel* (ca. 3–6%) werden der Paste beigegeben, um ihr Fließverhalten zu verbessern, gute Druckeigenschaften zu erhalten und eine ausreichende Klebfähigkeit zu garantieren. Weiterhin ist eine schnelle und restlose Verdunstung des Lösungsmittels in der Vorheizphase wichtig, um Lötfehler (z. B. Lotperlen) zu vermeiden. Das enthaltene *Harz* (ca. 4–8%) dient als Bindemittel zwischen den einzelnen Komponenten. In Standardlotpasten wird das Naturprodukt Kolophonium verwendet, welches zusätzlich die Klebrigkeit der Paste auf der Leiterplatte unterstützt [135]. Bei der räumlichen Bestückung kommt diesem Aspekt eine besondere Bedeutung zu. Eine stark klebrige Paste hält die Bauelemente in der Schräge sicherer. Zusätzlich sind *Aktivatoren* (ca. 1%) und weitere *Additive* Bestandteile der Lotpasten (zu detaillierteren Untersuchungen zum Lotpastenauftrag vgl. auch [136]).

Zur Anwendung kamen drei Lotpasten mit einer Schmelztemperatur von 179°C, wie sie im allgemeinen in der Industrie verwendet werden, sowie zwei weitere, niedrigschmelzende Pasten (163°C und 138°C), die sich für den Einsatz auf thermoplastischen Schaltungsträgern besonders eignen würden. Die Viskosität der drei Standard-Lotpasten liegt bei ca. 550Pa·s. Die niedrigschmelzenden Pasten besitzen aufgrund ihrer anderen Zusammensetzung eine geringere Viskosität (ca. 300Pa·s). Die Leiterplatten wurden mit allen fünf Lotpasten bis zu einem Winkel von 90° mit jedem der acht Bauelemente bestückt und anschließend sofort verlötet.

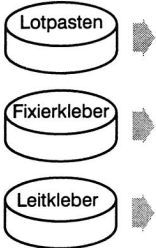
Zur sicheren Befestigung von SMDs beim Wellenlöten wird ein Klebepunkt zwischen die Anschlußflächen des Bauteiles auf die Leiterplatte gesetzt. Anschließend wird das Bauelement an seiner Position bestückt, wobei sich die Bauteilunterseite mit dem Klebstoff verbindet. Der Aushärtvorgang mittels Wärme- und/oder Strahlungsenergie erzeugt in kurzer Zeit eine sichere Verbindung. Transportvorgänge und sonstige Bewegungen der bestückten Leiterplatte sind vor dem Lötvorgang ohne Lageänderung der Bauelemente möglich.

Aus den Aufgaben und Funktionen verschiedener Zusätze und haftvermittelnder Substanzen kann auf deren Einfluß für die Haftfähigkeit bei der räumlichen Bestückung geschlossen werden [137]. Die SMD-Klebstoffe stehen als Ein- oder Zweikomponentensysteme (vgl. Bild 44) zur Verfügung. Hauptbestandteil ist das *Basisharz*. Es enthält die Grundbausteine (Monomere) für die Polymerverbindung, welche durch die vorhandene funktionelle Gruppe charakterisiert sind. Diese reaktionsfreudige Verbindung einiger organischer Stoffe ist sehr energiereich. Sie hat das Bestreben, sich mit anderen Elementen zu verbinden, um in einen energieärmeren Zustand überzugehen. Für die durchzuführenden Versuche wurden vinyl- und epoxidgruppenhaltige SMD-Kleber ausgewählt.

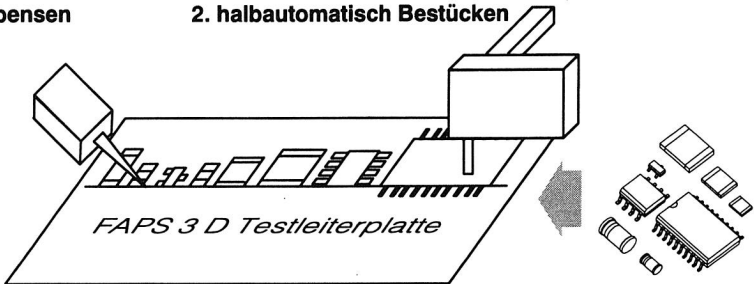
Für die Untersuchungen im Bereich der SMD-Klebstoffe wurden zwei Sorten ausgewählt. Beide sind thermisch aushärtende Kleber, die speziell für die SMD-Technik entwickelt wurden. Sie befestigen die SMD-Bauteile während der Produktion sicher auf der Platine. Kleb-

stoff 1 ist ein lösungsmittelfreier Epoxidkleber mit Viskositätswerten im Bereich von 300 – 500 Pa·s (lt. Datenblatt). Der SMD-Kleber 2 ist kein reiner Epoxyd- oder Acrylkleber. Er vereint die Vorteile von beiden, und besitzt eine Viskosität von ca. 400 Pa·s bei einer Scherrate von 1 s^{-1} . Das Aushärten erfolgt in einem Umluftofen bei 130°C und einer Härtezeit von 3min.

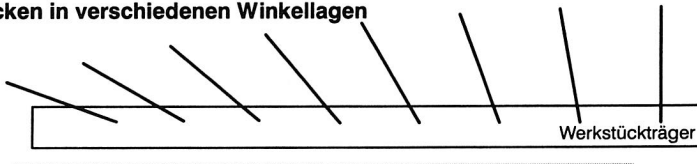
1. manuell Dispensen



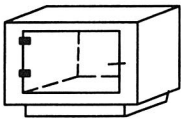
2. halbautomatisch Bestücken



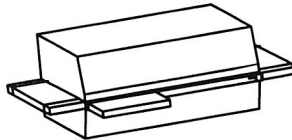
2. Einstecken in verschiedenen Winkellagen



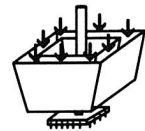
2. Verlöten in unterschiedlichen Ofentypen



Konvektionsofen



Infrarot-Reflowofen



Heißgas-Werkzeug

Bild 43: Versuchsablauf zur Ermittlung der Grenzwinkel

Leitklebstoffe werden seit einigen Jahren insbesondere in der Hybridtechnik eingesetzt und können durch die höhere Elastizität des Klebers gegenüber der Lotlegierung vor allem einen besseren Abbau von mechanischen Spannungen bewirken [138]. Im Gegensatz zur Lötverbindung, bei der die mechanische Fixierung und die elektrische Leitfähigkeit gemeinsam durch die Lotpaste erfolgt, werden diese beiden Funktionen bei Leitklebern getrennt realisiert. Ein elektrisch leitendes Material wie Silber, Gold oder Graphit ermöglicht die Stromleitung durch Bildung langer Ketten von sich berührenden Partikeln der Füllstoffe. Die

mechanische Bindung erfolgt durch Adhäsion und Kohäsion des nicht leitenden Basisharzes, welches einen sehr hohen elektrischen Widerstand besitzt [139].

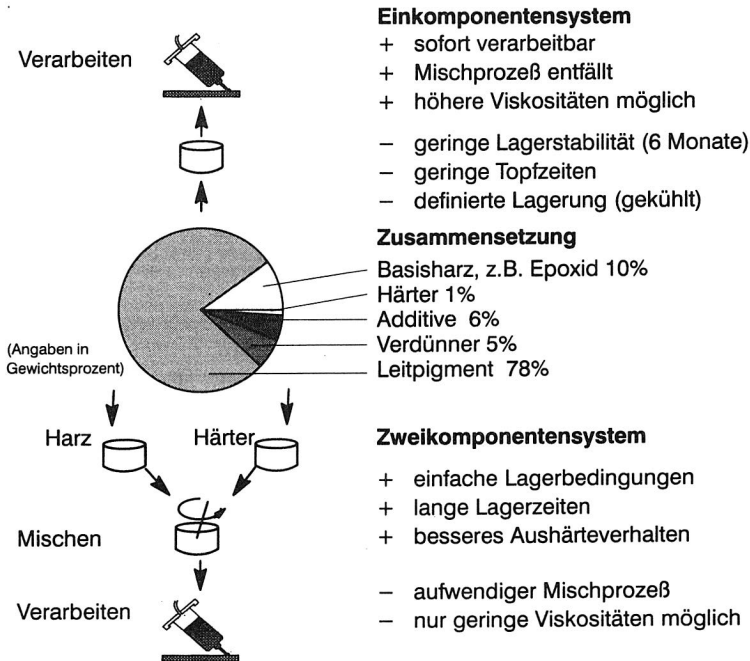


Bild 44: Leitkleber (Zusammensetzung [140], Vergleich Ein-, Zweikomponentenkleber)

Der Hauptbestandteil von Leitklebern sind die *Leitpigmente* (siehe Bild 44). Sie haben nicht nur einen Einfluß auf die elektrischen und thermischen Eigenschaften der Verbindung, sondern ebenso auf das rheologische Verhalten der Klebepaste und die mechanischen Festigkeitswerte. Von Bedeutung sind Art, Form, Größe und Anordnung der Füllstoffe in der Harzmatrix. Der am häufigsten eingesetzte Pigmentstoff ist Silber neben Gold, Kupfer, Nickel und Graphit. Analog zum Metallpulver bei Lotpasten sind verschiedene Partikelformen in unterschiedlichen Größen denkbar: Plättchen, Kugeln, Nadeln, verzweigte Nadeln, Vielecke oder blasiges Material [141]. Entscheidend für die Leitfähigkeit ist die durchschnittliche Kontaktzahl eines Partikels. Flakes (plättchenförmige Metallpigmente) erreichen mit ca. 80 Gewichtsprozent die besten Werte. Andere Formen werden in geringen Mengen beigegeben, um das Fließverhalten des Klebers zu verbessern. Eine besondere Oberflächenbehandlung (Coating) der Plättchen erfolgt ebenfalls zur Verbesserung elektrischer Leitwerte.

Die Leitfähigkeit einer Klebverbindung wird durch zwei Vorgänge beschrieben [142]:

1. Die Metallflakes berühren sich bei einer ausreichenden Anzahl im Klebepunkt und stellen einen Strompfad her. Über einem maximalen Füllstoffanteil kommt es zu keiner weiteren Erhöhung der Leitfähigkeit.
2. Eine elektrische Leitung zwischen sich nicht berührenden Partikeln erfolgt über Leitungsbänder, Ionendiffusion und Elektronenhopping-Prozesse.

Für die Untersuchungen von Leitklebern wurden drei verschiedene Substanzen ausgewählt, die in Bezug auf die Viskosität thixotropes Verhalten zeigen. Leitkleber können durch ihren dreidimensional vernetzten Molekülaufbau geringere Schubspannungen aufnehmen als Lotpasten, wodurch sich deutlich geringere Viskositätswerte ergeben. Die Leitkleber wurden im Umluftofen bei Temperaturen von 150 bis 200°C ca. 15min ausgehärtet.

5.2.3 Experimentell ermittelte Winkellagen elektronischer Bauelemente

Während die Haftfestigkeit der Lotpasten bei den zweipoligen Bauelementen sogar an senkrechten Wänden ausreichte, kam es bei den Bauelementen mit Anschlußbeinchen bei Überschreiten des jeweiligen kritischen Grenzwinkels vor dem Löten bereits zu einem Abrutschen. Die kritische Phase im Lötprozeß ist die Erwärmung in der Aufheizzone bei 60–80° und nicht etwa der Aufschmelzprozeß, bei dem die Bauelemente auf Grund der Oberflächenspannung des flüssigen Lotes zum Teil sogar entgegen der Hangabtriebskraft auf ihre Pads zentriert werden [143]. Bild 45 zeigt die erzielten Winkellagen in Abhängigkeit der verwendeten Lotpasten und der gesetzten Bauelemente.

Neben den ermittelten Grundeinstellungen wurden verschiedene Variationen der Versuchsparameter durchgeführt, die folgende Ergebnisse brachten:

- In Abhängigkeit der verschiedenen Gehäuseformen, deren Anschlußgeometrie und -anzahl werden unterschiedliche Maximalwinkel erreicht (siehe Bild 45).
- Eine Erhöhung des Dosiervolumens führt bei bestimmten Lotpasten und einzelnen Bauelementen (insb. SO) zu einer Verbesserung des Bestückwinkels.
- Durch Vortrocknung der Lotpaste wird auch bei kritischen Bauelementen eine Erhöhung des Neigungswinkels erreicht.
- Durch Optimierung der kritischen Phase des Reflowprozesses (Reduzierung der Vorheiztemperatur) werden bessere Werte für die Neigungswinkel erzielt.
- Durch Auftrag von Lötstopplack, der einen gewissen Abstützeffekt für die gesetzten Bauelemente bewirkt, können die zulässigen Winkel erhöht werden.

Bei Verwendung der SMD-Fixierkleber ist der Transportvorgang der kritische Prozeß, bei dem die Bauelemente von ihren Positionen rutschen. Der Härtevorgang im Ofen ist durch die stetig ansteigende Haftfestigkeit dagegen unkritisch. Auch beim Einsatz von SMD-Fixierklebern konnten die zulässigen Neigungswinkel durch Erhöhung des Dosiervolumens

und Aufbringen von Lötstopplack erhöht werden. Während die Vortrocknung keine signifikante Veränderung brachte, konnte durch Ersatz des hartpapierverstärkten Basismaterials FR2 durch glasfaserverstärktes Epoxidharzmaterials FR4 Verbesserungen erzielt werden.

Die mit Leitklebern durchgeführten Versuche zeigten eine sehr gute Haftfähigkeit. Sie fixierten nahezu alle untersuchten Bauelemente bis zu einem Winkel von 90° sicher auf der Leiterplatte. Auch die Variation der Parameter (Vortrocknung, Aushärtetemperatur etc.) verschlechtert die erzielten Maximal-Werte nicht. Die Probleme bei Leitklebern liegen jedoch noch in der Verarbeitbarkeit, ihrer Langzeitbeständigkeit gegenüber Umwelteinflüssen und bei den elektrischen Eigenschaften. Sobald diese Leitmaterialien in der planaren Technologie stärkeren Einsatz finden und in breiteren Feldversuchen die noch bestehenden Vorbehalte ausgeräumt werden können, werden sie gerade auch bei räumlichen Schaltungsträgern ein hervorragend geeignetes Anwendungsgebiet erschließen.

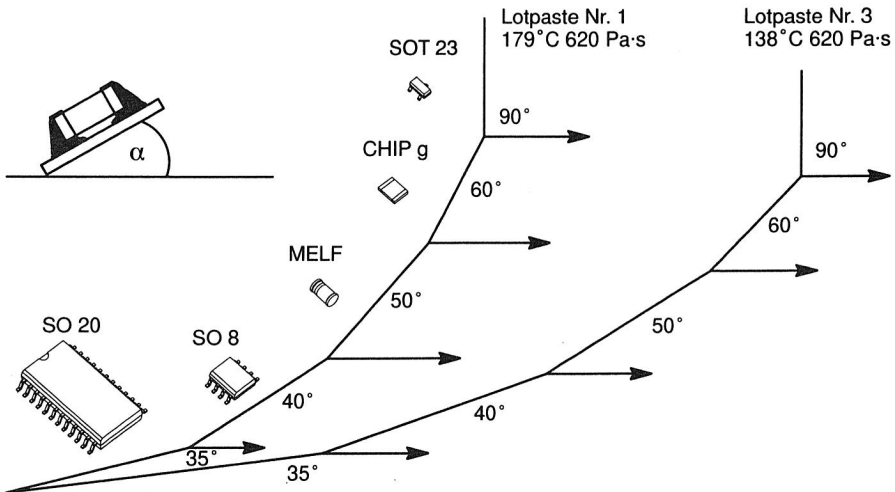


Bild 45: Erzielte Winkellagen verschiedener Bauelemente in Lotpaste

Mit den durchgeführten Versuchen wurde nachgewiesen, daß unter Berücksichtigung der zu durchlaufenden Fertigungsschritte Bestückung und Löten bzw. Aushärten die Haltekräfte der bisher eingesetzten Verbindungsmedien Lotpaste, Fixier- und Leitkleber auch eine Platzierung der elektronischen Komponenten auf schrägen Prozeßflächen ermöglichen. Unter Einhaltung der ermittelten Grenzwinkel, können damit elektronische Geräte zusätzlich miniaturisiert werden.

5.3 Verbindungstechnologien für MID

Die Entwicklung geeigneter Basismaterialien für MIDs, die anfangs primär zur Substitution konventioneller Leiterplattenmaterialien angesehen wurden, orientierte sich bisher fast ausschließlich an den bis dato angewendeten Verfahren des Wellenlötens und der Reflowtechnik sowie den dazu eingesetzten Zinn-Blei-Legierungen als Verbindungsmedium. Da insbesondere die Verbindung aus diesen Lötverfahren und -materialien für thermoplastische Kunststoffe extrem hohe Anforderungen an die Temperaturbelastbarkeit stellen, wurden, ohne diese Anforderungen in Frage zu stellen, vorrangig die sog. Hochtemperaturthermoplaste (siehe Kapitel 3.1) als Substratwerkstoffe für MID entwickelt oder angepaßt. Die großen strukturellen Vorteile der MID-Technologie wogen die Einschränkungen dieser Werkstoffe bezüglich Verarbeitbarkeit und deren hoher Preis auf.

Da MIDs zunehmend auch in Anwendungen vordringen, in denen nicht nur die Funktion einer Leiterplatte ersetzt, sondern in erster Linie die gesamte Produktstruktur überdacht wird, fordern die Anwender die weitere Verwendung ihrer bisher eingesetzten Kunststoffe, die in jahrelanger Erfahrung auf deren speziellen Einsatz hin optimiert wurden. Verstärkt durch den vorherrschenden Zwang, die Herstellungskosten zu reduzieren, wird die Umkehrung des oben beschriebenen Ansatzes verlangt: Die Konstruktion wählt den für die Anwendung am besten geeigneten und kostengünstigsten Werkstoff aus, die Verbindungstechnik muß daraufhin abgestimmt werden.

Da die dazu nötigen Verbindungstechniken noch nicht für alle Bereiche verfügbar sind, kann eine solch radikale Umstellung in der Praxis noch nicht funktionieren. Vielmehr müssen Produktgestaltung und Fertigungsplanung intensiv bei der Konstruktion spritzgegossener Schaltungsträger aufeinander abgestimmt werden, d. h. Produkt- und Produktionstechnologie sind parallel zu entwickeln. Demzufolge werden in den folgenden Abschnitten die Anforderungen der Lötverfahren und die Eigenschaften der Substratwerkstoffe aufeinander abgeglichen. Ziel ist die Entwicklung von angepaßten Lötverfahren für die speziellen Belange der MID-Technologie.

5.3.1 Evaluierung verfügbarer Reflow-Massenlötverfahren

Das Verlöten der elektronischen Komponenten mit dem Leiterbild eines thermoplastischen Schaltungsträgers gehört zu den kritischsten Prozessen in der gesamten Herstellungskette spritzgegossener Elektronik-Baugruppen. Da die Funktion einer elektronischen Schaltung von jeder einzelnen Lötstelle abhängt, wird von diesem Prozeßschritt eine extrem hohe Qualität gefordert. Aus diesem Zwang heraus, wurden die eingesetzten Verfahren im Laufe ihrer Einsatzzeit auf Fehlerraten im Bereich weniger Hundert dpm (defects per Million) optimiert. Trotz der strukturellen Vorteile in vielen anderen Bereichen ist eine räumliche Schaltung in gleichem Maße abhängig von der optimalen Fertigungsqualität des Lötprozesses.

Daraus folgt die Notwendigkeit für die eingesetzten thermoplastischen Basismaterialien, diesen speziellen Bedingungen zu entsprechen.

Heute verfügbare und im industriellen Einsatz angewandte Lötverfahren unterscheiden sich deutlich in dem Maß des Temperatureinflusses auf die elektronischen Baugruppen. Neben der maximalen Prozeßtemperatur sind vor allem die zeitliche Einbringung und die geometrische Ausdehnung der Temperatureinbringung von besonderer Bedeutung. Bild 46 zeigt das Zusammenwirken dieser drei Größen, das über die Belastbarkeit der eingesetzten Thermoplaste entscheidet. Daraus läßt sich erkennen, daß eine Verminderung der Temperaturbelastung für die Substrate auf verschiedene Weise erfolgen kann:

- Reduzierung der maximalen Prozeßtemperatur (z. B. niedrig-schmelzende Lote)
- Minimierung der Konfrontationsdauer (z. B. Laserlöten)
- Räumliche Begrenzung der Wärmeeinbringung (selektive Lötverfahren)

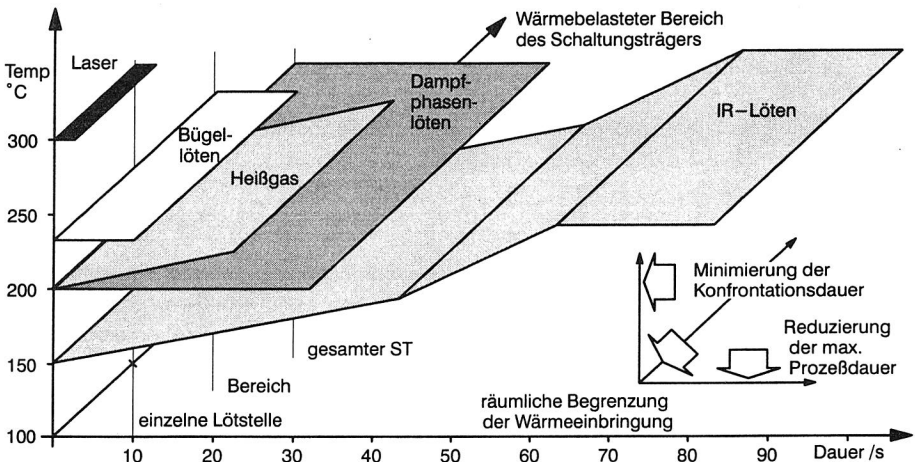


Bild 46: Charakteristiken verschiedener Verbindungstechnologien

Zur Beurteilung der Temperaturbeständigkeit im Lötprozeß sind die Versagensmechanismen der normierten Prüfverfahren nur eingeschränkt anwendbar. Deshalb wurden in ersten experimentellen Versuchen die Temperaturbeständigkeit verschiedener Thermoplaste in unterschiedlichen Reflow-Lötanlagen untersucht [146]. Dazu werden Probekörper aus verschiedenen Thermoplasten angefertigt, die in unterschiedlichen Absorptionskoeffizienten und metallisierter Oberfläche variieren sowie dreidimensionalen Aufbau besitzen, um den Einfluß räumlicher Strukturen bestimmen zu können. In ersten Experimenten wurden die Ergebnisse von [147] verifiziert, nach denen die sog. Hochtemperaturthermoplaste (hier LCP, PEI, PES) mit sorgfältig angepaßter Prozeßsteuerung in herkömmlichen Reflowlötanla-

gen verlötet werden können (vgl. auch [148, 149]). Standard-Konstruktions–Kunststoffe versagen jedoch unter Verwendung dieser herkömmlichen Löttechnologien.

Darauf aufbauend werden weitere Versuchsreihen durchgeführt, die durch ein aufgebrachtes Schaltungsbild auch Unterschiede in der Bestückdichte und damit lokale Temperaturdifferenzen erzeugen lassen sowie eine Beurteilung der Lötqualität ermöglichen [143].

5.3.2 Experimentelle Untersuchung selektiver Lötverfahren

Für den Einsatz für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger sind solche Lötverfahren besonders geeignet, die die Temperatureinbringung in das Substrat möglichst minimieren, die sogenannten *selektiven Lötverfahren*. Da die Zusammensetzung der Lotpasten ein spezielles Temperatur-Zeit–Profil vorschreibt, ist in der Reflowtechnik primär²⁷ die Verminderung der gleichzeitig mit Wärme beaufschlagten Fläche möglich. In folgenden Reflow-Lötverfahren ist diese Idee appliziert:

- Blendengesteuertes Infrarotlöten
- Heißgaslöten
- Bügellöten

Beim luftgekühlten Infrarotlöten wird die schlechte Absorption der Infrarotstrahlung von konventionellen Leiterplattenbasismaterialien ausgenutzt. Während mit einem Dunkelstrahler durch die hohe Absorption der Lotpaste gezielt die Lötstellen erwärmt wird, soll die im Ofenbereich entstehende Warmluft abgesaugt und durch kühlende Luftströme ersetzt werden. Dadurch soll die Temperatur an der Lötstelle maximal 200°C erreichen, die Lufttemperatur direkt über dem Schaltungsträger soll gleichzeitig jedoch nur ca. 100°C betragen [150]. Anwendungen dieses Verfahrens aus der industriellen Praxis sind bisher jedoch noch nicht bekannt.

Mit der Möglichkeit, die notwendige Wärmeenergie direkt über das flüssige Lötinn auf den Schaltungsträger aufzubringen, kann durch Abwandlung bekannter Methoden der Bad-Löttechnologien die Temperatureinbringung gleichzeitig räumlich und zeitlich minimiert werden. Varianten dazu finden sich in folgenden Verfahren:

- Fontainenlöten [151]
- Lötdrucken (Solderprint)
- Kolbenlöten

Repräsentativ für die selektiven Lötverfahren wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Industrieroboter-geführte Zelle zum 3D-Löten von spritzgegossenen Schaltungsträgern mit Hilfe des Kolbenlötverfahrens aufgebaut. Zum räumlichen Führen des Lötwerkzeuges wurde ein

²⁷ Laserlöten wird vor allem zum Verlöten fester Lotdepots eingesetzt. Dadurch sind auch kürzere Aufschmelzzeiten möglich.

6-Achs–Gelenkarmroboter eingesetzt. Diese für planare Leiterplatten auf Basis von vierachsigen SCARA-Robotern bekannte Technologie [152] wurde in beschriebenem Anwendungsfall zusätzlich um eine Schutzgas(N_2)-Umspülung der Lötstelle sowie eine Aktivierung mittels Ameisensäure erweitert [153]. Im Kolben befindet sich ein Heizkörper, der das austretende Gas temperaturgeregelt erhitzt. Durch die geometrische Form der Kolbenspitze entsteht eine Kapillarwirkung, die das flüssige Lot aus der automatischen Lotdrahtzufuhr speichert. Der Stickstoff, der zum Schutz vor Oxidation den Luftsauerstoff von der Lötstelle abschirmt [154] und mit Ameisensäure ($H-COOH$) angereichert ist, die wiederum bereits vorhandene Metalloxide reduzieren kann, wird direkt am LötKolben ausgeleitet (Abbildung 47 zeigt den Versuchsaufbau sowie das eingesetzte Kolbenlötwerkzeug)²⁸.

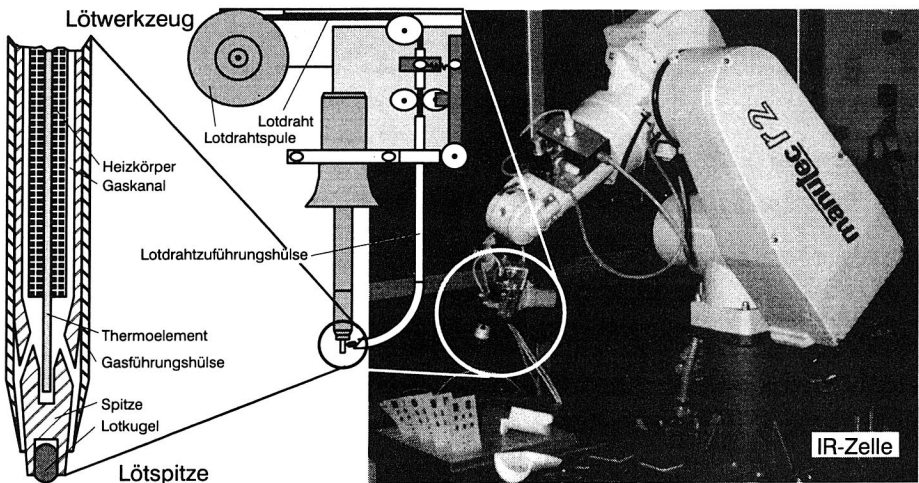


Bild 47: Versuchsaufbau zum selektiven Kolbenlöten

In umfassenden Versuchsreihen wurde die Qualität der erzeugten Lötverbindungen überprüft. Bei der Einstellung der ermittelten optimalen Lötparameter (Kolbentemperatur, Abstand Kolben-Anschlüsse, Verfahrensgeschwindigkeit, Orientierung des Werkzeugs, Lotdrahtzuführung, Stickstoff- und Ameisensäuremenge etc.) konnten auch Fine-Pitch–Bauelemente mit Rastermaßen bis zu 0,65mm sicher verlötet werden (siehe Bild 48). Eine wesentliche Einschränkung der Eignung des Verfahrens liegt jedoch in der geringen Robustheit des Prozesses gegenüber ungenau platzierten Bauelementen begründet, die je nach Verschiebungsrichtung zu Kollisionen, Brückenbildung oder offenen Lötstellen führen kann. Durch Integration eines nachgiebigen Werkzeuges könnten diese Probleme jedoch gemindert werden.

²⁸ Bei der Durchführung der Versuchsreihen wurde der Verfasser von Herrn Dipl.-Ing. Ralf Luchs unterstützt.

Legende:

T_L : Kolbentemperatur / °C

v : Lötgeschwindigkeit / mm·s⁻¹

Temperaturmessung durch
Fühler im Abstand von
 $s_1 = 1\text{ mm}$ und $s_2 = 3\text{ mm}$

Substrat-
Temperatur / °C

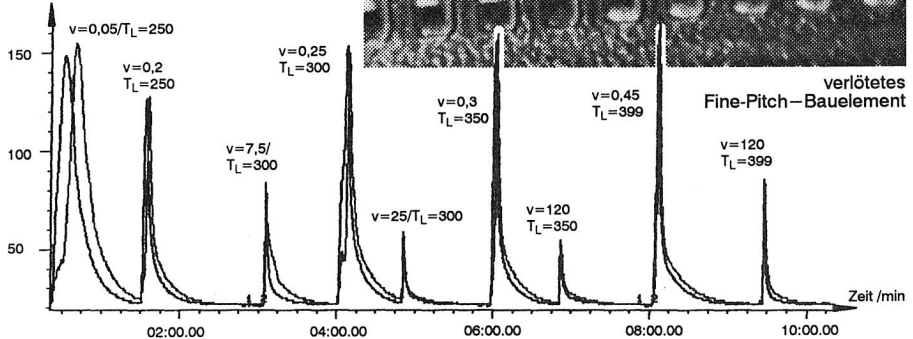


Bild 48: Temperaturbelastung beim Kolben-Lötprozeß

Der kinematische Aufbau des oben beschriebenen Lötverfahrens sowie der Löt-Prozeß selbst ermöglichen das Verlöten von elektronischen Bauelementen auf bis zu 75° geneigten Flächen. Da die Temperaturbelastung des Substratmaterials minimal ist (siehe Bild 48), können auch Standardkunststoffe (wie PC oder ABS) ohne Schädigung verarbeitet werden. Da mit steigender Kolbentemperatur auch die Bahngeschwindigkeit des Lötvorganges erhöht werden konnte, ergaben sich unabhängig von der gewählten Löttemperatur die maximalen thermischen Belastungen des Substratwerkstoffes im Bereich von 150-160°C bei einer Kontaktzeit von ca. 5s. Die Verwendung der in Stickstoff gelösten Ameisensäure führte ebenfalls zu keinen negativen Veränderungen des Basismaterials. Mit dieser Applikation wurde somit beispielhaft ein Lötverfahren realisiert, das einerseits Bauelemente auf nahezu beliebig geneigten Flächen verlöten kann und andererseits durch die minimale Temperatureinbringung auch temperaturempfindliche Kunststoffe verarbeiten kann.

5.3.3 Entwicklung alternativer Montagetechnologien für MIDs

Die herkömmliche Löttechnologie hat trotz ihrer breiten Anwendung eine Reihe von Nachteilen, die die Entwicklung alternativer Verfahren zu deren Substitution sinnvoll machen:

- eingeschränkte Ausbeute bei engen Prozeßfenstern,
- hohe Temperaturbelastung der Bauelemente und Substrate,
- teurer, zusätzlicher Fertigungsprozeß ohne direkte Wertschöpfung,

- starke Umweltbelastung durch Reinigungsverfahren und schwermetallhaltige Lote sowie
- ungünstige Demontierbarkeit der Bauelemente zu Reparatur- und Recyclingzwecken.

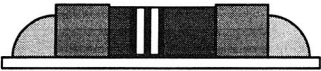
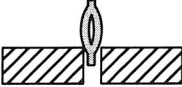
SMD-Reflowtechnologie 	Skizze	Einpreßtechnik 
<div data-bbox="181 432 447 707"> <div>Aufbringen Lotpaste</div> <div>▼</div> <div>Bestücken Bauelemente</div> <div>▼</div> <div>Reflowlöten</div> <div>▼</div> <div>Waschen</div> </div>	Prozeßkette	<div data-bbox="661 545 926 600"> Einpressen Bauelemente </div>
<ul style="list-style-type: none"> – hohe thermische Belastung – Qualitätsprobleme durch Lötfehler (Brücken, Spritzer, Benetzung etc.) – teurerer zusätzlicher Prozeßschritt – Umweltbelastung durch Reinigung und schwermetallhaltige Lote – geringe mechanische Belastbarkeit + geringe mechanische Belastung des Schaltungsträgers + bewährte Verbindungstechnologie 	Eigenschaften	<ul style="list-style-type: none"> + geringe thermische Belastung + hohe Zuverlässigkeit auch bei thermischen Wechselbeanspruchungen + Verkürzung der Prozeßkette + zusätzlich umweltfreundlicher durch einfache Demontierbarkeit + hohe mechanische Belastbarkeit – hohe mechanische Belastung des Schaltungsträgers – erst für wenige Komponenten verfügbar

Bild 49: Löttechnologie versus Einpreßtechnik

Die konstruktive Gestaltungsfreiheit, die MIDs durch die Formgebung mittels Spritzgußtechnik erhalten, ermöglichen den Einsatz unkonventioneller Verbindungstechniken für elektronische Bauelemente; der Wunsch, Standard-Thermoplaste als Basismaterial anwenden zu können, zwingt dazu, statt der bisherigen Lötverbindungen neue Konzepte für den elektrischen Kontakt und die mechanische Befestigung für MID-Anwendungen zu entwickeln oder bestehende Ansätze zu adaptieren. Neben einer Vielzahl möglicher Alternativen, elektrische Komponenten in der MID-Herstellungskette in die Baugruppe zu integrieren (z. B. spritzgußintegrierte oder galvanische Verbindungstechnik), bieten sich insbesondere rein mechanische Verfahren zur Montage an.

Anhand der Einpreßtechnik werden beispielhaft²⁹ Vorteile und Funktionsweise mechanischer Verbindungstechniken deutlich, die insbesondere in Verbindung mit der MID-Technologie gegenüber der konventionellen Löttechnik eine Reihe von Vorteilen aufweisen (siehe Bild 49). Dabei werden die Anschlußstifte der Bauelemente mit einem Übermaß in die metallisierten Bohrungen des Schaltungsträgers eingepreßt [155]. Die nötige Haltekraft der Bauelemente kann entweder bei der Verwendung massiver Einpreßstifte durch die Deformierung der Bohrungen aufgebracht werden oder, beim Einsatz nachgiebiger Stifte, zusätzlich durch die Verformung deren elastischer Zonen, die es in einer großen Anzahl unterschiedlicher Ausprägungen gibt. [vgl. 156]. Darüberhinaus sind auch einpreßbare Einzelsteckkontakte und spezielle Fassungen verfügbar, in die bedrahtete Bauelemente eingesteckt werden können.

Versuche zur Anwendung der Einpreßtechnik in thermoplastischen Basismaterialien zeigen die hervorragende Eignung für spritzgegossene Schaltungsträger [157]. Bohrungen mit geringen Toleranzen (typisch $1\text{ mm } +0,09, -0,06$) können spritzgußtechnisch runder und glatter hergestellt werden. Der Übergangswiderstand ist auch nach Temperaturwechseltest und Gastest weitaus niedriger (max. $80\mu\Omega$), als der zulässige Wert für Standard-Leiterplatten (max. $1\text{ m}\Omega$). Darüberhinaus ermöglicht die freie Formgestaltung der MID-Schaltungsträger die Integration kompletter Bauelementegehäuse (insb. Stecker, Klemmen etc.) und damit die Einsparung teurer elektromechanischer Komponenten durch Einpressen der einzelnen Kontakte.

Die durchgeführten technischen Analysen, experimentellen Versuche sowie konzeptionellen Entwicklungen dieses Kapitels verdeutlichen, daß bereits unter Ausnutzung bzw. Anpassung der verfügbaren Montagetechnik für elektronische Baugruppen räumliche spritzgegossene Schaltungsträger sicher und produktiv verarbeitet werden können. Darüberhinaus wird gezeigt, wie durch Anwendung fortschrittlicher Verbindungstechniken auf der einen Seite eine weitere Miniaturisierung elektronischer Produkte erreicht und andererseits kostengünstige Basismaterialien eingesetzt werden können.

²⁹ Neben der Einpreßtechnik existieren weitere Möglichkeiten der mechanischen Verbindungstechnik wie z. B. Sockeltechnik, Schnappverbindungen, Knopfkontakttechnologie, Elastomer-Verbinder etc.

