

Fertigungstechnik - Erlangen

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Klaus Feldmann

Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Manfred Geiger

Frank Pöhlau

86

Entscheidungsgrundlagen zur Einführung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)



Frank Pohlen

Entscheidungsgrundlagen zur Ein-
führung räumlicher Entscheidungs-
Schaltungsträger (3-D-MID)

1999 11 10

Frank Pöhlau

Entscheidungsgrundlagen zur Einführung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)

Herausgegeben von

Professor Dr.-Ing. Klaus Feldmann,

Lehrstuhl für

Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik

FAPS



Meisenbach Verlag Bamberg

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

Tag der Einreichung: 8. Juli 1998
Tag der Promotion: 12. Oktober 1998
Dekan: Prof. Dr.-Ing. habil. G. Herold
Berichterstatte: Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann
Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. G. W. Ehrens

G 99

-173

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Pöhlau, Frank:

Entscheidungsgrundlagen zur Einführung räumlicher spritzgegossener
Schaltungsträger (3-D MID) / Frank Pöhlau. Hrsg. von Klaus
Feldmann. - Bamberg : Meisenbach, 1999
(Fertigungstechnik - Erlangen ; 86)
Zugl.: Erlangen, Nürnberg, Univ., Diss., 1998
ISBN 3-87525-114-8 ISSN 1431-6226

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdrucks
und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus,
vorbehalten.

Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des
Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein
anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichts-
gestaltung - mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG ausdrücklich
genannten Sonderfälle -, reproduziert oder unter Verwendung
elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder
verbreitet werden.

© Meisenbach Verlag Bamberg 1999

Herstellung: Gruner Druck GmbH, Erlangen-Eltersdorf

Printed in Germany

Vorwort

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

Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Feldmann, dem Leiter dieses Lehrstuhls am Institut für Maschinenbau und Fertigungstechnik, danke ich herzlich für die großzügige Förderung bei der Durchführung der Arbeit und die Gewährung des nötigen Freiraumes bei der Bearbeitung dieses interessanten Aufgabenspektrums.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Gottfried W. Ehrenstein, dem Leiter des Lehrstuhles für Kunststofftechnik der Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, gilt mein Dank für die wohlwollende Übernahme des Koreferates und die fachliche Unterstützung während der Anfertigung der Arbeit.

Weiter bedanke ich mich bei all meinen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl, insbesondere Herrn Dipl.-Ing Roland Meier, Herrn Dr.-Ing. Manfred Gerhard, Herrn Dipl.-Ing. Ralf Luchs und Herrn Dr.-Ing. Otto Meedt für die stete Bereitschaft zur Unterstützung und zu fruchtbaren Diskussionen.

Auch den Partnern in der "Forschungsvereinigung Räumliche Elektronische Baugruppen 3-D MID e.V." gebührt mein herzlicher Dank für die stets ausgezeichnete Zusammenarbeit; insbesondere möchte ich hier Herrn Dipl.-Ing. Ulrich Hartmann, Herrn Dipl.-Ing. Ingo Kriebitzsch, Frau Dr. Ellen Maaßen, Herrn Dipl.-Ing. Ulrich Schütz und Herrn Dipl.-Ing. Volker Zippmann erwähnen.

Aus dem Kreis der Studenten möchte ich vor allem Herrn Dipl.-Ing Frank Stoll und Frau Luitgard Distel hervorheben, die jahrelang mit mir zusammengearbeitet und mich tatkräftig unterstützt haben.

Nicht zuletzt bedanke ich mich bei meinen Eltern, die mich stets auf meinem Weg und beim Erreichen meiner Ziele gefördert haben.

Mein herzlichster Dank gilt meiner Partnerin Alexandra, die vor allem in den letzten Monaten der Arbeit viele Wochenenden ohne mich verbringen mußte, für das geduldige Korrekturlesen, ihr großes Verständnis und das ausgleichende Umfeld während der Entstehung dieser Arbeit.

Erlangen, im Oktober 1998

Frank Pöhlau

Institut für Hochschulforschung
Gießen, 1999

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.
Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Fritzsche, dem Leiter dieses Lehrstuhls am Institut für Maschinenbau und Fertigungstechnik, danke ich herzlich für die großzügige Förderung bei der Durchführung der Arbeit und die Gewährung des nötigen Freiraumes bei der Bearbeitung dieser interessanten Aufgabenstellung.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Gottfried W. Eisenstein, dem Leiter des Lehrstuhls für Kunststofftechnik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, gilt mein Dank für die wohlwollende Übernahme des Kooperations- und didaktischen Unterstützung während der Anfertigung der Arbeit.

Weiter bedanke ich mich bei all meinen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl, insbesondere Herrn Dipl.-Ing. Roland Meier, Herrn Dr.-Ing. Manfred Gehard, Herrn Dipl.-Ing. Ralf Luchs und Herrn Dr.-Ing. Otto Meier für die stete Bereitschaft zur Unterstützung und zu fruchtbaren Diskussionen.

Auch den Partnern in der "Forschungsgesellschaft für mechanische Elektrotechnik Baugruppen 3-D-MID e.V." gebührt mein herzlichster Dank für die stets ausgezeichnete Zusammenarbeit. Insbesondere möchte ich hier Herrn Dipl.-Ing. Ulrich Hahnemann, Herrn Dipl.-Ing. Ingo Kretsch, Frau Dr. Eva Meißner, Herrn Dipl.-Ing. Ulrich Schütz und Herrn Dipl.-Ing. Volker Zippmann erwähnen.
Aus dem Kreis der Studenten möchte ich vor allem Herrn Dipl.-Ing. Frank Glöck und Herrn Ludwig Dittler hervorheben, die während meiner Zusammengehörigkeit und nach der häufig Unterstützung fanden.
Nicht zuletzt bedanke ich mich bei meinen Eltern, die mich stets zu meinem Weg und beim Erreichen meiner Ziele gefördert haben.

Mein herzlichster Dank gilt meiner Partnerin Alexandra, die vor allem in den letzten Monaten der Arbeit viele Wochenenden ohne mich verbringen musste, für das geduldige Kommen und das große Verständnis und das ausdauernde Umfeld während der Entstehung dieser Arbeit.

Erlangen, im Oktober 1999

Frank Pötter

1999 Gießen Verlag
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Gießen, 1999

Entscheidungsgrundlagen zur Einführung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)

– Inhaltsverzeichnis –

1	Einführung	1
2	Problemfelder und Lösungsansätze zur Aufbauorganisation	3
2.1	Ziele bei der Einführung einer neuen Technologie	3
2.2	Technologie räumlicher Schaltungsträger	5
2.3	Entscheidungsfindung bei der Einführung von MID	9
2.4	Problemfelder	10
2.5	Lösungsansätze im Rahmen der Aufbauorganisation	12
2.5.1	Interdisziplinäre Integration der Entwicklungsumgebungen	13
2.5.2	Frühzeitige Konzeptabstimmung	15
2.5.3	Schaffung einer MID-geeigneten Aufbauorganisation mit Methoden des Projektmanagements	17
2.5.4	MID-Projektentwicklung in virtuellen Unternehmen	18
3	Systematische Entwicklung einer MID-Baugruppe	20
3.1	Technische Konzeptfindung	21
3.1.1	Anforderungsanalyse	22
3.1.2	Pflichtenheft	22
3.1.3	Grobkonzepte	23
3.2	Technische Bewertung von Aufbauvarianten	27
3.2.1	Aufstellen der Einflußfaktoren	28
3.2.2	Gewichtung der Faktoren	28
3.2.3	Bewertung der Einflußfaktoren	30
3.2.4	Technische Bewertung der Konzepte	32
3.3	Wirtschaftliche Bewertung nach VDI	34
3.4	Auswahl des weiterführenden Konzeptes	35
3.5	Ausarbeitung der weiterführenden Variante und Prototypenbau	36
4	Aufstellen eines Anforderungsprofils	38
4.1	Anforderungen aus dem Einsatz	38
4.2	Anforderungen und Problembereiche aus der Fertigung	43
4.2.1	Werkzeugbau und Spritzguß	44
4.2.2	Metallisierung und Strukturierung	44

4.2.3 Auftrag des Verbindungsmediums und Bestücken	45
4.2.4 Verbindungstechnik	47
4.3 Wirtschaftlichkeitsanforderungen	49
4.3.1 Gesamtstückzahlen und Losgrößen	49
4.3.2 Verkaufspreis und Customer Added Value	49
4.3.3 Taktzeiten	50
4.3.4 Produktzyklen	50
4.3.5 Risikobewertung	51
4.4 Vereinheitlichung der Anforderungen	51
4.4.1 Kantenbeschaffenheit	52
4.4.2 Oberflächeneigenschaften von MIDs	52
4.4.3 Kennzeichnung des Schaltungsträgers	53
4.4.4 Abstand der Leiterzüge	54
4.4.5 Durchkontaktierte Löcher	54
4.5 Aufstellen von Anforderungsprofilen	55
5 Technische Grenzen von MID-Verfahren	58
5.1 Stromtragfähigkeit von thermoplastischen Substraten	58
5.2 Eignungsprofile verschiedener Herstellverfahren	61
5.2.1 Zweikomponentenspritzguß	62
5.2.2 Heißprägen	64
5.2.3 Laserstrukturierung	65
5.2.4 Maskenstrukturierung	68
5.2.5 Hinterspritzen von Folien	70
5.2.6 Mechanische Strukturierung und Siebdruck	72
5.2.7 Kombinationen von Herstellverfahren	73
5.3 Typische Anwendungen einzelner Herstellverfahren	74
5.4 Entwicklungstrends der Herstellverfahren	77
6 Wirtschaftliche Betrachtung der MID-Technologie	78
6.1 Grundlegende Einflußfaktoren auf die Kosten einer Baugruppe	79
6.2 Einflußfaktoren in den Phasen des Produktlebenszyklus	80
6.2.1 Phasen des Lebenszyklus und relevante Kosten	80
6.2.2 Prozeßkostenrechnung	81
6.2.3 Summationsmodell und Prozeßgliederung	82
6.3 Aufstellen eines Kostenmodells für MID über die Phasen des Produktlebenszyklus	84
6.3.1 Entwicklung und Prototypenbau	84
6.3.2 Formgebung	86
6.3.3 Metallisierung	89

6.3.4	Strukturierung	94
6.3.5	Montage von Baugruppe und System	99
6.3.6	Einsatz	101
6.3.7	Logistik	102
6.4	Einfluß unterschiedlicher Kalkulationsmodelle	102
7	Auswahlkriterien und Gestaltungsregeln für MIDs	104
7.1	Regeln zur allgemeinen Beurteilung der MID-Tauglichkeit	104
7.2	Technische Grenzen der Herstellverfahren	104
7.3	Regeln zur Materialauswahl	106
7.4	Regeln für die geometrische Gestaltung	107
7.5	Regeln für das Metallisieren	109
7.5.1	Gestaltungsregeln für den galvanisiergerechten Spritzguß	109
7.5.2	Zusammensetzung der Metallisierung	110
7.6	Wirtschaftliche Grenze zwischen rein chemischer und chemisch / galvanischer Metallabscheidung	110
7.6.1	Grundlegende Einflußfaktoren und Randbedingungsszenario ..	111
7.6.2	Kosten der Metallisierung und Ermittlung des Grenzpunktes	113
7.7	Regeln für die Layout-Gestaltung	115
7.8	Auswahl der Weiterverarbeitungsverfahren und entsprechende Gestaltungsregeln	116
8	Informationsbereitstellung	119
8.1	Übersichtliche Grundinformationen	119
8.2	Regelwerk zur Technologieeinführung	121
8.3	Patentrecherche	122
8.3.1	Zweikomponentenspritzguß	124
8.3.2	Heißprägen	125
8.3.3	Maskenverfahren	125
8.3.4	Laserstrukturierung	125
8.3.5	Hinterspritzen von Folien	126
8.4	Multimedia-Informationssystem	126
9	Zusammenfassung und Ausblick	129
10	Literaturverzeichnis	131

1 Einführung

Bei der Entwicklung neuer Produkte sieht sich die Elektronikindustrie ständig steigenden Anforderungen an Komplexität und Funktionalität der Produkte bei wachsendem Kostendruck ausgesetzt. Dies führt zu einer verstärkten Suche nach kostengünstigen, leistungsfähigen Technologien, um den gestiegenen Ansprüchen gerecht zu werden.