6. Holonische³⁰ Entwicklungsumgebung für elektronisch-mechanisch – integrierte Produkte

Die Konstruktion technischer Produkte muß die Anforderungen des Marktes unter Einsatz verfügbarer Produktionstechnologien möglichst umfassend erfüllen. Bild 50 veranschaulicht den stetigen Wandel der wettbewerbsbestimmenden Produktionsfaktoren: In den 60er Jahren war die Befriedigung der starken Nachfrage der Konsumenten vorherrschendes Ziel der Unternehmen. Daraus resultierte die Steigerung der Produktivität als wichtigste Anforderung für die damalige Fertigungstechnologie. Die allmähliche Sättigung der Märkte führte danach zu dem Wunsch der Käufer, sich durch individuellere Produkte abzuheben. Die Folge daraus ist die Notwendigkeit zur Beherrschung einer hohen Variantenflexibilität und einer wirtschaftlichen Produktion trotz sinkender Stückzahlen. Wachsender Wohlstand und kürzer lebiger Geschmack zwangen die Unternehmen, in immer engeren Zyklen neue Produkte zu entwickeln und zu produzieren, die sich folglich weniger durch innovative Technik als vielmehr durch angepaßtes Design auszeichneten. Die Überhitzung dieses Konsumdruckes bei gleichzeitiger Abkühlung der Hochkonjunktur führten dann Anfang der 90er Jahre zu einer Rückbesinnung auf qualitativ hochwertige und langlebige Produkte. Das steigende Bewußtsein für Ressourcen und Umwelt wird dagegen in Zukunft die Umweltverträglichkeit der Produkte verstärkt in den Fordergrund stellen.

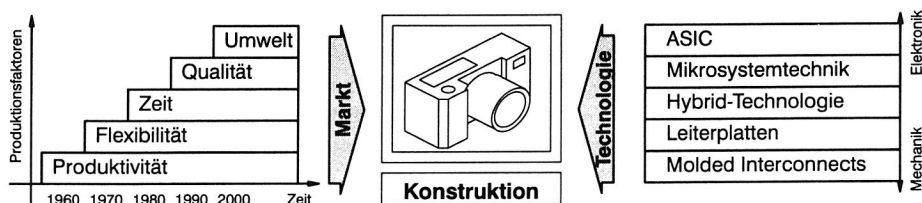


Bild 50: Konstruktion zwischen Marktanforderung und Technologieangebot

Gleichzeitig stellen sich zur Gestaltung elektronischer Produkte eine wachsende Vielfalt an möglichen Aufbautechnologien zur Verfügung. Der Konstrukteur muß bereits sehr früh entscheiden, ob die geforderte Funktionalität, z. B. in anwendungsspezifischen Integrierten Schaltkreisen, unter Einsatz der Mikrosystemtechnik, der Hybridtechnologie, konventioneller Leiterplatten, spritzgegossener Schaltungsträger oder unter Kombination einer oder mehrerer dieser Technologien gestaltet werden soll.

Die Anforderungen für den Konstrukteur steigen damit explosionsartig. Auf der einen Seite muß er Einsatzgebiete sowie Vor- und Nachteile der Produktionstechnologien genau ken-

³⁰ Abgeleitet aus dem griechischen *Holos* (das Ganze) und der Endsilbe *on* (einzelnes Teil), d.h. ganzheitliches, integriertes System.

nen und auf der anderen Seite die Produktfunktionalität innovativ und leistungsfähig gestalten. Die Komplexität dieser Aufgabe kann mit Hilfe einer umfassenden Unterstützung durch rechnerbasierte Werkzeuge durchgeführt werden. Im folgenden wird die Konzeption und die Realisierung einer holonischen Entwicklungsumgebung für elektronisch-mechanisch-integrierte Produkte beschrieben. Da die Abbildung und die Automatisierung kreativer Aufgaben in Softwaresystemen die Gefahr inhärieren, bestehende Abläufe und Technologien festzuschreiben und damit innovationshemmend wirken können, wurde bei der Konzeption insbesondere auf Anpassungsfähigkeit gegenüber produkt- und produktionstechnologischen Veränderungen geachtet.

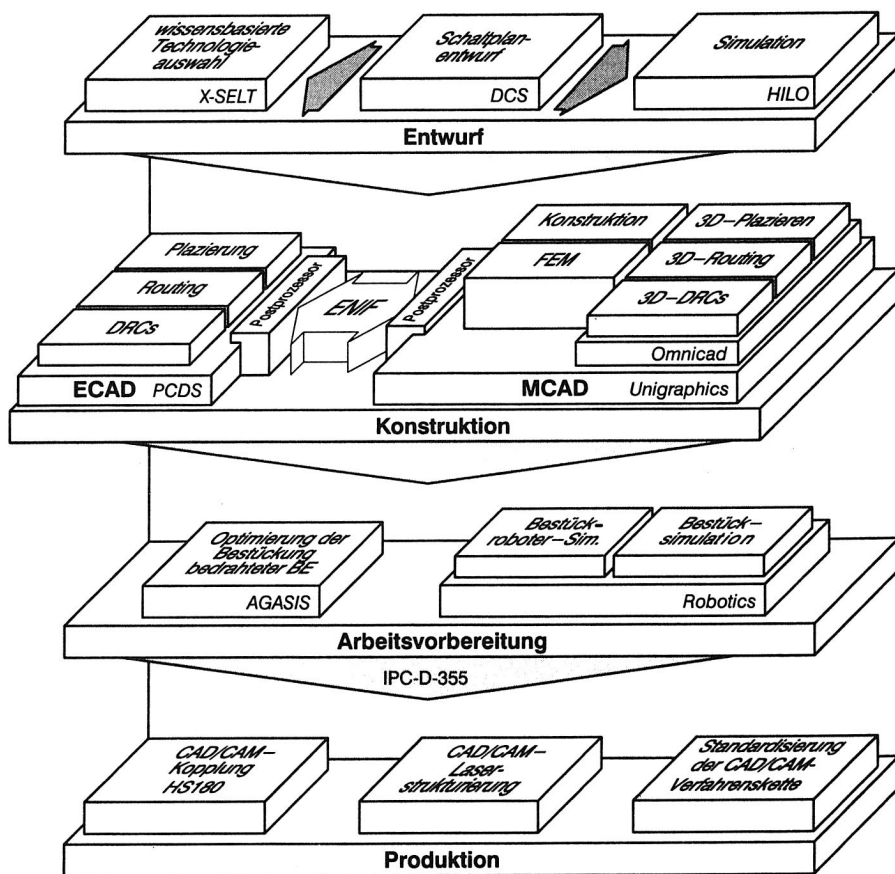


Bild 51: Zusammenwirken der Einzelbausteine der holonischen Entwicklungsumgebung

Bild 51 zeigt das Zusammenwirken der entwickelten Module untereinander und mit Standardsoftware. Die Entwicklung des logischen Schaltplans wird in einem Logikeditor (z. B.

DCS) entworfen [158]. Auf Basis der aus dem logischen Entwurfsprozeß zur Verfügung gestellten Daten (Netzliste, Schaltplan etc.) kann die elektrische Funktion durch Simulation (z. B. *HILO*) verifiziert werden [159].

Noch vor der Detaillierung der physikalischen Konstruktion ist es notwendig, eine technisch-wirtschaftlich fundierte Entscheidung über die Wahl der alternativen Produktaufbautechnologien zu treffen. Das entwickelte, in Kapitel 6.1 vorgestellte Expertensystem (*XSELT*) unterstützt den Elektronikonstrukteur in dieser Fragestellung. Neben interaktiv abgefragten betriebswirtschaftlichen Information werden die wesentlichen technischen Daten aus dem Logik-Entwurfssystem übernommen.

Die physikalische Gestaltung der elektronischen und mechanischen Baugruppen eines elektronischen Produktes werden nach dem Stand der Technik noch getrennt durchgeführt. Die rechentechnische Verknüpfung von CAD-Systemen für die Elektronik- und Mechanikkonstruktion beschleunigt den Entwurfsprozeß signifikant und schafft gesicherte Planungsergebnisse. Über die Softwareschnittstelle *ENIF* (Extended Neutral Interface) werden die relevanten Informationen der verschiedenen Konstruktionsschritte zwischen Elektronik und Mechanik ausgetauscht (Kapitel 6.2)[160].

Räumliche Schaltungsträger erfordern jedoch eine simultane Gestaltung der mechanischen und elektronischen Funktionen in einem integrierten Konstruktionswerkzeug. In Kapitel 6.4 wird die Konzeption und Realisierung von *Omnicaad* beschrieben, das die Teilfunktionen Bauelemente-Plazierung, Verdrahtung und Design Rule Checks auf Basis eines volumenorientierten Modellierers berücksichtigt [160].

Die Planung der Montageprozesse sowie die Ableitung der korrespondierenden NC-Programme ist im räumlichen Anwendungsfall wesentlich komplexer als für standardisierte planare Flachbaugruppen; für dieses noch spezielle Problem existieren zum heutigen Stand der Technik bisher keine Lösungen. Dazu wird in Kapitel 7.2.1 mit *AGASIS* ein Konzept zur kollisionskontrollierten Bestücksequenzgenerierung vorgestellt. Der Einsatz der kinematischen Simulation zur Bestückprozeßplanung wird in Kapitel 7.2.2 beschrieben.

Spezifische Realisierungen zur Übertragung der produktdefinierenden Daten in die Fertigungsumgebung werden zur 3D-Laserstrukturierung (Kapitel 7.1) und SMD-Bestückung (Kapitel 7.2.3) entwickelt. Die Formulierung einer standardisierten Datenrepräsentation der prozeßrelevanten Daten stellt die Grundlage für integrierte CAD/CAM-Verfahrensketten dar.

6.1 Wissensbasierte Auswahl von Produktaufbautechnologien

Die insbesondere in der Elektronik geforderten kurzen Reaktionszeiten auf Marktwünsche zwingen zu einer schnellen und sicheren Entscheidung, in welcher Technologie eine elektronische Schaltung realisiert werden soll. Die Auswahl einer technologisch machbaren und wirtschaftlich tragfähigen Lösung ist auf Grund des umfangreichen Bündels an Randbedin-

gungen, der großen Vielfalt unterschiedlicher Produktaufbautechnologien und deren Weiterentwicklungen in der frühen Phase der Produktkonzeption ein problematischer Schritt. Detaillierte Kenntnisse von Vor- und Nachteilen der in Frage kommenden Möglichkeiten und die fundierte Abwägung ihrer Eignung für die vorliegende Aufgabenstellung sind dabei von großer Bedeutung. Eine Fehleinschätzung in dieser Phase gefährdet substantiell den Erfolg der Entwicklung [161].

Die Auswahl einer spezifischen Fertigungstechnologie für elektronische Schaltungen basiert in aller Regel auf dem Erfahrungswissen der Entwickler und Konstrukteure. Relevantes Wissen ist bisher primär nur in Entscheidungstabellen dokumentiert. Rechnergestützte Werkzeuge zur Entscheidungsunterstützung sind für diese Fragestellung nicht verfügbar, wissenschaftliche Arbeiten tangieren diesen Bereich bisher nur periphr [162] oder unterstützen spezielle Technologien im Detail [163] und nicht übergeordnet und vergleichend. Im folgenden wird ein Konzept und die darauf aufbauende Realisierung eines wissensbasierten Systems (XSELT) zur Selektion möglicher Produktaufbautechnologien vorgestellt.

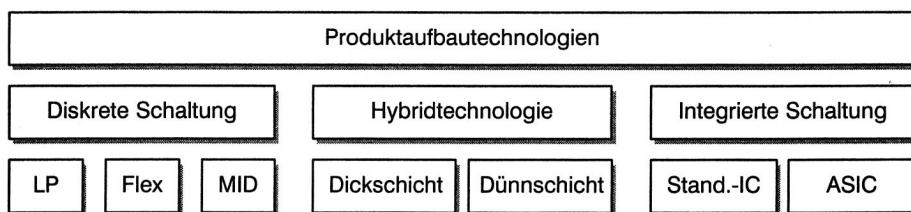


Bild 52: Alternativen zur Abbildung elektronischer Funktionen

Charakterisierende Eigenschaften, Herstellungsprozesse sowie Vor- und Nachteile der betrachteten alternativen Produktaufbautechnologien (siehe Bild 52) sind umfassend in der Literatur beschrieben [164, 165, 166, 167]. Darauf aufbauend werden im folgenden die wesentlichen Einflußgrößen und Entscheidungswege untersucht, das Problemfeld analysiert sowie Systemkonzept und Implementierungsstrategie entwickelt.

6.1.1 Systematisierung der Vorgehensweise bei der Technologie-Selektion

Selbst bei Beachtung der Vielfalt der Einfluß- und Bedingungsgrößen, die den Rahmen für die Entwicklung einer elektronischen Schaltung bilden, der Vielzahl von Realisierungsmöglichkeiten für diese Schaltung und der individuellen Entwurfsstile der Schaltungsentwickler, läßt sich der Kern jeder Schaltungsentwicklung in einem prinzipiellen Entwicklungsablauf darstellen [161] (siehe auch Bild 51).

Die Technologieauswahl findet zumeist bereits sehr früh in der Entwicklung, in der Konzeption oder Schaltungsentwicklung, statt. Ziel der Schaltungsentwicklung ist eine funktionsfähige

hige und fertigungsgerechte Schaltung unter Berücksichtigung projektspezifischer Restriktionen. Diese Phase wird sinnvollerweise unterteilt in die drei Schritte

- Erstellen des Grobkonzeptes (Pflichtenheft)
- Ausarbeitung des Detailkonzeptes (Realisierbarkeitsstudien)
- Entwurf der Schaltung

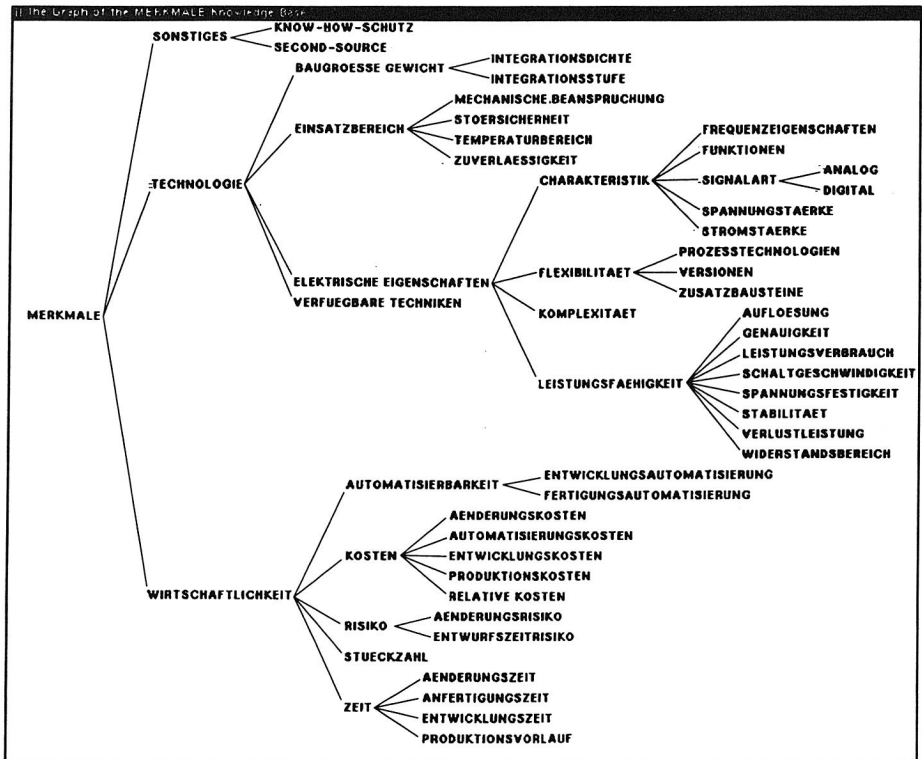


Bild 53: Kriterienstruktur zur Technologieauswahl als Merkmalshierarchie (Hardcopy)

Die Erstellung des Grobkonzeptes umfaßt zunächst die Definition der gewünschten Funktionen und der geforderten Eigenschaften der zu entwickelnden Schaltung. Dazu gehört auch die Analyse der Umwelt, die Festlegung der Modalitäten der Zusammenarbeit mit anderen (Teil-)Systemen und der zugehörigen Schnittstellen sowie der Einsatzbedingungen der Schaltung. Eine wesentliche Aufgabe bei der Erstellung eines Grobkonzeptes ist die Festlegung und Bewertung der Entwicklungsziele. Ergebnis dieser Designphase ist das Pflichtenheft.

Die Erstellung eines Realisierungskonzeptes dient der Präzisierung und Ausformulierung der im Pflichtenheft zusammengestellten Anforderungen. In dieser Phase werden mögliche Arten der Realisierung erarbeitet, untersucht und festgelegt. Im dritten Schritt wird das ausgewählte Konzept in einer realen Schaltung umgesetzt sowie die Zielerreichung evaluiert.

Diese drei Phasen werden sukzessive durchlaufen. Mit wachsendem Arbeitsfortschritt wächst der Konkretisierungsgrad; die Möglichkeit, Korrekturen vornehmen zu können, nimmt ab. Der genaue Zeitpunkt, wann über die Auswahl einer bestimmten Produktaufbautechnologie entschieden wird, ist jedoch nicht genau festzulegen. Zum einen muß vom Entwickler auch nach Erstellen der Netzliste, die bereits eine komplette symbolische Beschreibung der Schaltung mit ihren Elementen und deren Beziehungen zueinander umfaßt, noch keine Entscheidung darüber getroffen worden sein, auf welche Art die entworfene Schaltung realisiert werden soll. Eine frühzeitige Favorisierung einer Lösung verkürzt zwar die Entwicklungszeit, geht aber mit dem Verlust der Technologie-Unabhängigkeit und der festen Bindung an einen Hersteller einher.

Das theoretische Prinzip, wonach der funktionale und der physikalische Entwurf streng sukzessive aufeinander aufbauen, ist jedoch allenfalls dann möglich, wenn eine weitgehende Festlegung der physikalischen Struktur und deren zugrundeliegender Technologie, z. B. auf Grund eines spezialisierten Produktspektrums, von Haus aus gegeben ist. Im allgemeinen aber muß eine gewisse Festlegung der physikalischen Struktur und der zugrundeliegenden Technologie getroffen werden, bevor die unterste Hierarchiestufe des funktionalen Entwurfs erreicht ist, da bereits hier Elemente verwendet werden, die eine spezifische Entsprechung in physikalischen Bauelementen besitzen müssen. Ein allgemeingültiges Verfahren und den bestimmten Zeitpunkt zur Technologieauswahl kann es folglich nicht geben.

Bild 53 strukturiert die Kriterien, die zur Entscheidung über die Auswahl einer bestimmten Produktaufbautechnologie herangezogen werden, in wirtschaftliche, schaltungstechnische und sonstige Kriterien. Diese Liste der bisher in XSELT verwalteten Kriterien erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sondern kann im Laufe der Anwendung des Systems erweitert werden.

6.1.2 Realisierung in einem wissensbasierten System zur Entscheidungsunterstützung

Dem Entwickler einer elektronischen Schaltung soll eine Arbeitsumgebung zur Verfügung gestellt werden, mit deren Hilfe eine strukturierte, sich selbst detaillierende Technologieauswahl für elektronische Baugruppen möglich ist. Zur Lösungssuche soll sowohl in verschiedenen Entwicklungsebenen interaktiv vorgegangen werden können, als auch vom System ein automatischer Vorschlag generiert werden. Zur Implementierung dieser Aufgabenstellung eignet sich insbesondere ein wissensbasierter Ansatz [168].

Auf Basis des Software-Entwicklungswerkzeuges *Knowledge-Engineering Environment KEE* wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit das System zur rechnergestützten Bewertung von Fertigungstechnologien *XSELT* entworfen. Aufbauend auf einer Wissensbasis über Fer-

tigungstechnologien für elektronische Schaltungen und den für die Auswahl notwendigen Randbedingungen wurde ein Expertensystem, das Wissensbasis, Inferenzmaschine und Benutzerschnittstelle logisch voneinander trennt, realisiert³¹.

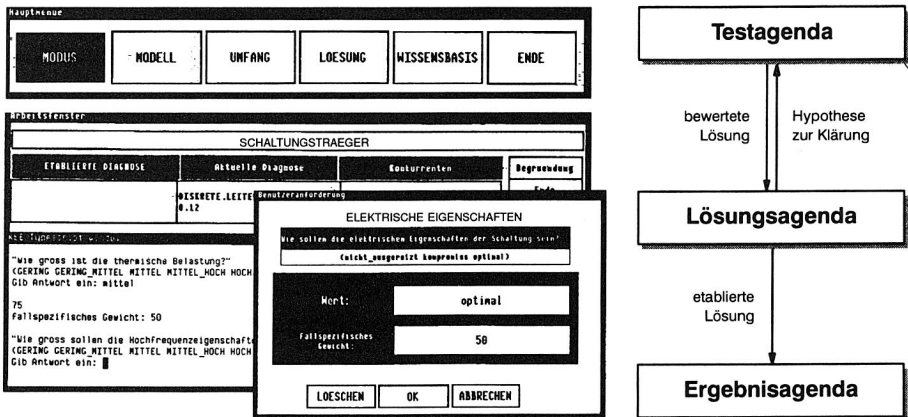


Bild 54: Bildschirmkopie des wissensbasierten Technologieauswahlsystems XSELT

Für den untersuchten Problemtyp, der einer Präzedenzauswahl entspricht, wird ein Problemlösungsverfahren entwickelt, das auf einer Kombination von *fallvergleichender* und *heuristischer Klassifikation* beruht. Die fallvergleichende Klassifikation eignet sich für Klassifikationsprobleme, für die eine Sammlung von Fällen mit Lösungen und Zusatzwissen über die Gewichtung von relativen Merkmalen vorhanden ist. Aus einer Falldatenbank bereits behandelter Fälle wird dabei der Fall ausgesucht, dessen Merkmale am besten mit denen des betrachteten Falles übereinstimmen, und seine Lösung bei hinreichender Ähnlichkeit übernommen. Die heuristische Klassifikation kann Aufgaben mit unsicherem Wissen klassifizieren.

Als Abarbeitungsstrategie für die Dialog- und Ablaufsteuerung wird die *Hypothesize-and-Test-Strategie* [169] gewählt. Dieser Mechanismus beruht auf einer Kooperation dreier Agenden: der Test-, der Lösungs- und der Ergebnisagenda (siehe Bild 54) und ermöglicht die dynamische Generierung der Fragenreihenfolge. Das Festlegen einer Fragestellung in der Testagenda sowie die Einordnung in die Lösungsagenda basieren auf Kosten/Nutzen-Analysen und Bewertungsverfahren auf Basis der Datenstrukturen des Fallvergleichs.

Der realisierte Prototyp ermöglicht eine interaktive Lösungssuche, bei der dem Benutzer gezielt Fragen gestellt werden, deren Reihenfolge jeweils neu berechnet wird. Damit wird ein effizienter Ablauf des Entscheidungsprozesses erreicht. Der Benutzer nimmt indirekt durch die Beantwortung der Fragen (Merkmalwert, fallspezifisches Gewicht des Merkmals)

³¹ Bei der Entwicklung des wissensbasierten Systems zur Technologieauswahl wurde der Verfasser von Dr.-Ing. Georg Geyer und Herrn cand. Inf. Berthold Zink unterstützt.

Einfluß auf den Ablauf der Lösungssuche. Durch spezifische Einstellung der Parameter Betriebsart (Modus), Umfang der Lösungssuche oder Lösungsart können Merkmalsmodelle auf den Benutzer angepaßt werden.

Ergebnis dieser Rechnerunterstützung ist eine technisch-wirtschaftlich bewertete Liste alternativer Produktaufbautechnologien für die vorher für einen konkreten Anwendungsfall hin spezifizierten Randbedingungen. Damit kann entgegen dem bisherigen Vorgehen zur Auswahl einer bestimmten physikalischen Schaltungstechnologie, das oft auf den speziellen Erfahrungen und Neigungen eines Konstrukteur beruht, mit Hilfe von *XSELT* ein objektive Entscheidungsgrundlage generiert werden.

6.2 Simultane Elektronik-Mechanik–Entwicklung

Die Beherrschung der Komplexität und der extrem kurzen Innovationszyklen elektronischer Produkte zwingt zum Einsatz computerunterstützter Entwurfswerkzeuge (EDA, ECAD, CAE), die sich damit zum Standardhilfsmittel in der Elektronik entwickelt haben. Anforderungen, Funktionsweise und Anwendung sind detailliert in der Fachliteratur beschrieben [170, 171]. Steigende Anforderungen an eine flexible Modellierung der Geometrie und deren hohe Varianz führen auch in der mechanischen Konstruktion zu einem breiten Einsatz rechnergestützter Konstruktionswerkzeuge (CAD, MCAD) [vgl. 172, 173, 174].

Produkte, in denen mechanische und elektronische Funktionen in enger Wechselwirkung stehen, können weder mit Hilfe der auf die elektronische Anwendung spezialisierten ECAD-Systeme noch mit den speziell auf die Mechanik ausgerichteten MCAD–Systemen sinnvoll entwickelt und konstruiert werden [175]. Für Produkte eines derartigen Aufbaus wird oftmals der Begriff *Mechatronik* verwendet [176]. Da prinzipiell jedes elektronische Produkt auch einen mechanischen Aufbau besitzt, wird durch unten stehende Definition der Begriff Mechatronik auf die im weiteren insbesondere betrachtete Produktmenge beschränkt [177]:

Mechatronik definiert die Menge aller Prozesse
zur Entwicklung, Konstruktion und Fertigung von Produkten,
die sowohl elektronische als auch mechanische Funktionsanteile besitzen,
welche in direkter funktionsrelevanter Abhängigkeit zueinander stehen.

Die Produkte selbst werden als *mechatronische Produkte* bezeichnet.

Diesem engen Zusammenwirken der mechanischen und elektronischen Komponenten eines Produktes steht bisher noch eine Vorgehensweise in der Produktgestaltung entgegen, die von Ingenieuren unterschiedlicher Fachrichtungen in organisatorisch getrennten Abteilungen mit separaten rechnerunterstützten Werkzeugen durchgeführt wird. Diese historisch manifestierte Trennung zwischen den Welten der Mechanik und der Elektronik eröffnet eine Reihe von Rationalisierungspotentialen für die Entwicklung mechatronischer Produkte.

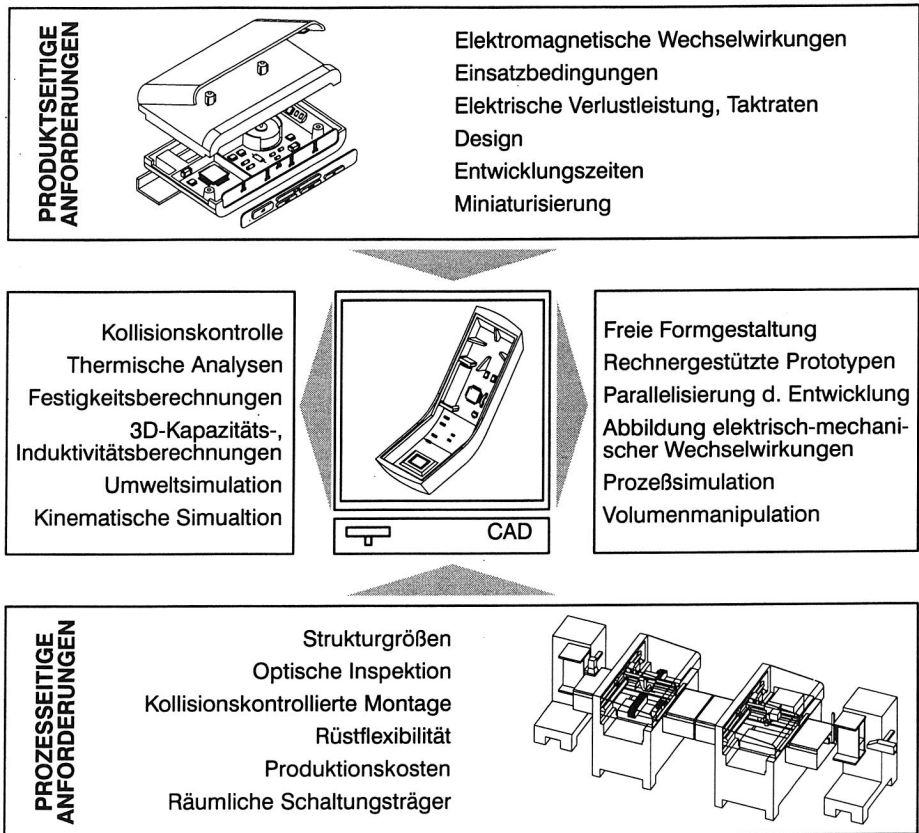


Bild 55: Anforderungen an die Konstruktion mechatronischer Produkte

Die effiziente rechnergestützte Manipulation mechatronischer Produkte in der Gestaltung zwingt demgegenüber zu einer elektronisch-mechanisch-integrierten Betrachtung der Gesamtsysteme. Die dieser These zu Grunde liegenden Anforderungen eröffnen *produkt-* und *prozeßseitig* große Rationalisierungspotentiale (siehe Bild 55).

6.2.1 Produktbestimmte Grenzen und Rationalisierungspotentiale

Die Verlagerung der Produktfunktionalität von der Mechanik in die Elektronik verschiebt prinzipiell das Funktionsverhalten und den Aufbau komplexer Produkte. Vormalig rein mechanische Produkte erhalten einen zunehmend oder sogar bestimmenden elektronischen

Anteil. Andererseits besitzen auch primär elektronische Geräte einen mechanischen Mindestanteil, z. B. als Gehäuse oder Benutzerschnittstelle. Die Bedeutung der mechatronischen Produkte wird folglich kontinuierlich steigen [178]. Die bisher streng getrennte Abarbeitung der Gestaltung der elektronischen und mechanischen Baugruppen beschränkt eine sinnvolle Parallelisierung der Aufgaben; einzelne Teilschritte müssen auf die Ergebnisse der vorgehenden warten. Fehler im Konstruktionsprozeß werden zu spät erkannt und führen zu zeit- und kostenintensiven Regelschleifen. Dagegen verkürzt eine simultane Bearbeitung die Entwicklungszeiten signifikant.

Während Designer sich bei der Gestaltung eines Produkts bisher häufig nach den Vorgaben der Techniker richten mußten (*form follows function*), ist heute vielmehr der Techniker gezwungen, die geforderte Funktionalität in eine nach ästhetischen Gesichtspunkten gestaltete Form einzupassen (*function follows form*). Die Konsequenz für den Elektronikonstrukteur sind immer kleiner werdende Nutzflächen für die elektronische Schaltung auf Leiterplatten mit komplex geformten Konturen, die in frei geformte Gehäuse eingebaut werden müssen. Mechatronische Entwicklungssysteme verbessern folglich die Miniaturisierung und die Möglichkeiten der Formgestaltung elektronischer Geräte.

Die unzureichenden Möglichkeiten zur Abstimmung der verschiedenen Funktionsmodule führen zur Definition technologisch unbegründeter Sicherheiten insbesondere bei der Auslegung der elektrischen Eigenschaften. Verbindungslängen, Kapazitäten [179], Induktivitäten oder die Abführung elektrischer Verlustleistung von Elementen, die aufgrund ihrer komplexen geometrischen Gestalt nicht auf den planaren Spezialfall zu reduzieren sind (Kabel, Feinleiter, räumliche Schaltungen etc.), können nur schwer abgeschätzt werden [180]. Berechnungstools, die die räumliche Gestalt berücksichtigen, können die Leistungsfähigkeit und Herstellungskosten der Produkte können folglich optimieren.

Die bisher getrennten Systeme können physikalische Effekte nur an den jeweils dedizierten Modellen untersuchen. Wechselwirkung zwischen Mechanik und Elektronik, wie die Abschirmung elektro-magnetischer Strahlung, Relais, Motore etc. können nicht berücksichtigt werden. Durch funktionsübergreifende Produkt-Modelle in integrierten Werkzeugen können demgegenüber auch diese elektrisch-mechanischen Wechselwirkungen abgebildet werden [181]. Weiterhin werden elektronische Produkte (tragbare Geräte, Automobilelektronik etc.) zunehmend raueren Einsatzbedingungen ausgesetzt. Mechanische Schwingungen und Stöße [182], Feuchtigkeit und Schmutz oder thermische Belastung [183] können bisher nicht berücksichtigt werden. Dagegen können funktionsintegrierte Entwicklungssysteme Aussagen über Belastbarkeit und Zuverlässigkeit bereits in der Produktgestaltungsphase liefern. Letztendlich führt die Forderung nach besserer Umweltverträglichkeit elektronischer Produkte zu einer notwendigen Reduzierung der Werkstoffvielfalt und des Ressourcenverbrauchs sowie der Forderung nach Demontierbarkeit und Recyclingfähigkeit. Beurteilung und Verbesserung dieser Eigenschaften des Gesamtsystems sind eklatant nur mit integrierten Systemen möglich.

6.2.2 Prozeßbestimmte Grenzen und Rationalisierungspotentiale

Neben den Anforderungen, die progressive Produkttechnologien an ein Konstruktionswerkzeug stellen, verlangen auch die für diese Produkte notwendigen Produktionstechnologien Fähigkeiten an Planungswerkzeuge, die bisher nicht erfüllt werden können. Die Verdichtung der Integration auch auf Ebene der Schaltungsträger fordert eine detailgenaue Modellierung und Untersuchung der Prozesse. Die bisherige Abstraktion auf das planare Problem wird selbst bei konventionellen Leiterplatten problematisch, wenn Feinstleitertechnik ($<50\mu\text{m}$) eingesetzt wird, die dadurch gekennzeichnet ist, daß im Querschnitt der Leiterbahnen Höhe und Breite ungefähr die gleiche Größe besitzen [184]. Produktionsprozesse der Mikroelektronik können infolge höchster Packungsdichte nicht mehr als zweidimensionale Vorgänge betrachtet werden. Unterwanderungen bei Oxidations- oder Diffusionsvorgängen verändern bei ungünstigem Querschnittsverhältnis die geplante Geometrie derart, daß die realisierten Werte unvorhersehbar stark von den geplanten abweichen können. Das Produkt und der Prozeß muß gegenüber dem heutigen Vorgehen dreidimensional betrachtet werden [185].

Die hohe Packungsdichte auf modernen Leiterplatten mit Bauelementen unterschiedlicher Technologien (THT, SMT, ODD, COB etc.) führt zur Problematik potentieller Kollisionen zwischen Bestückwerkzeugen und Komponenten der Flachbaugruppe. Um die elektronischen Baugruppen möglichst dicht konstruieren zu können, ohne dabei eine automatisierte Montierbarkeit einzuschränken, muß bereits in der Produktgestaltung die Möglichkeit der Kollisionskontrolle bestehen (siehe Kapitel 7.2.1).

Die Besonderheiten der einzelnen Lötprozesse müssen verstärkt bereits in der Planung berücksichtigt werden, da Einflüsse wie komponentenabhängige Wärmekapazitäten, Abschattungen, der Einfluß unterschiedlicher Substratwerkstoffe, die Packungsdichte usw. produktspezifisch sind. In der Fachliteratur sind Ansätze u. a. zur Abbildung der Verfahren Schwallöten [186], Infrarot-Reflowlöten [187] und Laserlöten [188] beschrieben.

Automatisierte optische Inspektionssysteme (AOI) z. B. mittels Lasertriangulation oder Röntgenstrahlung benötigen zum Abgleich der Sensordaten mit geplanten Solldaten ein dreidimensionales Abbild der bestückten Baugruppe [189]. Dabei werden nicht nur Bauelementepositionen und -orientierungen überprüft, sondern auch die Qualität der Lötstellen. Die mathematische Beschreibung optimaler Lötungen [186] setzt die Fähigkeit zur dreidimensionalen Modellierung und Beschreibung freigeformter Flächen voraus.

Herkömmliche zweidimensionale Schaltungs-Layoutsysteme können diesen Forderungen nicht mehr adäquat gerecht werden. Die oben genannten Kriterien eröffnen damit einer volumenbasierten Gestaltung elektronischer Produkte Rationalisierungspotentiale und führen in der Folge zu sicherer und kostengünstigerer Produktion. Die Einführung räumlicher Schaltungsträger jedoch zwingt zum Einsatz elektronisch-mechanisch integrierter Konstruktionssysteme. Die Platzierung elektronischer Bauelemente, das Verlegen der Leiterbahnen oder auch die Analyse mit Hilfe sog. Design Rule Checks (DRC) in dreidimensional ge-

formte Geometrien sind sinnvoll nur auf Basis volumenorientierter Modellierungssysteme möglich.

6.2.3 Anforderungen an mechatronische Entwicklungssysteme

Der in Bild 56 gezeigte Kfz-Armaturenbrettschalter wurde mit heute verfügbaren Moduln zur rechnergestützten Elektronik- und Mechanik-Konstruktion realisiert. Als wesentliche Problematik des Entwurfsprozesses wurde das Verlegen der Leiterbahnen innerhalb des Trägerkörpers erkannt. Dies entspricht dem manuellen, dreidimensional uneingeschränkten Routen. Konnten durch die realisierten Modellkopplungen die Entwurfsdaten aus dem ECAD leicht übernommen werden, zeigt sich hierbei, daß die Möglichkeiten des Layoutens elektronischer Komponenten in MCAD-Systemen für derartige Anwendungsfälle unzureichend sind [191].