Die Einführung einer neuen Technologie in die Fertigung stellt jedoch immer ein Risiko dar, das hinsichtlich aller Einflußfaktoren nur schwer abgeschätzt werden kann.

Die Technologie räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger aus thermoplastischen Kunststoffen nimmt seit wenigen Jahren immer dann einen stetig steigenden Stellenwert ein, wenn der Ersatz einer elektronischen Baugruppe durch die Nachfolgeneration geplant ist.

Die umfassenden Vorteile dieser Technik eröffnen die Möglichkeit sowohl zu technischen Verbesserungen der Produkte als auch zu beträchtlichen Kosteneinsparungen. Auch aus ökologischer Sicht ist der Einsatz thermoplastischer Substrate dem duroplastischen Leiterplatten aus Epoxidharz oder Hartpapier vorzuziehen.

Weltweit beschäftigen sich momentan etwa 20 Firmen mit der Herstellung elektronischer Baugruppen in MID-Technologie, ungefähr 50 weitere stellen Rohstoffe, Maschinen oder Werkzeuge her bzw. sind in der Anwendung aktiv. Insbesondere in Europa ist die Technologie in den letzten Jahren bedeutend stärker ins Bewußtsein von Entwicklern und Entscheidern gedrungen als noch vor einigen Jahren.

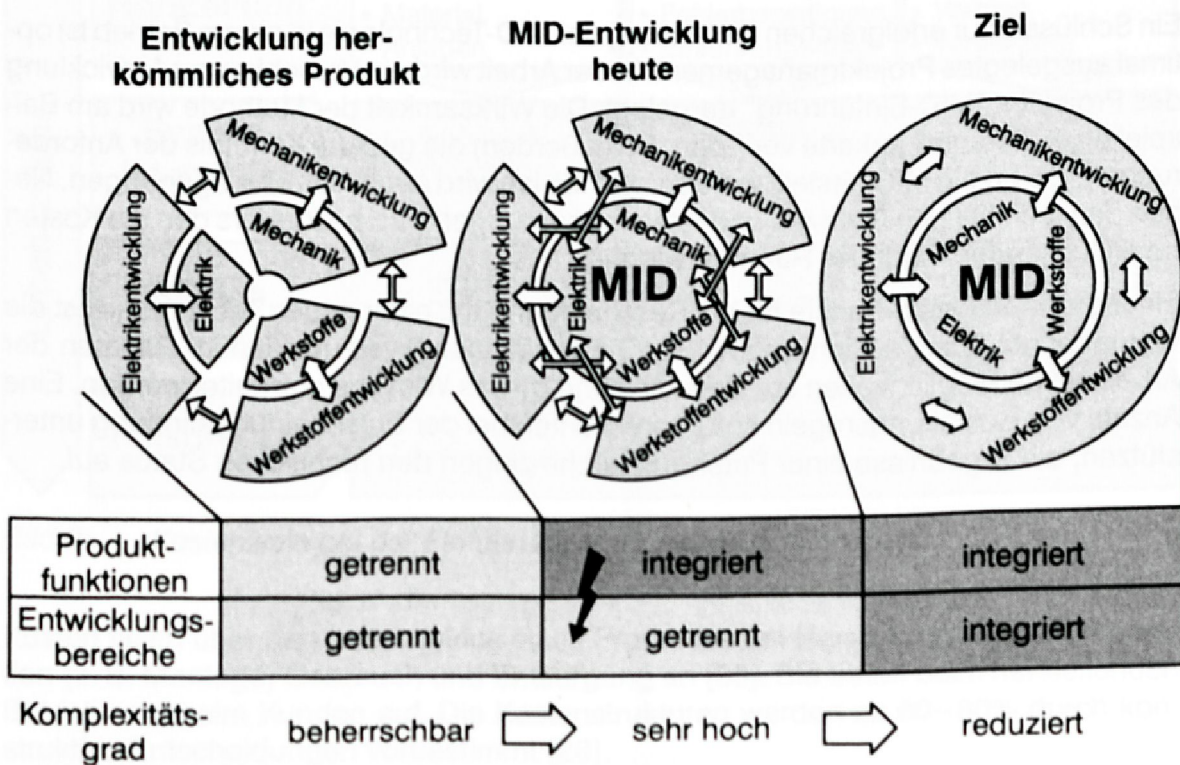


Bild 1: Erarbeitung einer MID-gerechten Organisationsstruktur

Trotz der offensichtlichen Vorteile konnte sich die MID-Technologie bisher jedoch nicht in großem Maße durchsetzen. Die mangelnde Akzeptanz räumlicher Schaltungsträger

in den Unternehmen hat verschiedene Gründe, die dazu führen, daß das Risiko der Technologie oft höher eingeschätzt wird als ihr Nutzen. Neben technischen Hemmnissen spielen vor allem mangelhaft ausgebildete Organisationsstrukturen in den Betrieben und fehlende objektive Grundlagen für die Entscheidungsfindung eine wesentliche Rolle bei der Verzögerung der Ausbreitung der Technologie. Die Entwicklungsumgebungen, die bei herkömmlichen Geräten aus funktionell getrennten Baugruppen gut anwendbar sind, können nicht ohne Adaption auf die Entwicklung von MIDs übertragen werden.

Dies fällt um so stärker ins Gewicht, als die Komplexität der MID-Technologie eine enge Zusammenarbeit mehrere Partner erfordert, um die nötige Qualität sicherzustellen. Beispielsweise bietet in Europa keine Firma die gesamte Verfahrenskette aus einer Hand an. In mehreren Kooperationen arbeitet in der Regel jeweils ein Spritzgießer mit einem Metallisierungsunternehmen und dem Kunden zusammen. Es bilden sich verschiedene Formen von offiziellen und inoffiziellen Netzwerken, um die Einführung zu vereinfachen und Kunden mehr Sicherheit zu bieten.

Diese Arbeit will im Rahmen einer systematischen Betrachtung einen wissenschaftlichen Beitrag dazu leisten, die Problemstellungen zu analysieren, die sich auf dem Weg zu einer erfolgreichen Einführung der MID-Technologie ergeben, und Wege zu ihrer Lösung aufzeigen. Nach einem einführenden Kapitel zur Technologie räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger werden geeignete Organisationsformen vorgestellt, wobei insbesondere auf das Problem der fächerübergreifenden Zusammenarbeit eingegangen wird.

Ein Schlüssel zur erfolgreichen Einführung der MID-Technologie in einem Betrieb ist optimal ausgelegtes Projektmanagement. In der Arbeit wird ein Vorschlag zur Abwicklung des Projektes "MID-Einführung" dargelegt. Die Wirksamkeit der Methode wird am Beispiel einer Datenträgerkarte verifiziert. Da außerdem die genaue Kenntnis der Anforderungen, die an ein MID gestellt werden, wichtig ist, wird auch hierauf eingegangen. Neben den technischen Grenzen und Herausforderungen wird besonders den die Kosten beeinflussenden Faktoren Raum gewidmet.

Einer der wichtigsten Punkte für die Beschäftigung mit einer neuen Technologie ist die Verfügbarkeit übersichtlich gegliederter Informationen. Hierzu sollen im Rahmen der Arbeit einige Möglichkeiten zur Bereitstellung dieses Wissens erarbeitet werden. Eine Anzahl von Gestaltungsregeln soll Interessenten bei der Entscheidungsfindung unterstützen, die Ergebnisse einer Patentrecherche zeigen den rechtlichen Status auf.

2 Problemfelder und Lösungsansätze zur Aufbauorganisation

2.1 Ziele bei der Einführung einer neuen Technologie

Die Entscheidung zur Einführung jeder neuen Technologie ist von mehreren Zielen geprägt. Neben Imagezielen wie gilt dabei in aller Regel der Grundsatz "besser, schneller, billiger" [106]. Auch primär nicht als Kosten in Erscheinung tretende Merkmale wie Qualität und Entwicklungszeiten lassen sich in Geldbeträge umrechnen, so daß die Entscheidungsfindung letztendlich immer von Kostenzielen geprägt ist. Die Systemkosten eines Produktes oder einer Technologie lassen sich gemäß Abbildung 2 aufgliedern und spannen ein Kostenfeld auf. Jede Kostensenkung in einem der Bereiche führt zu einer Verkleinerung der die Kosten repräsentierenden Fläche.

Ziel beim Einsatz einer neuen Technologie oder eines neuen Produktes muß immer die Senkung der Gesamt-Systemkosten sein. Diese können selbst dann gesenkt werden, wenn einzelne Bereiche höhere Kosten verursachen als bei der Vorgängertlösung. Dies wird bei der Entscheidungsfindung jedoch nicht immer ausreichend berücksichtigt.

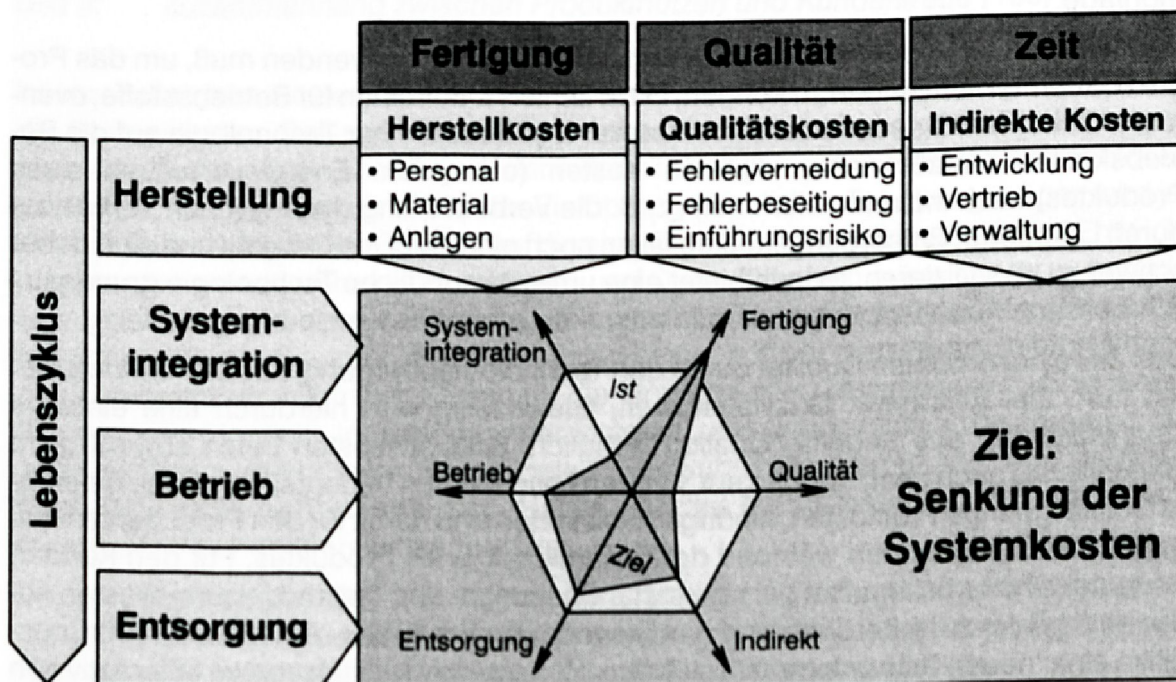


Bild 2: Kostenziele bei der Einführung einer neuen Technologie

Kosten fallen über den Lebenszyklus eines Produktes bei Herstellung, Systemintegration (z. B. Montage) Gebrauch und Entsorgung an [93]. Sie treten beim herstellenden Betrieb und beim Kunden auf. Die Kostenstrukturen werden zu 60–80% durch konstruktive Entscheidungen vorbestimmt [28].

Beim **Produzenten** entstehen zum einen Herstellkosten, bestehend im wesentlichen aus Material-, Personal- und Anlagenkosten. In die Anlagenkosten gehen insbesondere die Abschreibungen sowie Energie- und Hilfsstoffverbrauch ein. Auch Raummieten und sonstige der Fertigung zuzuordnende Nebenkosten fallen unter die Herstellkosten.

Primäres Ziel beim Übergang von einer herkömmlichen Technologie auf eine neue ist meist die Senkung der Herstellkosten.

Ein weiteres Ziel, das mit einem Technologiewechsel verbunden ist, ist in der Regel die Verkürzung der Entwicklungszeiten bei gleichbleibendem Personalbestand. Kurze Entwicklungszeiten ermöglichen eine rasche Reaktion auf die Bedürfnisse der Kunden und damit das Sichern wichtiger Marktanteile. Kostenseitig bedeutet die Verkürzung darüberhinaus eine Erhöhung der Entwicklungsproduktivität und somit die Senkung der Entwicklungskosten pro Produkt. Eine neue Technologie hat demnach vor allem dann gute Einführungschancen, wenn sie für den Hersteller eine Senkung von Herstell- und/oder Entwicklungskosten erwarten läßt.

Beim **Kunden** fallen hauptsächlich Anschaffungs- und Nutzungskosten an. Die Anschaffungskosten bestimmen sich aus dem Verkaufspreis des Herstellers und werden somit wiederum maßgeblich von den Herstell- und Entwicklungskosten bestimmt. Die Nutzungskosten setzen sich aus den Kosten für die Inbetriebnahme, den Betrieb und die Entsorgung eines Produktes zusammen. Bei einem Halbzeug, etwa einem MID-Schaltungsträger, gehören zu den Inbetriebnahmekosten auch die Kosten zur Montage in ein übergeordnetes System, also etwa Bestückung, Verbindungstechnik und Endmontage.

Die Betriebskosten umfassen alle Kosten, die ein Kunde aufwenden muß, um das Produkt dauerhaft verwenden zu können. Dazu zählen z. B. Kosten für Betriebsstoffe, eventuelle Gebühren/Steuern oder Zubehörteile. Der Einfluß einer Technologie auf die Betriebskosten umfaßt neben direkten Kosten (etwa dem Energieverbrauch eines Produktes) auch indirekte Merkmale, z. B. die Verbesserung dynamischen Verhaltens durch Leichtbau. Entsorgungskosten fallen noch nicht sehr ins Gewicht und sind daher schwer zu klassifizieren, jedoch bietet eine umweltfreundliche Technologie grundsätzlich bessere Voraussetzungen, um künftig anfallende Kosten niedrig zu halten.

Das Ziel einer erhöhten Qualität durch den Technologieübergang läßt sich umformulieren zum Ziel geringerer Qualitätskosten. Gleichzeitig wird hierdurch eine einfache Quantifizierung des Begriffs "Qualität" möglich. Qualitätskosten treten sowohl beim Hersteller als auch beim Kunden auf. Für den Produzenten bedeutet eine hohe gefertigte Qualität geringe Prüfkosten, niedrige Ausfallraten und damit für den Produzenten niedrige Reklamationsraten während der Garantiezeit eines Produktes. Für den Kunden bedeutet eine hohe Qualität geringe Instandhaltungs- und Instandsetzungskosten sowie geringe Ausfallzeiten während des Betriebs des Produktes. Auch das Einführungsrisiko einer neuen Technologie läßt sich dem Bereich der Qualitätskosten (alternativ den Entwicklungskosten) zuordnen. Eine Risikoabschätzung nach Methoden der Prozeß-FMEA ist auf jeden Fall zu empfehlen.

Ein weiteres, eng mit dem Ziel der Qualitätsverbesserung verbundenes Ziel ist die Schaffung überlegener Produktmerkmale. Diese führen, wenn sie für den Kunden deutlich sind und eine Nutzenschwelle übersteigen, zu einer Steigerung des Marktanteiles und der Kundentreue. Eine erhöhte Kundentreue verringert wiederum die erforderlichen Aktivitäten zur Marktbearbeitung und somit die Vertriebskosten. Die entsprechenden Zusammenhänge sind in Abbildung 3 dargestellt.

Eine positive Differenzierung führt darüberhinaus in aller Regel zu einem erhöhten Marktanteil und somit einer Verteilung der Entwicklungs- und Vertriebskosten auf eine höhere Anzahl von verkauften Einheiten, was die anteiligen Kosten pro Einheit senkt.

Ebenso können für die Marktposition wichtige Merkmale, etwa die Liefertreue oder die Qualität der Beratungsleistungen, zur Erhöhung der Kundenzufriedenheit und -treue beitragen und somit wiederum die Vertriebskosten senken. Eine Stärke der MID-Technologie liegt in der Schaffung positiver Differenzierungsmerkmale für ein Produkt.

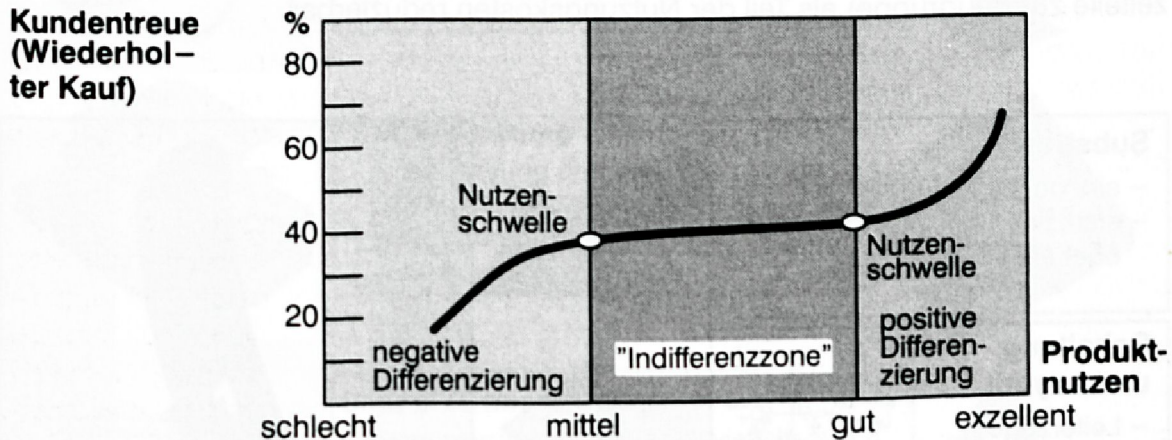


Bild 3: Zusammenhang zwischen Produktnutzen und Kundentreue [106]

Im Idealfall sinken mit dem Einführen einer neuen Technologie alle Teilkosten und somit die Systemkosten. Solange sich die Systemkosten verringern, kann die Einführung einer neuen Technologie jedoch auch dann Vorteile bringen, wenn einzelne Kostenblöcke ansteigen. Häufig, so auch oft bei der Einführung räumlicher Schaltungsträger, wird jedoch weit überwiegendes Gewicht auf die einseitige Senkung der Herstell- und Entwicklungskosten gelegt, ohne die Nutzungs- und Qualitätskosten ausreichend zu berücksichtigen. Aufgrund ihrer spezifischen Eigenheiten eignen sich jedoch gerade MIDs besonders für die Senkung der Gebrauchskosten, auf der meist betrachteten Ebene des Zulieferers vor allem der Kosten für die Montage zum Gesamtsystem. Eine starke Senkung der Herstell-, insbesondere der Material- und Anlagenkosten ist aufgrund der eingesetzten aufwendigen Technologien zur Substratfertigung und hochwertigen Werkstoffe nicht leicht zu erreichen. Häufig wird das MID-Substrat sogar teurer als ein vergleichbares herkömmliches Substrat.

Bei zahlreichen durch den Autor betreuten Projekten hat sich gezeigt, daß eine ganzheitliche Betrachtung des Systems "MID" unbedingt erforderlich ist, um die Technologie räumlicher Schaltungsträger erfolgreich in die Produktion einzuführen.

2.2 Technologie räumlicher Schaltungsträger

In der klassischen Aufbautechnologie elektronischer Geräte und Systeme bestehen diese aus den elektrischen Funktionsträgern, etwa Leiterplatten, Schaltern oder Abschirmkäfigen, den mechanischen Verbindungs- und Gehäuseelementen, die die Funktionsbaugruppen vor Umwelteinflüssen schützen und dem Gerät seine geometrische Gestalt verleihen, sowie Kabeln oder Kabelbäumen, die die einzelnen Elemente verbinden.

Die Technologie räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger ermöglicht die Integration elektrischer und mechanischer Elemente auf nahezu beliebig geformten Trägerkörpern. Es handelt sich dabei um partiell metallisierte, in der Regel aus Thermoplasten

spritzgegossene Strukturen. Ein wesentlicher Aspekt ist dabei die übergreifende mechanisch-elektronische Funktionalität. MIDs integrieren mechanische und elektrische bzw. elektronische Funktionselemente und ermöglichen somit die Einsparung von Einzelteilen und damit von Montagekosten. Aus Kundensicht im Kostenmodell sind somit neben den Herstellkosten insbesondere die Inbetriebnahmekosten (Montage der Einzelteile zur Baugruppe) als Teil der Nutzungskosten reduzierbar.