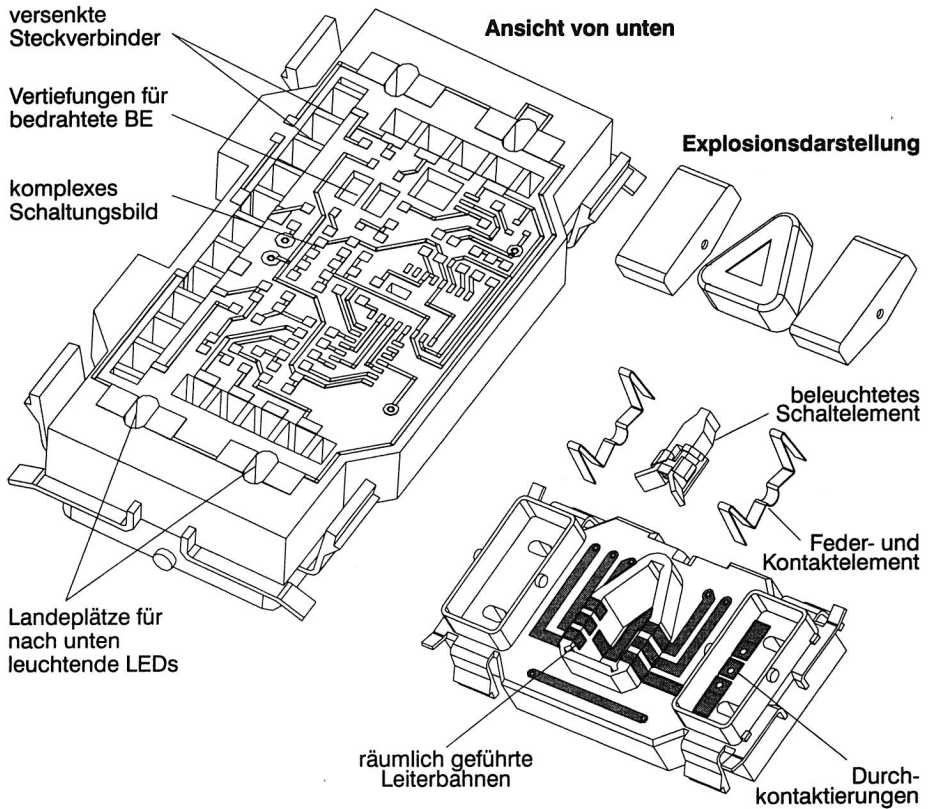


Bild 56: 3D-Konstruktion eines Kfz-Armaturenbrettschalters in MID-Technologie

Mit den oben analysierten Rationalisierungspotentialen leiten sich neue Anforderungen für rechnergestützte Werkzeuge zur Produktgestaltung ab (Bild 55). Sie stellen die Grundlage für die Module der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten holonischen Entwicklungsumgebung für mechatronische Produkte, insbesondere den Molded Interconnect Devices, dar.

Wichtigste Voraussetzung für die Realisierung der aufgezeigten Rationalisierungspotentiale ist die rechnerinterne Abbildung der Produkte als 3D-Volumen-Modelle. Sie sind die informationstechnische Grundlage für die im folgenden genannten Funktionen. Wesentliches Grundkonzept ist die Bereitstellung eines multidisziplinären Werkzeuges, das in der Lage ist, Wechselwirkungen unterschiedlicher Effekte, insbesondere aus Elektronik und Mechanik, zu berücksichtigen. Darüberhinaus ist die Integration anderer Bereiche wie der Optik, Magnetik, Thermodynamik etc. anzustreben.

Zur Evaluierung der konstruierten Produkte auf Funktionserfüllung, Belastbarkeit und Zuverlässigkeit sind umfangreiche Möglichkeiten der Produktanalyse und -simulation bereits in der Planungsphase zur Verfügung zu stellen. Dazu gehören analytische und numerische Berechnungen (FEM, BEM etc.), elektrische, thermische und kinematische Simulationen, Untersuchungen zur elektro-magnetischen Verträglichkeit, zum Schwingungs-, Vibrations- und thermischen Verhalten sowie zur Nachahmung wirklichkeitsnaher Umweltbedingungen.

Um eine technisch sinnvolle und wirtschaftliche Produktion sicherstellen zu können, müssen Module zur Prozeßanalyse und -simulation in die Entwicklungsumgebung eingepaßt werden. Diese allgemein auch als Manufacturing Rule Checks (MRC) zu bezeichnenden Werkzeuge können online während des Konstruktionsprozesses die Aktionen des Bedieners überprüfen und bei Verstößen gegen definierte Fertigungsregeln Meldungen generieren oder automatisch Verbesserungen vorschlagen. Parallel zum Fortschritt in der Detaillierung der Produktgestaltung ist eine konstruktionsbegleitende Kalkulation notwendig, die durch eine schrittweise Verfeinerung die zu erwartenden Herstellungskosten transparent macht (vgl. Kapitel 8.2).

Mit Hilfe der konzipierten Entwicklungsumgebung können die Entwicklungszeiten signifikant verkürzt werden. Der rechnergestützte Produktgestaltungsvorgang erstreckt sich dabei bis zur Erstellung virtueller Prototypen. Die vormals zwingende Notwendigkeit der Herstellung physikalischer Muster wird durch die realitätsnahe, rechnerinterne Darstellung des Endproduktes abgeschwächt.

6.3 Rechnergestützte Kopplung von Entwurfswerkzeugen für elektronische und mechanische Anwendungen

Ein erster Ansatz zur Realisierung funktionsbereichsübergreifender Anforderungen ist die rechnerbasierte Verbindung der spezialisierten CAD-Werkzeuge für den elektronischen und den mechanischen Entwurf. So wird auf der einen Seite der Gestaltung elektronischer Mo-

dule die Möglichkeiten mechanischer CAD-Systeme eröffnet und andererseits der mechanischen Konstruktion der Einbau der Elektronik erleichtert.

Bild 58 verdeutlicht das Kopplungsprinzip: Mit Hilfe von Datenextraktionsprogrammen, sog. Postprozessoren, können die auszutauschenden Informationen aus den spezifischen Datenmodellen unterschiedlicher CAD-Systeme ausgelesen werden und in die Grammatik einer neutralen Repräsentationsform formatiert werden. Aus dieser systemunabhängigen Schnittstelle können umgekehrt die produktbeschreibenden Daten der jeweils anderen Welt herausgelesen und in das eigene Konstruktionswerkzeug geholt werden (Preprozessor).

6.3.1 Definition der ECAD/MCAD–Schnittstelle ENIF

Obwohl das Problemfeld des Produktdatenaustausches hinlänglich bekannt ist, existiert bis dato kein Standard für die Beschreibung der Leiterplattendaten [192], der für diese Problemstellung produktiv einsetzbar ist. Diese Aussage wird sowohl durch die eingehende Analyse bestehender normierter Schnittstellen (EDIF, IGES etc.) als auch durch Ansätze führender Systemanbieter (GIFF [192], ELMIF [193], Gerber-Format etc.) untermauert. Als Grundlage für die weiteren Entwicklungen wurde der in der industriellen Praxis etablierte Ansatz *Neutral Interface Format (NIF)* [194] gewählt, um eine möglichst breite Akzeptanz sicherzustellen. Um darüberhinaus ein einheitliches, gemeinsames Medium zum Datenaustausch zwischen beliebigen CAD-Systemen bereitzustellen, mußte NIF signifikant erweitert werden. Das im Rahmen dieser Arbeit konzipierte *Extended Neutral Interface Format (ENIF)* repräsentiert die größte gemeinsame Informationsmenge, die von mechanischen und elektronischen CAD-Systemen gemeinsam genutzt werden können, übernimmt zur Darstellung der Daten aber die in NIF definierte Syntax.

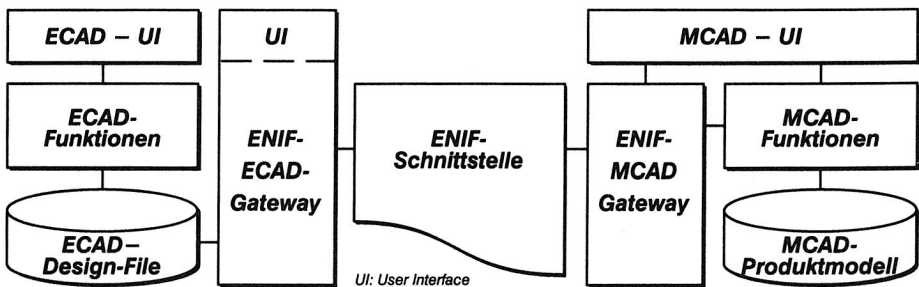


Bild 57: Systemstruktur der ECAD-MCAD-Kopplung

Zur Extraktion der relevanten Information aus den ECAD-Design-Dateien wurde ein mit Hilfe der UNIX-Tools LEX und YACC [195] generierter Parser (ENIF-ECAD-Gateway) entwickelt, der die Datenstrukturen rechnerintern initialisiert und anschließend in die ENIF-Schnittstelle schreibt. Umgekehrt können die initialisierten Strukturen auch durch manipu-

lierte Daten aus einer ENIF-Datei verändert werden und in einem spezifischen ECAD-Datenformat abgelegt werden (Bild 57).

Auf der Seite des Mechanik-CAD werden die ENIF-Dateien verwendet, um in *Unigraphics* ein Volumenmodell der Leiterplatte zu erzeugen (Abbildung 57). Über eine Indexiertabelle werden die Volumenmodelle der Bauteile aus einer Bibliothek entnommen, auf die im folgenden noch näher eingegangen wird (Kapitel 6.3.3). Die Übertragung der ENIF-Daten ins MCAD-System wurde auf Basis der Programmierschnittstelle des MCAD-Systems (*User-Functions*) realisiert, die den Zugriff auf die MCAD-Daten von außen ermöglicht.

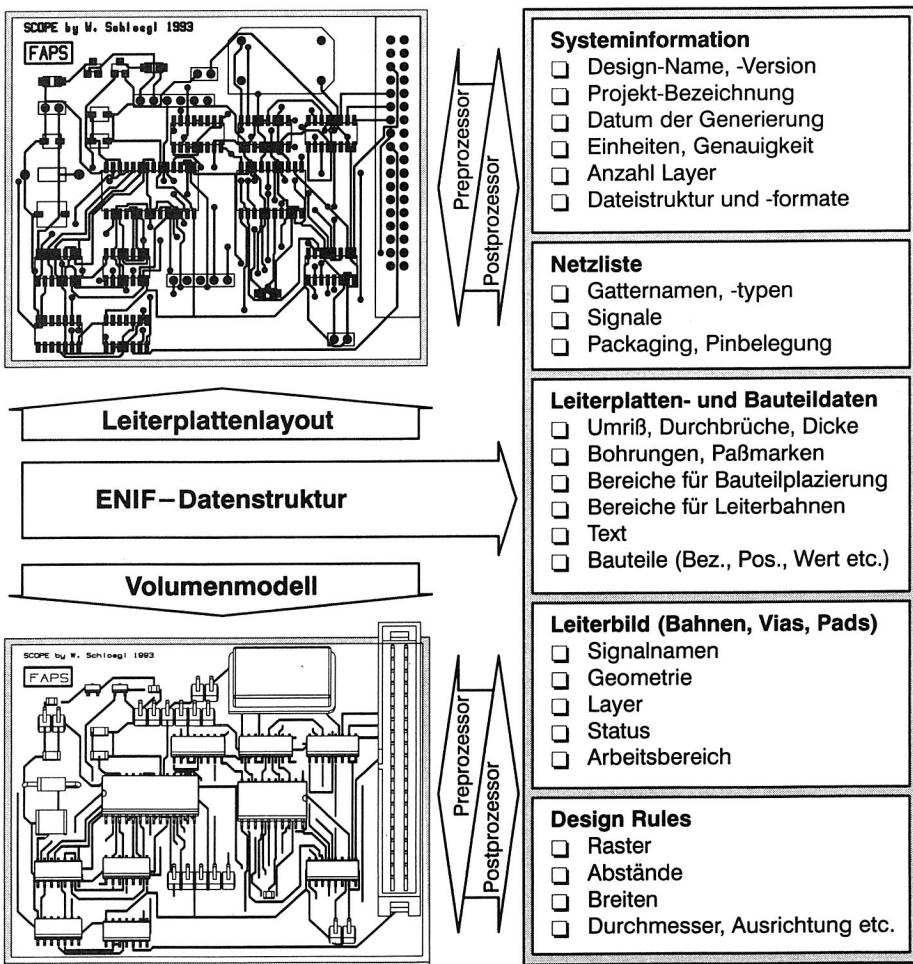


Bild 58: Software-Schnittstelle ENIF zwischen ECAD und MCAD

Die in Abbildung 58 aufgeführten Leiterplattendaten werden in ENIF auf mehrere unabhängige Datenmodule strukturiert. Je nach Anforderung hat man somit einen selektiven Zugriff auf den relevanten Teil der Daten. Durch diese Aufteilung wird die Möglichkeit gegeben, unterschiedliche Informationen auch in unterschiedlichen Formaten zu übertragen. Damit kann nicht nur das NIF-Format weiterhin verwendet werden, sondern auch z. B. die Netzliste in EDIF, die Leiterbahnen im Gerber-Format oder die Leiterplattenkontur in IGES.

Die Datenmodule sind wie folgt strukturiert:

1. Systeminformation

Dieses übergeordnete Informationsmodul wird zur Verwaltung der einzelnen Dateien generiert. Neben der Zuordnung von spezifischen Modulen zu gewählten Datenbeschreibungsformaten werden hier auch allgemeine, projektbezogene Informationen gespeichert.

2. Netzliste

Diese Datei beschreibt die logische Funktion der elektronischen Schaltung und definiert die Gatterein- und -gänge, die Signale und deren Zuordnung zu physikalischen Komponenten.

3. Leiterplatte und Bauelemente

Hier wird die elektronische Baugruppe geometrisch beschrieben. Dies beinhaltet z. B. die Kontur mit Ausbrüchen und Bohrungen, reservierte Bereiche (sog. Areas für Platzierung, Durchkontaktierungen, Verdrahtung etc.) sowie die Lage, Orientierung und Beschreibung der Bauelemente. Eine Untermenge dieses Segmentes entspricht in etwa der NIF-Schnittstelle.

4. Leiterbild

Neben den geometrischen und fertigungstechnischen Informationen der Leiterbahnen, Pads und Durchkontaktierungen werden auch deren Signaldaten beschrieben.

5. Design-Rules

Mit Hilfe dieser Datei ist es möglich, die im ECAD definierten Regeln zur Herstellbarkeit elektronischer Baugruppen darzustellen (z. B. Abstände zwischen Signalen, Tracks, Pads, Vias, Bauteilen etc., Grenzwerte wie Leiterbahnbreiten, Bohrdurchmesser etc. oder Defaultwerte wie Durchmesser, Breiten, Orientierungen etc.).

6.3.2 Ablauf des elektronisch-mechanisch – simultanen Entwurfprozesses³²

Bild 59 skizziert das kooperative Arbeiten mit gekoppelten Elektronik- und Mechanikkonstruktionssystemen. Die Gehäusekonstruktion für ein elektronisches Produkt erfolgt im MCAD-System. Aus den räumlichen Gegebenheiten ergibt sich für die verwendete Leiterplatte die Kontur. Diese wird bei herkömmlichen Leiterplatten aus der Einbausituation, bei

³² Bei der Implementierung der rechnergestützten ECAD/MCAD-Kopplung wurde der Verfasser von Herrn cand. Inf. Werner Aurbach und Herrn cand. Inf. Roland Klingert unterstützt.

flexiblen oder räumlichen Leiterplatten aus einer Flächenabwicklung abgeleitet. Die Leiterplattenkontur kann bei Applikationen, die keine kritischen Anforderungen an die Miniaturisierung besitzen (Computer, Unterhaltungselektronik etc.), auch auf der Seite des Elektronik-Layouts gewählt werden. Diese Anwendungen werden hier jedoch nicht näher betrachtet. Folgende Vorgaben für eine Leiterplatte werden im MCAD festgelegt und müssen an die Elektronikkonstruktion übergeben werden:

- Leiterplattenaußenkontur
- Positionen geometrisch festgelegter Bauteile (Stecker, Anzeigeelemente usw.)
- Durchbrüche, Bohrungen
- Vorgeschriebene und verbotene Zonen für Bauelemente
- Vorgeschriebene und verbotene Zonen für Leiterbahnen
- Vorgeschriebene und verbotene Zonen für Durchkontaktierungen

Parallel zur geometrischen Gestaltung kann innerhalb der Elektronikkonstruktion die gewünschte elektronische Funktion durch Komposition elementarer Funktionen synthetisiert werden. Dies erfolgt zweistufig in getrennten Modulen innerhalb der EDA-Systeme: Im logischen Entwurfssystem werden elektrische Elementarfunktionen, durch grafische Symbole repräsentiert, in einer Arbeitsfläche rein logisch angeordnet und miteinander durch Linien verbunden, was der elektrischen Verschaltung entspricht. Grundlage der logischen Beschreibung einer elektronischen Schaltung bildet daraus abgeleitet der Stromlaufplan³³. Der funktionelle Entwurf wird von einem Netzlisteneditor unterstützt, die Ergebnisse werden an das rechnergestützte Layoutsystem übergeben.

Das Layoutsystem liest die sogenannte Netzliste ein, die die logischen Grundelemente sowie deren elektrische Verschaltung repräsentiert. In dem Layoutsystem wird nun das Packaging, das Zuordnen logischer Elementarfunktionen zu realen physikalischen Bauelementen vorgenommen. Aus dem Packaging abgeleitete Bauformen werden im nächsten Schritt, der Bauteilplatzierung, nach den Optimierungskriterien minimale Verbindungslängen und minimale Anzahl an Durchkontaktierungen durchgeführt. Diese Aufgabe wird vom Rechner durch Automatismen zur Platzierung sowie durch Tauschvorgänge für Gatter und Pins unterstützt. Eventuelle Veränderungen im logischen Stromlaufplan werden durch *Back Annotation* automatisch aktualisiert.

Zur Überprüfung auf mögliche Kollisionen zwischen den gesetzten Bauelementen und der Gehäusegeometrie müssen die Bauteilbezeichnungen mit deren Positionen und Orientierungen an das mechanische CAD-System übergeben werden. Hier können visuell am Bildschirm oder mit Hilfe automatischer Algorithmen Überschneidungen erkannt werden und gegebenenfalls Bauelemente verschoben werden. Die optimierten Positionen müssen wieder zurück ins ECAD übertragen werden.

³³ Unter einem Stromlaufplan versteht man einen Schaltplan, der die Funktionsweise von elektronischen Produkten aufgelöst nach Stromwegen als elektrische Schaltung beschreibt. Der Stromlaufplan enthält alle Bauelemente, Anschlüsse, Verbindungsleitungen u. ä. Im Stromlaufplan verwendet man zur symbolischen Darstellung der einzelnen elektronischen Komponenten Schaltzeichen.

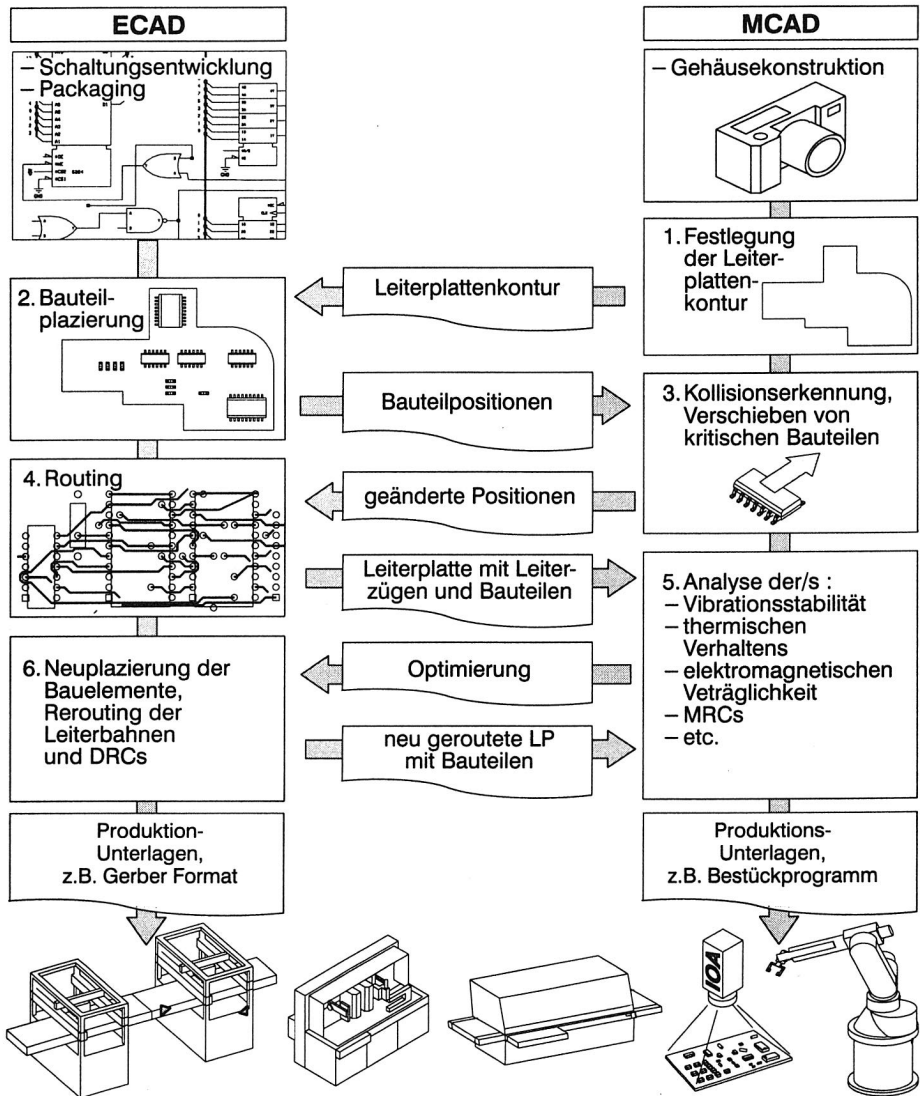


Bild 59: Prinzipielle Arbeitsweise bei Kopplung von ECAD mit MCAD–Systemen

Auf Basis der verifizierten Platzierung werden die Anschlüsse der Bauelemente verbunden. Moderne EDA-Systeme unterstützen diesen Schritt durch sog. *Auto-Router*. Dabei können auch bereits verlegte Leiterbahnen verschoben (*Push-and-Shove–Router*) oder wieder aufgetrennt und neu verlegt werden (*Rip-and-Retry–Router*). Hier greifen auch automatische

Prüffunktionen wie z. B. der *Netlist Connectivity Check (NCC)* zum Test der Übereinstimmung zwischen logischem und physikalischem Entwurf oder die *Design Rule Checks (DRC)*.

Die gesamte Beschreibung des vollständigen Leiterplattenlayouts kann zu detaillierten Analysen wiederum ins mechanische CAD-System übertragen werden. Auf Basis des online generierten volumenbasierten Modells können mechanische Festigkeit, thermisches Verhalten, elektronisch-mechanische Wechselwirkungen etc. untersucht und die elektronische Baugruppe dahingehend optimiert werden. Dazu sind Bibliotheken notwendig, die neben der rein geometrischen 3D-Darstellung ebenso elektronische, mechanische, thermische und weitere Eigenschaften von elektronischen Bauteilen, Schaltungsträgern, Umwelteinflüssen etc. repräsentieren können. Auf dieser Basis können, ausgehend von den zweidimensionalen Ausgangsdaten aus dem ECAD, umfangreiche Simulationen und Berechnungen erstellt werden. Die nötigen Änderungen müssen dem ECAD-System wieder zurückgeführt werden, um sie dort durch NCCs oder DRCs zu verifizieren. Dieser Vorgang muß u. U. auch in mehreren Regelschleifen durchlaufen werden.

Aus den für den jeweiligen Zielprozeß am besten geeigneten Produktmodellen werden die Fertigungsunterlagen generiert. So bietet sich z. B. die Ausgabe der Gerberdaten aus dem ECAD und die Fertigungs- oder Montageprogramme aus dem MCAD an. Mit Hilfe dieses realisierten Konzeptes können alle abwickelbaren räumlichen Schaltungen in kürzeren Entwicklungszeiten, mit höherer Qualität und Sicherheit, ohne sonst notwendige physikalische Prototypen, fertigungsgerechter und damit effizienter konstruiert sowie die organisatorische Trennung der elektronischen und mechanischen Entwicklung vermindert werden.

6.3.3 Konzeption einer fachbereichsübergreifenden Konstruktions-Bauelemente – Bibliothek

Die erhöhten Anforderungen an die Funktionalität fachbereichsübergreifender Entwurfswerkzeuge führt auch zu einer Erweiterung des Informationsinhaltes und der Informationsbreite von Konstruktions-Bibliotheken für mechatronische Komponenten. So müssen aus einer Vielzahl unterschiedlicher technischer Felder Bauteile verfügbar sein, wie z. B. aus:

- Elektrik (Kabel, Stecker, Schalter etc.)
- Elektronik (aktive und passive elektronische Komponenten, Anzeigeelemente etc.)
- Mechanik (Befestigungs- und Versteifungselemente, Standardgehäuse etc.)
- Elektro-Mechanik (Relais, Motore etc.)
- Akustik (Mikrophone, Lautsprecher etc.)
- Optik (Linsen, Reflektoren, Streuscheiben etc.)

Daraus folgt bereits, daß die notwendige Informationsbreite über die reine Integration der elektronischen und mechanischen Bauteil-Bibliotheken weit hinausgeht. Zur Berücksichti-

gung der Effekte aus den unterschiedlichen Bereichen sowie deren Wechselwirkungen müssen rechnerintern umfangreiche Komponenten-Eigenschaften gespeichert und verarbeitet werden können, wie z. B.:

- Geometrische Eigenschaften (3D-Modelle, wie z. B. die SMD-Bauformen in Bild 60, Bauteil-Koordinatensysteme etc.)
- Elektronische Eigenschaften (elektrische Werte R, C, I, Zuordnung Gatter-Pins etc.)
- Mechanische Eigenschaften (Festigkeit, Elastizität etc.)
- Thermische Eigenschaften (Kapazität, Leitung, Strahlung etc.)
- Optische Eigenschaften (Transparenz, Farbe, Brechungsindex etc.)

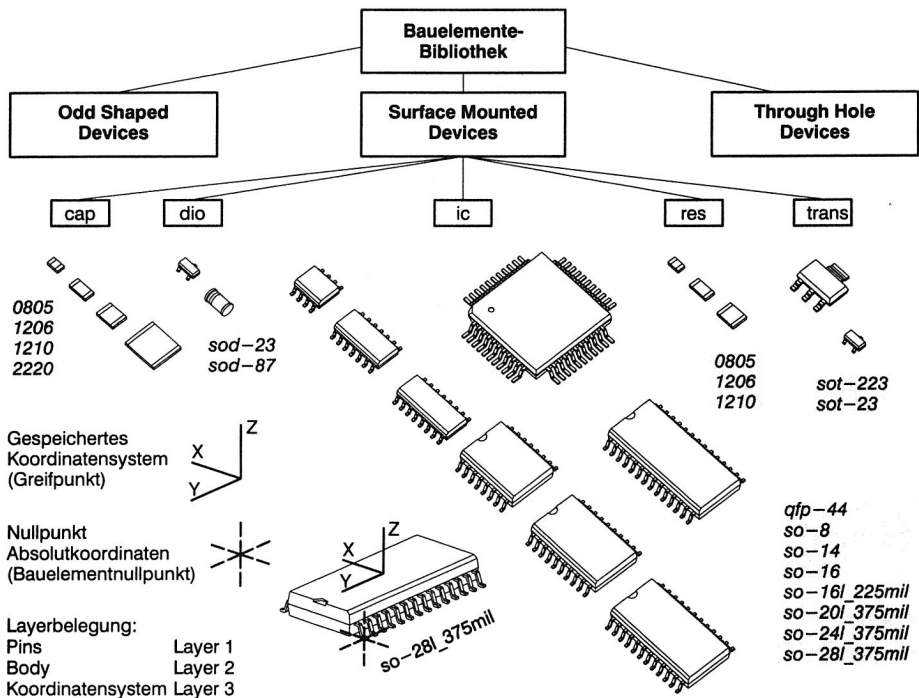


Bild 60: Daten-Konventionen der Bauelemente-Bibliothek a. Bsp. ausgewählter SMDs

Die einzelnen Komponenten werden nicht einzeln in allen enumerierten Varianten abgelegt, sondern beim interaktiven oder automatischen Zugriff näher spezifiziert und online in den definierten Eigenschaften parametrisiert. Ein aus der Bibliothek ausgewähltes Kühlblech kann so z. B. über die Vorgabe der geometrischen Abmaße und den thermischen Eigenschaften des Werkstoffes spezifiziert werden, woraus sich die Kühlleistung ableiten läßt.

Umgekehrt kann jedoch auch eine gewünschte Kühlleistung eingegeben und die geometrischen Abmaße rechnergestützt vorgeschlagen werden.

Zur Verwaltung der umfangreichen Informationen wird die Funktionalität verfügbarer 3D-Geometrie-Modellierer genutzt. Dieses Konzept besitzt im Gegensatz zu der Möglichkeit, die vielfach nur alphanumerischen Daten in einer relationalen Datenbank abzulegen, die Vorteile der Repräsentation in einem einheitlichen Produktmodell und damit einfachere Konsistenzsicherung sowie weitaus kürzere Zugriffszeiten. Nachteilig ist jedoch der höhere Entwicklungsaufwand für Funktionen zur Datenorganisation und -abfrage.

6.4 Konzipierung des systemtechnischen Entwicklungswerkzeuges

Während oben beschriebener Ansatz zur Kopplung der Entwurfssysteme für die mechanische und elektronische Konstruktion für den Großteil der Anwendungen eine pragmatisch sinnvolle Lösung bietet, werden in Zukunft nur solche Werkzeuge die wachsenden Anforderungen zur Gestaltung mechatronischer Produkte erfüllen können, die demgegenüber einen fachbereichsintegrierten Entwurf unterstützen. Solche ganzheitlichen Konstruktionswerkzeuge vermeiden die sonst notwendigen Regelschleifen zwischen den verschiedenen speziellen CA-Werkzeugen und unterstützen damit die Verkürzung der Entwicklungszeit. Erst dadurch wird die Gestaltung von komplexen mechatronischen Produkten realisiert, die rechnergestützt bisher nicht möglich war.

Dies gilt insbesondere für:

- Räumliche elektronische Prozeßflächen, die nicht- oder schwer abwickelbare Geometrien besitzen, wie z. B. Kugel- oder Freiformflächen.
- Berücksichtigung elektronisch-mechanischer Wechselwirkungen,
- Generierung von Fertigungsdaten für räumliche Schaltungsträger (Werkzeug-Bau, Laser-Strukturierungsprogramme etc.)

Realisierte Ansätze für diese Problemstellung existieren erst für die Beschreibung Integrierter Schaltkreise [185]. Die Schaltungslayoutentwicklung räumlicher elektronischer Baugruppen wurde dagegen bisher jedoch noch nicht wissenschaftlich betrachtet. Im folgenden wird das in Abbildung 61 illustrierte, fachbereichsübergreifende Entwurfswerkzeug *OMNICAD* beschrieben [177].

6.4.1 Systemaufbau und Datenrepräsentation

Die Fähigkeit zur Realisierung rechnergestützter Werkzeuge zur Verarbeitung produktbeschreibender Daten mechanisch-elektronischer Produkte liegt im wesentlichen in der Fähigkeit, Produktinformationen, die in konventionellen rechnergestützten Werkzeugen zum Stand der Technik noch auf pragmatisch gelösten, teilweise jedoch anachronistischen Da-

tenrepräsentationsformen basieren, verarbeiten zu können. In der Elektronik werden Produktdaten im wesentlichen durch listenartige Aufzählungen verwendeter Bauelemente sowie deren elektrischen Verbindung beschrieben. Im mechanischen Bereich hat in den letzten Jahren durch den Übergang von zwei- zu dreidimensionalen Beschreibungsformen und der Verwendung komplexerer Grundelemente zumindest teilweise eine moderne Beschreibungsmethodik Einzug gehalten.

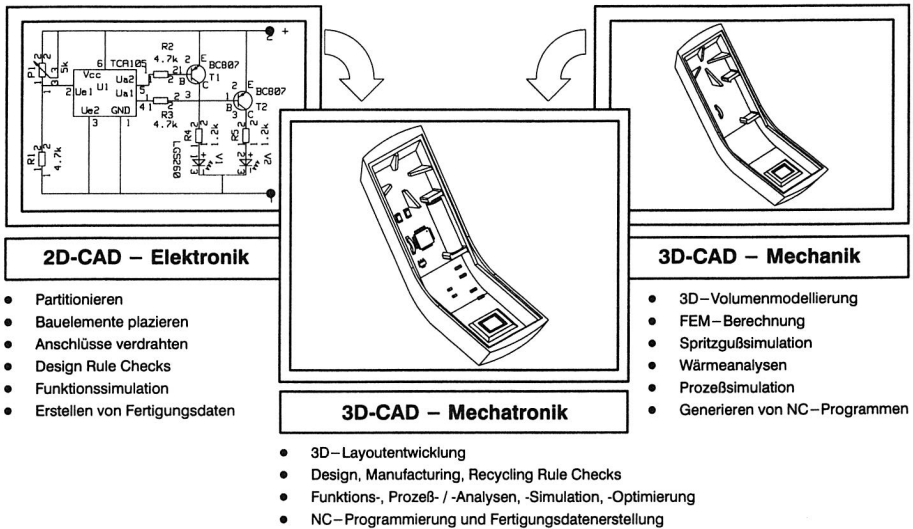


Bild 61: Integration von ECAD- und MCAD-Funktionen in OMNISCAD

Die Entwicklung der breiten Palette geometriebasierender CA-Systeme führte zu systemeigenen Datenstrukturen, die naturgemäß nicht modellkompatibel sind. Die seit Beginn der 70er Jahre unternommenen Anstrengungen zum Datenaustausch in Projekten wie *IGES*, *VDAFS*, *CAD*I* und *SET* auf der mechanischen sowie *VNS*, *VHDL*, *TDF* und *EDIF* auf der elektronischen Anwendungsseite hatten damit prinzipiell nur das Ziel, innerhalb ihres Anwendungsbereiches einen rechnergestützten Datenaustausch zu ermöglichen.

Erst durch die Initiierung der Standardisierung im Rahmen des (*PDES*/) *STEP* – Projektes Mitte der 80er Jahre wurde erstmalig versucht, eine zunächst von Problembereichen unabhängige, formal einheitliche Beschreibungsform für Produktdaten beliebiger Anwendungsbereiche zu normieren. Mit dieser einheitlichen Beschreibungsmethodik und den in Entwicklung oder Normung befindlichen Anwendungsprotokollen wird es nun erstmals möglich, rechnergestützte Werkzeuge zur Unterstützung des Produktentstehungsprozesses zu entwickeln, die von proprietären Abspeicherungsformaten unabhängig sind. So können die Datenformate nach ISO – CD10303/21 (*EXPRESS* [196]) genutzt werden, um Produktda-

ten in STEP-konformer Weise über Massenspeicher zwischen unterschiedlichen CAD-Systemen auszutauschen. In einem weiteren Schritt lassen sich die in *STEP* vorgegebenen Beschreibungsformate auch zum Bau sogenannter *STEP*-Modellierer nutzen, die auf Basis interner Datenstrukturen nach *STEP*-Schema arbeiten.

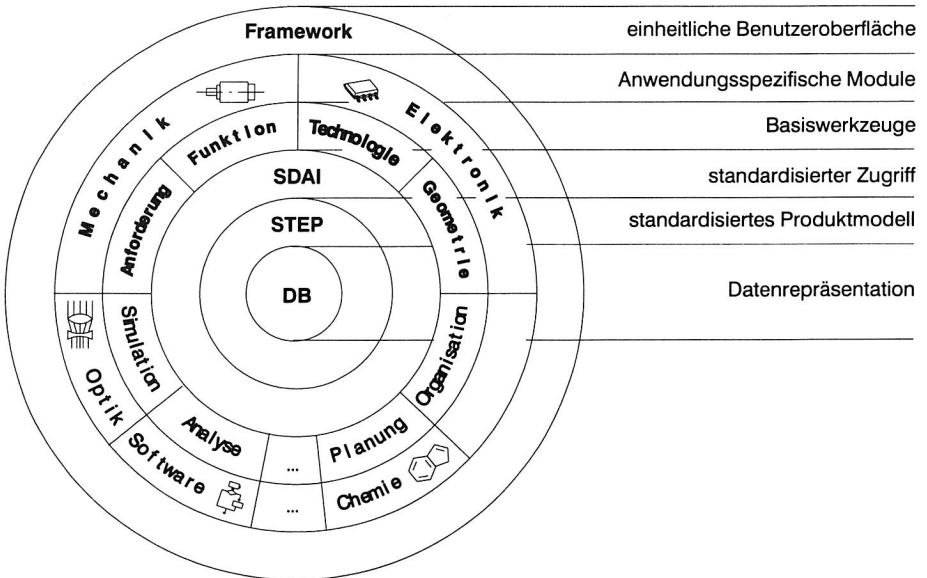


Bild 62: Schalenmodell OMNICAD

Der Realisierungsansatz *OMNICAD* nutzt die Formulierung des anwendungsunabhängigen Datenmodelles von *STEP* als Grundlage für die Entwicklung eines holonisches Entwurfswerkzeuges, das in der Lage ist, beschreibende Informationen aus unterschiedlichen Fachbereichen, wie insbesondere der Elektronik und der Mechanik, zu verwalten und zu verarbeiten.³⁴

Als funktioneller Kern dieser Entwicklungsumgebung dient ein dreidimensionaler Geometriemodellierer nach B-Rep (Boundary Representation) – Beschreibungsschema, der gegenüber anderen Geometriedatenrepräsentationsformen wie CSG (Constructive Solid Geometry) in dem hier geplanten Einsatzbereich geeigneter ist. Von den am Markt erhältlichen Modellierern (z. B. ACIS (Spatial Technology) oder CV-DORS (Computervision)) wurde der in vielen kommerziellen CAD-Systemen integrierte PARASOLID (EDS) für die ersten prototypischen Realisierungen ausgewählt.

³⁴ Bei der Konzeption von OMNICAD wurde der Verfasser von Herrn Dipl.-Ing. Thomas Krebs unterstützt.

6.4.2 Funktionen zum 3D-Plazieren von Bauelementen³⁵

In dem vorgestellten Realisierungsansatz wurde noch darauf verzichtet, für die Beschreibung der mechatronischen Systemfunktionalität einen logischen Modellierer zu implementieren. Da sinnvollerweise auch logischer und physikalischer Entwurf integriert bearbeitet werden sollten, ist diese Möglichkeit konzeptionell vorgesehen. So kann in einem ersten Schritt die logische Definition der elektronischen Schaltung auch aus einem Elektronik-CAE-System übernommen werden.

Die Übertragung der Netzliste wird über eine EDIF-Schnittstelle realisiert, die einen herstellernunabhängigen Austausch der Designinformationen elektrischer Schaltungen erlaubt. Sie enthält im wesentlichen bereits die Hauptzelle, die alle Verbindungen enthält, deren Instanzen, die Bauelemente repräsentieren und in deren Elementzellen nur ihre Anschlüsse definiert sind.

Mit oben vorgestellten Ansatz ermöglicht OMNISCAD ein völlig neues Vorgehen bei der Gestaltung mechatronischer Produkte. Elektronische und mechanische Funktionen werden nicht mehr parallel zueinander oder gar sukzessive nacheinander konstruiert, sondern in einem integrierten Arbeitsablauf. Dies bedeutet für die Platzierung, daß nicht mehr ausschließlich elektronische Komponenten positioniert werden, sondern der Zusammenbau der gesamten Baugruppe (oder des gesamten Gerätes) integriert mit der geometrischen Gestaltung interaktiv am Rechner abläuft.

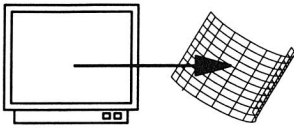
Ausgangspunkt zur Produktgestaltung sind neben den elektronischen Bauelementen, die in der Netzliste vorgegeben sind, insbesondere auch die geometrischen Randbedingungen, die sich z. B. aus dem Einbau des betrachteten Moduls oder auch durch ergonomische Anforderungen ergeben können. So werden Stecker, Tasten oder Schalter, Anzeigen, und Befestigungspunkte mit Hilfe der Funktionen des dreidimensionalen Modellierers zuerst an den Positionen im Raum angeordnet, die von außen vorgegeben sind. Unter Berücksichtigung dieser vorgegebenen Schnittstellen kann, unter Verwendung der umfangreichen Funktionen moderner dreidimensionaler Geometriemodellierer, die Außenhaut des zu entwickelnden Produktes optimal nach technischen, wirtschaftlichen und gestalterischen Gesichtspunkten entworfen werden. Aus dieser Geometrie können die Prozeßflächen für die Montage der elektronischen Bauelemente abgeleitet werden. Diese Auswahl ist für die folgenden Schritte der Komponentenplatzierung relevant und kann automatisch vom System vorgeschlagen werden oder interaktiv durch Anklicken einer bestimmten Fläche mit dem Cursor am Bildschirm erfolgen. Die spezifizierten Flächen werden farblich markiert und, falls vorgegeben, das Platzierungsraster in Form von Gitterlinien angezeigt.

Die zu positionierenden Bauelemente werden aus der Netzliste gelesen und dem Benutzer in einer Liste zum interaktiven Plazieren angeboten. Alternativ besteht auch die Möglichkeit, auf alle in der Bibliothek abgelegten Komponenten zuzugreifen. Nach Auswahl eines Bauelementes aus dieser Liste wird in einer beliebigen Ansicht am Bildschirm eine Fläche

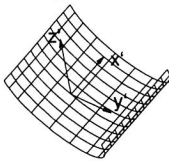
³⁵ Bei der Implementierung der Platzierungsfunktionen wurde der Verfasser von Herrn cand. Inf. Peter Bartelsen unterstützt.

durch Mausklick definiert, auf die das Bauelement automatisch normal zur Oberfläche gesetzt wird (Bild 63). Mit Hilfe der Maus oder der Drehknöpfe kann diese Komponente dann entweder im voreingestellten Koordinatensystem bewegt und gedreht oder über die gewählte, beliebig geformte Oberfläche verschoben werden (Bild 64 zeigt die Benutzeroberfläche zur Platzierung). Aus Gründen der möglichen Rechenleistung der verwendeten Workstations werden diese Operationen noch mit einem abstrahierten, geometrisch vereinfachten Modell durchgeführt, das erst bei Bestätigung der Position durch das exakte Modell ersetzt wird.

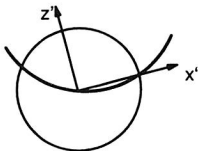
1. Projektion des Auswahlpunktes auf die Oberfläche des Schaltungsträgers



2. Ermittlung eines Koordinatensystems durch partielle Ableitung



3. Erzeugung von Schnittpunkten und Ausrichtung des Koordinatensystems



4. Einblenden eines Quaders als Bauteil- platzhalter
5. Platzieren des Bauteils

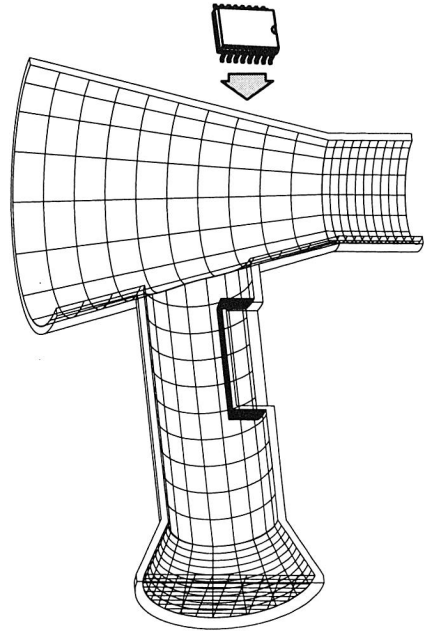
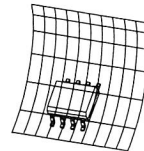
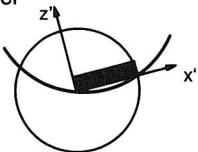


Bild 63: Rechenschritte bei der Platzierung eines Bauteils

Aus den Informationen der Netzliste können an den jeweiligen physikalischen Kontakten die Netzverbindungen durch alphanumerische Anzeige der Potentialnamen oder durch sog.

Gummibänder, die die Anschlüsse grafisch durch Linien verbinden, angezeigt werden. Damit können bereits visuell nach Verbindungslängen optimierte Positionen gefunden werden.

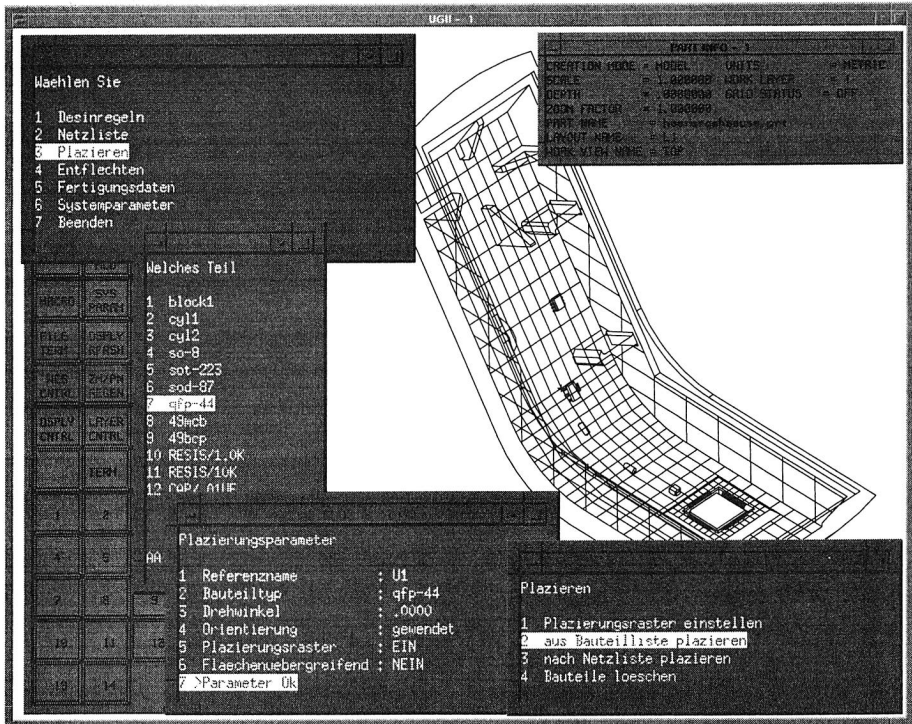


Bild 64: 3D-Plazieren elektronischer Komponenten in OMNISCAD (Bildschirmkopie)

Diese Platzierung von elektronischen, elektromechanischen oder auch mechanischen Bauelementen aus einer Bibliothek kann wiederum direkten Einfluß auf die geometrische Gestalt des Gehäuses nehmen. So können durch die integrierten Funktionen zur Geometrie-Modellierung online z. B. Platzierungsflächen für hochpolige Bauelemente planarisiert oder Einbauprobleme großer Komponenten durch Vergrößerung des Gehäuses an bestimmten Stellen entschärft werden.

Molded Interconnect Devices sind zum heutigen Entwicklungsstand noch durch relativ einfache elektronische Schaltungen gekennzeichnet, die, insbesondere bei Two-Shot-Molding-Applikationen, auf sehr komplexen Geometrien realisiert sind. Aus diesem Grund ist insbesondere die oben beschriebene interaktive Unterstützung der Platzierung von Bauelementen für die MID-Konstruktion wichtig. Auf diesen Grundfunktionen aufbauend können im weiteren auch automatische Algorithmen implementiert werden.

6.4.3 Rechnergestütztes interaktives 3D-Routing

Die Anzeige der elektrischen Verbindungen mit Hilfe der alphanumerischen Potentialnamen oder der grafischen Gummibänder bildet den Ausgangspunkt für die kurzschlußfreie Entflechtung der Leiterbahnen³⁶. Im dreidimensionalen Entwurf wird der Aufwand für die Rechnerunterstützung durch zusätzliche Freiheitsgrade, die die verschiedenen MID-Herstellungsverfahren ermöglichen, erschwert:

- beliebige räumliche Verbindungen der Leiterbahnen,
- beliebige Querschnittsformen der Leiterbahnen (siehe Bild 65),
- Leiterbahnen auf der Oberfläche oder im Schaltungsträger.

Die Anforderungen, die an die dreidimensionale Verdrahtung der elektrischen Verbindungen für räumliche Schaltungsträger gestellt werden, entsprechen damit einer Vereinigung der Funktionalitäten der bekannten Werkzeuge zur Leiterbahn-Entflechtung und der Kabelbaumverlegung.

Um die Flexibilität und den Funktionsumfang bezüglich interaktivem und automatischem Routing aus dem Elektronik-Layoutsystem erhalten zu können, müssen im dreidimensionalen Produktmodell angepaßte Datenstrukturen eingesetzt werden. Die Modellierung als "Solid" entspräche zwar den geometrischen Gegebenheiten der Leiterbahnen; das Erstellen bzw. das nachträgliche Verlegen oder Verschieben dieses komplexen Körpers würde jedoch immensen Aufwand bedeuten. Stattdessen werden die elektrischen Verbindungswege ähnlich wie im 2D-Layoutsystem nur durch eine Folge von Stützpunkten, die hier allerdings beliebig im Raum liegen können, sowie durch spezifische Konstruktionsregeln definiert. (Abbildung 65 beschreibt dazu die rechnerinterne Darstellung.) Die Eckpunkte der Leiterbahnen können interaktiv am Bildschirm eingegeben, automatisch von einem Routing-Algorithmus berechnet und nachträglich leicht geändert werden.

Die konkrete Geometrie der Leiterbahnen wird online zur interaktiven Bearbeitung generiert, nicht jedoch rechnerintern gespeichert. Die Ableitung der exakten geometrischen Ausprägung geschieht über sog. Designregeln, die am Beispiel der Leiterbahnen folgende Informationen enthalten:

- Querschnittsform der Leiterbahnen
- Eckenverlauf (rectangular, chamfered, rounded, smoothed)
- fertigungstechnische Restriktionen (minimaler Biegewinkel, minimale Breite etc.)
- Werkstoffe und Schichtaufbau (Kupfer, Zinn-Blei, Nickel, Gold etc.)

Diese Informationen können einzelnen Teilsegmenten, ganzen Leiterbahnen oder der gesamten Schaltung zugeordnet und jederzeit geändert werden, ohne geometrische Modellierungsoperationen durchführen zu müssen. Dies ist z. B. bei Änderung der elektrischen Anforderungen oder der Herstellungsprozesse von besonderer Bedeutung. Da bestimmte

³⁶ Bei der Implementierung der Entflechtungsfunktionen wurde der Verfasser von Herrn Dipl.-Ing. Knuth Götz unterstützt.

(subtraktive) Fertigungsprozesse am besten durch die Trennung zwischen den leitenden Bereichen beschrieben werden können, ist es sinnvoll, auch die inverse Definition des Schaltungsbildes durch die nichtleitenden Bereiche vorzusehen.

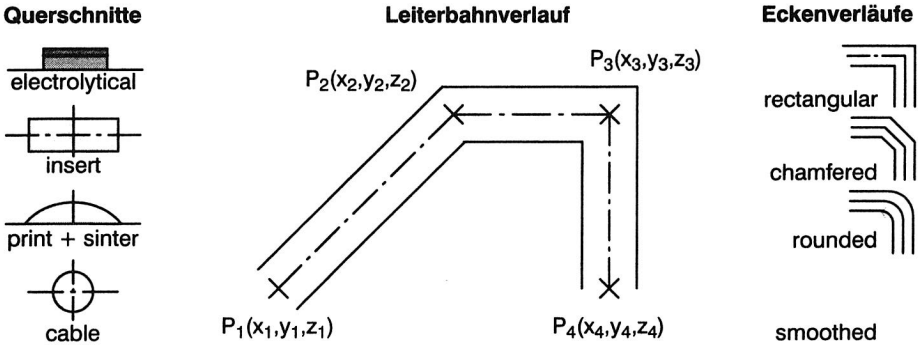


Bild 65: Rechnerinterne Darstellung der Leiterbahngeometrie

Darüberhinaus sind gleichzeitige Operationen auf mehrere Leiterbahnen, wie z. B. bei der Verlegung von Bussen, über eine Gruppenfunktionalität konzeptionell vorgesehen. Analog zu automatischen Routingverfahren (z. B. nach Lee [197]) im planaren Anwendungsfall können die vorgestellten interaktiven Funktionen auch nach den vorangehend bereits vorgestellten Verfahren automatisiert werden.

6.4.4 On-line Überprüfung von Konstruktions- und Fertigungsregeln (DRC)

Bevor ein Leiterplattenlayout an die Fertigung weitergegeben wird, muß die gesamte Leiterplatte einer kompletten Prüfung nach funktions- und fertigungstechnischen Kriterien unterzogen werden. Diese Überprüfung auf Einhaltung der benutzerdefinierten Design-Rules sollte möglichst schon on-line während des Entwurfs erfolgen. Wenn dies nicht oder nur teilweise möglich ist, müssen die Design-Rule-Checks gesondert am Ende der Optimierung durchgeführt werden. Diese Prüfungen umfassen:

- Vergleich aller physikalischen Leiterverbindungen mit den vorgegebenen logischen Verbindungen auf fehlende Verbindungen oder Kurzschlüsse
- Kontrolle der definierten minimalen Abstände (siehe Bild 66)
- Überprüfung des Schaltungsträgers auf Einhaltung der definierten Fertigungsregeln

Zu diesen Fertigungsregeln gehören insbesondere die minimal möglichen Abstände zwischen den verschiedenen Komponenten (SMDs, THDs, Tracks, Pads, Vias, Holes etc.) der elektronischen Baugruppe, die nun auch im Dreidimensionalen abgeprüft werden müssen. (Bild 66 zeigt beispielhaft einige dieser Regeln.)

Die bereits im planaren Anwendungsfall bekannten Konstruktionsregeln müssen für räumliche Schaltungsträger umfassend erweitert werden. Dies gilt z. B. für folgende neuen Möglichkeiten:

- möglicher Bestückungswinkel relativ zur Horizontalen für elektronische Bauelemente,
- Positionieren eines Bauelementes auf gekrümmten oder mehreren Flächen
- geometrische Einschränkungen für den Verlauf von Leiterbahnen,
- Querschnittsform und Eckenverlauf der Leiterbahnen,
- negativ oder positiv definiertes Schaltungsbild (Beschreibung der leitenden oder nichtleitenden Bereiche)

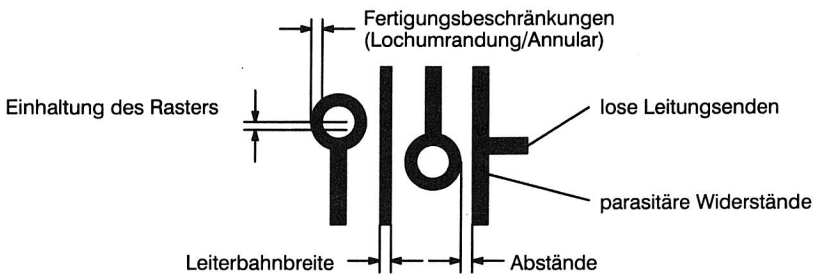


Bild 66: Online zu überprüfende Fertigungsregeln

Da die vielfältigen Herstellungstechnologien für räumliche Schaltungsträger (z. B. Two-Shot-Molding, Laserstrukturieren, In-Mould etc.) auch eine völlig unterschiedliche geometrische Gestaltung der Schaltungsträger selbst und deren Leiterbilder erfordern, ist konzeptionell vorgesehen, die konkrete geometrische Ausprägung des Schaltungslayouts, so weit wie möglich über Design-Rules zu steuern. Dies unterstützt die Forderung nach einer möglichst späten Festlegung auf eine bestimmte Fertigungstechnologie. Das Schaltungslayout kann dadurch relativ unabhängig von dem letztlich ausgewählten MID-Verfahren entworfen werden, durch nachträgliche Veränderung der implementierten Konstruktionsregeln kann die Geometrie die einzelnen Leiterbahnen automatisiert generiert werden. Dies bedeutet z. B. für das Heißprägen, daß aufgrund der Fertigungsmöglichkeiten des Klischees der Leiterbahnverlauf geglättet, für das Laserstrukturieren das Schaltungsbild durch minimale trennende Bereiche definiert oder für die Formstrukturierungsverfahren, daß das elektrische Layout in das Spritzgußwerkzeug integriert werden muß.

In vorangegangenen Kapitel wurden eingehend die Defizite der existierenden Konstruktionssysteme aufgezeigt sowie Lösungen zur Erweiterung deren Möglichkeiten für die Gestaltung räumlicher Schaltungsträger durch Kopplung der spezialisierten CAD-Systeme für den elektronischen und mechanischen Entwurf realisiert. Darüberhinaus wurde ein fachbereichsübergreifendes Entwicklungswerkzeug konzipiert und prototypisch implementiert.

7. CAD/CAM-Verfahrensketten für mechatronische Produkte

Durch den Einsatz rechnergestützter Entwurfsmethoden, automatisierter Leiterplattenlayouts sowie computergesteuerter Bestückungsautomaten konnten in jedem einzelnen Bereich der konventionellen Flachbaugruppenproduktion hohe Produktivitätssteigerungen erzielt werden. Dies ist ein Grund, warum gerade in der Elektronik die Rechnerunterstützung in der Entwicklungsphase gegenüber anderen Anwendungsgebieten führend, die Durchdringung von CAD-Systemen am größten und der Automatisierungsgrad in der Montage am höchsten ist [198].

Ziel dieses Kapitels ist es, diese in der planaren Technologie gewohnte durchgängige Informationsverarbeitung von der Entwicklungs- in die Fertigungsebene auch für dreidimensionale Schaltungsträger zur Verfügung zu stellen. Da die Aufgabenstellung der rechnergestützten Ableitung der Fertigungsdaten für den räumlichen Anwendungsfall ungleich schwieriger ist, existieren bis dato nur rudimentäre Lösungen. In Abbildung 51 wurde bereits das Zusammenwirken der einzelnen Module der Entwicklungsumgebung für mechatronische Produkte illustriert. Im folgenden werden diese Werkzeuge im einzelnen beschrieben.

Die rechnergestützte Ableitung der Steuerinformationen für die koordinierte Beschriftung räumlicher Belichtungsmasken mit Hilfe eines Lasers und die sechssachsige Bewegung eines Gelenkarmroboters zur Manipulation der Masken unter dem Beschriftungsfeld des Lasers stellt enorm gesteigerte Anforderungen an den Maskenherstellungsprozeß. In Zusammenarbeit zwischen Laserhersteller, Anwender und Universität wurde die im folgenden Kapitel 7.1 beschriebene Prozeßkette zur Serienreife geführt.

Auf Grund der kinematisch weitaus komplexeren räumlichen Elektronik-Bestückung gestaltet sich die Ableitung der NC-Programme für Bestückungsautomaten oder Industrieroboter sehr viel schwieriger. Im Rahmen dieser Arbeit wurden dazu alternative, für unterschiedliche Einsatzfälle konzipierte Strategien und dazu korrespondierende Software-Werkzeuge entwickelt (siehe Kapitel 7.2): AGASIS ist ein Optimierungs-Tool für Schaltungsträger der in der Praxis bisher ausschließlich eingesetzten Typen 0, 1A und 1B, das für die automatisierte Bestückung rechnergestützt kollisionsfreie und optimierte Bestücksequenzen generiert [199]. Für geometrisch komplexere MIDs auch der Typen 2 und 3 können durch Einsatz der kinematischen Simulation Montageprozesse geeignet geplant werden. Die Übertragung der NC-Daten in die Fertigungsebene wurde durch die Entwicklung einer spezifischen CAD/CAM-Verfahrenskette ermöglicht [200]. Das Problem unterschiedlicher Repräsentationsformen und Kommunikationsprotokolle kann durch den Einsatz des für das IPC entwickelten standardisierten Datenformates *IPC-D-355* egalisiert werden, das bereits auf die Anforderungen räumlicher Schaltungsträger ausgerichtet ist [201].

7.1 CAD/CAM-Verfahrenskette für die 3D-Laser-Strukturierung

In Kapitel 4.3 wurden die Entwicklungsarbeiten zur Adaption der Folienmaterialien an die Anforderungen der Laser-Beschriftung der räumlichen Belichtungsmasken für die Strukturierung von photosensitiven Folien für MIDs vorgestellt. Ergänzend dazu wurde die Ableitung der NC-Informationen für die Fertigungsgeräte Laser und Industrieroboter der Beschriftungszelle automatisiert sowie deren Prozeßablauf optimiert³⁷.

7.1.1 Koordinierter Verfahrensablauf von Gelenkarmroboter und Laser

In Abbildung 68 wird der Verfahrensablauf zur Beschriftung der tiefgezogenen Belichtungsmasken veranschaulicht: Die Photomaske wird auf ein Werkstück aufgespannt und durch angelegtes Vakuum definiert in dieser Position gehalten. Ein 6-Achs–Gelenkarmroboter positioniert die verschiedenen Beschriftungsebenen des Werkstücks senkrecht unter dem Laser, dessen Strahl mit Hilfe zweier Galvospiegel entsprechend dem LeiterbahnlAYOUT ausgeleitet wird und die Masken selektiv schwärzt. Um eine gleichmäßige Beschriftung zu gewährleisten, muß die Maske während des Beschriftungsvorgangs immer in der Brennebene des Lasers gehalten werden. Verschiedene Leiterbahnbreiten werden durch mehrere nebeneinanderliegende oder überlappende Laserlinien erzeugt.

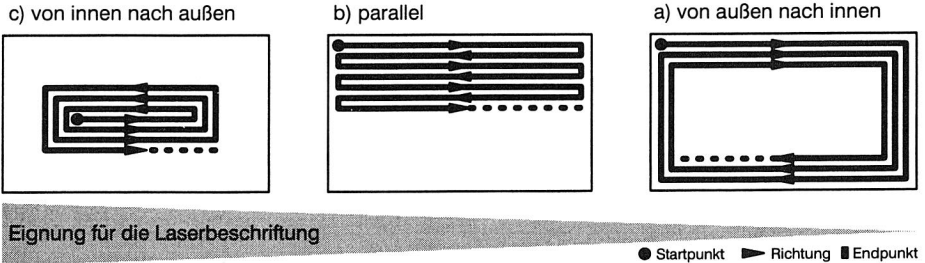


Bild 67: Alternative Strategien zur Flächenfüllung

Im Elektronik-Layoutsystem müssen die verschiedenen Beschriftungsebenen abgewickelt werden und getrennt bearbeitet werden. Die so erzeugten Geometrieeinformationen des Leiterbildes werden über die Gerber-Schnittstelle des Elektronik-CAD–Systems an einen Laser-Code–Generator transferiert, der die Gerberdaten in sog. Laser-Logo–Daten konvertiert. Das daraus erzeugte Laser-Formprogramm enthält neben den Beschriftungsinformationen auch die Unterprogramme zur Steuerung des Roboters und die korrespondierenden Markierungspositionen. Damit kontrolliert die Lasersteuerung die Aktionen des Roboters.

Um einen industriellen Einsatz der CAD/CAM-Verfahrenskette für die Serienproduktion gewährleisten zu können, mußten Funktionen zur optimierten Füllung von Flächen, zur kom-

³⁷ Bei der Durchführung der Versuchsreihen wurde der Verfasser von Herrn cand. Ing. Thomas Krautheim unterstützt.

fortablen Behandlung von im ECAD verwandten Blendengeometrien und Füllbereichen sowie zur steuerungstechnischen Berücksichtigung der Robotergenauigkeit zur Verfügung gestellt werden.

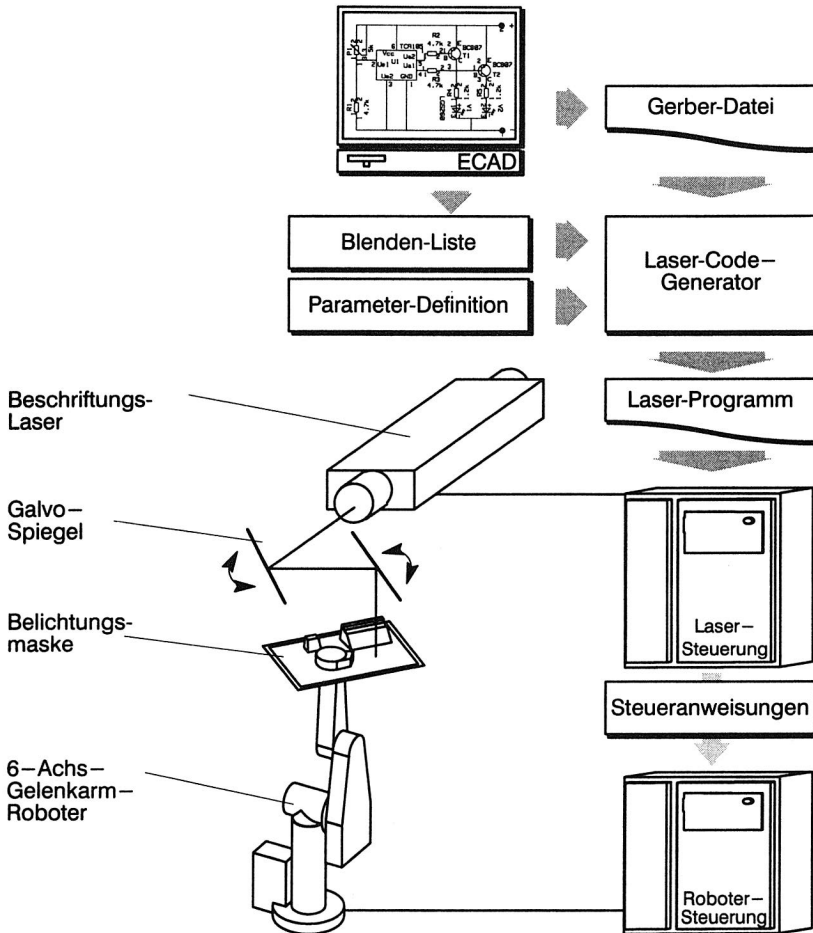


Bild 68: CAD/CAM-Verfahrenskette für die 3D-Laser-Beschriftung

Der Durchmesser der Fokusfläche des Lasers beträgt weniger als $100\mu\text{m}$. Typische Leiterbahnbreiten betragen zwischen $200\mu\text{m}$ und $500\mu\text{m}$. Zur vollständigen Schwärzung muß der Laser diese Bahnen mehrmals abfahren. Prinzipiell bestehen die technisch sinnvollen Möglichkeiten, die Linien parallel, von innen nach außen oder von außen nach innen abzufahren (Bild 67). In experimentellen Versuchen wurden die optimalen Prozeßparameter ermittelt

(Schreibgeschwindigkeit 110mm/s, Impulsfrequenz 3000/s, Lampenstrom 120A). Dabei wurde auch festgestellt, daß die konzentrische Füllung der Flächen von außen nach innen zur sukzessiven Überhitzung des Folienmaterials und zum Verdampfen der beschreibbaren Pigmente führt. Dadurch wird die Mitte der zu füllenden Bereiche für den nachfolgenden Belichtungsvorgang mittels UV-Licht lichtdurchlässig. Der entwickelte Füllalgorithmus berücksichtigt dies und bietet zur besseren Ableitung der Wärme alternativ eine parallele Schraffierung oder eine Füllung von innen nach außen an.

7.1.2 Entwicklung einer durchgängigen CAD/CAM-Verfahrenskette

Zur Konvertierung der vom Elektronik-CAD-System gelieferten Gerber-Datei, die das Leiterbild in Form von Bewegungsanweisungen und einer Blendensteuerung für Vektorplotter enthält, in das vom Laser verarbeitbare Laser-Formprogramm wurde ein sog. Laser-Code-Generator eingesetzt. Dieser spezielle Postprozessor kann Leiterbahnen direkt in Steuerdaten für den Laser umwandeln (siehe Bild 68). Vektorplotter besitzen darüberhinaus die Möglichkeit, häufig wiederkehrende Formelemente als sog. Flashes durch spezielle Blenden auf einmal zu belichten. Diese Flashes werden für den Laser in Makros umgewandelt, die unter der korrespondierenden Blendennummer in einer Unterprogrammliste gespeichert werden. Diese Makros können in beliebiger, optimierter Weise abgelegt oder auch interaktiv bearbeitet werden. Die Definition der Parameter dient zur Angabe der zu konvertierenden Blenden-Dateien, zur Bestimmung der Schreibbreite des Lasers sowie für die Eingabe eines Zoomfaktors oder einer Koordinatenverschiebung.

Um eine ausreichende Wiederholbarkeit des Laser-Roboter-Systems garantieren zu können, mußte die Wiederholgenauigkeit statistisch überprüft werden. Ausgehend von einer Referenzbeschriftung wurden an unterschiedlichen Stellen des Beschriftungsfeldes jeweils vier Kreuze gelasert, die anschließend mit einem Videomeßgerät vermessen wurden. Die Versuche wurden mit und ohne Bewegung des Roboters sowie unter Beteiligung einer unterschiedlicher Anzahl von Achsen gefahren, um eventuell auftretende signifikante Abweichungen besser bestimmen zu können (Bild 69 zeigt die Ergebnisse des Versuches mit allen bewegten Achsen). In den Diagrammen erkennt man die relativ großen, absoluten Positionierungenauigkeiten, die zwischen 150 und 450µm liegen. Die deutlichen Unterschiede in den Positionierabweichungen zwischen den Werten δx_1 , δx_4 bzw. δy_3 , δy_4 und δx_2 , δx_3 bzw. δy_1 , δy_2 resultieren aus der Tatsache, daß die Position 4 in den Mittelpunkt des Laserbeschriftungsfeldes gelegt wurde, und alle Positionen, die näher am Beschriftungsrand liegen, größere Ungenauigkeiten erfahren.

Die für den Beschriftungsprozeß relevante Wiederholgenauigkeit liegt jedoch weit unter den ermittelten Werten der Positionierungenauigkeit. Unter der Voraussetzung, daß die entstandenen Abweichungen einer Normalverteilung entsprechen, ergab sich die größte Standardabweichung aller durchgeführten Versuche zu 18,656µm. Mit einem Vertrauensbereich von mehr als 99% (drei Standardabweichungen 3σ) lagen alle Messungen im Bereich von ca. $\pm 50\mu\text{m}$. Aus den Werten der Positioniergenauigkeit wurden auch die Winkelabweichungen

rechnerisch ermittelt, deren schlechtester Wert deutlich unter $0,005^\circ$ lag. Die Wiederholgenauigkeit des Laser-Roboter-Systems ist damit ausreichend gut für die zu erfüllende Aufgabe. Aus den gewonnenen Erfahrungen wurde eine Methodik zur Minimierung der Programmierarbeit beim Positionieren entwickelt, die die komplette CAD/CAM-Kette umfaßt, und mögliche Fehler bei der Positionierung unterdrückt.

Versuchsgeräte und -parameter

Industrieroboter Puma 200

Override: 20%

bewegte Achsen: 6

Basel NdYag Beschriftungslaser LBI600

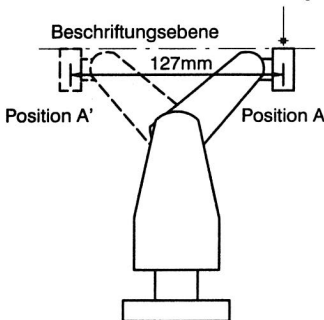
Wellenlänge: 1064nm

Leistung: 60W

Linienstärke: ca. $150\mu\text{m}$

Brennweite: 160mm

Versuchsaufbau und Roboterbewegung



Testmuster

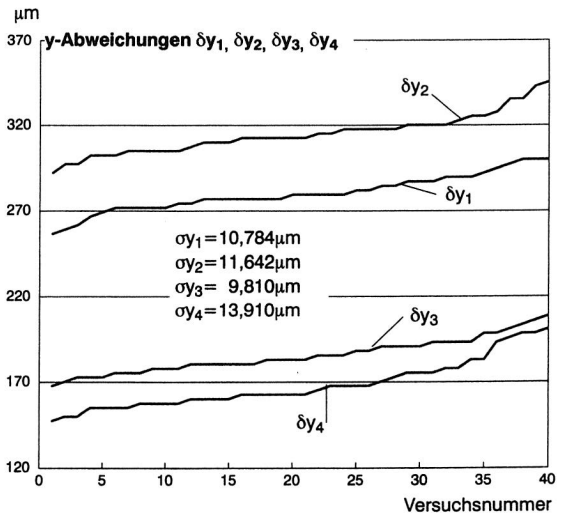
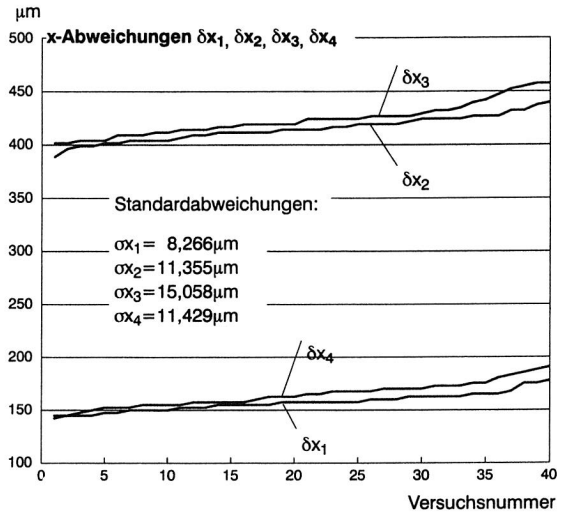
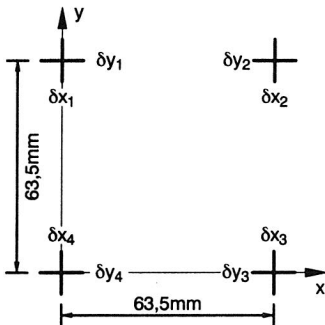


Bild 69: Versuchsergebnisse zur Ermittlung der Wiederholungsgenauigkeit

7.2 Rechnerintegrierte Produktdatenverarbeitung für die Bestückung

7.2.1 Kollisionskontrollierte Bestücksequenzgenerierung³⁸

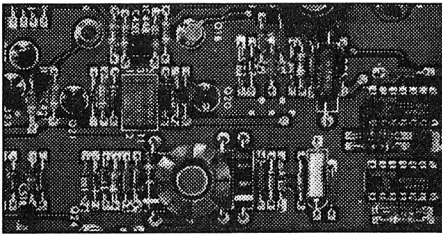
Wie in Kapitel 5.1 gezeigt wurde, stellen räumliche Schaltungsträger besondere Anforderungen an die automatisierte Bestückung elektronischer Bauteile. Die Zugänglichkeit der einzelnen Landepositionen sowie mögliche Kollisionen zwischen bewegten und unbewegten Elementen müssen bereits bei der Planung der Bestückprozesse berücksichtigt werden. Weiterhin sollten die großen Rationalisierungspotentiale, die in der Optimierung der Montage der Bauelemente liegen, erschlossen werden [209].