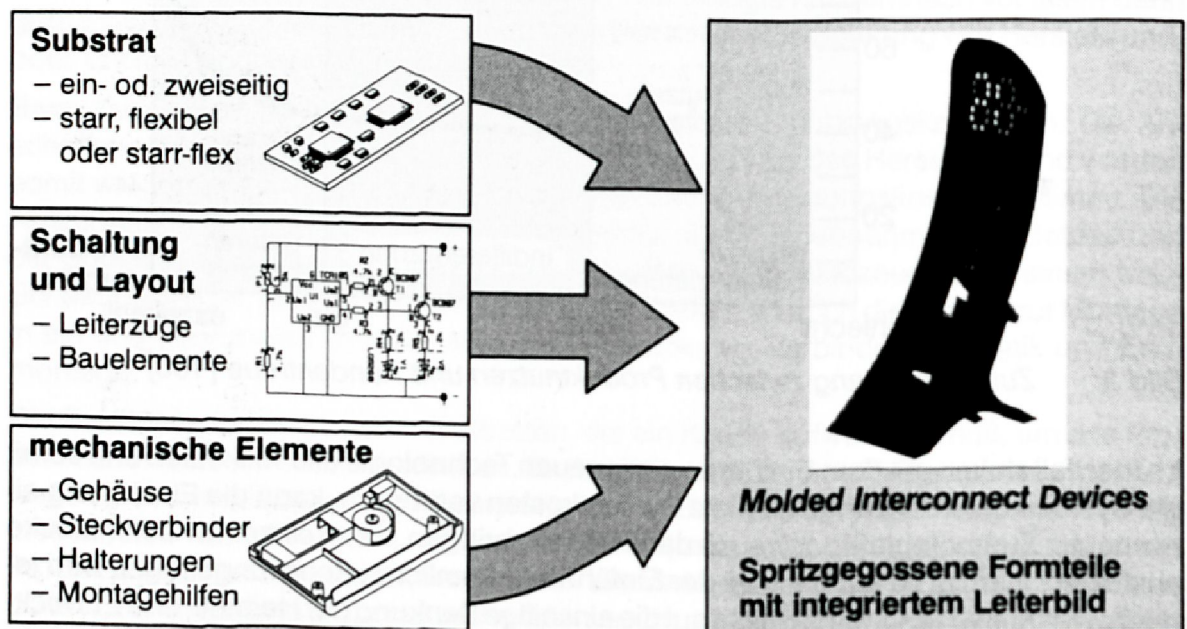


Bild 4: Definition für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger

MIDs eröffnen dem Konstrukteur bei geeigneter Konstruktion beträchtliche Vorteile gegenüber herkömmlichen Aufbautechniken. Diese lassen sich in drei Gruppen zusammenfassen.

Der hauptsächliche Vorteil im *technischen* Bereich liegt in der Integration der elektronischen und mechanischen Funktionen. Es hat sich gezeigt, daß die Nutzung dieses Vorteils gleichzeitig eine unabdingbare Voraussetzung für den erfolgreichen Einsatz eines MID ist. Gleichzeitig ermöglicht die Integration in bestimmten Fällen eine Miniaturisierung der Baugruppe. Weiter sind neuartige Funktionen realisierbar, die bei herkömmlicher Fertigungstechnologie nur mit sehr hohem Aufwand dargestellt werden können.

Auch hinsichtlich der *Rationalisierung* bietet MID deutliche Vorteile gegenüber konventionellen Technologien: Durch die Einsparung mechanischer Bauteile werden die Prozeßketten insbesondere in der Montage verkürzt und vereinfacht, was wiederum einer der wichtigsten Vorteile, aber auch eine Voraussetzung für die erfolgreiche Einführung der Technologie ist. Die Verringerung der Teilezahl führt auch zu indirekten Kosteneinsparungen, etwa durch verkleinerte Stücklisten. Allein mit dem Vergeben einer Teilenummer für eine Komponente sind nicht unerhebliche Verwaltungskosten verbunden. Falls eine Miniaturisierung möglich ist, führt diese zusätzlich zu einer Einsparung an Basismaterial. Durch das Verringern von Schnittstellen wird die Zuverlässigkeit erhöht.

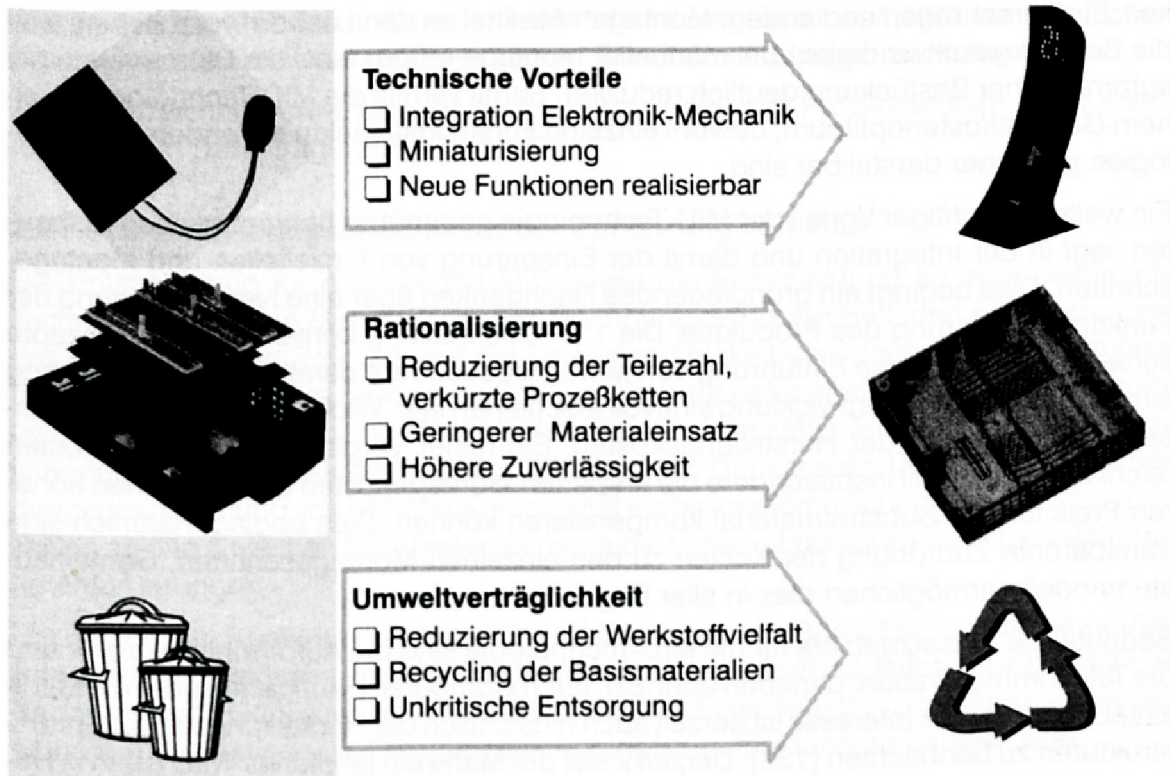


Bild 5: Vorteile der MID-Technologie gegenüber konventionellem Aufbau [nach 42]

Räumliche, thermoplastische Schaltungsträger sind in der Regel auch wesentlich *umweltverträglicher* als herkömmliche elektronische Baugruppen. Die Verwertung der ausgedienten Geräte wird vor allem durch die Verringerung des Materialmixes gefördert. In aller Regel bestehen MID-Baugruppen nur aus zwei bis drei Stoffen, nämlich dem Basisthermoplast und der Metallisierungsschicht, im Gegensatz zur stofflichen Vielfalt herkömmlicher Produkte. Für MIDs sind Basiswerkstoffe verfügbar, die ohne Zusätze flammhemmend sind. Gegenüber herkömmlichen, duroplastischen Leiterplattenmaterialien sind sie regenerierbar, können somit einfach rezykliert werden und sind damit wesentlich umweltverträglicher als diese.

In der Vergangenheit wurde für räumliche Schaltungsträger häufig der Begriff "dreidimensionale Leiterplatte" verwendet. Diese Bezeichnung trifft jedoch nicht die typischen Stärken der Technologie. Bei den meisten bisher erfolgreichen MID-Projekten handelt es sich um Baugruppen überwiegend mechanischer Funktion, die zusätzliche elektrische und elektronische Funktionselemente, etwa Bauelemente oder Steckverbinder integrieren. Typischerweise spielen räumliche Schaltungsträger ihre Stärken nicht in Einzeldisziplinen, sondern erst im Zusammenspiel der verschiedenen Funktionen aus.

Ein einfaches Beispiel hierfür sind z.B. Löcher für die Montage von Durchsteckbauelementen: Auf einer herkömmlichen Leiterplatte können feine Strukturen bei geringeren Kosten erzeugt und somit eine höhere Packungsdichte von Bauelementen realisiert werden als auf einem thermoplastischen Substrat. Auch ist der Basiswerkstoff an sich preiswerter. Das MID eröffnet jedoch ohne Mehrkosten in der Herstellung die Möglichkeit, Einführschrägen und andere Montagehilfsmittel an den Löchern vorzusehen, was die Bestückgeschwindigkeit bei manueller Montage erhöht bzw. die Störungsrate bei automatischer Bestückung deutlich reduziert. Somit verhilft die MID-Technologie zu ei-

keit, Einführschrägen und andere Montagehilfsmittel an den Löchern vorzusehen, was die Bestückgeschwindigkeit bei manueller Montage erhöht bzw. die Störungsrate bei automatischer Bestückung deutlich reduziert. Somit verhilft die MID-Technologie zu einem Gesamtkostenoptimum, obwohl einzelne Funktionsaspekte mit anderen Technologien günstiger darstellbar sind.

Ein weiterer wichtiger Vorteil der MID-Technologie gegenüber herkömmlichen Aufbauten liegt in der Integration und damit der Einsparung von Einzelteilen und Montageschritten. Dies bedingt ein grundlegendes Nachdenken über eine Neuausrichtung der Funktionsgliederung des Produktes. Die 1:1-Übersetzung konventioneller Konzepte scheitert meist, was die Einführung von MIDs insbesondere parallel zu der Einführung einer kompletten Neuentwicklung sinnvoll erscheinen läßt. Wichtig ist auch eine umfassende Betrachtung der Herstellungskosten. Ein reiner Vergleich der Materialkosten reicht nicht aus, weil insbesondere die ersparten Montagekosten teilweise einen höheren Preis für das Substratmaterial kompensieren können. Dies bedingt natürlich eine transparente Zuordnung der Kosten zu den einzelnen Montageschritten, Gemeinkostenmodelle ermöglichen dies in aller Regel nicht.