Im Rahmen dieser Arbeit wurde dazu das Werkzeug *AGASIS (Automated Generating and Simulation of Insertion Sequences)* zur kollisionskontrollierten Bestücksequenzplanung entwickelt, das in der Lage ist, aus den Bestückinformationen des Elektronik-CAD-Systems automatisch eine kollisionsfreie Bestücksequenz zu ermitteln [199]. Der generierte Ablauf wird darüberhinaus nach vom Benutzer definierten Kriterien in Bezug auf Zeit oder Kosten optimiert.

Das Prozeßplanungssystem *AGASIS* ist für einen übergreifenden Einsatz in den verschiedenen Aufgabenbereichen der Produktentstehung Konstruktion, Arbeitsplanung und Fertigung konzipiert (Bild 70). In der Leiterplattenkonstruktion dient es in einem sehr engen Regelkreis als sog. Manufacturing Rule Checker. Es überprüft die Bauelementeabstände auf Bestückbarkeit und zeigt Plazierungsfehler an. Dabei werden die Greifwerkzeuge der unterschiedlichen Automaten für Axial-, Radial-, DIP- und SMD-Bauelemente berücksichtigt. Beim Einsatz von Clinchwerkzeugen werden potentielle Kollisionen auch auf der Unterseite detektiert. Durch simultane Berechnung und tabellarische Anzeige der Einzel- und Gesamtbestückkosten, die aus Verfahrenswegen, Bestückkopf- und Werkstückträger-Bewegungen, Greifwerkzeugwechsel etc. resultieren, werden dem Layouter die Auswirkungen seiner Konstruktionsarbeit auf die Fertigungskosten transparent.

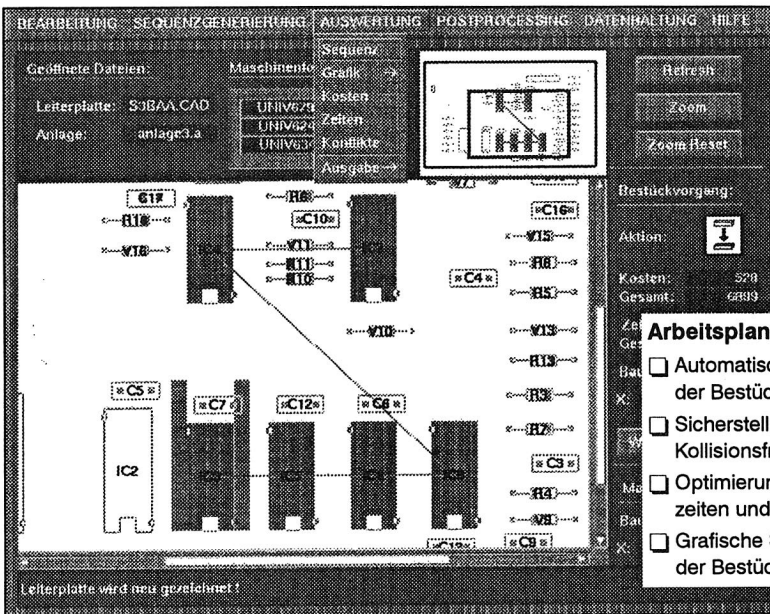
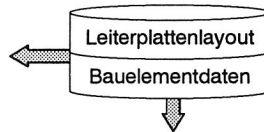
Hauptzielbereich für den Einsatz von *AGASIS* ist die Fertigungsvorbereitung, in der die Bestückprogramme erstellt werden. Die komplexe Problemstellung der Ermittlung von kollisionsfreien und optimierten Bestückabläufen kann bei mit einer hohen Anzahl von elektronischen, insbesondere bedrahteten Bauelementen eng gepackten Schaltungsträgern nicht mehr manuell durchgeführt werden. *AGASIS* generiert automatisch zeit- und kostenoptimierter Bestücksequenzen, die vom Arbeitsplaner am Bildschirm kontrolliert und interaktiv verbessert werden können.

³⁸ Bei der Implementierung von *AGASIS* wurde der Verfasser von Herrn cand. Inf. Oliver Kesper, Herrn cand. Ing. Thomas Schramm und Herrn cand. Inf. Johannes Treiber unterstützt.



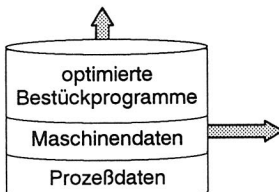
Leiterplatten-Layout

- ☐ Überprüfung des Leiterplatten-Layouts
- ☐ Manufacturing Rule Checks (MRC)
- ☐ Berechnung der Bestückzeiten und -kosten



Arbeitsplanung

- ☐ Automatische Generierung der Bestücksequenzen
- ☐ Sicherstellung der Kollisionsfreiheit
- ☐ Optimierung der Bestückzeiten und -kosten
- ☐ Grafische Simulation der Bestückung



Produktion

- ☐ Verwaltung der NC-Programme
- ☐ Kommunikation mit Maschinenrechner

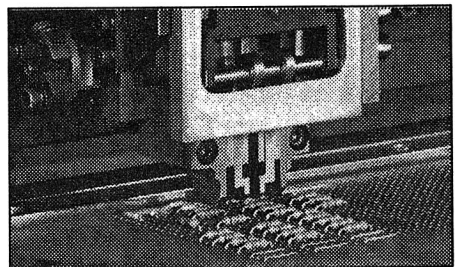


Bild 70: Funktionen von AGASIS in verschiedenen Aufgabenbereichen

Die Optimierung der Bestücksequenzen kann durch eine Vielzahl von Parametern vom Benutzer gesteuert werden und folgt den Hauptzielen:

- Kollisionsfreiheit
- Möglichst vollständig automatisierte Montage
- Kostenoptimale Bestücksequenz
- Minimierung des Verfahrwegs

Nach einer detaillierten Analyse verschiedener anwendbarer Algorithmen zur rechnergestützten Generierung der Bestücksequenz [210] wurde der sog. A* (Assignment and Patching)-Algorithmus in AGAS/S implementiert (siehe Bild 71). Er erzeugt Ergebnisse, die nur geringfügig von der optimalen Lösung abweichen. Dazu wird ein Bauelement als Startpunkt definiert, von dem ausgehend ein Suchbaum, in dem jeder Ast einem der enumerisch möglichen Wege durch die Leiterplatte entspricht, aufgebaut wird. Der Suchraum, dessen Summe der Möglichkeiten über die Fakultät der Bauelementezahl definiert ist, muß nach der kostengünstigsten kollisionsfreien Alternative durchsucht werden.

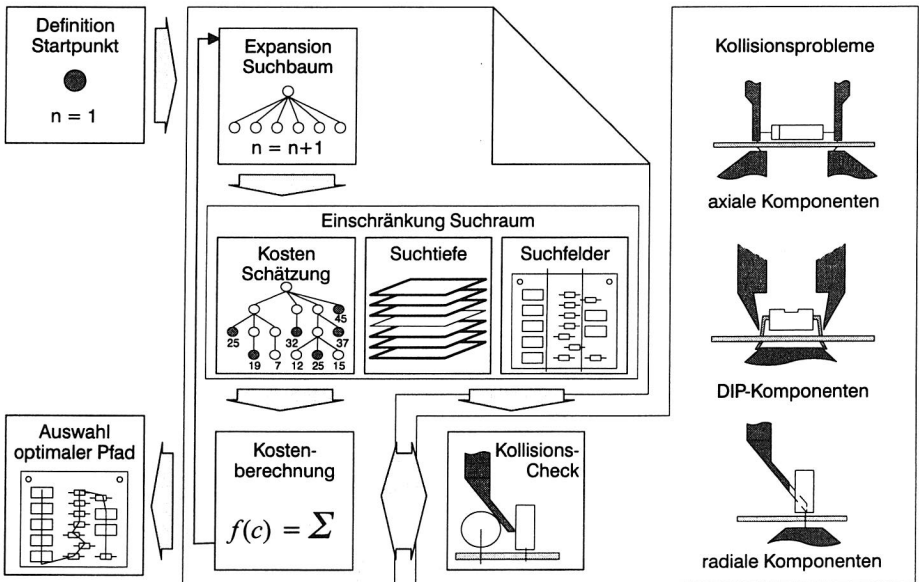


Bild 71: Algorithmus zur rechnergestützten Generierung der Bestücksequenzen

Um dieses Problem, das schon bei relativ geringer Anzahl an elektronischen Komponenten rechnerisch nicht mehr zu beherrschen ist, lösen zu können, wird der A*-Algorithmus durch drei intelligente Tricks beschleunigt, die den aktuellen Suchraum beschränken. Diese Such-

raumbeschränkung ist für den Benutzer parametrierbar. Dadurch kann die Qualität der Ergebnisse und der dazu nötige Rechenzeitbedarf von außen gesteuert werden.

- *Kostenabschätzung*

Diese Funktion ist in der Lage, die folgenden, noch durchzuführenden Bestückungskosten durch Summieren der minimal möglichen Kosten der Einzelaktionen im voraus abzuschätzen. Äste, die an diesem Punkt bereits erkennbar keine optimale Lösung mehr liefern können, werden im weiteren nicht mehr verfolgt und vom Suchbaum abgeschnitten.

- *Suchtiefe*

Durch diesen Faktor kann eingestellt werden, wie weit die Gesamtkosten vom System voraus zu berechnen sind. Maximal möglicher Wert ist dabei die Anzahl der Bauelemente.

- *Suchbereiche*

Da die Kosten zu einem großen Teil durch die Verfahrenwege bestimmt werden, ist es sinnvoll, das nächste zu bestückende Bauelement nur in einem räumlich begrenzten Bereich zu suchen. In Abhängigkeit der Vorzugsrichtungen der Bestückungsautomaten kann der betrachtete Schaltungsträger in mehrere Suchbereiche aufgeteilt werden.

Parallel zur Optimierung der Bestückkosten und -zeiten verifiziert eine online Kollisionsüberprüfung einen sicheren Bestückungsvorgang. Dazu muß die Geometrie der potentiellen Kollisionspartner im Detail analysiert werden. Überschneidungen zwischen folgenden Objekten werden verglichen (Bild 71 zeigt ausgewählte Kollisionsprobleme):

- Bestückkopf mit Greifwerkzeugen
- Clinch-Werkzeuge
- Werkstück, bzw. räumlicher Schaltungsträger
- Bauelemente (axiale, radiale, DIP-, SMD- und Sonderbauelemente)

Die automatisch generierte Bestücksequenz kann grafisch am Rechner simuliert werden. Der erfahrene Arbeitsplaner kann auf diese Weise die Qualität der Sequenz überprüfen und gegebenenfalls noch interaktiv Verbesserungen vornehmen. Dazu werden neben dem Schaltungsträger mit seinen möglichen 3D-Elementen und den bereits gesetzten Komponenten auch die Geometrie des Greifers und der vom Bestückkopf zurückgelegte Weg am Bildschirm dargestellt. Die oben genannten Aktionen werden im einzelnen angezeigt. Zur besseren Übersicht stehen umfangreiche Möglichkeiten der grafischen Manipulation wie Panning oder Zooming zur Verfügung. In Abbildung 70 sind verschiedene Bildschirmkopien der Benutzeroberfläche von AGASIS dargestellt.

Zur Beurteilung der Güte der erstellten Bestückprogramme werden automatisch tabellarische Auswertungen erstellt. Sie enthalten Informationen über Kosten- und Zeitanteile für die verschiedenen Bauelemente und die ausgeführten Aktionen. Damit kann sehr einfach erkannt werden, an welcher Stelle das Layout oder das NC-Programm noch Schwachstellen aufweist. Die Bestückprogramme werden im maschinenspezifischen Format ausgegeben und an die betreffenden Automaten transferiert.

AGASIS wurde in *DOPE* (*Databased Optimization System for Production in Electronics*), ein integriertes Werkzeug zur Arbeitsplanung in der Elektronik, integriert. *DOPE* verbindet Konstruktion und Produktion über eine durchgängige CAD/CAM-Verfahrenskette. Die marktentscheidende Time-to-Market wird damit wesentlich verringert. Programmierstätigkeiten an der Maschine entfallen; Eingabefehler werden damit eliminiert. Die direkte Übertragung von Bestückprogrammen und Rüstvorgaben an die Maschinen macht die Datenübermittlung schnell und sicher. Durch effiziente automatisierte Planungsalgorithmen erschließt *Dope* mögliche Zeiteinsparungen von bis zu 50% [212].

7.2.2 Kinematische Simulation automatisierter Montagesysteme

Aus der Anwendung räumlicher Schaltungsträger resultiert eine enorme Komplexitätssteigerung für die automatisierte Montage. Die optimale Platzierung der mechanischen und elektronischen Komponenten, die kinematische Interaktion verschiedener zueinander bewegter Teile und insbesondere die Abschätzung der Zugänglichkeit und Kollisionsfreiheit der Bestücksysteme in der Montage machen den Einsatz der kinematischen Simulation bereits in der Planungsphase sinnvoll³⁹. Damit können vielfältige detaillierte Untersuchungen ohne zeitaufwendige und teure Prototypen durchgeführt werden [211], wie z. B.:

- Kinematische Analysen der bewegten Teile des mechatronischen Produktes,
- Ablaufstudien und Kollisionschecks der Montageprozesse,
- Montagetakzitermittlung und -optimierung,
- Generierung der NC-Programme für die Handhabungssysteme

Durch die Anwendung der im 6. Kapitel beschriebenen holonischen Entwicklungsumgebung liegen die Produktbeschreibungen der rechnergestützt gestalteten mechatronischen Systeme bereits in Form dreidimensionaler Daten vor. Diese Volumenmodelle können direkt für die kinematische Simulation verwendet werden. Bild 51 zeigt den Informationsfluß zwischen dem entwickelten Konstruktionssystem und den Werkzeugen der Prozeßplanung. Produktinformationen konventioneller planarer Leiterplatten können aus dem Layoutsystem *HP PCDS* über die *ECAD-MCAD*–Schnittstelle *ENIF* an das mechanische CAD-System übertragen (siehe 6.3), dadurch zu dreidimensionaler Darstellung aufbereitet und an das Simulationssystem weitergegeben werden. Modelle räumlicher Schaltungsträger, die in *OMNICAD* entwickelt wurden, können direkt übernommen werden.

Damit werden auch die einzelnen Bestückpositionen der Bauelemente übertragen. Wie in 6.3.3 beschrieben wurde, enthalten die Komponenten der fachbereichsübergreifenden Konstruktions-Bauelemente–Bibliothek ein Koordinatensystem am definierten Greif- oder Ansaugpunkt. Diese Koordinatensysteme (T-Points) können im Simulationsmodell automatisch

³⁹ Bei der Durchführung der Simulationsstudien wurde der Verfasser von Herrn Dipl.-Ing. Wolfgang Schlägl unterstützt.

mit den in dem Baugruppenmodell vorgesehenen Bestückpositionen, Bauelementorientierungen und Bauelementhöhen in Deckung gebracht werden. Damit wird eine ergonomische Programmierung der Montageabläufe erzielt.

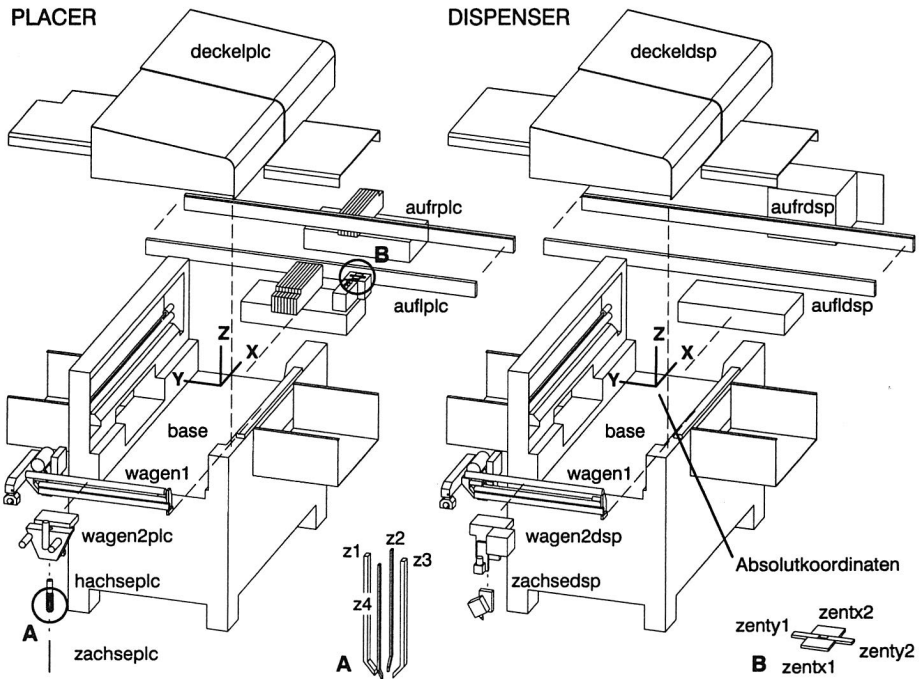


Bild 72: Geometrisches Modell einer Bestückungslinie

Die Modellierung der eingesetzten Produktionsmittel dagegen ist zeitintensiver (Bild 72). Die geometrische Beschreibung der zu simulierenden Maschinen muß aus den Konstruktionszeichnungen übernommen oder gegebenenfalls vermessen und ins volumenorientierte CAD-System übertragen werden. Im Simulator muß eine vollständige kinematische Beschreibung der Automaten eingegeben und das Verhalten gesamter Fertigungslinien definiert werden. So wurden die in Kapitel 5.1.3 entwickelten alternativen Montagekonzepte für die Bestückung räumlicher Schaltungsträger mit Hilfe der kinematischen Simulation auf ihre Eignung hinsichtlich kinematischer Fähigkeiten, Bestückungsleistung und Genauigkeit evaluiert (siehe Bild 73).

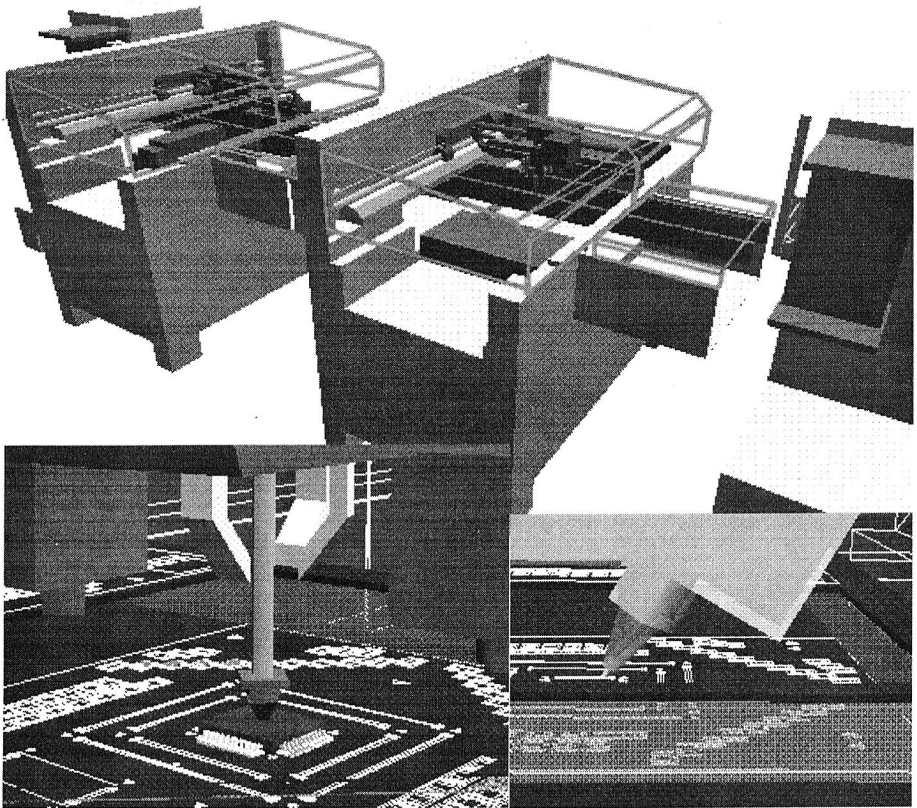


Bild 73: Kinematische Simulation der Montageprozesse

7.2.3 Entwicklung einer spezifischen CAD/CAM–Kopplung für die Bestückung⁴⁰

Das Ziel der rechnergestützten Produktgestaltung ist die Aufbereitung der Produktbeschreibenden Informationen für die Fertigungsprozesse. Bedeutende Rationalisierungspotentiale liegen damit in der rechnerbasierten Verbindung der Konstruktions- und Fertigungssysteme. Durch die Etablierung durchgängiger CAD/CAM–Verfahrensketten entfällt die wiederholte manuelle Eingabe produktbeschreibender Daten. Dadurch werden Kosten in der Fertigungsvorbereitung eingespart, Fehler vermieden und die wettbewerbsbestimmende

⁴⁰ Bei der Entwicklung der CAD/CAM – Kopplung wurde der Verfasser von Herrn cand. Ing. Martin Flohr unterstützt.

Durchlaufzeit von der Entwicklung über die Produktion bis zur Auslieferung an den Kunden eminent verkürzt.

Dazu sind zwei unabhängig voneinander stehende Teilprobleme zu lösen: Die Konvertierung der Daten in ein maschinenlesbares Format sowie die Rechner-Kommunikation zwischen Planungs- und Fertigungsebene [213]. Die weitaus rationellste Methode ist die Generierung der Bestückpositionen direkt aus dem rechnergestützten Layoutsystem. Im Rahmen dieser Arbeit wurde solch eine spezifische CAD/CAM-Kopplung für die SMD Bestückung realisiert (Bild 74)[198]. Diese spezielle Anbindung ermöglicht die direkte Kommunikation zwischen den CAD-Systemen von Hewlett Packard und den SMD-Bestückungsautomaten von Siemens.

Die Leiterplattenlayoutdaten, die im ECAD-System abgelegt sind, werden durch einen speziellen Postprozessor in dem für die Bestückungslinie verarbeitbaren Format aufbereitet. Der Postprozessor wie auch die Funktionen zur CAD/CAM-Kopplung können menügesteuert direkt aus dem CAD-System aufgerufen werden. Die Übertragung der im ASCII-Format repräsentierten Daten basiert auf einer RS232-Schnittstelle. Über ein gesichertes Protokoll (3964R) werden die Telegramme blockweise an den Linienrechner übersendet. Die Ankopplung erfolgt quasi im Multitasking. Andere Aufgaben, z. B. die Auslösung des Bestückprozesses, können auch während der Kommunikation ausgeführt werden. Damit ist es nicht nötig, daß ein bestimmter Programmteil zur Übertragung ausgewählt werden muß, da in jeder Situation die Kopplungsmöglichkeit besteht.

Der Linienrechner verwaltet die Datenbestände, versorgt die Stationsrechner mit Bestückprogrammen und wickelt die Kommunikation mit übergeordneten Rechnern ab. Dazu müssen ankommende ASCII-Files zur Weiterverarbeitung in Binärcode konvertiert werden und die ankommenden Bestückdaten geprüft werden. Die Kommunikation mit den hierarchisch untergeordneten Stationsrechnern wird auf Basis des IEC-Busses abgewickelt.

Damit wird es ermöglicht, vom CAD-Rechner aus Informationen vom Linienrechner abzufragen, dort die Datenhaltung zu organisieren und Files in beide Richtungen zu übertragen. Für diesen Transfer sind Dateien folgender Art vorgesehen: Bestückpositionen, Nutzenbeschreibungen, Bauteilbeschreibungen, Rüttlerkonfigurationen, Bauteilspurbelegungen und auch Managementinformationen (Fehlerstatistiken, Auftragsfertigmeldungen etc.). Dabei verhält sich der Linienrechner nur passiv. Er untersucht die ankommenden Telegramme auf Verständlichkeit und reagiert gegebenenfalls.

Diese Bereitstellung der Produktionsdaten in Datenformaten und Kommunikationsprotokollen, die von den einzelnen Bestückungsequipmentherstellern in spezifischer Weise definiert wurden, behindert die vollständige Durchdringung der rechnerbasierten Verknüpfung der Entwicklungs- und Fertigungsebene. Die Standardisierung dieser CAD/CAM-Verfahrenskette löst dieses Problem effizient. Dazu wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Richtlinie zur Übertragung der Produktinformationen für alle Prozeßschritte der Bestückung entwickelt, die vom *Institute for Interconnecting and Packaging Electronic Circuits IPC* in dessen For-

mattfamilie IPC-D-35x [214] als *Printed Board Automated Assembly Description in Digital Form IPC-D-355* aufgenommen wurde. IPC-D-355 wurde im Hinblick auf die zu erwartende verstärkte Anwendung räumlicher Schaltungsträger von Beginn an auf diese zusätzlichen geometrischen Anforderungen hin ausgelegt [215].

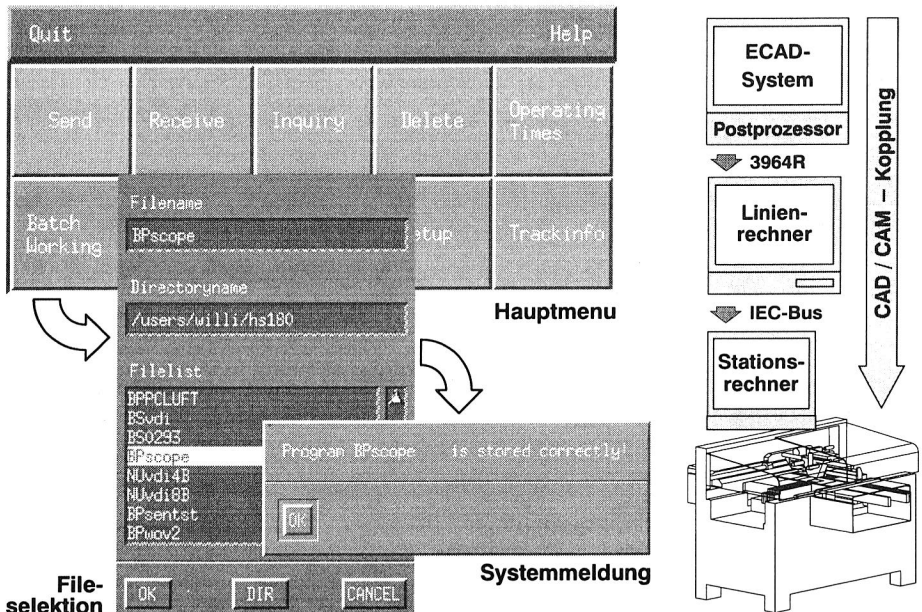


Bild 74: Spezifische CAD/CAM-Kopplung für SMD-Bestückungsautomaten

In diesem Kapitel wurde aufgezeigt, wie die rechnergestützt erstellte Produktbeschreibung räumlicher Schaltungsträger effizient in die Fertigungsebene transferiert werden kann. Beispielhaft für die gesamte MID-Produktionskette werden weiterhin NC-Steuerinformationen speziell für die Prozesse der Laserstrukturierung und der Bestückung generiert. Damit wird auch für den komplexen räumlichen Anwendungsfall die Lücke zwischen Entwicklung und Produktion informationstechnisch geschlossen.

8. Wirtschaftliche Bewertung neuer Produktionstechnologien

Da konventionelle Methoden der Wirtschaftlichkeitsanalyse eine differenzierte Bewertung der noch unsicheren und weit vernetzten Kosten- und Nutzenwirkungen neuer Technologien nicht ausreichend gestatten, werden oftmals erzielbare Rationalisierungspotentiale interessanter Innovationen erst zu spät erkannt [216]. Der Sprung in neue Technologien wird dadurch häufig viel zu spät vollzogen, nämlich erst dann, wenn herkömmliche Verfahren an die Grenzen ihrer technischen Möglichkeiten stoßen. Dieses gerade in Europa oft zu bemerkende Festhalten an beherrschten, aber ausgereizten Technologien verschlechtert die Konkurrenzfähigkeit zu stark sicherheitsbedachter Unternehmen.

Im Kapitel 8.1 soll ein Ansatz entwickelt werden, der Kostenstrukturen und Nutzenpotentiale neuer Technologien bereits im Vorfeld transparent macht. Dazu wird das Bewertungsverfahren der *Prozeßübergangskosten* vorgestellt und am Beispiel der dreidimensionalen spritzgegossenen Schaltungsträger mit integrierten Leiterbahnen (3-D MID) verifiziert [217].

Die große Anzahl unterschiedlicher MID-Herstellungsverfahren sowie deren starker Einfluß auf Produktgestalt und Fertigungskosten führt zu einer problematischen Entscheidungsdiscrepanz in der Definitionsphase neuer Produkte. Entweder werden mit großem Aufwand mehrere Konstruktions-Alternativen in unterschiedlichen Herstellungstechnologien parallel geplant und konstruiert, um auf Basis mehr oder weniger grober Randbedingungen die zu erwartenden Herstellungskosten abschätzen zu können. Die zweite Möglichkeit ist eine sehr frühe Festlegung und detaillierte Gestaltung des Produktes unter Berücksichtigung der Anforderungen einer speziellen Technologie. Damit ist eine relativ sichere Vorkalkulation möglich. Dieses Vorgehen birgt jedoch die Gefahr in sich, viel zu spät zu erkennen, daß in dem gewählten MID-Verfahren die geplanten Einsparungseffekte möglicherweise nicht erreicht werden können.

Somit ist die Entwicklung eines rechnergestützten Werkzeuges zur Vorkalkulation von räumlichen spritzgegossenen Schaltungsträgern, das auf Basis noch vager Daten in einer möglichst frühen Phase der Produktgestaltung eingesetzt werden kann, ein weiteres Ziel dieses Kapitels. Dazu werden verfügbare Methoden der Vorkalkulation analysiert und auf den beschriebenen Anwendungsfall hin geprüft. Die detaillierte Ermittlung quantifizierter Kostenstrukturen ausgewählter MID-Herstellungsverfahren bildet die Grundlage für das implementierte Werkzeug *MIDIS-C*⁴¹. *MIDIS-C* enthält für alle wichtigen MID-Herstellungsverfahren neben deduzierten Kalkulationsformeln auch über konkrete Preisanfragen ermittelte Kosten für Materialien und Prozesse. Darüberhinaus werden die ausgewählten Herstellungsprozesse in ihrem prozeßtechnischen Ablauf transparent gemacht sowie deren fertigungstechnische Ausschlußkriterien berücksichtigt.

⁴¹ *MIDIS-C*: Molded Interconnect Device Information Service (Kapitel 2.3) – Calculation

Die Vorteile des ganzheitlichen MID-Ansatzes sowie dessen Auswirkungen auf Fertigungs- und Montagetechnologie werden abschließend am Beispiel der Entwicklung und Konstruktion eines Kfz-Elektronik-Modules beschrieben. Die konsequente Ausnutzung der technischen Möglichkeiten zur Funktionsintegration, Teile- und Variantenreduzierung und Montagevereinfachung zeigen eindrucksvoll das wirtschaftliche Potential zur Kostenreduktion durch MIDs auf.

8.1 Entwicklung eines prozeßorientierten Bewertungsverfahrens

Über die Einführung einer neuen Fertigungstechnologie entscheidet neben technischen Verbesserungen vor allem deren Fähigkeit zur Senkung der Herstellkosten. Dabei stellt sich das Problem, daß Produktionsinnovationen mit etablierten Verfahren konkurrieren müssen, für die auf Grund der längeren Einsatzzeit sowohl größere Erfahrung bestehen als auch meistens erhebliche Investitionen in Fertigungsmittel getätigt wurden. Eine neue Technologie kann dagegen häufig zu Beginn ihres Lebenszykluses bei gleichem Mitteleinsatz noch nicht das gleiche Leistungsvermögen aufweisen (Bild 75). Bedingt durch das vorherrschende, traditionelle Wirtschaftlichkeitsverständnis werden damit insbesondere bei Technologieübergängen neue Technologie prinzipiell schlechter bewertet [218].

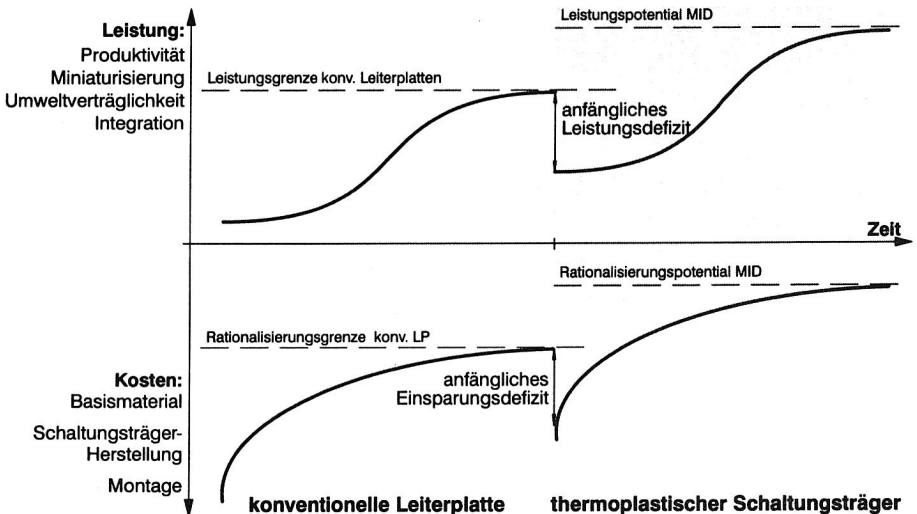


Bild 75: Leistungs- und Kostenverlauf neuer Technologien

Das Leistungsvermögen der Molded Interconnect Devices, das insbesondere in der Einführungsphase in den vielfältigen, untereinander vernetzten Wirkungen begründet liegt, ist da-

mit zu wenig transparent. Der erfahrungsgemäß degressive Kostenverlauf neuer Technologien wird bisher nur eingeschränkt in die Betrachtungen mit einbezogen.

Eine geeignete Wirtschaftlichkeitsbewertung muß diesen Sachverhalt berücksichtigen, indem sie anfängliche Leistungsdefizite und zu erwartende Entwicklungsmöglichkeiten transparent macht. Da die Wirtschaftlichkeit der MID-Technologie sehr stark produktspezifisch ist, muß das Bewertungsverfahren die Selektion geeigneter Produkte unterstützen, die einen erfolgreichen Einstieg in diese neue Fertigungstechnologie ermöglichen. Herkömmliche betriebswirtschaftliche Bewertungsmethoden können diesen Anforderungen nicht gerecht werden. Oftmals ermitteln sie nur Kennzahlen (Return-on-Investment, Break-even-Point usw.), ohne wirkliche Hilfe bei der Bewertung von Fertigungstechnologien und der Auswahl von geeigneten Produkten zu leisten [219]. So ist es denkbar, eine neue Fertigungstechnologie auf herkömmlichen Fertigungsmaschinen einzusetzen. Es wären somit keine Investitionen notwendig. Eine Wirtschaftlichkeitsbewertung im Sinne einer Investitionsrechnung versagt hier.

Neue Bewertungsmethoden für Produktionstechnologien wurden entwickelt, um mit allgemeineren Ansätzen auch spezielle Fertigungstechnologien beurteilen zu können [220, 221]. Deren Einsatzbarkeit für die Bewertung neuer Fertigungstechnologien wie MID relativiert sich, da zum einen diese Verfahren auf investitionstheoretischen Modellen basieren und zum anderen Technologien bewertet werden, indem deren Beitrag zur Steigerung definierter Kriterien, wie Produktivität, Flexibilität oder Qualität beurteilt wird. Solche Kriterien dienen jedoch eher dazu, auf rein betriebswirtschaftlicher Ebene über eine Technologie zu entscheiden. Tatsächlich entscheidet aber die Entwicklungsabteilung zusammen mit der Fertigungsvorbereitung wesentlich früher. Zum Zeitpunkt der Entstehung solcher Kennzahlen ist somit bereits über die Einführung einer Technologie entschieden. Geeignete Wirtschaftlichkeitsrechnungen müssen folglich so gestaltet sein, daß sie bereits in diesem frühen Stadium die Entwicklung durch verlässliche Bewertungen unterstützen. Auch herkömmliche Überlegungen zur kostengünstigen Konstruktion reichen nicht aus, da sie lediglich versuchen, Produkte zu optimieren, jedoch keine Aussage machen können, ob der Einsatz einer neuen Technologie insgesamt wirtschaftlich ist [222]. Neue Fertigungstechnologien, wie die der räumlichen spritzgegossenen Schaltungsträger, führen bisherige Bewertungsverfahren somit an die Grenzen ihrer Aussagefähigkeit.

8.1.1 Wirkungskettenbetrachtung und Prozeßübergangskostenrechnung

Die wirtschaftlichen Einflußfaktoren der MID-Technologie sind sehr unterschiedlicher Natur. Zum einen können ganz erhebliche Kosteneinsparungen erzielt werden, andererseits kann die Herstellung eines funktionsintegrierten Schaltungsträgers teurer als eine einfache Leiterplatte sein. Möglich ist auch, daß anschließende Verfahren in der Weiterverarbeitung des Spritzgußteils aufwendiger werden, wie z. B. durch den Übergang produktiver, simultaner Prozesse (bspw. Siebdruck) durch sequentielle (bspw. Dispensen). Über die Wirtschaftlich-

keit eines Produktes und damit über den Einsatz einer Fertigungstechnologie kann erst entschieden werden, wenn sämtliche Veränderungen monetär quantifiziert wurden.

Zur Systematisierung und Ableitung der wirtschaftlichen Bedeutung der vielfältigen Eigenschaften der MID-Technologie eignet sich das Bewertungsverfahren mittels Wirkungsketten. Grundlegende Konzepte dazu lieferte eine Untersuchung über die Wirtschaftlichkeit rechnerintegrierter Planungssysteme [223]. Da nahezu alle Wirkungen der MID-Technologie entweder in der Fertigung über Material- und Herstellungskosten oder im Produkt in erhöhtem Kundennutzen und damit höheren Erträgen darstellbar sind, kann ihr Gesamtnutzen letztendlich über die Aufsummierung der monetär-quantifizierten Merkmale ermittelt werden.

Die Kostenveränderungen, die sich durch die Entscheidung für ein bestimmtes Verfahren ergeben, werden im gesamten Verlauf der MID-Herstellung und -Montage durch die Kombinationsmöglichkeiten der eingesetzten Prozesse immer komplexer. Konventionelle Methoden bieten keine Lösung zu deren Ermittlung. Als neues Verfahren wird im folgenden die *Prozeßübergangskostenrechnung*⁴² vorgestellt

Zur Ermittlung der Prozeßübergangskosten⁴³ (siehe Bild 76) werden zunächst Technologie-merkmale für die einzelnen Fertigungsprozeßschritte gesammelt, die bestimmende Einflußfaktoren für die Wirtschaftlichkeit darstellen können. Für die Anwendung der MID-Technologie können dies beispielhaft sein:

- Strukturierung: Minimale Leiterbahnbreiten, Leiterbahnlänge
- Bestückung: Anzahl elektronischer Bauelemente, räumliche Gestaltung
- Spritzguß: Auswahl Werkstoff, Strukturfeinheit

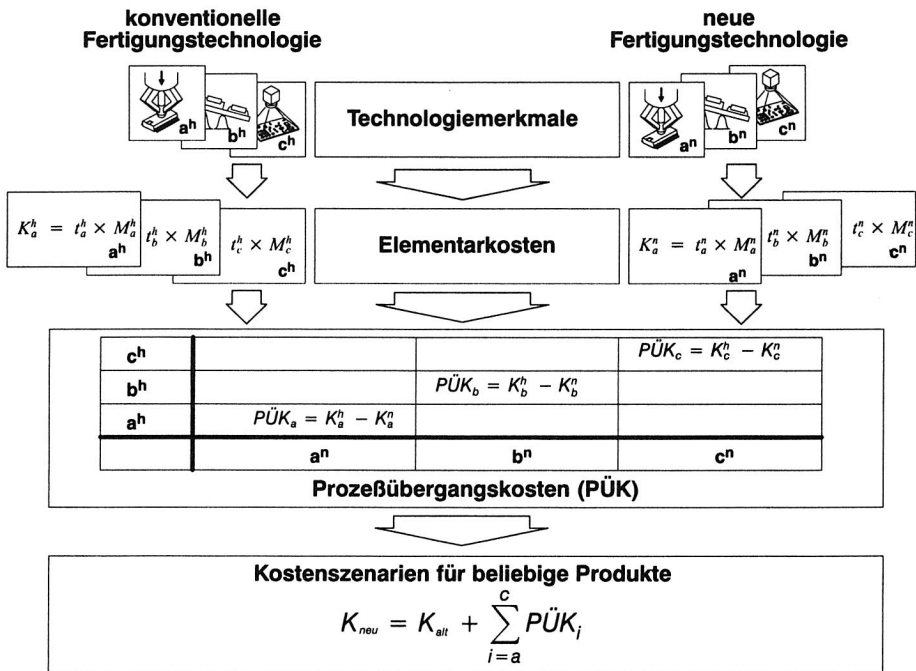
Da manche Kriterien sich im Verlauf des Bewertungsprozesses als weniger wichtig, andere wiederum als bedeutender herausstellen, muß dieser Kriterienkatalog fortlaufend angepaßt werden. Jedes Merkmal wird schließlich auf einen konkreten Prozeß in der Fertigung heruntergebrochen. Diejenigen Prozeßkosten, die von der neuen Technologie verändert werden, werden in Form von Fertigungszeiten und Platzkostensätzen quantifiziert. Im folgenden Schritt werden die Differenzen dieser Elementarkosten zwischen der herkömmlichen und der neuen Technologie gebildet. Für jeden Prozeß entstehen so rein technologiebedingte (und nicht mehr produktspezifische) Kostenveränderungen, die *Prozeßübergangskosten*.

Durch Aufsummierung aller Prozeßübergangskosten können sehr einfach Szenarien für beliebige Produkte analysiert und damit die spezifischen Auswirkungen neuer Technologien auf die Herstellungskosten transparent gemacht werden. Einzelne Prozesse können bewertet, die günstigste Alternative ausgewählt, optimierungsbedürftige Schwachstellen selektiert sowie die Gesamtfertigungskosten bei Einführung neuer Technologien berechnet werden.

⁴² Bei der Entwicklung der Prozeßübergangskostenrechnung wurde der Verfasser von Herrn cand. rer. pol. Michael Wolf unterstützt.

⁴³ Demgegenüber geht es bei dem neuen Kostenrechnungsansatz der *Prozeßkostenrechnung* um die verursachungsgerechte Zuschlüsselung von Gemeinkosten [224].

Die Prozeßübergangskosten können nicht nur für Fertigungsprozesse insgesamt ermittelt werden, sondern es ist mit der gleichen Vorgehensweise auch möglich, die Kostenübergänge für die elementaren Bestandteile (z. B. SMD-Bauelement, Schirmblech) eines Produktes abzubilden. Man erhält eine Tabelle, aus der man die Übergänge der Technologie-stufen je Bauelemente in Kosten entnehmen kann. Da sich beispielsweise beim Übergang von 2D-Leiterplatten auf 3D-Schaltungsträger die Bestückzeit ändert, kann diese zeitliche Änderung über den Maschinenstundensatz in Kosten ausgedrückt werden. Die Bestückzeit-änderung für ein einzelnes Bauelement hängt damit nicht primär vom Produkt ab, sondern hauptsächlich von der Leistungsfähigkeit der neuen Bestücktechnik.



Legende: a,b,c: Fertigungsprozesse
M: Maschinenstundensatz

h: herkömmliche Technologie
n: neue Technologie

K: Fertigungskosten
t: Fertigungszeiten

Bild 76: Prinzip und Vorgehensweise zur Ermittlung der Prozeßübergangskosten

Der Inhalt der Tabelle stellt somit keine produktspezifischen Kosten mehr da, sondern kann vielmehr technologiespezifische Kosten für elementare Einzelteile abbilden. Sobald die Konstruktion eines völlig beliebigen Produktes bekannt ist, kann mit Hilfe der elementaren Technologiekosten sofort eine betriebswirtschaftliche Entscheidung pro oder contra einer neuen Fertigungstechnologie in Form von Kostensimulationen getroffen werden.

8.1.2 Verfahrensschritte zur wirtschaftlichen Bewertung der MID-Technologie

Das Verfahren der Bewertung über Wirkungsketten und die Prozeßübergangskosten sind zwei Methoden, die aufeinander aufbauen. Die Wirkungsketten dienen zunächst dazu, grundsätzliche Technologiemerkmale den jeweiligen Fertigungsprozessen zuzuordnen. Aufgrund dieser Ergebnisse werden dann die Prozeßübergangskosten ermittelt, wodurch ein Vergleich einer neuen Technologie mit herkömmlichen Verfahren ermöglicht wird.

Der gesamte Verfahrensablauf zur Bewertung ist zunächst in zwei Teile gegliedert. Auf der strategischen Unternehmensebene (langfristiger Planungshorizont) wird mit Hilfe des Technologieportfolio-Konzepts die Attraktivität der MID-Technologie für eine ausgewählte Firma ermittelt [225]. Diese langfristige Bewertung stellt sicher, daß sich die Chancen und Risiken der neuen Fertigungstechnik mit den Ressourcen der Firma (finanzielle, personelle, technologische usw.) in Einklang bringen lassen.

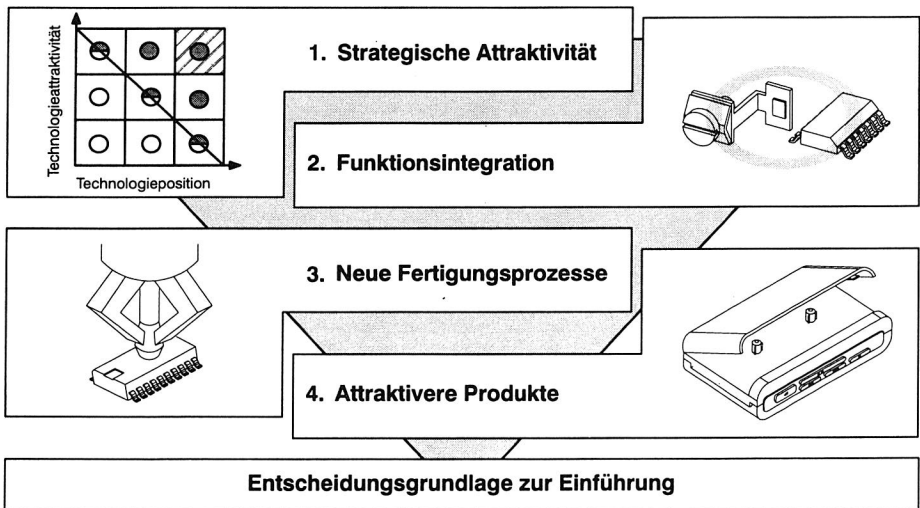


Bild 77: Verfahrensschritte zur Bewertung der MID – Technologie

Die operative Bewertungsebene (mittel- bzw. kurzfristiger Planungshorizont) ist durch Innen- und Außenwirkungen gekennzeichnet. Diese Unterscheidung ergibt sich, da Nutzenerweiterungen firmenintern in Form von Kostenveränderungen auftreten können. Andere Wirkungen werden über Preis- und Mengensteigerungen (Erträge) ermittelt und betreffen so das Unternehmensumfeld. Mit Ausnahme der strategischen Bewertungsmethode werden sämtliche Nutzen- bzw. Ertragsveränderungen im Verlauf der Bewertung mit Hilfe der Prozeßübergangskosten oder/und der Wirkungsketten ermittelt. Die Verfahrensschritte zur Bewertung der MID-Technologie zeigt Bild 77.

Im Verlauf des Verfahrens werden die wichtigsten Eigenschaften und Merkmale der MID-Technologie bewertet, die sich wie folgt gliedern lassen:

1. Strategische Attraktivität
2. Funktionsintegration
3. Kosten-/Nutzenveränderungen aufgrund neuer Fertigungsprozesse
4. Kosten-/Nutzenveränderungen durch attraktivere Produkte.

Diese Hauptmerkmale lassen sich noch weiter unterteilen. Die qualitative Verbesserung der Produkte kann z. B. durch einen besseren Wärmehaushalt, bessere elektromagnetische Verträglichkeit, höhere Stoßfestigkeit usw. erreicht werden. Über alle Bewertungsschritte hinweg ergeben sich jetzt Kostenreduzierungen bzw. -steigerungen. Eine Wirtschaftlichkeit der neuen Technologie ergibt sich erst dann, wenn die Summe der monetär quantifizierten Merkmale positiv ist. Die Methode der Prozeßübergangskostenrechnung kommt im Verlauf der Bewertungsmethode bei der Beurteilung der Fertigungsprozesse zum Einsatz.

Selbstverständlich besitzen einige Kriterien höheren wirtschaftlichen Einfluß als andere. Ein wirtschaftlicher Einsatz der MID-Technologie ergibt sich schneller an einem Produkt, das sehr viele in das Spritzgußteil integrierbare Funktionen aufweist. Da anfänglich aber die Herstellung des Spritzgußteils sehr teuer ist, treten andere Kriterien, wie z. B. qualitative Verbesserungen, in der Vordergrund. Mit vorgestelltem Bewertungsansatz gelingt es nun, solche tendenziell nicht quantifizierbaren Merkmale monetär zu bewerten. Eine Kosteneinsparung mit Hilfe einer neuen Fertigungstechnologie wird auf diese Art und Weise deutlich früher im Lifecycle transparent.

8.2 Entwicklung eines hypertextgestützten Systems zur Vorkalkulation

Die Entscheidung für oder gegen die Herstellung eines spezifischen Produktes in MID-Technologie wird letztendlich immer auf Basis einer betriebswirtschaftlichen Analyse fallen. In der Praxis werden konventionelle und neue Lösung meist durch eine Herstellungskostenrechnung verglichen. Zwar liegen gewöhnlich für die existierende Produktaufbautechnologie detaillierte Zahlen vor, die Ermittlung aussagekräftiger Kosteninformationen für ein geplantes MID-Produkt dagegen ist ungemein schwierig. Folgende relevante Ausgangsdaten fehlen dazu meist ganz oder sind nur unvollständig vorhanden:

- Auswahl der Materialien
- detaillierte Konstruktionsunterlagen und Stücklisten
- Festlegung der MID-Produktionstechnologie
- Festlegung der Elektronik-Montagetechnologie (insb. Verbindungstechnik)

Zudem liegen gewöhnlich noch keine Erfahrungen aus der Serienproduktion vor, die sicheren Aufschluß z. B. über zu erwartende Qualität oder Ausbringung geben könnten. Verständlicherweise führen diese Unsicherheiten zu der Forderung, daß sogar pessimistisch geschätzte Kosteneinsparungen mindestens zwischen 30 und 50% gegenüber der bisherigen Technologie betragen müssen.

Die Herstellungskostenkalkulation, durchgeführt auf Basis unsicherer Daten, entscheidet folglich, ob sich eine neue Technologie durchsetzt oder nicht. Um diesen Prozeß durch die Bereitstellung relevanter Daten möglichst effizient zu unterstützen, wurde im Rahmen dieser Arbeit das hypertextgestützte (Vor-)Kalkulationssystem *MIDIS-C* entwickelt. Es ermöglicht über quantifizierte Kalkulationsformeln wichtiger Herstellungsverfahren eine Kostenabschätzung von MIDs bereits in deren Konzeptionsphase. Über detailliert analysierte Kostenstrukturen sowie empirisch abgeleitete Faustregeln, die hierarchisch verfeinert werden können, können sehr schnell Wirtschaftlichkeitsszenarien für unterschiedliche Produktaufbauten und Herstellungstechnologien durchgespielt werden.

Allen weiteren Ausführungen wird die Annahme zugrunde gelegt, daß ein potentieller Produzent die für eine MID-Produktion notwendigen Fertigungseinrichtungen besitzt bzw. eine Planung durchgeführt wurde, welche notwendigen Anschaffungen aufgrund eines möglichen potentiellen MID-Teilespektrums getätigt werden müssen (Makrobetrachtung siehe Kapitel 8.1). Entscheidungsgrundlage für das auszuwählende Fertigungsverfahren stellen dabei die verfahrensabhängigen Herstellkosten der MID-Applikation im Sinne einer Mikrobetrachtung dar.

8.2.1 Evaluierung verfügbarer Methoden zur Vorkalkulation

Ziel der im folgenden untersuchten Methoden zur Vorkalkulation ist es, möglichst frühzeitig Aussagen über die Herstellkosten für eine bisher in konventioneller Technologie gefertigte MID-Baugruppe treffen zu können. Grundsätzlich erscheint die in der Praxis etablierte Zuschlagkalkulation für diese Aufgabe als geeignet [226]. Sie basiert auf der Überlegung, daß bei der Nachkalkulation einer gesamten Abrechnungsperiode die Summe der Material-, Fertigungs- und Gemeinkosten feststeht und deren Verhältnis zu den Gesamteinzelkosten auch für spezifische Einzelaufträge Gültigkeit besitzt [227]. Da diese Vorgehensweise nur eingeschränkt in der Lage ist, die entstehenden Kosten verursachungsgerecht darzustellen, müssen Anpassungen vorgenommen werden, um die Grundlage für ein zuverlässiges und aussagekräftiges Instrumentarium für den MID-Bereich zur Verfügung zu stellen.

Eine Möglichkeit, die Unzulänglichkeiten der Zuschlagkalkulation zu beseitigen, ist der Einsatz der Platzkostenrechnung [228]. Dabei werden nicht nur die Kosten der Verfahren selbst, sondern auch für Steuerung, Bedienung, Überwachung und Instandhaltung mit eingebracht [229]. Die Bezugsbasis Fertigungslohn wird ganz oder teilweise durch Maschinenstunden ersetzt [230].

Bild 78 zeigt das Problem, daß die klassische Vorkalkulation die entstandenen Kosten erst zu einem Zeitpunkt erfaßt, an dem diese jedoch in keiner Weise mehr beeinflusst werden können [231]. Eine Vielzahl von Unternehmensbereichen benötigt aber schon in einem früheren Stadium Kosteninformationen. So z. B. der Vertrieb, um einen Preis für das Produkt festlegen, oder der Einkauf, um bspw. Fremtteile mit langen Lieferzeiten rechtzeitig bestellen zu können [232]. In erster Linie ist es aber für die Konstruktionsabteilung selbst zu spät, wirtschaftliche Verbesserungen einzuleiten, wenn die Kostenanalyse erst einsetzt, nachdem die Konstruktion vollständig abgeschlossen ist.

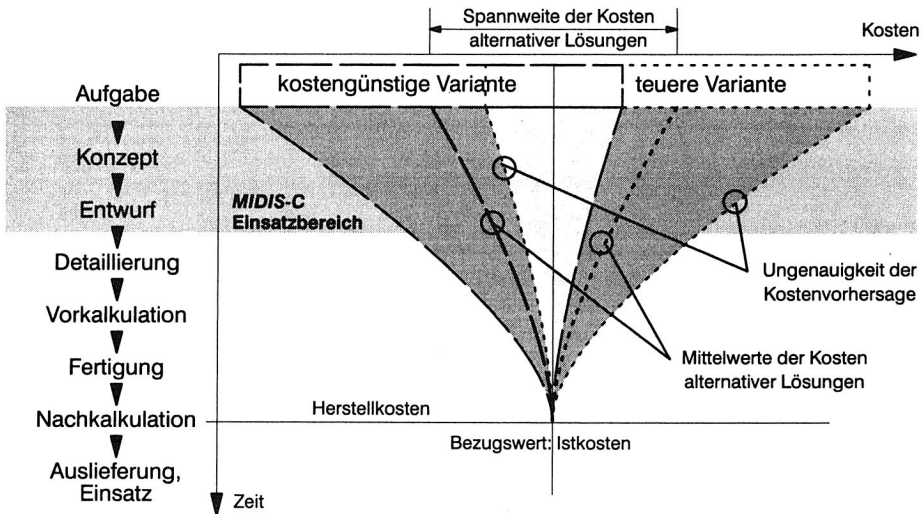


Bild 78: Genauigkeit der Kostenvorhersage (in Anlehnung an [233])

Der in der Klein- und Einzelfertigung heute übliche lange Regelkreis, bei dem eine Kostenfrüherkennung erst nach abgeschlossenem Konstruktionsvorgang einsetzt, kann nicht befriedigen. Verbesserungsvorschläge zur Kosteneinsparung können nicht mehr berücksichtigt werden, ohne daß überproportional hohe Änderungskosten entstehen [233]. Neben den Übergangszeiten zwischen den Abteilungen erschweren abteilungsspezifische Zyklen die Entwicklungskette zusätzlich und führen zu einer Erhöhung der Entwicklungskosten [232]. Von diesem sequentiell arbeitenden Vorgang muß zu dem parallel ablaufenden kurzen Regelkreis übergegangen werden. Konstruktion und Kalkulation greifen hier stets ineinander, Verbesserungen im Sinne von Kosteneinsparungen und erhöhter Funktionalität sind zu jedem Zeitpunkt möglich [231].

Konstruktionsphase	Verfahren	Eignung	Voraussetzungen
Konzipierung	Materialkosten-Methode	bedingt	HK/MK = konst. kleine Variation der Baugröße
	Gewichtskosten-Methode	bedingt	Konstruktion, Fertigung, Material und Stückzahl ähnlich
	Ähnlichkeits-Kalkulation	gut	basierend auf bereits durchge- führten Grundentwürfen
Planung	Gut/Schlecht-Beispiele	bedingt	falls zahlenmäßige Grundlagen oder Kalkulation aufwendig
	Relativkosten-Kataloge	sehr gut	Kosten des Bezugsobjektes müssen bekannt sein
Gestaltung/ Detaillierung	Regressions-Rechnung	bedingt	prinzipiell gut geeignet, aber sehr aufwendig
	Fertigungsdaten-Kalkulation	bedingt	vglbar. Ähnlichkeitskalkulation, aber späterer Einsatzzeitpunkt

Bild 79: Evaluierung verschiedener Kalkulationsmethoden

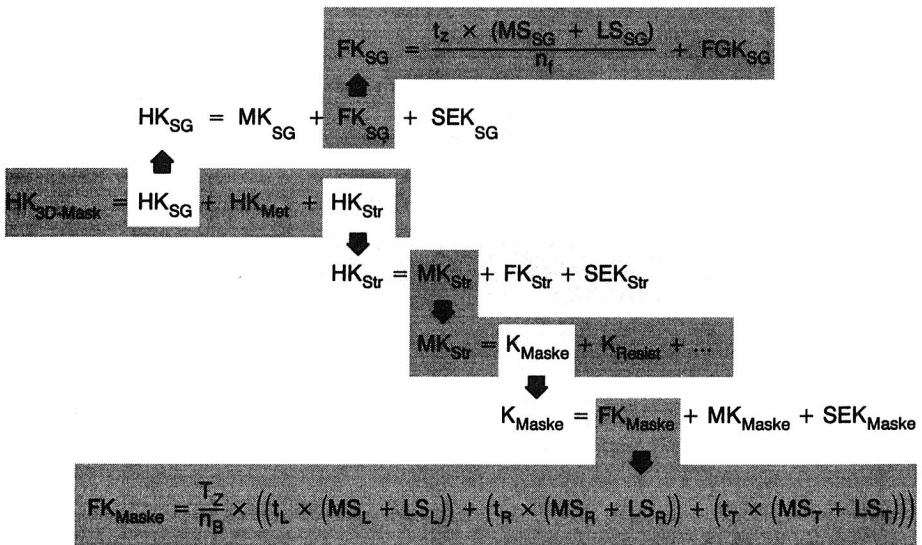
Zur effizienten Unterstützung von Entwicklern und Konstrukteuren mit Kosteninformationen, müssen die Kalkulationsmethoden an den Entwurfszeitpunkt anpaßt werden, auch wenn zu diesem Zeitpunkt nur sehr grobe Datenstrukturen vorhanden sind. Für die Anwendung zur MID-Kalkulation wurden die in Bild 79 aufgeführten Methoden analysiert [233, 234, 235, 236, 237]. Die verschiedenen Formen der entwicklungs- und konstruktionsbegleitenden Kalkulation ermöglichen in Verbindung z. B. mit der Zuschlagskalkulation eine exakte Ermittlung der Herstellkosten für eine MID-Applikation. Eine Kostenfrüherkennung und -optimierung wird durch das Ineinandergreifen von klassischer und konstruktionsbegleitender (Vor-)Kalkulation gewährleistet.

8.2.2 Kostenstrukturen ausgewählter MID-Herstellverfahren

Nachdem sowohl klassische als auch konstruktionsbegleitende Kalkulationsmethoden im Hinblick auf einen möglichen Einsatz im MID-Bereich evaluiert wurden, werden ausgewählte MID-Herstellungsverfahren erfaßt, kalkuliert und die gewonnenen Ergebnisse monetär quantifiziert. Dazu wurden sechs Herstellungsverfahren ausgewählt, die im Bereich der 3D-Schaltungsträgerherstellung am häufigsten eingesetzt werden und zu denen es außer technischen Erklärungen in der Literatur bis heute keine geeigneten allgemeinen Kalkulationsschemata gibt. Bei diesen Verfahren handelt es sich um (siehe 4. Kapitel):

- Two-Shot-Molding (PCK und SKW)
- 3D-Maskenbelichtung
- Laserdirektstrukturierung (SIL)
- Heißprägen
- Folien-Inmold

Die Verfahren wurden entsprechend den modernen Gesichtspunkten der Kostenrechnung in Kalkulationsteilbereiche (Materialkosten / Fertigungskosten / Sondereinzelkosten) gegliedert und darauf aufbauend allgemeingültige Kalkulationsformeln erstellt, die eine wirtschaftliche und speziell auf das Verfahren ausgerichtete monetäre Quantifizierung ermöglichen. (Bild 80 zeigt einen Auszug aus der Kostenhierarchie zur Berechnung der Herstellkosten des 3D-Maskenbelichtungsverfahrens.) Dazu wurden alle positiven und negativen Eigenschaften einer Fertigungstechnologie gesammelt, strukturiert und über die Fertigungsprozesse in Form von Kosten abgebildet.



Legende:

HK: Herstellkosten	t: Bearbeitungszeit	Met: Metallisierung	n _f : Anzahl der Formnester
MK: Materialkosten	MS: Maschinenkosten	Str: Strukturierung	L: Laser
FK: Fertigungskosten	LS: Lohnkosten	T _z : Teilezahl des Auftrages	R: Roboter
SEK: Sondereinzelkosten	SG: Spritzguß	n _B : Belichtungen pro Maske	T: Folientiefziehmaschine

Bild 80: Auszug aus implementierter Kostenhierarchie (3D-Maskenbelichtungsverfahren)

Damit ermöglicht es MIDIS-C⁴⁴ dem Anwender, Kalkulationen für verschiedene MID-Herstellverfahren durchzuführen. Dem Benutzer steht es dabei offen, entweder Neukalkulationen oder Ähnlichkeitskalkulationen, die auf einem benutzerspezifischen Datenbestand aufbauen, anzuwenden. Neben einer benutzerfreundlichen Präsentationsoberfläche (siehe Bild 81) wurde bei der Realisierung von MIDIS-C vor allem berücksichtigt, daß der Anwender schnellstmöglich zu Grobkalkulationsergebnissen gelangen kann. Dazu wurden Pauschalpreise im Programmcode hinterlegt, die dem Benutzer die Eingabe von Einzelinformationen bzw. -preisen abnehmen.

TEIL 1 KALKULATION METALLISIERUNG / STRUKTURIERUNG DES

Materialkosten:

Material-einzelkosten:

Folienstärke: ☒ 12 µm ☐ 18 µm
☐ 35 µm ☐ 70 µm

verzinnt: ☐ JA ☒ NEIN
 vernickelt: ☐ JA ☒ NEIN
 Trägerfolie: ☐ JA ☒ NEIN
 Lötstopplack pauschal 15%: ☐ JA ☒ NEIN

geschätzte Teilezahl: Stück ges.

Länge: cm
 Breite: cm

Materialgemeinkosten: %

Fertigungskosten:

Fertigung-einzelkosten:

Zykluszeit: s
 Anzahl bearbeitbarer Teile pro Zyklus: Stück
 Maschinenstundensatz: DM/Std
 Lohnkosten: DM/Std
 Flachprägekosten: DM/Stück
 Siebdruckkosten: DM/Stück

Fertigungsgemeinkosten: %

Materialkosten: DM / 100 Stück

Fertigungskosten: DM / 100 Stück

Zurück Abbruch

Zum 2. Teil der Heißprägekosten verzweigen

Bild 81: Benutzeroberfläche von MIDIS-C (exemplarische Bildschirmseite)

Mit Hilfe der Neukalkulation ist es ferner möglich, beliebige geplante MID-Applikationen frühzeitig hinsichtlich der zu erwartenden Herstellkosten zu bewerten. Im Zusammenspiel mit dem oben beschriebenen Verfahren der Prozeßübergangskosten stellen die ermittelten Berechnungsformeln den direkten Bezug auf die konkrete Betriebs- bzw. Fertigungsebene dar und können über MIDIS-C sofort monetär quantifiziert werden.

⁴⁴ Bei der Entwicklung von MIDIS-C wurde der Verfasser von Herrn cand. rer. pol. Markus Goldhofer unterstützt.

8.3 MID-Technologieeinführung am Beispiel eines Kfz-Elektronik-Moduls

In Kooperation mit einem Automobilhersteller und dessen Zulieferer wurde im Rahmen dieser Arbeit am Beispiel einer elektronischen Baugruppe zur Steuerung automatischer Schiebedächer, die insbesondere in modernen Limousinen der oberen Mittelklasse eingebaut werden, Konzeption, konstruktive Entwicklung und Fertigungsplanung eines MIDs durchgeführt⁴⁵. Mit der Bearbeitung dieses Pilotprojektes sollen die technischen Möglichkeiten und wirtschaftlichen Rationalisierungspotentiale des MID-Einsatzes im Automobil aufgezeigt werden, die Tauglichkeit existierender Werkstoffe untersucht, alternative Herstellungsverfahren vergleichend bewertet sowie die Anwendbarkeit verfügbarer Montagetechnologien evaluiert werden. Vorrangiges Ziel dabei ist die Senkung der System-Herstellungskosten insbesondere durch die Reduzierung der Teilezahl, die Minimierung von Fügeprozessen und die Miniaturisierung des Bauraumes.

8.3.1 Analyse der konventionellen Aufbautechnik

Bild 82 zeigt die Explosionsdarstellung des E-Moduls in konventioneller Aufbautechnik. Die Struktur ist gekennzeichnet durch ein zweiteiliges Kunststoff-Spritzguß-Gehäuse (E-Box und Deckel) sowie die eingebaute, ebenfalls zweiteilige Elektronik. Die elektronische Haupt-Baugruppe besteht aus FR4-Leiterplatte, Kunststoff-Frontblende, Stecker, Relais, Messerstecker sowie weiteren THT- und SMT-Bauelementen. Eine weitere, kleinere FR4-Leiterplatte trägt nur den Mikroschalter, der die Stellung des Schiebedaches mit Hilfe von Steuerrädern des Getriebes erkennt. Sie ist durch eine sechspolige Flachbandleitung (Jumper) mit der größeren Leiterplatte verbunden.

Sowohl die elektronischen Komponenten als auch Stecker und Jumper werden in einer Wellenlötanlage mit der Leiterplatte verlötet. Um die auf den Stecker wirkenden Kräfte aufnehmen zu können, muß dieser zusätzlich vernietet werden. Da der Stecker zugekauft wird, muß die bisherige Konstruktion dessen Maße und Lage berücksichtigen. Das gesamte E-Modul wird durch Schnapphaken am Aluminium-Druckguß-Gehäuse des Getriebes befestigt, in das die Schraubaugen für die Halterung am Schiebedachrahmen integriert sind. Der elektrische Kontakt zum Antriebsmotor wird über zwei Messerstecker realisiert. Diese metallischen Biegeteile werden durch Bohrungen auf der Leiterplatte montiert und anschließend auf der Rückseite verlötet. Durch eine Aussparung im Gehäuse kann der motorseitige Stecker sicher in den Messerkontakten positioniert werden.

Die elektronische Schaltung besteht aus 1206-, 1812-Chip- und SOT23-Bauelementen, einem Relais sowie einem Varistor in THT-Ausführung. Damit wird eine mehrstufige Bestückung für SMD und THD notwendig. Das insgesamt einfache, einseitige Layout ist auf den Prozeß des Wellenlötens hin optimiert.

⁴⁵ Bei der konstruktiven Gestaltung des Schiebedach-E-Moduls wurde der Verfasser von cand. Ing. Ingo Kriebitzsch unterstützt.

Durch eine große Aussparung im Gehäuse können eine Vielzahl unterschiedlicher Steckerkonfigurationen untergebracht werden. Kleinere Verbindungselemente müssen dann jedoch von einer aufgesteckten Blende abgedeckt werden. Die Positionierung der Platine wird durch Stifte im Gehäuse gewährleistet. Der Mikroschalter wird zusätzlich durch Dornen am Getriebegehäuse in der gewünschten Lage fixiert.

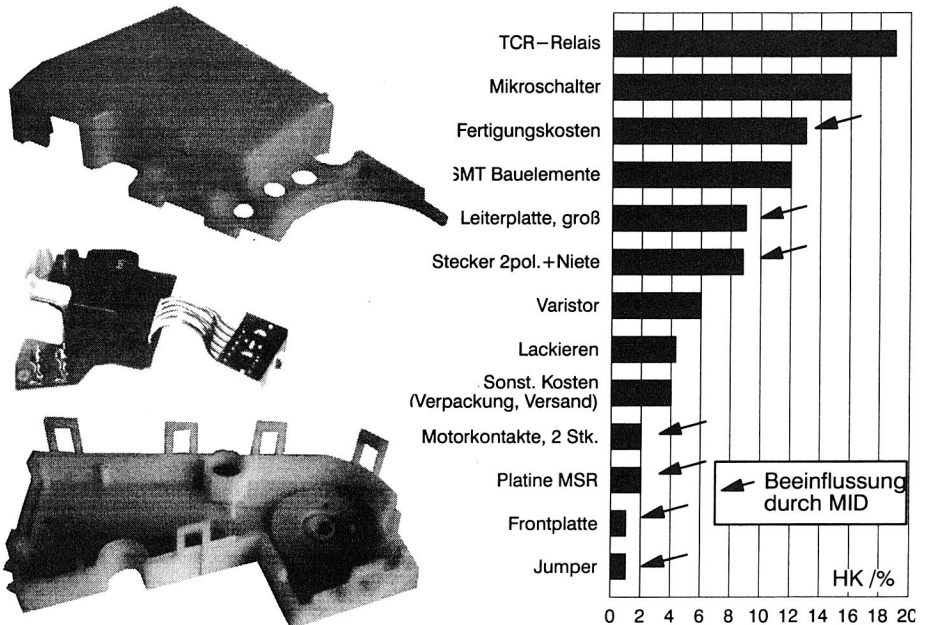


Bild 82: Konventionelle Aufbautechnik des E-Moduls

Die Herstellung des gesamten Schiebedachmotors wird auf eine mehrstufige Zuliefererkette aufgeteilt, bei der Elektronikfertigung, Endmontage und Einbau in das Automobil in unterschiedlichen Unternehmen durchgeführt werden. Die Aufteilung der Elektronik auf zwei, durch ein Flachbandkabel verbundene Leiterplatten ist handhabungstechnisch aufwendig und verhindert eine automatisierte Montage. Zusätzlich muß die Frontblende eingesetzt werden.

Die Aufstellung der Kosten in einer ABC-Analyse (siehe Bild 82) zeigt mögliche Rationalisierungspotentiale für die MID-Technologie auf. Man erkennt, daß die elektronische Komponenten, die auch in einer MID-Lösung benötigt werden, bereits über 50% der Gesamtkosten betragen. Einsparungsmöglichkeiten liegen dagegen insbesondere in den mechanischen und elektro-mechanischen Komponenten (ca. 25% Kostenanteil) sowie in den Fertigungskosten (ca. 15%). Bisher notwendige Aufwendungen für Lackieren (ca. 4%) und weitere für

Verpackung, Versand etc. (ca. 4%) können durch eine funktionsintegrierte Aufbautechnik eventuell ebenfalls reduziert werden. Diese C-Kosten sollen jedoch hier nicht näher betrachtet werden. Insgesamt folgt, daß etwa 40% des Gesamtkostenanteils durch Einsatz der MID-Technologie beeinflusst werden können.

8.3.2 Anforderungs- und Zielanalyse

In Abstimmung zwischen Automobilbauer und Zulieferer wurde zu Beginn der Entwicklungsarbeiten die zu erfüllenden Anforderungen in einem Lastenheft strukturiert, wobei insbesondere Rahmenbedingungen zu den Bereichen Produkteigenschaften, Werkstoff, Geometrie und Fertigung enthalten sind.

Idealer Ausgangspunkt für die Entwicklung einer MID-Baugruppe ist die Neukonstruktion, bei der ohne den Zwang der Anpassung an bestehende Konfigurationen die optimale Form des Schaltungsträgers gestaltet werden kann. Gleichzeitig lassen sich in diesem Fall auch die Produktionsprozesse neu konzipieren und damit Konstruktion und Fertigung eng aufeinander abstimmen. Damit ergibt sich ein sehr hohes Kostensenkungspotential.