Bedeutende Einsatzgebiete für die MID-Technologie sind die Automobilelektronik und die Telekommunikation, daneben aber z.B. auch Computer, Hausgeräte oder die Medizintechnik. Starkes Interesse ist derzeit auch hinsichtlich der Herstellung von Antennenstrukturen zu beobachten [133]. Derzeit weist der Markt ein jährliches Wachstum in Höhe von etwa 30% auf [140], allerdings ausgehend von niedrigem Niveau, so daß einzelne Großprojekte erhebliche Schwankungen hervorrufen können. In den letzten Jahren war insbesondere in Europa ein überdurchschnittliches Wachstum zu beobachten.

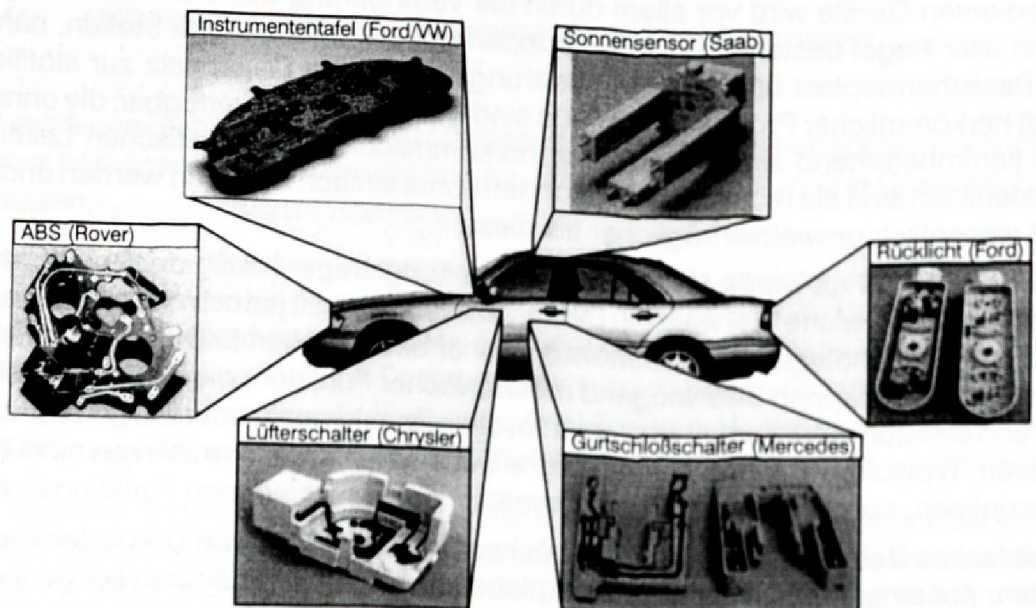


Bild 6: Beispielhafte Einsatzbereiche für MID im Automobil [98]

Ein wichtiges Einsatzgebiet für räumliche Schaltungsträger ist die Automobilindustrie, in der neben erheblichem Kostendruck auch knapper Einbauraum und Gewichtsprobleme die Entscheidung für den Einsatz der Technologie begünstigen. Seit mehreren

Jahren werden MID-Baugruppen in Automobilen eingesetzt, seit 1997 auch in sicherheitsrelevanten Bereichen unter extremen Einsatzbedingungen im Motorraum.

Zahlreiche weitere Anwendungen befinden sich derzeit im Projektstadium, unter anderem auch im Datenträgerbereich [62,47].

2.3 Entscheidungsfindung bei der Einführung von MID

Die Entscheidung für oder gegen MID sowie die Entscheidung für eine bestimmte Technologie oder ein Material findet im Spannungsfeld zwischen den Anforderungen des Marktes an ein Produkt und die Leistungsfähigkeit verschiedener Ausführungsmöglichkeiten statt. Die besondere Schwierigkeit zur optimalen Nutzung der technologischen, ökonomischen und ökologischen Potentiale der MID-Technologie, liegt in dem integrierten Produkt-, Gestaltungs- und damit auch Denkansatz. Die nötigen Entscheidungsprozesse sind von höherer Komplexität als bei herkömmlichen Technologien und stellen an den einzelnen Mitarbeiter wie auch die Unternehmensorganisation relativ hohe Anforderungen.

Um zur idealen Auslegung eines MID zu kommen, ist die Berücksichtigung einer Vielzahl von Einflußfaktoren erforderlich. Grundsätzlich gilt, daß die Anforderungen an eine Baugruppe aus Gebrauch und Produktion mit den Eigenschaften und Grenzen der verfügbaren Materialien und Fertigungstechnologien in Einklang zu bringen sind.

Die Anforderungen aus dem Gebrauch unterscheiden sich je nach Einsatzgebiet sehr stark. Neben einigen übergreifenden Anforderungen, die für alle MIDs gelten, weist jede Branche spezifische Anforderungslisten auf, die von eingesetzten Baugruppen, unabhängig von der verwendeten Herstelltechnologie, zu erfüllen sind. Neben den Gebrauchsanforderungen stellen jedoch auch Bereiche der Prozeßkette Anforderungen an die MID-Baugruppe. So ist es zum Beispiel möglich, daß eine Baugruppe, die im alltäglichen Einsatz nur bis etwa 60 °C erwärmt wird, was die Verwendung eines preiswerten Massenkunststoffs ermöglichen würde, während der Produktion einem Lötprozeß unterzogen wird, der aufgrund der für kurze Zeit auftretenden Spitzentemperatur den Einsatz eines höherwertigen (und damit teureren) Thermoplasten erfordert.

Dem gegenüber stehen die Möglichkeiten der verfügbaren Materialien und Fertigungsverfahren. Während die Materialien MID-spezifisch insbesondere thermische und chemische Einsatzgrenzen aufweisen, liegen die Grenzen der Verfahren vor allem bei den erzielbaren Strukturfeinheiten und Metallschichten sowie der erreichbaren Dreidimensionalität der Strukturen.

In Kapitel 4 werden wesentliche Anforderungsstrukturen erläutert, Kapitel 5 befaßt sich mit den Grenzen der häufigsten derzeit eingesetzten Technologien zur Erzeugung des Schaltungslayouts.

Die Herausforderung für den MID-Entwickler liegt darin, die Anforderungen unter Beachtung der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen so mit den Fähigkeiten von Material und Prozeß in Einklang zu bringen, daß ein möglichst kostengünstiges, die geforderte Funktion optimal erfüllendes Produkt entsteht. Hierzu sind eine Vielzahl von Informationen erforderlich. Obwohl mittlerweile eine große Datenmenge zur Verfügung steht, sind die Zusammenhänge vielfach nicht klar, insbesondere was die Auswirkung der konstruktiven Auslegung und der Wahl der Fertigungstechnologie auf die Gesamt-Kostensituation betrifft. Einige der benötigten Informationen möchte diese Arbeit bereitstellen.

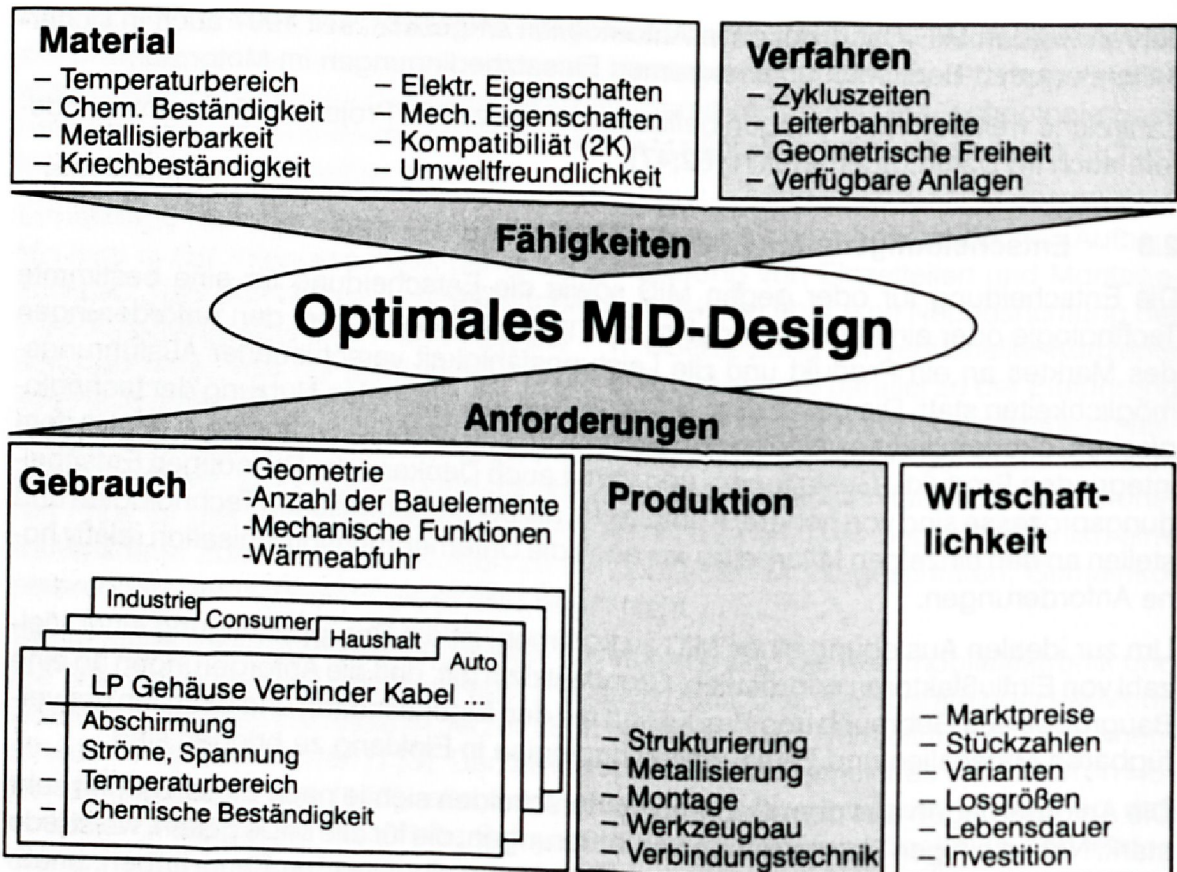


Bild 7: Entscheidungskriterien für den Einsatz der MID-Technologie [96]

Die Voraussetzung für die Koordination der Entwicklungsarbeit muß die Organisationsstruktur des Unternehmens schaffen. Die – in Deutschland bereits im Bildungssystem an den Hochschulen deutlich festzustellende – strikte Trennung der Kompetenzen der an einem Entwicklungsprojekt beteiligten Personen nach technologischen Fachbereichen, nicht nach Funktionseinheiten, führt zu verschiedenen Problemfeldern, die bei der Einführung von räumlichen Schaltungsträgern auftreten.

2.4 Problemfelder

Bei zahlreichen vom Autor betreuten Projekten zur Einführung von MID-Baugruppen kristallisierten sich im wesentlichen vier Bereiche heraus, an denen eine erfolgreiche Einführung der MID-Technologie scheitern kann. Neben offensichtlichen technischen und wirtschaftlichen Hemmnissen waren dies häufig ungeeignete Strukturen in der Ablauf- und Aufbauorganisation der Firmen sowie mangelnde Informationen, die zu wirtschaftlichen Fehleinschätzungen führten oder eine genaue Kalkulation unmöglich machten.

Die dargestellten, aufgetretenen Probleme sind exemplarisch, können jedoch auf viele andere Fälle verallgemeinert werden. Bei vielen MID-Projekten hat sich gezeigt, daß die größten Herausforderungen zur Einführung und Qualifikation der für die meisten Unternehmen noch neuen Technologie nicht in den technischen Disziplinen liegen, sondern in Unsicherheiten und unbewußtem Risikogefühl der beteiligten Personen begründet sind. Hauptursache hierfür ist die komplexe Struktur von MIDs, die es erfordert, eine Vielzahl von unterschiedlichen Fachgebieten in die Entwicklung mit einzubeziehen, wo-

bei der Aufbauorganisation die erforderlichen Informationen über die Prozesse nicht immer ausreichend bereitstellt.

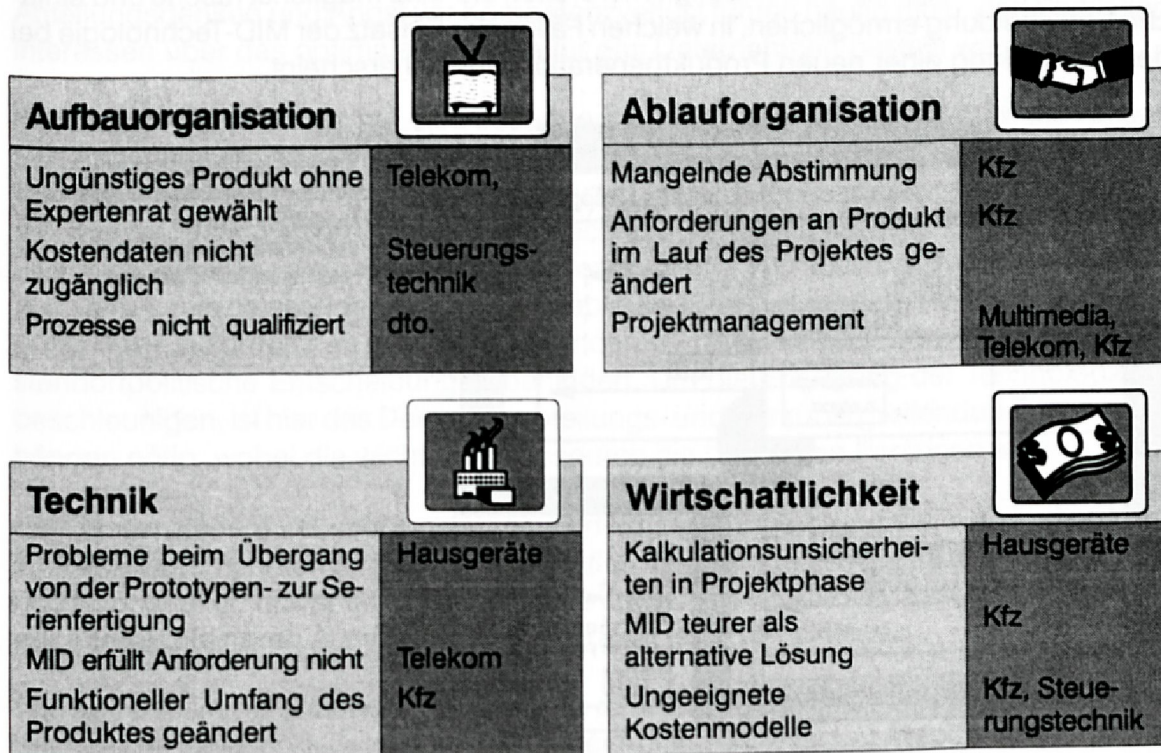


Bild 8: Problemfelder bei der Einführung von MID

Unternehmen sind theoretisch nach einem von zwei Modellen organisiert. Die Organisation kann funktions- oder produktorientiert aufgebaut sein [105]. Die überwiegende Mehrzahl der Unternehmen weist jedoch eine Mischform auf, bei der einer funktionsorientierten Organisation produktorientierte Projektstrukturen beigeordnet sind.

Natürlich können mehrere Funktionsblöcke zusammengefaßt werden. Bei den angewandten Organisationsformen ist in aller Regel eine deutlich ausgeprägte Fachkompetenz der Mitarbeiter zu beobachten, das fachübergreifende Verständnis integrativer Denkstrukturen ist jedoch häufig nicht sehr stark ausgebildet. Bei der Matrixorganisation ist der Zusammenhalt und die Abhängigkeit innerhalb der Abteilungsstrukturen in der Regel sehr viel stärker ausgebildet als hinsichtlich des Produktes bzw. Projektes über die Abteilungsgrenzen hinweg. Die Produktverantwortlichen haben häufig nicht genug Einfluß und fachliche Kompetenz, um ein interdisziplinäres Vorgehen wirkungsvoll zu koordinieren.

Der Mangel, der sich bei einer solchen Organisation zeigt, liegt in der fehlenden Abstimmung zwischen den Bereichen, was häufig zu aufwendigen Schnittstellenlösungen führt. Entwickler neigen dazu, die Gestaltung ihres eigenen Bereiches (z.B. der Leiterplatte) zu optimieren, ohne auf Nachbarbaugruppen mehr Rücksicht zu nehmen als unbedingt erforderlich (z.B. Anschlußbelegung abgehender Kabel). Somit werden zwar Teiloptima erreicht, das Gesamtoptimum jedoch verfehlt. Neben erhöhten Produktionskosten führt eine solche Vorgehensweise auch häufig zu kundenunfreundlichen Strukturen, etwa mangelnder Reparaturreignung des Gerätes.

2.5 Lösungsansätze im Rahmen der Aufbauorganisation

Nachfolgend werden einige Vorschläge für eine Anpassung der Aufbauorganisation an die Bedürfnisse der MID-Entwicklung unterbreitet, die eine möglichst rasche und einfache Entscheidung ermöglichen, in welchen Fällen der Einsatz der MID-Technologie bei der Entwicklung einer neuen Produktgeneration sinnvoll erscheint.

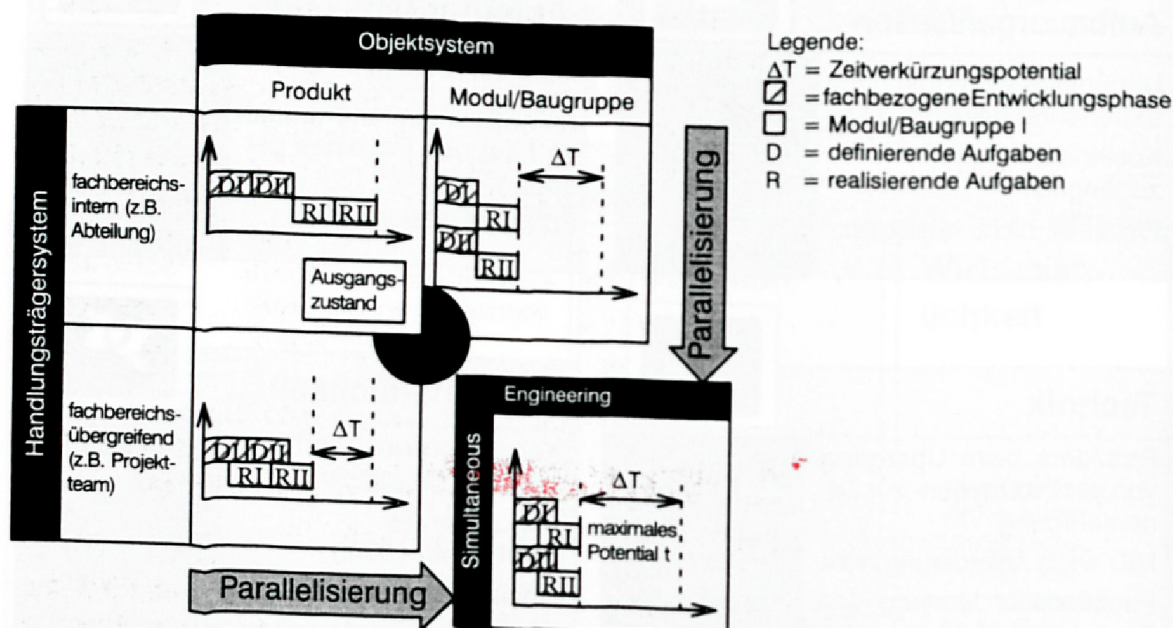


Bild 9: Verbesserte Abstimmung des Produktdurchlaufes und Verkürzung der Durchlaufzeiten mittels Simultaneous Engineering (nach [71])

In den letzten Jahren sind an die Stelle der klassischen, funktionsorientierten Entwicklungsdurchläufe verstärkt projektorientierte Ansätze bei der Entwicklung eines neuen Produktes getreten. Im Rahmen des "Simultaneous Engineering" oder "Concurrent Engineering" werden Projektteams gebildet, in denen Spezialisten aus verschiedenen Abteilungen zusammenarbeiten. Insbesondere werden im herkömmlichen Ablauf hintereinander geschaltete Funktionsbereiche zusammengebracht, etwa Entwicklung, Arbeitsplanung, Fertigung und Vertrieb. Ziele des Simultaneous Engineering sind in aller Regel vor allem die Verkürzung der Entwicklungszeit und somit die Senkung der Entwicklungskosten sowie ein besseres Verständnis für die Bedürfnisse des Kunden. Die enge Verzahnung der verschiedenen Funktionsbereiche hilft dabei, beiden Zielen näher zu kommen. Eine besondere Bedeutung im Hinblick auf die Entwicklung räumlicher Schaltungsträger kommt der Abstimmung verschiedener Fertigungsbereiche zu. In der gegenwärtigen Situation auf dem Markt für MIDs ist keine Firma in der Lage, ohne Partner ein funktionsfähiges MID anzubieten. Die einzelnen Fertigungsschritte beeinflussen maßgeblich das Ergebnis und die erzielbare Qualität der nachfolgenden Prozesse. Die korrekte Einstellung der Fertigungsparameter ist ohne zumindest grundlegendes Verständnis der nachfolgenden Prozesse unmöglich.

Daher ist die genaue Definition der Schnittstellen zwischen den Fertigungsabteilungen, die in diesem Fall den verschiedenen Firmen entsprechen, von entscheidender Bedeutung für den Erfolg des Gesamtprojektes. Mangelnde Abstimmung führte wiederholt zu einer dramatischen Verlängerung der Entwicklungsarbeit. Umgekehrt kann durch früh-

zeitige Kooperation und das Schaffen eines Vertrauensverhältnisses die Erfolgsaussicht eines Projektes wesentlich gesteigert werden. Aber bereits die Einführung des Simultaneous Engineering in einem einzelnen Betrieb stößt häufig auf Schwierigkeiten. Abteilungsdenken und Angst vor Kompetenzverlust führen häufig dazu, daß Partikularinteressen über das optimale Ergebnis für das Unternehmen gestellt werden.