Da dieser Schritt gewöhnlich durch die Notwendigkeit der Einführung neuer Technologien erheblichen Aufwand an Investitionen und Zeit zum Einrichten der Anlagen und Sammeln von Erfahrung fordert, wird in der industriellen Praxis gerne der pragmatische Ansatz gewählt, eine konventionelle Lösung unter Beibehaltung der Rahmenkonstruktion auf die neue Technologie umzustellen. Das Risiko wird durch den Einsatz bewährter Verfahren und bestehender Fertigungsmittel erheblich minimiert. So können die Vorteile der MID-Technologie aufgezeigt werden, ohne hohe Vorleistungen an Investitionen oder lange Einführungszeiten in Kauf nehmen zu müssen.

Die oben beschriebenen Gründe machen die Einführung der MID-Technologie in zwei Stufen sinnvoll. Die Ziele der ersten Phase leiten sich daraus wie folgt ab:

- Reduzierung der Gesamtkosten,
- Integration der Stecker,
- Einsatz konventioneller Fertigungstechnik,
- Beibehaltung der Gehäusegeometrie und
- Verwendung der bisherigen elektronischen Bauelemente.

8.3.3 Konstruktive Entwicklung der MID-Lösung

Die Werkstoffauswahl wird von der Forderung bestimmt, konventionelle Wellenlötverfahren einzusetzen. Vorausgegangene Versuche zur Temperaturbelastung in verschiedenen Lötprozessen zeigen, daß auch spezielle Polyamide die hohen Temperaturen (bis 250°C) auf Grund der sehr kurzen Kontaktzeit (ca. 5s) widerstehen können (siehe Kapitel 5.3). Auf

Grund der guten Eignung für die Zweikomponentenspritzgußtechnologie, der hervorragenden Metallisierbarkeit sowie insbesondere dem Kostenvorteil gegenüber Hochtemperaturthermoplasten wird für die Leiterbahnbereiche ein PA66 und für die tragenden Bereiche PA6 ausgewählt.

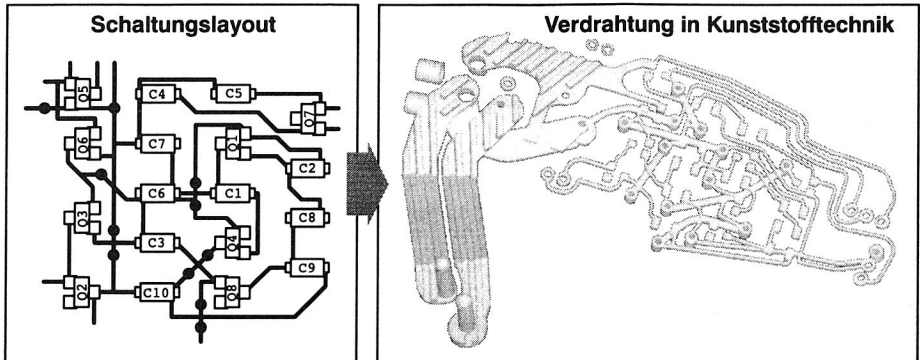


Bild 83: Elektronisches Schaltungslayout der MID-Baugruppe

Das herkömmliche Schaltungslayout erweist sich auf Grund der veränderten Geometrie des Schaltungsträgers, der fehlenden Anbindung des Mikroschalters und insbesondere wegen der für die Zwei-Schuß-Technologie zu feinen Leiterbildstrukturen als ungeeignet. Das neu entflochtene Layout (siehe Bild 83) wurde durch die Aufhebung bestehender Lötshatteneffekte und die Gestaltung der Padflächen [131] hinsichtlich der Lötbarkeit optimiert. Die Anwendung von Durchkontaktierungen, die beim Zwei-Schußverfahren gegenüber der Leiterplattentechnik unerhebliche Mehrkosten verursacht, entschärft kritisch Layoutstellen und verbessert den Stromfluß. Unter Einsatz der rechnergestützten Platzierungs- und Routingalgorithmen (siehe 6. Kapitel) konnte auf Verlegung von Leiterbahnen unter Bauelementen verzichtet werden und der minimale Abstand auf 0,7mm und die minimale Breite der Leiterbahnen auf 0,4mm begrenzt werden.

Die mechanische Konstruktion des neuen Schaltungsträgers integriert alle bisherigen elektrischen und mechanischen Bauteile (Stecker, Nieten, 2 Motorkontakte, Frontblende, 2 Leiterplatten, Jumper). Der Fügeprozeß der rein elektronischen Komponenten (SMD, THD, Relais etc.) wird durch Positionierungshilfen und Schnapphaken erleichtert. Durch das Zusammenfassen beider Leiterplatten kann ein Lötvorgang eingespart werden. Montage und Logistik werden dadurch insgesamt stark vereinfacht und erhebliche Materialkosteneinsparungen erzielt. Der zweipolige Stecker zum Kabelbaum konnte um 90° gedreht werden. Damit konnte die Anbindung zu den Leiterbahnen erleichtert, das Spritzguß-Werkzeug vereinfacht und der Einbau der Schiebedachsteuerung effizienter gestaltet werden.

Das MID-Bauteil ist für die Herstellung in Zwei-Schußtechnik (siehe Kapitel 4.1.1) konzipiert, die Metallisierung des Leiterbildes in Volladditiv-Technik. Nur in diesem Herstellungsverfahren kann die komplexe räumliche Struktur der Leiterbahnen realisiert werden. Über die relativ hohen Stückzahlen können die zusätzlichen Kosten für die aufwendigeren Spritzgußformen amortisiert werden.

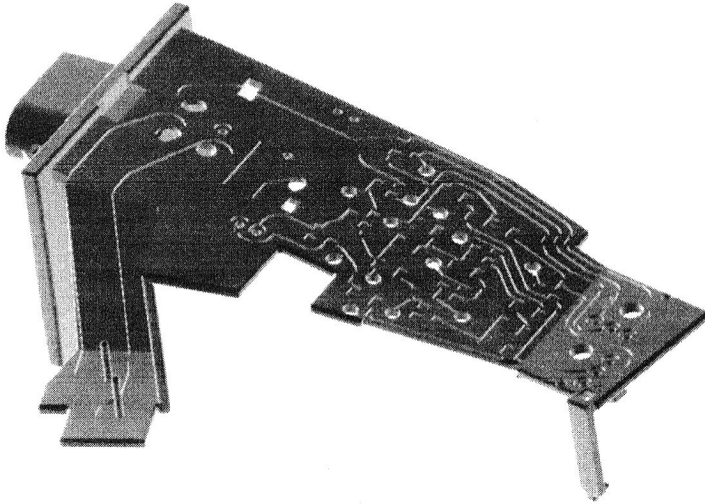


Bild 84: E-Modul in MID-Technologie (schattierte Darstellung)

Die Verbindung mehrerer MIDs zu einem Nutzen oder die Bereitstellung eines Werkstückträgers ermöglicht den simultanen Transport durch die vorhandenen Anlagen zum Kleberdispensen und SMD-Bestücken. Die bisher manuell durchgeführte Montage der THDs und der Exoten wird in der neuen Lösung durch integrierte Schnapphaken und Positionierungshilfen einfacher und sicherer. Die Aushärtung des Klebers ca. 3min bei 130°C entspricht einem Tempervorgang für den Kunststoff, der dessen Formstabilität erhöht. Das entwickelte E-Modul in MID-Technologie kann auf konventionellen Wellenlötanlagen verlötet werden. Die abgewinkelte Form des Schaltungsträgers kann Strömungsveränderungen in der Lötwellen verursachen, die in durchgeführten Versuchen jedoch keine negativen Auswirkungen auf die Benetzbarkeit hatten. Integrierte Stege im Bereich des Mikroschalters schotten die Oberfläche gegen einen Überlauf der Lötwellen ab.

8.3.4 Wirtschaftlichkeitsvergleich

Bereits die Umgestaltung der konventionellen Konstruktion in eine MID-Variante erschließt ein erhebliches Rationalisierungspotential. Die Aufstellung in Bild 85 quantifiziert die Kosten-

einsparungen der integrierten Lösung: Die gesamte Baugruppe kann danach mit um ca. 24% niedrigeren Herstellungskosten produziert werden. Vergleicht man gerechterweise jedoch nur die Bereiche, die direkt vom Einsatz der MID-Technologie betroffen sind, erkennt man das eigentliche Einsparungspotential des integrierten MID-Bauteils, das um 57% günstiger ist, als die Summe der konventionellen Bauteile.

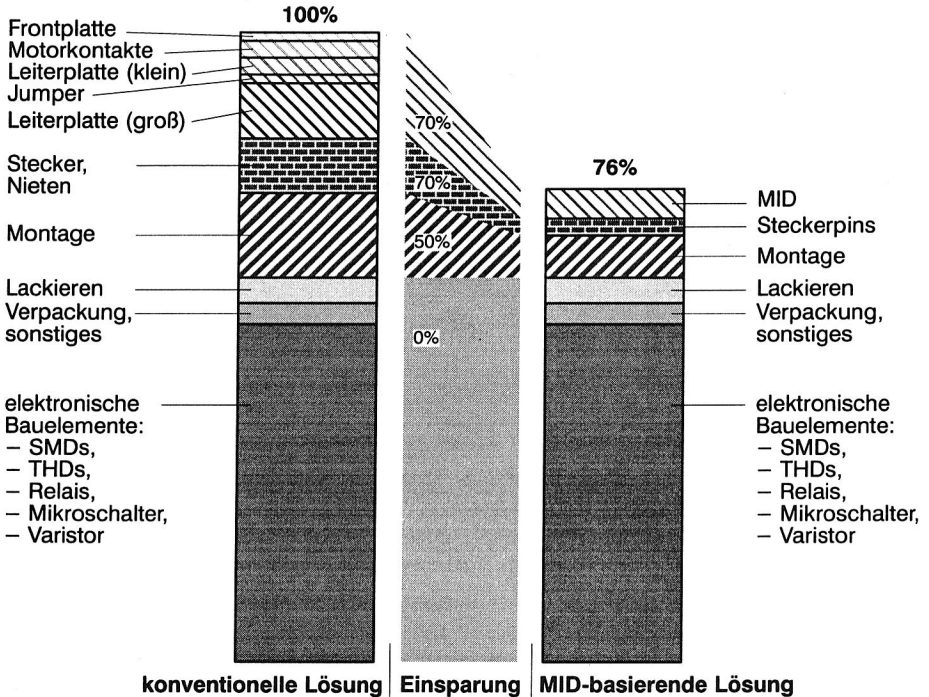


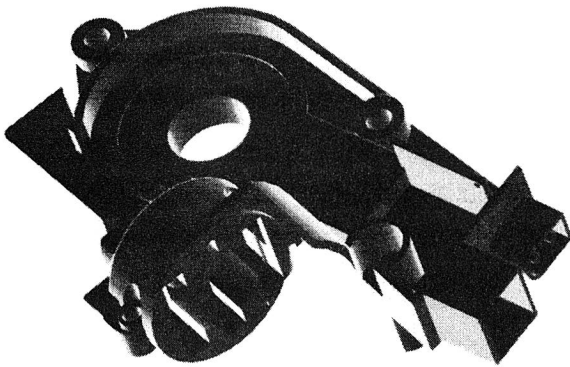
Bild 85: Vergleich der Herstellungskosten von konventioneller und MID-Lösung

Darüberhinaus konnten weitere qualitative Vorteile wie eine höhere Zuverlässigkeit durch weniger Verbindungsstellen, die Vereinfachung der Logistik durch weniger Bauteile, die Verkleinerung des Bauraumes, die Reduzierung der Werkstoffvielfalt sowie die Verbesserung der Rezyklierbarkeit erzielt werden. Neben den Montagekosten, die für die MID-Alternative konservativ geschätzt wurden, bietet auch der relativ hohe Kosten-Anteil für die Lackierung, der in der neuen Aufbautechnik eigentlich nicht mehr notwendig ist, zusätzliche Einsparungsmöglichkeiten.

8.3.5 Zusätzliche Einsparungseffekte durch weitergehende Integration

In der zweiten Konzeptphase kann die Schiebedachsteuerung komplett neu überdacht werden. Da die konstruktive Gestaltung sich damit nur noch an den geometrischen Fixpunkten von Motor und Getriebe orientieren muß, kann ein einziges MID zusätzlich zu den Funktionen der Stufe 1 auch die Aufgaben beider Gehäuseteile in sich vereinen. Mit der Umstellung der Positionserkennung vom bisherigen Mikroschalter auf Hall-Sensoren können sowohl die Steuerräder im Getriebe als auch das bisherige Aluminium-Druckgußgehäuse sowie weitere Bauteile des Motors entfallen, deren Funktion in das geplante MID integriert werden könnte. Ebenso könnten Funktionselemente des Innenraums mit aufgenommen werden (siehe Bild 86).

Damit eingesparter Bauraum und Gewicht ermöglichen die Aufnahme einer komplexen elektronischen Schaltung zur komfortableren Steuerung des Schiebedaches. Diese Schaltung zeichnet sich durch weniger aber höher integrierte Bauelemente aus. Diese Randbedingungen führen die Zwei-Schuß-Technologie an die Grenzen ihrer Möglichkeiten. Um deren Vorteile, insbesondere die geometrische Gestaltungsfreiheit, für diese Anwendung zu bewahren und gleichzeitig feinere Strukturen erreichen zu können, bietet sich die Kombination mit anderen Verfahren zur Strukturierung des Leiterbildes, wie z. B. die Laserstrukturierung, an.



Motor und Getriebe

- Steuerräder im Getriebe
- Aluminium-Druckgußgehäuse
- Kohlenhalterung
- Entstörelektronik
- Lagerschild

Innenraumelektronik

- Bedienschalter
- Empfänger für Fernbedienung
- Regensensor für Schiebedach
- Leselampe
- Elektronik für automatisch abblendbaren Innenspiegel

Bild 86: Weitere Integrationspotentiale durch MID-Technologie

Beispielhaft für eine Vielzahl von Anwendungen nicht nur aus der Automobil Elektronik zeigt abschließend das oben entwickelte MID eindrucksvoll die Möglichkeiten zur Integration und Rationalisierung durch den Einsatz räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger auf.

9. Zusammenfassung und Ausblick

Molded Interconnect Devices sind durch eine intelligente Verknüpfung neuer Werkstoffe, fortschrittlicher Fertigungsprozesse und innovativer Verfahrensketten in integrierten Produktstrukturen gekennzeichnet. Durch die Integration mechanischer und elektrischer Funktionen und die damit verbundene Reduktion der Teilezahl können elektronische Produkte signifikant miniaturisiert und rationalisiert werden. Dieser Quantensprung zur Gestaltung elektronischer Geräte revolutioniert die gesamte Herstellungskette: Beginnend bei der rechnergestützten Konstruktion der räumlich ausgebildeten elektronischen Schaltung, über die Verarbeitung und insbesondere die strukturierte Metallisierung der adäquaten Thermoplaste bis zur Montage der elektronischen Bauelemente in dreidimensionale Schaltungsträger müssen alle konventionell eingesetzten Verfahren in Frage gestellt oder völlig ersetzt werden. Das daraus resultierende immens komplexe Technologiefeld wurde in seiner Gesamtheit wissenschaftlich bisher nicht bearbeitet.

Ziel der vorliegenden Dissertation war daher, basierend auf einer ganzheitlichen Betrachtung, die Möglichkeiten und Grenzen dieser neuen Aufbautechnologie aufzuzeigen, deren Herstellungsprozesse zu analysieren, Innovationspotentiale daraus abzuleiten sowie Lösungsansätze für die detektierten Probleme zu entwickeln. Die Bearbeitung der rein technischen Fragestellungen wird mit Hilfe der durchgeführten Applikations- und Marktpotentialanalysen am Beginn der Arbeit und der abschließenden wirtschaftlichen Bewertung auch aus betriebswirtschaftlicher Perspektive reflektiert, und damit die ökonomische Relevanz der MID-Technologie untermauert. Die bisher fehlende Verfügbarkeit von Erfahrungswissen über MID-Technologien und -Applikationen wird durch die Realisierung des hypertextgestützten MID-Informationssystem MIDIS, in dem über 100 verschiedene MID-Produkte detailliert beschrieben und nahezu alle existierenden Verfahrensschritte und Prozeßketten zur Herstellung von MIDs strukturiert gespeichert wurden, egalisiert.

Die Gliederung der Arbeit orientiert sich demzufolge an der Prozeßkette zur Herstellung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger. Dazu wird für jeden der einzelnen Teilschritte der heutige Stand der Technik dargestellt, bestehende Defizite herausgearbeitet und daraus begründete Entwicklungsarbeiten vorgestellt. Zu den bisher eingesetzten, werkstoffunflexiblen und umweltbedenklichen naßchemischen Verfahren zur Metallisierung von Kunststoffen wird durch die Anpassung physikalischer Beschichtungsverfahren an die Anforderungen elektronischer Baugruppen eine technisch und wirtschaftlich interessante Alternative aufgezeigt. Die dabei erzielten Haftfestigkeiten liegen im Bereich der galvanischen Verfahren, Möglichkeiten zur einfachen Strukturierung konnten gefunden werden. Dagegen ist die damit metallisierbare Werkstoffvielfalt weitaus größer, die Umweltverträglichkeit ungleich höher und die Prozeßkosten insbesondere für die Kunststoffvorbehandlung deutlich niedriger. Die mögliche Wiederverwertung der eingesetzten Rohstoffe wird durch die Evaluierung von Trennverfahren für Kunststoffsubstrat und metallischer Beschichtung, die eine sortenreine Separierung der einzelnen Fraktionen von über 95% ergab, sichergestellt.

Die gesteigerte Komplexität der fertigungsgerechten Konstruktion, die sich aus der Verbindung von Schaltungslayouterstellung und Spritzgußprozeß insbesondere aus dem Einsatz der Mehrfachspritzgußverfahren ergeben, wird durch die Erstellung eines Konstruktionsrichtlinien-Kataloges, der auch die Interdependenzen zwischen Kunststoffverarbeitung und Metallisierung berücksichtigt, beherrschbar gemacht. Für das 3D-Maskenbelichtungsverfahren wurden Folien-Materialien und Laserbeschriftungsprozeß für die Anwendung in der Serienproduktion optimiert. Die durchgeführten Arbeiten gestatten Strukturfeinheiten von bis zu 150µm sowie eine deutliche Verbesserung der Tiefziehfähigkeit bei gleichbleibender Schwärzung.

Die Validierung konventioneller Bestückssysteme verdeutlicht deren Einsatzgrenzen, die bereits bei einfachen 2½D-MIDs liegen. Für die Montage komplexerer Geometrien räumlicher elektronischer Baugruppen wurden Bestückssysteme konzipiert, die eine Platzierung elektronischer Komponenten in allen sechs Freiheitsgraden ermöglichen. Die Realisierbarkeit elektronischer Komponenten auf schrägen Prozeßflächen wurde experimentell nachgewiesen und die Grenzen der Haftfähigkeit der verschiedenen Verbindungsmedien Lotpaste, Fixier- und Leitlebter ermittelt. Aufbauend auf der Evaluierung herkömmlicher Massenlötverfahren wurden alternative Möglichkeiten der Verbindungstechnik für thermoplastische Basismaterialien aufgezeigt. Die durchgeführten Versuche zum robotergeführten selektiven Löten bestätigten durch die geringen Temperaturbelastungen der Kunststoffsubstrate ihre Eignung für den MID-Einsatz.

Ein besonderer Schwerpunkt stellt die Entwicklung integrierter Konstruktionssysteme für mechatronische Geräte dar. Die entwickelte Software-Schnittstelle für die Kopplung der CAD-Systeme für den mechanischen und den elektronischen Entwurf ermöglicht das rechnergestützte Layout aller abwickelbaren 3D-Schaltungen. Für alle komplizierteren Geometrien wurde eine Entwicklungsumgebung konzipiert und exemplarisch implementiert, die die beiden Funktionsbereiche des ECAD und des MCAD integriert. Für zwei Schlüsselprozesse der MID-Fertigung, der 3D-Laserstrukturierung und der räumlichen Bestückung, wurden durchgängige CAD/CAM-Verfahrensketten aufgebaut. Abschließend werden am Beispiel einer Automobil-Anwendung die Vorteile des MID-Ansatzes transparent gemacht.

Während Gegenstand dieser Arbeit insbesondere die Entwicklung von Produktions-Prozessen war, muß in weiterführenden Arbeiten die Aufmerksamkeit auch der Untersuchung von speziellen Funktionselementen in MID-basierten Produkten gewidmet werden. So steht die wissenschaftlich fundierte Beantwortung von Fragestellungen wie Steckverbindungstechnik in MID, Realisierung von Federeigenschaften durch metallisierten Kunststoff, Belastbarkeit von Leiterbahnen mit hohen elektrischen Strömen etc. noch für weitere wissenschaftliche Abhandlungen aus. Können die prozeßtechnischen Probleme, die sich insbesondere aus dem Wunsch nach Anwendung thermoplastischer Kunststoffe bei gleichzeitiger Bewahrung der herkömmlichen Lötverfahren ergeben, und die noch offenen Fragen bezüglich der Produktgestaltung mittelfristig gelöst werden, wird sich langfristig die Technologie der räumlichen spritzgegossenen Schaltungsträger in allen elektronischen Geräten etablieren.

10. Literaturverzeichnis

1. Smith, A. *An Inquiry into the Nature and Causes of the Wealth of Nations.*
Todd, W. B. Reprint, Oxford, Clarendon, 1776.
2. Waterman, R. H. *Die neue Suche nach Spitzenleistungen. Erfolgsunternehmen*
 im 21. Jahrhundert. Econ, Düsseldorf 1994.
3. Ohmae, K. *Die neue Logik der Weltwirtschaft: Zukunftsstrategien der inter-*
 nationalen Konzerne. Hoffmann und Campe, Hamburg, 1991.
4. Spur, G. *Unternehmensführung in der zukünftigen Industriegesellschaft.*
 in: Tagungsband des Produktionstechnischen Kolloquiums
 (PTK), Berlin, 1992.
5. Warnecke, H., –J. *Die fraktale Fabrik.* Springer Verlag, Berlin, 1992.
6. Womack, J. P. *The Machine that changed the world.*
Jones, D. T. New York, NY, Rawson, 1990.
7. Hammer, M. *Reengineering the Corporation.*
Champy, J. Harper Collins Publishers, New York, 1993.
8. Eversheim, W. *Organisation in der Produktionstechnik.*
 Weka Verlag, Augsburg, 1994.
9. Ehrenstein, G. W., *Umwelt- und recyclinggerechte Produktentwicklung.*
Brinkmann, Th., WEKA Verlag, Augsburg 1993.
Steinhilper, R.
10. Feldmann, K., *Neue Rationalisierungspotentiale durch Funktionsintegration.*
Franke, J. PA, 3/1992, Oldenburg Verlag, München 1992, S. 18–21.
11. Lethonen, E. W. *Manufacture of Circuit Modules using Etched Molds.*
 U.S. Patent, Nr. 481.601, 23.08.1965.
12. Mc Camley, P. *Thermoplastic materials and technology molded printed wiring*
 **boards*.* 1st International SAMPE Electronics Conference.
 Vol.1. Electronic Materials and Processes, 1987, s. 224–235.
13. Hriciga, A. L., *Performance testing of molded circuit interconnects.*
Mihelcic, J. M. Connection Technology, 2/1988, S. 20–24.
14. Barclay, B. F. *Molded Circuit Boards.* Printed Circuit Network, 2/1988, S. 2-6.
15. Barclay, B.F. *Gespritzte Leiterplatten.* in: Handbuch der Leiterplattentechnik
Freed, D.F. Band 2 – Neue Verfahren, Neue Technologien; Eugen G. Leuze
 Verlag; Saulgau; 1991, S. 382–395.
16. Goldbacher, A. *3D-Hybride sprengen Entwicklungsgrenzen.*
 Elektronik 15/1990, Franzis Verlag GmbH, München, S. 28–31.

17. Freund, B. *Neue Herausforderungen an die Produktion durch Packungsdichte und Funktionsintegration*. Tagungsband zur Fachtagung Productronica, Münchner Messe und Ausstellungsgesellschaft mbH, München, 1991.
18. N.N. *IPC Molded Printed Board Subcommittee IPC-MB-380, Guidelines for Molded Interconnects*. Institute for Interconnecting and Packaging Electronic Circuits, Lincolnwood, Illinois, 1989.
19. Spur, G.,
Merz, P. *Spritzgießen keramischer Bauteile*. Zwf CIM 89 (1994) 6, Carl Hanser Verlag, München 1994, S. 338–340.
20. Feldmann, K.,
Franke, J. *Automated assembly of new 3D Molded Interconnection Devices*. Proceedings 11. IEEE International Electronics Manufacturing Technology Symposium, San Francisco, USA, 16.-18.09.1991.
21. Feldmann, K.,
Brand, A.,
Franke, J., *Räumliche spritzgegossene Schaltungsträger helfen Kosten sparen*. PRONIC (1993), Vogel Verlag Würzburg, 1993.
22. Grampp, K. *Rechnerunterstützung bei Test und Schulung an Steuerungssoftware von SMD-Bestücklinien*. Dissertation an der Universität Erlangen-Nürnberg, Carl Hanser Verlag München Wien, 1994.
23. Mettler, J. *The US-Industrie and Market*.
in: Bürkner, Feldmann, Franke, Römer (Hrsg.): Proceedings 1. Int. Congress Molded Interconnect Devices, Erlangen 1994, Meisenbach Verlag, Bamberg, S. 373-379.
24. N.N. *EECA-PCB European Statistic 1993*.
25. Gasch, M. *Die Lage auf dem europäischen Leiterplattenmarkt*. ZEV-Leiterplatten 11/93, S. 14-16.
26. Feldmann, K.,
Franke, J. *MID-Technologie und Marktentwicklung in Europa*.
in: Bürkner, Feldmann, Franke, Römer (Hrsg.): Proceedings 1. Int. Congress Molded Interconnect Devices, Erlangen 1994, Meisenbach Verlag, Bamberg, S. 5–22.
27. N.N. *The Bishop report. Connector*.
Bishop&Associates, Inc. Issue No. 31, May 18. 1994, Vol. 2Q94.
28. N.N. *Die elektrotechnische Industrie. Statistischer Bericht 1994*. ZVEI, Frankfurt 1994.
29. Hartley, N. *Business Opportunities for Plastics in the New Age of Electronics*. Proceedings Plastronics '93, Scotland Business Research, Princeton NJ, USA 1993.

30. Frisch, D.C.,
Yu–Ling T. *Additive processes for 3-D molded circuit packages.*
Proceedings of the Technical Programm of the National Electronic Packaging and Production Conference – NEPCON WEST: Packing, Production, Testing, 1986, S. 300–309.
31. Hunter, P. *The Adhesion Promotion and Metallisation Process.*
in: Bürkner, Feldmann, Franke, Römer (Hrsg.): Proceedings 1. Int. Congress Molded Interconnect Devices, Erlangen 1994, Meisenbach Verlag, Bamberg, S. 197-208.
32. Boone, L. *Metallisieren und Strukturieren von Spritzgießteilen mit integrierten Leiterzügen.* in: 15. Ulmer Gespräche Kunststoffmetallisierung und leitende Polymere. Leuze Verlag, Saulgau 1993, S. 100-113.
33. Quinn, K.,
Travis, J.,
Ganjei, J. *Injection molded thermoplastic printed circuit boards.*
in: 19. Annual Connectors and Interconnection Technology Symposium Proceedings, 1986, S. 35–45.
34. N.N. *Methodisches Auswählen des richtigen Werkstoffes nach technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten.*
VDI–Werkstoffauswahl–Richtlinie.
35. Bednarz, J. *Kunststoffe in der Elektrotechnik und Elektronik.*
Peter Eyerer (Hrsg.), Stuttgart, 1988.
36. Ozegowski, M. *Bewertungskriterien für thermoplastische Werkstoffe unter Berücksichtigung von Umweltaspekten.*
Interner Bericht, Siemens AG, Berlin, 1993.
37. Jungnickel B.-J. *Umformen von Kunststoffen in festem Zustand.*
Expert Verlag, Esslingen 1987.
38. Ehrenstein, G. W.
Kuhmann, K. *Bedeutung des Spritzgießprozesses in der MID-Fertigung.*
in: Bürkner, Feldmann, Franke, Römer (Hrsg.): Proceedings 1. Int. Congress Molded Interconnect Devices, Erlangen 1994, Meisenbach Verlag, Bamberg, S. 169-180.
39. Domininghaus, H. *Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften.*
4. Auflage; VDI–Verlag; Düsseldorf; 1992.
40. Ehrenstein, G. W. *Polymere Werkstoffe.* Carl Hanser Verlag, 1990.
41. Zahradnik, F. *Hochtemperatur–Thermoplaste.* VDI–Verlag, Düsseldorf, 1993.
42. Brown, R. P. *Taschenbuch Kunststoff–Prüftechnik.*
Hanser Verlag; München, Wien; 1984.
43. Ebneith, H.,
Riedel, W. *Galvanische Verfahren.* in: Kunststoff-Metallisierung, Handbuch für Theorie und Praxis. Leuze Verlag, Saulgau, 1992, S.43–64.

44. Förster, F. *Untersuchungen zum Mechanismus der Haftung zwischen Polymeren und außenstromlos abgeschiedenen Metallschichten.* Dissertation an der Technischen Universität Berlin, 1985.
45. Nakahara, H.,
Huntington, L. *Full Build Electroless Copper Plating is the Process of the Future.* in: Electronic Packaging and Production, Cahners Publishing Company, January 1991, S. 51–53.
46. Wolf, G. D.,
Giesecke, H. *Neues Verfahren zur ganzflächigen und partiellen Metallisierung von Kunststoffen.*
in: 15. Ulmer Gespräche Kunststoffmetallisierung und leitende Polymere. Leuze Verlag, Saulgau 1993, S. 127–134.
47. Roth, H.–K.,
Gruber, H. *Laser–induced Generation of highly conductive areas.* Synthetic Metals, 37 (1990), S. 151–64.
48. Sauerer, W. *Elektronisch selbstleitende Polymere.* Kunststoffe 81 (1991), S. 394–399.
49. Ganz, J.,
Köhler, E. *LAD – ein neuartiges, laserunterstütztes Beschichtungsverfahren für feine Strukturen in der Elektronik.* Metall 45(1991)1, Metall–Verlag, Berlin.
50. Kern, H. *Dickfilm-Polymer–Leiterplatten.*
in: Herrmann, G., Handbuch der Leiterplattentechnik (Band 3), Leuze Verlag, Saulgau 1993.
51. Howard, J. P. *Interfering with Interference – The Role of Conductive Coatings in Electronic Appliances.* in: Tagungsunterlagen zur Plastronics '93, Frankfurt, 29.-30.06.1993, S. 241–248.
52. Todd, M.,
Capote, M. A. *Multilayer Printed Circuits from Revolutionary Transient Liquid Phase Inks.* in: Proceedings Surface Mount International, 1993.
53. N.N. *New dry additive process for injection *moulded* *boards*.* Electronic Production, 1985, S. 61.
54. Soszek, P. *Two Novel Additiv Processes to Create Circuitry: Direct Laser Writing and Direct Electrostatic Transfer and Deposition.*
in: Circuit World 19(1993)4, S. 12–15.
55. Bauser, H.,
Bolch, H.,
Mager, T.,
Schindler, B. *Heißprägen von Leiterbahnen – Verfahren und Anwendungsmöglichkeiten.* SMT/ASIC 1988, Hüthig Buch Verlag Heidelberg 1988, S. 119–121.
56. Herrmann, G.
(Hrsg.) *Handbuch der Leiterplattentechnik.* Band 3, Eugen Leuze Verlag, Saulgau 1993.

57. Ebner, H.,
Riedel, W. *Physikalische Verfahren.*
in: Kunststoff-Metallisierung, Handbuch für Theorie und Praxis.
Leuze Verlag, Saulgau, 1992, S.65–85.
58. Frey, H.,
Kienel, G. *Dünnschichttechnologie.*
VDI Verlag, Düsseldorf 1987.
59. Mäschtig, K. *Dünnschichttechnologie—Allgemeine Grundlagen und Methoden der Dünnschicht-Technik zur Oberflächenvergütung.*
Syntex GmbH, Frankfurt/Main 1988.
60. Tompler, S. *Metallisieren von Kunststoffen im Hochvakuum.*
Kunststoffe 78(1988)6, Carl Hanser Verlag, München.
61. Botzler, P. *Metallisierung von Kunststoffen durch PVD-Verfahren.*
in: Bürkner, Feldmann, Franke, Römer (Hrsg.): Proceedings
1. Int. Congress Molded Interconnect Devices, Erlangen 1994,
Meisenbach Verlag, Bamberg, S. 211-225.
62. Bialojan, W.,
Geisler, M. *Beschichten im Vakuum, Metallisieren von Kunststoffoberflächen.*
Kunststoffe 81(1991)7, Carl Hanser Verlag, München.
63. N.N. *Gitterschnittprüfung.* Deutsche Industrienorm Nr. 53 151
(Entwurf), Beuth Verlag, Berlin 1990.
64. Dobrinski, P.,
Krakau, G.
Vogel, A. *Physik für Ingenieure.*
7. Auflage, B. G. Teubner Verlag, Stuttgart 1988.
65. Schwartz, W.,
Wagner, W. *Thermal Limitations in Roll Coating Processes.*
Proceedings of the 28th Annals of the Technical Conference of
the Society of Vacuum Coaters, Philadelphia 1985.
66. Atkins, P. W. *Physikalische Chemie – Arbeitsbuch.*
Springer Verlag, Berlin.
67. Schammler, G.,
Springer, J. *Chemische, physikalische und mechanische Bindungscharakteristiken.*
in: Stromlose Beschichtung von Metall, Kunststoff,
Glas und Keramik, Berichtsband zum 10. Ulmer Gespräch,
1988 in Neu-Ulm, Eugen G. Leuze Verlag, Saulgau 1988.
68. Packham, D.E. *Adhesion Aspects of Polymeric Coatings.*
Plenum Press New York, 1983.
69. Wu, S. *Polymer Interface and Adhesion.*
Marcel Dekker Inc., New York, 1982.
70. Liebel, G. *Reinigung und Modifizierung von Kunststoffoberflächen.*
in: Stromlose Beschichtung von Metall, Kunststoff, Glas und Keramik,
Berichtsband zum 10. Ulmer Gespräch, 1988 in Neu-Ulm,
Eugen G. Leuze Verlag, Saulgau 1988.

71. Schwing, U. *Heutige Möglichkeiten der Dickschicht- und Dünnschichttechnik.* Ulm 1993.
72. Timpe, H.-J. *Photopolymere – Prinzipien und Anwendungen.* VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1988.
73. Merricks, D. *Use of Electrodepositable Photoresist XP91147 on Philips CFT Samples.* Shipley Technical Memorandum, 3. June 1992.
74. Schiller, S.
Heisig, U. *Bedampfungstechnik, Verfahren – Einrichtungen – Anwendungen in VEB.* Technik Verlag, Berlin 1975.
75. Severin, J. W. *Start-up strategy for Philips PMF on European MID market.* in: Bürkner, Feldmann, Franke, Römer (Hrsg.): *Proceedings 1. Int. Congress Molded Interconnect Devices*, Erlangen 1994, Meisenbach Verlag, Bamberg, S. 409-423.
76. N.N. *Recycling von HT-Thermoplasten.* *Plastverarbeiter* 11 (1992) 16.
77. Menges, G.
Michaeli, W.,
Bittner, M. *Recycling von Kunststoffen.* Carl Hanser Verlag, München 1992.
78. N.N. *Entwurf der Verordnung über die Vermeidung, Verringerung und Verwertung von Abfällen gebrauchter elektrischer und elektronischer Geräte (Elektronik – Schrott – Verordnung).* Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 1991.
79. Alting, L.,
Jorgensen, J
et al. *Product Life Cycle Assessment as a Decision Making Tool in Product Development.* IEEE Int. Symposium on Electronics and the Environment, 1994.
80. Kuhmann, K.,
Ehrenstein, G. W. *Recycling von Thermoplasten.* Literaturrecherche zum Materialverhalten, Eigenverlag, Erlangen 1993.
81. Hopperdietzel, R.,
Franke, J.,
Schiebisch, J. et al. *Recycling elektronischer Geräte.* *Elektronik* 15/1992, Franzis Verlag GmbH, München.
82. Feldmann, K.,
Krause, D.
Meerkamm, H.,
Scheller, H. *Design for Recyclability and Economic Planning of Disassembly based on the Recyclinggraph Tool.* in: Feldmann (Hrsg.): *Proceedings Int. CIRP Seminar on Recycling RECY*, Erlangen, Meisenbach Verlag Bamberg, 1994.
83. Kahmeyer, M.,
Schmaus, T. *Demontagegerechte Produktgestaltung zwischen Montage, Aufbereitung und Entsorgung.* VDI Berichte Nr. 999, VDI Verlag Düsseldorf, 1992.
84. Steinhilper, R. *Industrielle Demontage von Serienprodukten – Praxis und Perspektiven.* in: VDI-Berichte 906, *Recycling – Eine Herausforderung für den Konstrukteur*, VDI-Verlag, Düsseldorf 1991.