Für die MID-Technologie hat dies besonders deshalb Konsequenzen, weil die Ablauf- und Abteilungsstrukturen in einem Unternehmen (sinnvollerweise) an die bestehenden Technologien angepaßt sind. Um ein möglichst hohes Rationalisierungspotential an Systemkosten zu realisieren, muß die MID-Technologie jedoch häufig mit der durch diese Technologien vorgegebenen Funktionsgliederung der Produkte brechen. Dies bedingt auch eine Umorganisation der Fertigungsabläufe. Eine Verlagerung von Teilen der Fertigung – wie sie durch den grundsätzlich anderen Aufbau sinnvoll wäre – wird oft durch standortpolitische Entscheidungen behindert. Um die Einführung der Technologie zu beschleunigen, ist hier das Denken in abteilungs- und werkübergreifenden Zusammenhängen nötig, wobei die wichtigste Ressource die beteiligten Personen sind.

Eine wesentliche Voraussetzung für eine erfolgreiche Einführung der MID-Technologie in einem Unternehmen ist daher das Schaffen von Strukturen, die für die Beschaffung und Koordination des nötigen Fachwissens sorgen. Besonderes Gewicht kommt dabei der interdisziplinären Ausrichtung und -bildung der Entwickler zu.

Wie aus den vorhergehenden Abschnitten deutlich wird, wurden in den Betrieben bisher in erster Linie Modelle zur Integration der Abläufe in zeitlicher Abfolge des Produktionsprozesses über die Abteilungsgrenzen hinweg eingeführt. Eine Integration über die fachlichen Bereiche der Aufbauorganisation hinweg ist dagegen weitgehend unterblieben. Hier liegt noch erheblicher Nachholbedarf, der sich besonders bei räumlichen Schaltungsträgern aufgrund ihres hohen Anspruchs an Integration nicht nur der Produkte, sondern auch der Entwicklungsumgebung negativ bemerkbar macht.

Um die Einführung der MID-Technologie zu erleichtern, wurden verschiedene Informationsblöcke in den entscheidungsrelevanten Bereichen erarbeitet, die der Organisation zur Verfügung gestellt werden können.

2.5.1 Interdisziplinäre Integration der Entwicklungsumgebungen

Kern einer MID-gerechten Organisationsstruktur mit dem Kunden im Mittelpunkt des Interesses ist die Erweiterung des Simultaneous Engineering zum Holonic Engineering (griech. "holos" = "das Ganze"), also von der gleichzeitigen Entwicklung zur "Ganzheitlichen Entwicklung". Unterstützend wurden Informationsmodule zu den technischen Randbedingungen in Form eines Handbuches und von Gestaltungsrichtlinien in Form einer "Checkliste" erarbeitet, die zusammen mit Informationen über die kostenbeeinflussenden Faktoren und die Patentsituation eine effiziente Entscheidungsfindung zum Einsatz der MID-Technologie ermöglichen. Eine Sammlung von Marktanforderungen und der Aufbau eines Arbeitskreises zur MID-gerechten Überarbeitung und Ergänzung bestehender Normen für elektronische Baugruppen runden die bereitgestellten Hilfsmittel ab.

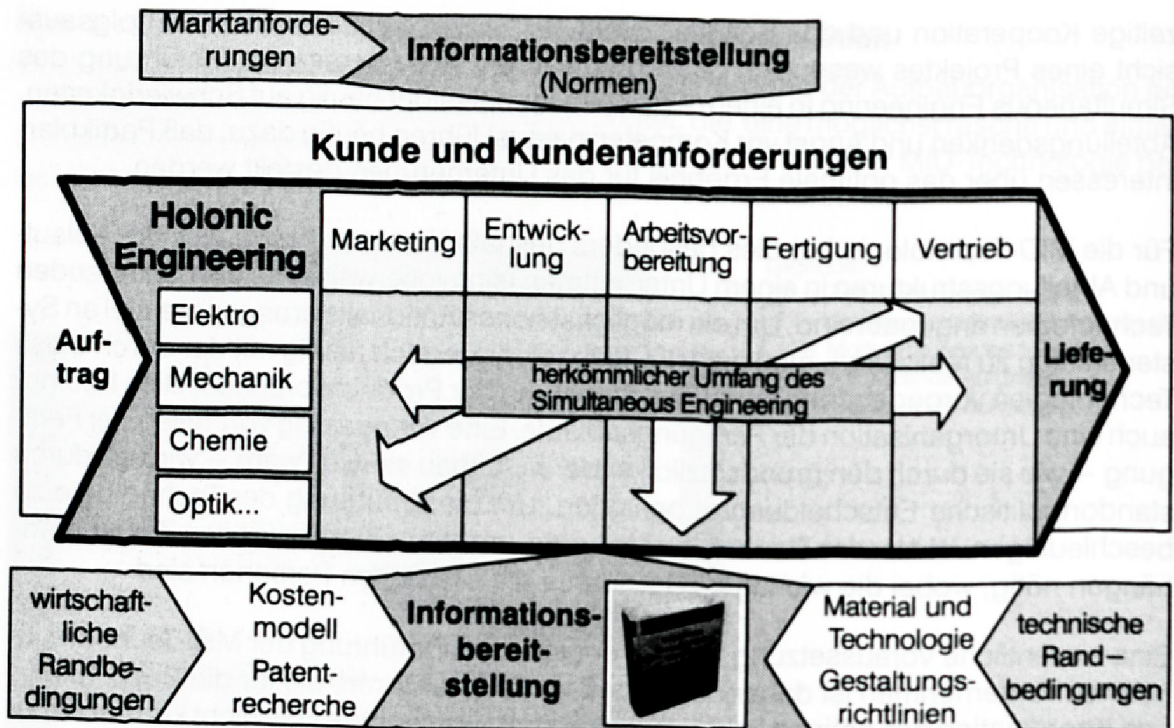


Bild 10: Rahmenbedingungen bei der Einführung der MID-Technologie

Holonic Engineering verfolgt das Konzept der Integration der Abteilungen in Längs- und Querrichtung im Entwicklungsprozeß [56,115,118,126]. Eine bedeutende Rolle spielt dabei auch die Behandlung wirtschaftlicher Fragestellungen, die in herkömmlichen Modellen weitgehend getrennt von ingenieurwissenschaftlichen Aufgaben betrachtet werden.

Wichtig ist hierbei vor allem nicht nur die organisatorische Darstellung der ganzheitlichen Betrachtungsweise, sondern insbesondere auch die Verbreitung dieses Gedankens in der Vorstellungswelt der Entwicklungsingenieure und der zugeordneten Kaufleute. Während der Tätigkeit des Autors am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik in Erlangen konnte ein wichtiger Teil dieses Anspruchs bei der Entwicklung des Konzepts für den erstmals an einer deutschen Universität eingeführten Studiengang "Produktionstechnik in der Elektrotechnik" umgesetzt werden, der für Studenten sowohl mit einem Vordiplom in Maschinenbau als auch in Elektrotechnik gewählt werden kann und einen wichtigen Schritt von der sparten- bzw. funktionsorientierten Ausbildung hin zur produktorientierten Ausbildung initiiert. Für eine wirklich ganzheitliche Entwicklungsumgebung muß dieses Modell jedoch noch um weitere Disziplinen ergänzt werden. Dies umfaßt vor allem die weitergehende Integration wirtschafts- und ingenieurwissenschaftlicher Inhalte und Personen, deren Denkweisen sich häufig wesentlich unterscheiden [2], in Projektgruppen. Insbesondere muß die Marktorientierung noch weiter gestärkt werden.

Die Verinnerlichung des holonischen Modells ermöglicht eine neue Sichtweise auf Entwicklungsprobleme, insbesondere bei räumlichen Schaltungsträgern, und erlaubt die gezielte Bereitstellung von Ressourcen zur Integration der Disziplinen über die ablauf- und aufbauorganisatorischen Einheiten.

Die Erweiterung der Denkmodelle zum Holonic Engineering fordert automatisch eine Vervielfachung des dem Entwickler zur Verfügung stehenden Wissens. Da der einzelne Mensch nicht beliebig viel Wissen "speichern" kann, bedingt dies entsprechende Konzepte, um das zusätzlich benötigte Wissen möglichst schnell zugreifbar bereitzuhalten. Das Nichtbesetzen nur einzelner Wissensfelder kann bereits äußerst negative Konsequenzen für den Gesamterfolg des Projektes haben. Grundsätzlich kann das Wissen als "Säule" (tiefgehendes Wissen auf einem relativ kleinen Fachgebiet) oder breit gefächert bei verhältnismäßig geringerer Wissenstiefe organisiert sein. In der Regel treten unterschiedlich ausgeprägte Mischformen auf, z.B. bei Führungskräften, die über ein breites Wissen, aber zusätzlich über Fachwissen auf ihrem ursprünglichen Tätigkeitsgebiet verfügen.

In der Regel sind in ein Projekt mehrere Hierarchieebenen eingebunden. Ein Projektleiter, der alle Bereiche koordiniert, wird ergänzt von Teilprojektleitern, die in ihren Fachbereichen über ein tieferes Wissen verfügen. Die untergeordnete Hierarchieebene der Sachbearbeiter weist ein ausgeprägtes Fachwissen auf, hat aber wenig Zugang zu Informationen aus anderen Fachgebieten. Abstimmungen von Inhalten, Konstruktion und Fertigung müssen über den Projektleiter erfolgen. So ist es durchaus üblich, daß der einzelne Konstrukteur keine Informationen darüber erhält, was bestimmte Fertigungsverfahren kosten oder wie Maschinenstundensätze kalkuliert sind.

Eine solche streng aufgabenteilige Projektstruktur wird mit zunehmender Vernetzung der einzelnen Projektbereiche ungeeigneter, da die Abstimmungshäufigkeit und der Bedarf für einen Informationsfluß zwischen den Aufgabengebieten stark ansteigt. Die Einführung von MIDs ist ein solches Projekt, bei dem eine enge Zusammenarbeit und eine breite Wissensbasis mit häufiger Abstimmung erforderlich ist. Für derartige Projekte sind alternativ Konzepte nötig und denkbar, bei denen jeder Projektmitarbeiter jederzeit über alle projektrelevanten Informationen verfügen kann. Idealerweise erschließt sich dem Mitarbeiter auch das gesamte zur Projektbearbeitung nötige Wissen, so daß die gesamte Projektbearbeitung aus einer Hand erfolgen kann. Da das pro Person bereithaltbare Wissensvolumen jedoch nicht wesentlich gesteigert werden kann, erfordert dies die Bereitstellung des Wissens in einer geeigneten Form.

Die übliche Form zur Wissensvermittlung sind elektronisch gestützte Informationssysteme. Im Rahmen dieser Arbeit wurde hierzu ein Konzept entwickelt, das die Rechnerchnittstelle durch ein Handbuch unterstützt und die Entscheidung erleichtern kann.