85. Breer, J.,
Dechow, O.,
Jochimsen, J.,
Röhler, W. *Computerschrott – Recycling –
Stand und Entwicklungsmöglichkeiten.*
Erich Schmidt Verlag, Berlin 1992.
86. Riller, P. *Wege zur recyclingfreundlichen Konstruktion von Elektro –
Hausgeräten.* Utech Berlin, im Tagungsband: Verwertung und
Entsorgung von Elektronikschrott, Berlin 1992.
87. Feldmann, K.,
Beitinger, G.
Franke, J.,
Scheller, H., *Recycling von 3D-Moulded Interconnection Devices.*
Metalloberfläche 11(1994)48, Carl Hanser Verlag, München,
S. 811 – 818.
88. Ehrenstein, G. W. *Recycling von Kunststoffen.*
Tagungsunterlagung zur SWISSBONDING 1994.
89. van der Flier, P. *Recycling of MIDs.*
in: Bürkner, Feldmann, Franke, Römer (Hrsg.): Proceedings
1. Int. Congress Molded Interconnect Devices, Erlangen 1994,
Meisenbach Verlag, Bamberg, S. 167.
90. Feldmann, K.,
Franke, J.
Scheller, H. *Platinen: Zerlegen statt Wegwerfen –
Konzept einer Demontage-Anlage für Leiterplatten.*
Elektronik 20/1994, Franzis-Verlag, Poing, S. 48-56.
91. Schmiemann, A.,
Orth, P.,
Meyer, H. *Entschichten der Oberflächen von Kunststoff-Altmaterialien.*
Kunststoffe 84(1994)3, Carl Hanser Verlag, München 1994.
92. Neumüller, O.-A., *Römpps Chemielexikon.* 8. Auflage, Band 1-3,
Franckh'sche Verlagshandlung, Stuttgart 1979.
93. Ullmann, F. *Ullmanns Encyklopädie der technischen Chemie.*
8. Auflage, Band 15-17, Verlag Chemie, Weinheim 1979.
94. Boone, L.,
Heerman, M.,
Mattelin, A.,
Roelants, E. *Integration mit SIL – Technik.*
Siemens – Zeitschrift Special FuE, Herbst 1992.
95. Thiele, R. *Änderung physikalischer Eigenschaften und Strukturen von Hoch-
polymeren nach hoher Verformung im Verbund mit Metallen.* Dis-
sertation am Institut für Physikalische Chemie, Clausthal 1988.
96. Bilitewski, B.,
Härdtle, G.,
Marek, K.,
Kijewski, K. *Recycling von Kunststoffabfällen –
Grundlagen, Technik, Wirtschaftlichkeit.*
Erich Schmidt Verlag, Berlin 1992.

97. Thome-Kozmiensky, K.J., Käufer, H. *Recycling von Kunststoffen.* EF-Verlag für Energie und Umwelttechnik, Berlin 1987.
98. Schmiemann, J. *Elektronikschrott zerlegen und verwerten.* in Umwelt Band 22, Nr. 3, 3/1992.
99. Ehrenstein, G. W. Schiebisch, J., Kuhmann, K. *Recycling und Qualitätssicherung von Konstruktionskunststoffen.* VDI Tagung Recyclinggerechte Produktentwicklung, Fellbach 1993.
100. Schäfer, G. *Möglichkeiten des Elektronikschrottrecyclings und Probleme der Kunststoffverwertung.* Seminarunterlagen "Praxis der Elektronikschrottsorgung, VDI Bildungswerk, Duisburg 1993.
101. Bilitewski, B., Härdtle, G., Marek, K. *Abfallwirtschaft – Eine Einführung.* Springer Verlag, Berlin 1990.
102. Feldmann, K., Franke, J. *Schaltungsträger in drei Dimensionen. Anwendungen von 3D Moulded Interconnection Devices.* Kunststoffe, 7-8(1993)99, Carl Hanser Verlag, München, S. 313-317.
103. Gregoire, G.D. *An alternative to traditional circuitry: 3D molded interconnect traces.* Proceedings of the Technical Program, NEPCON West, 1989, s. 1801–1805.
104. Suhr, M. L., Frisch, D. C. *Design Evolution from Concept to Production.* in: Bürkner, Feldmann, Franke, Römer (Hrsg.): Proceedings 1. Int. Congress Molded Interconnect Devices, Erlangen 1994, Meisenbach Verlag, Bamberg, S. 381-393.
105. Miyashita, T. *MID Materials and SKW Method.* in: Bürkner, Feldmann, Franke, Römer (Hrsg.): Proceedings 1. Int. Congress Molded Interconnect Devices, Erlangen 1994, Meisenbach Verlag, Bamberg, S. 257–266.
106. Gleixner, J. *Zweischußspritzguß und Metallisierung von Polyamiden.* in: Bürkner, Feldmann, Franke, Römer (Hrsg.): Proceedings 1. Int. Congress Molded Interconnect Devices, Erlangen 1994, Meisenbach Verlag, Bamberg, S. 159–166.
107. Hartmann, U.; Zaderej, V. *Aus 3D–Leiterplatten werden Produkte.* F&M, 99(1991)11, Carl Hanser Verlag, München.
108. Geiger, M., Pucher, H.-J., Glasmacher, M., Hutfless, J., Kickelhain, J. *Konzepte zur laserstrahlunterstützten, strukturierten Metallisierung von 3-D MIDs.* in: Bürkner, Feldmann, Franke, Römer (Hrsg.): Proceedings 1. Int. Congress Molded Interconnect Devices, Erlangen 1994, Meisenbach Verlag, Bamberg, S. 229–240.

109. Kickelhain, J. *Mikrostrukturierung von konventionellen und 3D-Leiterplatten mittels Lasertechnik.*
in: Tagungsband Leiterplattentagung, Fellbach 28./29.04.1994.
110. N.N. *Single- and Multilayer Molded Circuits Using Image Decals in the Moulding Process.* Electronic Manufacturing 7/90, S. 24-27.
111. Schmidt, W.,
Röhrs, G.,
Kostelnik, J. *Neue Dimensionen in der Leiterplattentechnik.*
F&M 102(1994)5–6, Carl Hanser Verlag, München 1994.
112. Fahrner, H.-M. *Der andere Weg zur Leiterplatte.* Surface Mount Technology 7/91, VP Verlagsgesellschaft mbH, Herrenberg, S. 44–47.
113. Zaderej, V.,
Mettler, J.,
Johnson, W.,
Strickland, W. *Three-dimensional plating or etching process and mask therefor*
US-Patent 1991, USPS 4985116, Mint-Pac, USA.
114. Schleedorn, M. *PVC-Folien zum Herstellen von Identifikations-Karten.*
Deutsches Patent DE 3544385 C1, Unilever N.V., 1987.
115. Herkt-Maetzky, C. *Kunststoffteile mit Laser beschriftet.*
Kunststoffe 81(1991)4, Carl Hanser Verlag, München.
116. Höger, A. *Warmformen von Kunststoffen.*
Carl Hanser Verlag, München, 1971.
117. Schraft, R. D.,
Wolf, E.,
Leicht, T. *Bestückautomaten.*
Hüthig Verlag, Heidelberg 1989.
118. Feldmann, K.,
Franke, J. *Integrated Assembly Systems for Mechanical and Electronic Components.* 24th Israel Conference on Mechanical Engineering, Haifa 19.05.92.
119. N.N. *Leiterplattenbestückung, Bestimmung der Genauigkeit und der Leistung von SMD Bestückautomaten.*
VDI/VDE – Richtlinie 3712, VDI Gesellschaft Feinwerktechnik, Beuth Verlag, Berlin 1991.
120. Reitinger, M. *SMT – Montage in der Flachbaugruppenfertigung – heute und morgen.* Tagungsband Leiterplatte 1994, VDI – Verlag GmbH, Düsseldorf 1994.
121. Sachs, L. *Angewandte Statistik.*
Springer Verlag, Heidelberg 1984, S. 204ff.
122. Husman, S.,
Yuan G. *Estimating Accuracy and Precision for an SMD Placement System.* Proceedings NEPCON West.

123. Feldmann, K.,
Franke, J. *Montagezellen für neue Strukturen elektronischer Geräte.*
Feinwerk und Meßtechnik 99 (1991) 7–8, Carl Hanser Verlag,
München, S. 313–317.
124. Feldmann, K.,
Brand, A.,
Gerhard, M. *Application and Extension of Conventional SMT Production
Equipment for the Assembly of 3 Dimensional Molded Intercon-
nection Devices (MID).* Proceedings Pronic 94, Paris.
125. Stober, R. *Lohnt sich die Leiterplattenbestückung mit Robotern?*
Elektronik 15/1990, Franzis Verlag GmbH, München, S. 91–92.
126. Tönshoff, K.,
Janocha, H.,
Gerstmann, U. *Robotergerauigkeit,
Erwartungen der Anwender und Realisierbarkeit.*
VDI-Z 132 (1990), Nr. 6, S. 93–97.
127. Wolf, E. *Bestücken von Leiterplatten mit Industrierobotern.*
Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York 1988.
128. Feldmann, K.
Brand, A. *Analytical and Experimental Research on Assembly Systems for
Molded Interconnect Devices (3-D MID).*
Annals of the CIRP, Vol. 43/1/1994, Singapore.
129. Brand, A.,
Feldmann, K. *Molded Interconnection Devices (MID) –
A new challenge for industrial robots.*
5. SME World Conference on Robotics Research, Boston 1994.
130. Flohr, R. *Beitrag zur optimalen Verbindungstechnik in der Oberflächen-
montage (SMT).* Dissertation, Hanser Verlag, München 1991.
131. Klein Wassink, R. J. *Weichlöten in der Elektronik.*
2. Auflage, Leuze Verlag, Saulgau 1991.
132. Hennemann, O.-D.
Mieske, H.
Dorbath, B. *Entwicklung von neuen Klebtechnologien in der Elektronik.*
Adhäsions–Buchreihe, Vogel–Verlag, München 1991.
133. Stein, H. *Der Einfluß rheologischer Parameter von Klebstoff und Lotpaste
auf die Fertigungsqualität in der SMD–Bestückung.*
in: Eder, Reichl (Hrsg.): Tagungsband SMT/ASIC/Hybrid vde-
Verlag, Berlin 1992.
134. Bandemer, H.,
Bellmann, A. *Statistische Versuchsplanung.*
Teubner, 4. Aufl., Stuttgart 1994.
135. Leske, W. *Lotpasten für die Reflowlötung – Reinigung SMD–bestückter
Baugruppen.* Vortrag bei BMW Elektronik GmbH Kalchreuth,
10.10.1991.
136. Feldmann, K.
Rothhaupt, A.
Sturm, J. *Systematische Untersuchungen zum Lotpastenauftrag mittels
Dispenstechnologie für unterschiedliche Rastermaße.*
in: Tagungsband SMT/ASIC/Hybrid 1993, vde-Verlag, Berlin.

137. Habenicht, G. *Kleben*. Springer Verlag Berlin, 1990.
138. Mieske, H. *Verfahren für die Anwendung von Leitlebern für OMB*.
in: O-D. Hennemann, H. Mieske, B. Dorbath (Hrsg.): *Entwicklung von neuen Klebtechnologien in der Elektronik. Adhäsions–Buchreihe*, München 1991.
139. Brunner, H. *Leitungsmechanismus und Funktionsverhalten elektrisch leitender Klebungen am Beispiel eines Leistungstransistors*.
Dissertation TU München, 1987.
140. Leske, W. *Können Leitlebstoffe Lotpasten in der SM-Technik ablösen?*
SMT 2/1992, VP Verlagsgesellschaft mbH, Herrenberg.
141. Dorbath, B. *Materialentwicklung für die Anwendung von Leitlebstoffen*.
Teilprojekt in Hennemann, Mieske, Dorbath (Hrsg.): *Entwicklung von neuen Klebtechnologien in der Elektronik. Adhäsions–Buchreihe*, München 1991.
142. Meier, N. *Entwicklung von neuen Klebtechnologien in der Elektronik*.
Teilprojekt in Hennemann, Mieske, Dorbath (Hrsg.): *Entwicklung von neuen Klebtechnologien in der Elektronik. Adhäsions–Buchreihe*, München 1991.
143. Feldmann, K.
Gerhard, M. *Löten von MIDs*.
in: Bürkner, Feldmann, Franke, Römer (Hrsg.): *Proceedings 1. Int. Congress Molded Interconnect Devices*, Erlangen 1994, Meisenbach Verlag, Bamberg, S. 293-304.
144. Draeger, D. *Kleben von SMD–Bauelementen auf der Flachbaugruppe, Untersuchung der Adhäsionskräfte*. Tagungsband SMT/ASIC/Hybrid, Fachmesse 02.–04.06.1992 Nürnberg, Hrsg. A. Eder und H. Reichl, Berlin 1992.
145. Orthmann, K. *Elektrische und mechanische Eigenschaften von Leitlebungen im Vergleich zu Lötungen bei der Leiterplattentechnik*. Adhäsion–Buchreihe, München 1991.
146. Feldmann, K.,
Franke, J,
Gerhard, M. *Evaluation of Engineering Thermoplastics for Molded Circuit Board Assembly*. in: Tagungsunterlagen zur Plastronics '93, Frankfurt, 29.-30.06.1993.
147. Chan, B. *The evaluation of various infra–red reflow machines for use with molded circuit *boards**. IEPS Proceedings of the Technical Conference. Ninth Annual International Electronics Packaging Conference, 1989, S. 188–198.
148. de Graaf, A.C.M. *Benefits of Stanyl Nylon 46 in Reflow Solderable Connection*. Tagungsunterlagen zur Plastronics '93, Frankfurt, 29.-30.06.1993.

149. Keep, G. T. *Infrared Reflow Oven Exposure of High Temperature Thermoplastic Connectors.*
Eastman Kodak Publication No. PPD-120, 1992.
150. N.N. *Reflow-Löten bei 100°C – Ofentemperatur?*
EPP 12/91.
151. Burr, D. C. *No Flux Solder Fountain Rework using Nitrogen.*
Proceedings NEPCON West 1994.
152. Spingler, J.,
Gaul, M. *Weichlöten mit Industrieroboter.*
Productronic 10/93, Hüthig Buch Verlag, Heidelberg, S. 20–26.
153. N.N. *Oxidfreies Löten –
Löten unter Schutzgas mit einem Handlötgerät.*
Productronic 5/92, Hüthig Buch Verlag, Heidelberg, S. 37–38.
154. Hartmann, H.-J. *Weichlöten unter aktivem Schutzgas –
ein Beitrag zum Umweltschutz.* EPP 4/89, S. 37–39.
155. Nolde, R. *Einpreßtechnik.*
E. Leuze Verlag, Saulgau 1994, S.12.
156. N.N. *Lötfreie elektrische Verbindungen. Einpreßverbindungen Begriffe, Anforderungen, Prüfungen.*
DIN 41611 Teil 5, Beuth Verlag, Berlin 1984.
157. van Alst, G.,
van Dijk, P.,
van Meijl, F. *MID Interconnection Considerations.*
in: Bürkner, Feldmann, Franke, Römer (Hrsg.): Proceedings
1. Int. Congress Molded Interconnect Devices, Erlangen 1994,
Meisenbach Verlag, Bamberg, S. 403–406.
158. Rose, M. *Leiterplattenentwurf.* Hüthig Buch Verlag Heidelberg, 1992.
159. Geisberger, B. *Simulation von Systemkomponenten auf Platinenebene.*
Tagungsband SMT/ASIC/Hybrid 1990, S. 135–145.
160. Feldmann, K.,
Franke, J. *Computer Aided Planning Systems for Integrated Electrical
and Mechanical Design.* IEEE Transactions on Components,
Hybrids, and Manufacturing Technology, Vol. 16, No. 4, 6/1993.
161. Groß, W.,
Köhler, T.,
Schneider, M.,
Schröder, E. *Werkzeuge und Techniken für die Entwicklung elektronischer
Schaltungen.*
VDI/VDE-Technologiezentrum Informationstechnik GmbH,
Berlin 1989.
162. Krause, F.-L.,
Schlingheider, J. *Entwickeln und Konstruieren mit wissensbasierten Software-
Werkzeugen – ein Überblick.* VDI-Berichte 903, VDI Verlag
Düsseldorf 1991.

163. Stevens, W. H.,
Wier, C. C.,
Zak, R. B. *Addressing the Engineering Challenges of the next Decade.*
Printed Circuit Design 7 (1990) 5, S. 35–41.
164. Thümmeler, T. *Mit Hyperintegration ins 21. Jahrhundert.* Elektronik 1/1993,
Franz Verlag GmbH, München.
165. Haberland, D. *Hybridintegrierte Schichtschaltungen zwischen IC und PCB.*
Siemens Components, 27 (1990) 5, S. 184–189.
166. Harbach, R. *Im Vergleich: ASICs, Hybride und diskrete Schaltkreise.*
elektronik industrie 10/1990, S. 107–111.
167. N.N. *Leiterplatten-Design 1997 – Welche Entwicklungen sind für die
Leiterplattentechnologie zu erwarten?* CADs 3/93, VP Verlags-
gesellschaft mbH, Herrenberg.
168. Geyer, G. *Entwicklung problemspezifischer Verfahrensketten in der Mon-
tage.* Dissertation an der Universität Erlangen-Nürnberg, Carl
Hanser Verlag München Wien, 1991.
169. Puppe, F. *Problemlösungsmethoden in Expertensystemen.*
Springer Verlag, Berlin 1990.
170. Ammon, P. *Entwurf von Leiterplatten.* Hüthig Buch Verlag, Heidelberg, 1987
171. O'Dell, T. *Die Kunst des Entwurfs elektronischer Schaltungen.*
Springer. Berlin, 1990.
172. Meerkamm, H. *Rechnerunterstützung beim fertigungsgerechten Konstruieren -
Möglichkeiten und Stand der Technik.* Schriftenreihe WDK 20,
Proceedings of ICED'91, Vol. I, Edition Heurista, Zürich 1991.
173. Abeln, O. *CAD-Systeme der 90er Jahre – Vision und Realität.* VDI-Be-
richte 861.1, VDI-Verlag, Düsseldorf 1990.
174. Krause, D. *Rechnerunterstütztes Konzipieren und Entwerfen mit Integration
von Analysen, insbesondere Berechnungen.* Dissertation an
der Universität Erlangen-Nürnberg, Fortschritts-Berichte
VDI Reihe 20 Nr. 78, VDI Verlag, Düsseldorf 1993.
175. Goldhorn, B.,
Seyffahrt, T.,
Sprengel, O. *Integrierte 3D-Konstruktion Elektronik/Mechanik.*
Elektronik 11/89, S. 125–129.
176. Ratkovic, D.
Wildgruber, S. *Mechatronik, die Kopplung von Mechanik- und Elektronik-CAE.*
F&M 102 (1994) 3, Carl Hanser Verlag, München 1994.
177. Feldmann, K.,
Franke, J.,
Krebs, Th. *OMNICAD: Integration von Funktionen zur elektrischen und me-
chanischen Produktgestaltung.* Tagungsunterlagen zur Fachta-
gung CAD '94, 17.-18.03.1994, Paderborn.

178. Bradley, D. A.,
Burd, N. C.,
Dawson, D.,
Loader, A. J. *Mechatronics. Electronics in products and processes.*
Chapman and Hall. London, 1991.
179. Nabors, K.,
White, J. *FastCap: A Multiple Accelerated 3-D Capacitance Extraction Program.* IEEE Transactions on Computer Aided Design, Vol. 10, No. 11, November 1991, S. 1447-1459.
180. Haramid, A.-K.,
Wexler, A. *3D structures and PCB transmission line effects.*
Electronic Product Design EPD 12/1992, IML Publication 1992.
181. Reinkemeier, R.,
Waßmuth, E. *Simulationswerkzeuge für elektromechanische Systeme.*
Feinwerktechnik & Meßtechnik, F&M 98 (1990) 7-8, Carl Hanser Verlag, München 1990, S. 295-299.
182. Friedmann, H. *FEM-Berechnungen verhindern mechanisches Versagen von Leiterplatten.*
CADS 7/91, VP-Verlagsgesellschaft, Herrenberg 1991.
183. Tokola, M. *Concurrent Design Permits Early Thermal Analysis.*
Electronic Products and Production, EP&P 11/1990, S. 66-70.
184. Britton, P. L. *Ultra-Feinleiter auf Leiterplatten.*
Elektronik Produktion und Prüftechnik, EPP 7-8/1994, Konradin Verlag Leinfelden-Echterdingen 1994.
185. Senturia, St.
et al *A Computer-Aided Design System for Microelectromechanical Systems (MEMCAD).* Massachusetts Institute of Technology, VLSI Memo 91-644, Okt. 1991.
186. Kyritsis, A.,
Tzanakis, C. *A mathematical model for the shape of wave-soldered joints on printed circuit boards.*
in: Journal of Physics III France, 1993, S. 1639-1658.
187. Habenicht, G.,
Hartmann, H.-J.,
Saile, P. M. *Computersimulation der Bauelementeerwärmung beim Reflowlöten.*
Verbindungstechnik in der Elektronik, VTE 1/93.
188. Wang, A.
et al. *Experimental Investigation and Numerical Simulation of the SMT Laser Microsoldering Thermal Process.* Soldering & Surface Mount Technology 8/1991, Wela Publications, S. 29-31.
189. Feldmann, K.,
Sturm, J. *Closed Loop Quality Control in Printed Circuit Assembly.*
IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology, Part A, Volume 17, Number 2, June 1994.
190. Moore, A.P.,
et al. *Computermodelling for package/substrate assemblies for solder joint reliability.* in Advanced Surface Mount Technology, IFS Publications, Springer Verlag, Berlin, 1988.

191. Feldmann, K.,
Franke, J.,
Luchs, R.,
Brand, A.,
Dritte Dimension. Räumliche spritzgegossene Schaltungsträger stellen neue Anforderungen an die Konstruktion.
Maschinenmarkt 100(1994) 29, Vogel Verlag und Druck KG, Würzburg.
192. Sammer, W.,
Raffler, H.
CAD für Moduln und Systeme in der Elektronik.
Springer Verlag, Berlin 1989.
193. N.N.
ELMIF, Siemens-Nixdorf, SNI-AP-221, November 1990.
194. N.N.
ECAD/MCAD Neutral Interface Format NIF. Racal-Redac Systems Ltd., Green Lane, Tweekesbury, England, 1988.
195. Lesk, M. E.,
Schmidt, E.
LEX – A Lexical Analyzer Generator.
Computing Services Technical Report No. 39, Bell Laboratorie, Murray Hill, New York, 1975.
196. N.N.
ISO DIS 10303–11 Product Data Representation and Exchange— Part 11: The EXPRESS Language Reference Manual.
TC 184/SC 4 N151, 31. August 1992.
197. Rubin, F.
The Lee Path Connection Algorithm.
IEEE Transactions on Computers 9/1974, S. 907 ff.
198. Feldmann, K.,
Franke, J.
CAD/CAM–Verfahrensketten in der Elektronikproduktion.
Tagungsband zur Fachtagung Automated Manufacturing in Electronics AME '91, Essen, 1991.
199. Feldmann, K.,
Franke, J.,
Rothhaupt, A.
Automated Generating and Simulation of Insertion Sequences (AGASIS). 15th International Manufacturing Technology Symposium, Santa Clara, USA, 4.–6. Oktober 1993.
200. Feldmann, K.,
Franke, J.
Probleme und Lösungen für das Koppeln von Rechnern und Fertigungsmaschinen. Elektronik, 39 (1990) 16, Franzis' Verlag, München, 1990.
201. Franke, J.,
Standardisierung der CAD/CAM-Verfahrenskette für die Bestückung von Leiterplatten (IPC-D-355). Tagungsunterlagen zur FED (Fachverband Elektronik-Design) – Konferenz, Berlin, 17.-19.09.1993.
202. Noble, P. JW.
Linking Design to Manufacture – The Problems.
Proceedings NEPCON West 1994.
203. Richter, J.
Vom CAD–Layout zum Bestück– und Prüfprogramm.
Leiterplattentechnik, Nov. 1992.
204. Foltin, E.,
Radek, A.
Laserstrahl beschriftet Formteile aus Thermoplast.
Kunststoffe 78 (1988) 8, Carl Hanser Verlag München.
205. Garnich, F.
Laserbearbeitung mit Robotern.
Springer Verlag, Heidelberg 1992.

206. Bimberg, D. *Materialbearbeitung mit Lasern*. Expert Verlag, Böblingen 1992.
207. Haak, U.,
Kurz, K.,
Lauk, G. *Berührungslos Beschriften mit dem Laserstrahl*.
Kunststoffe 83 (1993) 11, Carl Hanser Verlag München.
208. Wildmann, D.,
Pietsch, B. *Lasersensibel pigmentierte Kunststoffe industriell beschriften*.
Kunststoffe 79 (1989) 12, Carl Hanser Verlag München.
209. Feldmann, K.,
Grampp, K.,
Koch, M.,
Rothhaupt, A. *Optimale Rüst- und Umrüststrategien steigern die Produktivität*.
Leiterplattentechnik (Supplement zu F&M, MO, QZ), Mai 1992,
Carl-Hanser Verlag, S. LP46–LP50.
210. Lawler, E. L. et al. *The Travelling Salesman Problem*.
Wiley & Sons, Chichester, 1988.
211. Kleineidam, G. *CAD/CAP: Rechnergestützte Montagefeinplanung*.
Dissertation an der Universität Erlangen-Nürnberg, Carl Hanser
Verlag München Wien, 1990.
212. Rothhaupt, A. *Modulares Planungssystem zur Optimierung der Elektronikfertigung*.
Dissertation an der Universität Erlangen-Nürnberg, Carl
Hanser Verlag München Wien, 1995.
213. Feldmann, K.,
Franke, J.,
Solvie, M. *Integration heterogener Kommunikationsprotokolle in der automatisierten Fertigung durch Migration in MMS*. Elektronik,
2/1992, Franzis' Verlag, München, 1992.
214. N.N. *Printed Board electronic description in digital Form*.
Deutsche Norm – Entwurf (Identisch mit IEC 52 (CO)363),
Beuth Verlag, Berlin, 1991.
215. Franke, J. *Printed Board Automated Assembly Description in Digital Form (IPC-D-355)*. Institute for Interconnecting and Packaging Electronic Circuits IPC, Lincolnwood USA, March 1993.
216. Schmid, ,
Eisele, R.
Schwan, Th. *Strategisches Kostenmanagement für integrierte Systeme*.
Kostenrechnungspraxis krp, o. Jhg. (1992)2, Gabler Verlag,
Wiesbaden, S.321–325.
217. Franke, J.,
Wolf, M. *Die wirtschaftliche Bewertung neuer Fertigungstechnologien*.
IO Management Zeitschrift 62 (1993) Nr. 4, Verlag Industrielle
Organisation BWI ETH, Zürich, 1993.
218. Pfeiffer, W.,
Weiß, E.,
Streibel, Ch. *Systemwirtschaftlichkeit*.
Verlag Vandenhoeck & Rupprecht, Göttingen 1994., S. 48ff.
219. Warnecke, H.–J.,
Bullinger, H. J.,
et al. *Wirtschaftlichkeitsrechnung für Ingenieure*.
Carl Hanser Verlag, München, Wien 1980.

220. Singer, U. *Die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Investitionen in neue Produktionstechnologien.*
Dissertation, Verlag Difo–Druck, Bamberg 1990.
221. Wildemann, H. *Strategische Investitionsplanung für neue Technologien in der Produktion.* in: Wildemann, H. (Hrsg.), *Strategische Investitionsplanung für neue Technologien in der Produktion*, 2. Fertigungswirtschaftliches Kolloquium an der Universität Passau vom 5. bis 7. März 1986, Tagungsband Teil 1, Gesellschaft für Management und Technologie, Passau 1986.
222. Roth, K. *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen.*
Springer Verlag, Berlin 1982.
223. Eisele, R. *Konzeption und Wirtschaftlichkeit rechnerintegrierter Planungssysteme.* Dissertation an der Universität Erlangen-Nürnberg, Carl Hanser Verlag München Wien, 1990.
224. Coenenberg, A.,
Fischer, Th. *Prozeßkostenrechnung – Strategische Neuorientierung in der Kostenrechnung.*
DBW Die Betriebswirtschaft, 51. Jg. 1991, S. 21-38.
225. Pfeiffer W.,
Weiss E. *Technologiemanagement.*
Verlag Vandenhoeck & Rupprecht, Göttingen 1990.
226. Loos, G. *Betriebsabrechnung und Kalkulation.*
Neue Wirtschafts-Briefe-Verlag, Herne u. a., 1993.
227. Bellenberg, K.,
Jungermann, B.
(Hrsg.) *Kalkulation in mittelständischen Betrieben.*
vde-Verlag, Offenbach 1991.
228. Kleineidam, E.,
Obenhaus, H. *Kostenrechnung.*
Gieseking Wirtschaftsverlag, Bielefeld Köln 1976.
229. Männel, W. *Zunehmende Technisierung und Modernisierung der Kostenrechnung.* Kostenrechnungspraxis krp, o. Jhg.(1993)5, Gabler Verlag, Wiesbaden, S. 304–309.
230. Christmann, A.,
Jorasch, W. *Kalkulation von Fertigungsgemeinkosten bei Verwendung mehrerer Bezugsgrößen.* in: Männel, W. (Hrsg.) *Hwb der Kostenrechnung*, Gabler Verlag, Wiesbaden 1992, S. 563–574.
231. Becker, J. *Konstruktionsbegleitende Kalkulation als CIM-Baustein.*
in: Männel, W. (Hrsg.), *Hwb der Kostenrechnung*, Gabler Verlag, Wiesbaden 1992, S. 353–358.
232. Scheer, A.-W. *Information Management bei der Produktentwicklung.*
in: *Information Management*, o. Jhg.(1989)3, Gabler Verlag, Wiesbaden, S. 119–130.

233. Ehrlenspiel, K. *Kostengünstig Konstruieren: Kostenwissen, Kosteneinflüsse, Kostensenkung.* Springer Verlag, Berlin u. a. 1985.
234. Gröner, L. *Entwicklungsbegleitende Vorkalkulation.* Springer Verlag, Berlin 1991.
235. Burger, A. *Konstruktionsbegleitende Kostenrechnung bei flexibel automatisierter Fertigung.* in: Kostenrechnung Praxis krp, o. Jg.(1993)1, Gabler Verlag, Wiesbaden, S. 18–26.
236. Schaal, S. *Integrierte Wissensverarbeitung mit CAD am Beispiel der konstruktionsbegleitenden Kalkulation.* Hanser Verlag, München 1992.
237. Eberle, P.,
Heil, H.-G. *Relativkosten-Informationen zur Kostenfrüherkennung.* in: Kostenrechnung Praxis krp, o. Jg.(1989)2, Gabler Verlag, Wiesbaden, S. 53–59.

Lebenslauf

1. Persönliche Daten

Name Jörg Franke
geboren am 30.04.1964 in Erlangen

2. Ausbildung

9/70 – 8/74 Grundschule in Rothenburg o. d. Tbr.
9/74 – 8/77 Reichsstadt-Gymnasium in Rothenburg o. d. Tbr.
9/77 – 6/83 Adam-Kraft-Gymnasium in Schwabach
6/83 Abschluß:
 Abitur
10/83 – 6/89 Studium der Fertigungstechnik an der
 Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
6/89 Abschluß:
 Dipl.-Ingenieur (Fertigungstechnik)

3. Berufstätigkeit

seit 7/1989 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für
 Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik an der
 Friedrich-Alexander-Universität Universität Erlangen-Nürnberg;
 Lehrstuhlinhaber: Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann

Reihe Fertigungstechnik Erlangen

Band 1

Andreas Hemberger

**Innovationspotentiale in der rechnerintegrierten Produktion durch
wissensbasierte Systeme**

208 Seiten, 107 Bilder. 1988. Kartoniert.

Band 2

Detlef Classe

**Beitrag zur Steigerung der Flexibilität automatisierter Montage-
systeme durch Sensorintegration und erweiterte Steuerungskonzepte**

194 Seiten, 70 Bilder. 1988. Kartoniert.

Band 3

Friedrich-Wilhelm Nolting

Projektiertung von Montagesystemen

201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tabelle. 1989.

Kartoniert.

Band 4

Karsten Schlüter

**Nutzungsgradsteigerung von Montagesystemen durch den Einsatz
der Simulationstechnik**

177 Seiten, 97 Bilder. 1989. Kartoniert.

Band 5

Shir-Kuan Lin

Aufbau von Modellen zur Lageregelung von Industrierobotern

168 Seiten, 46 Bilder. 1989. Kartoniert.

Band 6

Rudolf Nuss

**Untersuchungen zur Bearbeitungsqualität im Fertigungssystem
Laserstrahlschneiden**

206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tabellen. 1989. Kartoniert.

Band 7

Wolfgang Scholz

**Modell zur datenbankgestützten Planung automatisierter
Montageanlagen**

194 Seiten, 89 Bilder. 1989. Kartoniert.

Band 8

Hans-Jürgen Wißmeier

**Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhaltens von Hartmetall-
Fließpreßmatrizen**

179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tabellen. 1989. Kartoniert.

Band 9

Rainer Eisele

**Konzeption und Wirtschaftlichkeit von Planungssystemen in der
Produktion**

183 Seiten, 86 Bilder. 1990. Kartoniert.

Band 10
Rolf Pfeiffer
Technologisch orientierte Montageplanung am Beispiel der Schraubtechnik
216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tabellen. 1990. Kartoniert.

Band 11
Herbert Fischer
Verteilte Planungssysteme zur Flexibilitätssteigerung der rechnerintegrierten Teilefertigung
201 Seiten, 82 Bilder. 1990. Kartoniert.

Band 12
Gerhard Kleineidam
CAD/CAP: Rechnergestützte Montagefeinplanung
203 Seiten, 107 Bilder. 1990. Kartoniert.

Band 13
Frank Vollertsen
Pulvermetallurgische Verarbeitung eines übereutektoiden verschleißfesten Stahls
XIII + 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tabellen. 1990. Kartoniert.

Band 14
Stephan Biermann
Untersuchungen zur Anlagen- und Prozeßdiagnostik für das Schneiden mit CO₂-Hochleistungslasern
VIII + 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tabellen. 1991. Kartoniert.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Band 26
Roland Müller
CO₂-Laserstrahlschneiden von kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen
141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tabellen. 1992. Kartoniert.

Band 27
Günther Schäfer
Integrierte Informationsverarbeitung bei der Montageplanung
195 Seiten, 76 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 28
Martin Hoffmann
Entwicklung einer CAD/CAM-Prozesskette für die Herstellung von Blechbiegeteilen
149 Seiten, 89 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 29
Peter Hoffmann
Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen : Prozeßführung und Systemtechnik in der 3D-Laserstrahlbearbeitung von Blechformteilen
186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tabellen. 1992. Kartoniert.

Band 30
Olaf Schrödel
Flexible Werkstattsteuerung mit objektorientierten Softwarestrukturen
180 Seiten, 84 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 31
Hubert Reinisch
Planungs- und Steuerungswerkzeuge zur impliziten Geräteprogrammierung in Roboterzellen
XI + 212 Seiten, 112 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 32
Brigitte Bärnreuther
**Ein Beitrag zur Bewertung des Kommunikationsverhaltens
von Automatisierungsgeräten in flexiblen Produktionszellen**
XI + 179 Seiten, 71 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 33
Joachim Hutfless
**Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik in der Strahlführung
einer CO₂-Hochleistungslaseranlage**
175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tabellen. 1993. Kartoniert.

Band 34
Uwe Günzel
**Entwicklung und Einsatz eines Simulationsverfahrens für operative
und strategische Probleme der Produktionsplanung und -steuerung**
XIV + 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tabellen. 1993. Kartoniert.

Band 35
Bertram Ehmann
**Operatives Fertigungscontrolling durch Optimierung auftragsbezogener
Bearbeitungsabläufe in der Elektronikfertigung**
XV + 167 Seiten, 114 Bilder. 1993. Kartoniert.

Band 36
Harald Kolléra
**Entwicklung eines benutzerorientierten Werkstattprogrammiersystems
für das Laserstrahlschneiden**
129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tabelle. 1993. Kartoniert.

Band 37
Stephanie Abels
**Modellierung und Optimierung von Montageanlagen
in einem integrierten Simulationssystem**
188 Seiten, 88 Bilder. 1993. Kartoniert.

Band 38
Robert Schmidt-Hebbel
**Laserstrahlbohren durchflußbestimmender
Durchgangslöcher**
145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tabellen. 1993. Kartoniert.

Band 39
Norbert Lutz
**Oberflächenfeinbearbeitung keramischer Werkstoffe mit
XeCl-Excimerlaserstrahlung**
187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tabellen. 1994. Kartoniert.

Band 40
Konrad Grampp
**Rechnerunterstützung bei Test und Schulung an
Steuerungssoftware von SMD-Bestücklinien**
178 Seiten, 88 Bilder. 1995. Kartoniert.

Band 41
Martin Koch
**Wissensbasierte Unterstützung der Angebotsbearbeitung
in der Investitionsgüterindustrie**
169 Seiten, 68 Bilder. 1995. Kartoniert.

Band 42
Armin Gropp
**Anlagen- und Prozeßdiagnostik beim Schneiden mit einem
gepulsten Nd:YAG-Laser**
160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tabellen. 1995. Kartoniert.

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

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

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

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

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

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

Band 49
Wolfgang Greska
Wissensbasierte Analyse und Klassifizierung von Bauteilen
144 Seiten, 96 Bilder. 1995. Kartoniert.

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