2.5.2 Frühzeitige Konzeptabstimmung

Sind an der Entwicklung – wie bei MID-Projekten üblich – mehrere Fachabteilungen beteiligt, ist es besonders wichtig, die Teilkonzepte möglichst frühzeitig gegenseitig abzustimmen, insbesondere, da bei MIDs Änderungen an einer Stelle des Konzeptes weitreichende Auswirkungen auf andere Projektbereiche haben können. Kritisch ist dies besonders deshalb, weil verschiedene Verfahrensschritte voneinander abhängig werden und somit dem Verständnis "fachfremder" Prozesse besondere Bedeutung zukommt. So kann beispielsweise ein funktions- oder kostenbedingter Wechsel der Materialtype oder des -lieferanten – selbst bei gleichbleibender Materialgruppe – fatale Auswirkungen auf die Metallisierbarkeit oder das Lötverhalten haben. Selbst bei identischem Material kann eine Änderung der Spritzparameter eine erfolgreiche, haftfeste Metallisierung der Oberfläche verhindern.

Änderungen sind bei MIDs meist teurer als bei herkömmlichen Elektroniklösungen, weil stets die Dreidimensionalität berücksichtigt werden muß. Beim Zweikomponentenspritzguß bedeutet dies z.B., daß zwei Spritzgußformen überarbeitet werden müssen. Das einmal für MID gewählte Konzept sollte möglichst beibehalten, kurzfristige Änderungen, wie sie vor allem im Bereich des Leiterplattenlayouts bei konventionellen Elektronikbaugruppen üblich sind, vermieden werden. Konzeptänderungen während der Entwicklungsphase gefährden Wirtschaftlichkeitsberechnungen und können das gesamte Projekt in Frage stellen. Dies soll in nachfolgendem Beispiel verdeutlicht werden: Bei einem Kfz-Zulieferer sollte ein elektronisches Steuergerät mit Hilfe der MID-Technologie so umgestaltet werden, daß der Bedarf verschiedener Kunden mit einer einfach zu variierenden Gerätefamilie abzudecken ist. Insbesondere waren hier Hausnormen der Kunden und Einbausituationen zu berücksichtigen, was unterschiedliche Formen und Lagen des Anschlußsteckers bedingte. Der Übergang von Stanzgittertechnik mit sehr hohen, erst bei großen Absatzmengen rentablen Werkzeugkosten zur MID-Technik sollte es ermöglichen, auch kleine Serien kostengünstig anzubieten und damit die Angebotsvarianten der Automobilhersteller entsprechend abzudecken.

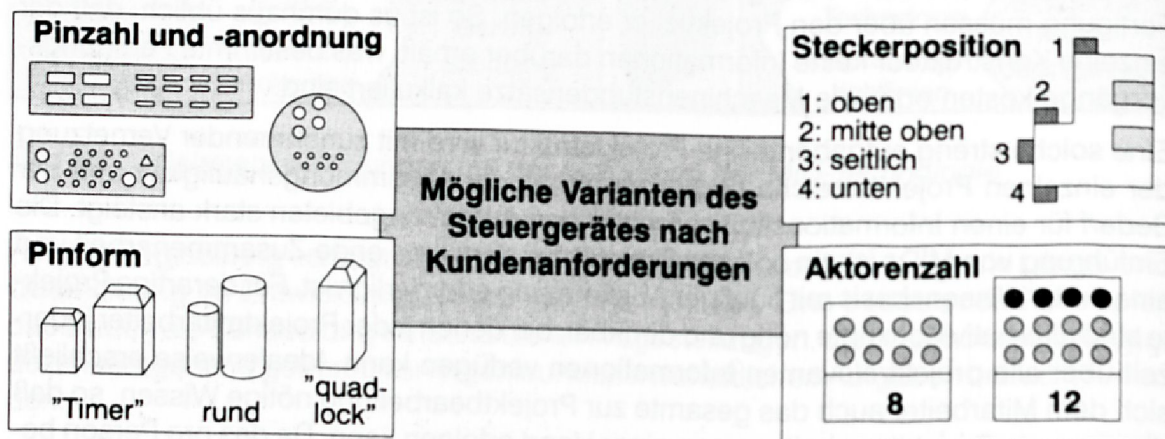


Bild 11: Flexibilitätsanforderungen an beispielhaftes Steuergerät hinsichtlich der Gestaltung des Anschlußsteckers und des Funktionsumfangs

Während in der herkömmlichen Technologie für jede Variante ein mehrere Millionen DM teurer Satz Stanzwerkzeuge erforderlich war, sahen erste MID-Konzepte einen variablen Bereich im Gehäuse des Steuergerätes vor, in dem mittels Werkzeugeinsätzen zu jeweils fünf- bis sechststelligen Kosten verschiedene Steckervarianten in unterschiedlichen Abgangslagen dargestellt werden können, um die Forderung nach möglichst hoher Flexibilität (siehe Abbildung 11) bei geringen Änderungskosten zu erfüllen.

Im Laufe des Projektes konnte der Projektpartner mehr und mehr seiner Kunden dazu bewegen, einen einheitlichen Stecker an einer einzigen Stelle des Steuergerätes zu akzeptieren und ihre Steckverbinder bzw. Kabelbäume entsprechend anzupassen. Somit entfiel eine der wesentlichen Motivationen für den Einsatz der MID-Technologie. Da die (Stanz-)Werkzeugkosten nun nicht mehr auf jede Variante, sondern auf die Gesamtstückzahl von mehreren Millionen Teilen pro Jahr umzulegen waren, ging der Kostenvorteil des spritzgegossenen Schaltungsträgers verloren; eine konstruktiv überarbeitete, konventionelle Lösung erwies sich schließlich als ca. 5% (!) kostengünstiger.

Die Anforderung wandelte sich im Laufe des Projektes von "möglichst flexibel bei geringen Änderungskosten" zu "möglichst kostengünstig ohne Berücksichtigung einer Än-

derungsmöglichkeit". Für die ursprüngliche Anforderungssituation wäre MID mit Sicherheit die bei weitem überlegene Technik gewesen. Im Bewußtsein der Projektbeteiligten hat sich als Grund für das Scheitern jedoch nicht die Anforderungsänderung, sondern die MID-Technik an sich eingeprägt. Dieses und andere Beispiele zeigen, wie wichtig gerade bei einer so interdisziplinär geprägten Technologie wie spritzgegossenen Schaltungsträgern ein Übergang der Projektbearbeitung von sequentiellen zu parallelen Denkweisen und eine häufige Abstimmung zwischen den Entwicklungssträngen ist.

2.5.3 Schaffung einer MID-geeigneten Aufbauorganisation mit Methoden des Projektmanagements

Die Einführung einer komplett neuen Technologie kann durch Methoden des Projektmanagements wesentlich gestützt werden. Hierbei besteht das Projekt in der Schaffung der geeigneten Organisationsform und Strukturen. Die Einführung sollte dabei in mehreren aufeinanderfolgenden Phasen erfolgen.

Etwa zwei bis vier Jahre vor der geplanten Einführung des ersten MID-Produktes sollten Gruppen auf der Ebene der direkt betroffenen Mitarbeiter gebildet werden, die sich mit dem Thema befassen; als Gruppenleiter kann der Vorgesetzte fungieren, ggf. nach Besuch eines Einführungsseminars. Alternativ ist die Zusammenarbeit mit einem externen Berater möglich. In dieser Phase wird das Know-How über die Technologie erworben und bei den später Betroffenen bereits verankert. Über einige Monate verteilt sind kurze (z.B. halbtägige) Seminare vorzusehen, um die Kenntnisse schrittweise zu erweitern und einer Überforderung und mangelhaften Verarbeitung des Gelernten vorzubeugen.

In einer zweiten Phase, etwa ein bis zwei Jahre vor der Einführung der Technologie in die Serie, sollte gezielt untersucht werden, welchen Beitrag die MID-Technologie zur Überwindung von Nachteilen der bislang eingesetzten Technologien leisten kann. Hierzu können Fallstudien, etwa "Parallelentwicklungen" nützlich sein, die jedoch von Fachleuten begleitet sein müssen, um die Abkehr von bestehenden Denkstrukturen zu unterstützen und einen 1:1 – Nachbau der bestehenden Konstruktionen zu verhindern.

Da es für ein Unternehmen in der Regel nicht möglich und sinnvoll ist, alle verfügbaren MID-Technologien parallel anzuwenden, umfaßt die kurzfristige Vorbereitung eine grobe Auswahl der für das jeweilige Produktportfolio bestgeeigneten Verfahren. Eine Feinauswahl entscheidet darüber, welche Schritte im Haus ausgeführt und welche extern vergeben werden sollen. Daran anschließend können die nötigen Investitionen getätigt werden. Bei der Einführung in die Serienproduktion sind nochmals umfangreiche Schulungsmaßnahmen, insbesondere für die Maschinenbediener, erforderlich. Außerdem umfaßt diese Phase die Lösung auftretender, unerwarteter Probleme. Der Übergang in die Arbeitsphase erfolgt fließend. In dieser Zielphase finden regelmäßig Reviews statt, um notwendige Änderungen oder Ergänzungen im Produktionsprozeß umzusetzen.

Häufig unterschätzen Unternehmen offenbar die langfristigen Erfolgsmöglichkeiten einer scheinbar risikoreichen Innovation. Diese können jedoch nur durch eine umsichtige Vorbereitung der Einführung sichergestellt werden, die vordergründig "unproduktiv" erscheint. Ein Einstieg in der kurzfristigen Vorbereitung, möglichst unter Umgehung erforderlicher Investitionen in Maschinen und Mitarbeiterfortbildung muß zu Schwierigkeiten in der Einführungsphase führen, so daß die Arbeitsphase, wenn überhaupt, nur schwer und mit zeitlicher Verzögerung, erreicht werden kann. Trotz des Aufwandes für eine sorgfältige Vorbereitung ist diese unbedingt zu empfehlen.

Eine sorgfältig auf die veränderten Anforderungen umgestellte Aufbauorganisation ist ein wesentlicher Faktor für die erfolgreiche Einführung räumlicher Schaltungsträger in einem Unternehmen.

2.5.4 MID-Projektentwicklung in virtuellen Unternehmen

Eine Form der Zusammenarbeit, die sich für die Einführung der MID-Technologie besonders gut eignet, sind virtuelle Unternehmen [122]. Virtuelle Unternehmen stellen insbesondere kleine und mittelständische Firmen mit der Flexibilität und Agilität aus, die sie benötigen, um in sich verändernden Märkten zu bestehen [76]. Eine Definition für ein virtuelles Unternehmen findet sich als: "Zeitweiliges Netzwerk unabhängiger Unternehmen, die über eine leistungsfähige Kommunikationsinfrastruktur verbunden sind. Die Unternehmen teilen Kompetenzen, Kosten und Märkte, um ein Produkt herzustellen." [16] Mehrere unabhängige Unternehmen mit verschiedenen Kompetenzen bilden ein Netzwerk, um flexibel die Marktanforderungen zu bedienen. Hierbei sind drei Typen von Netzwerken zu unterscheiden, die in Bild 12 dargestellt sind.

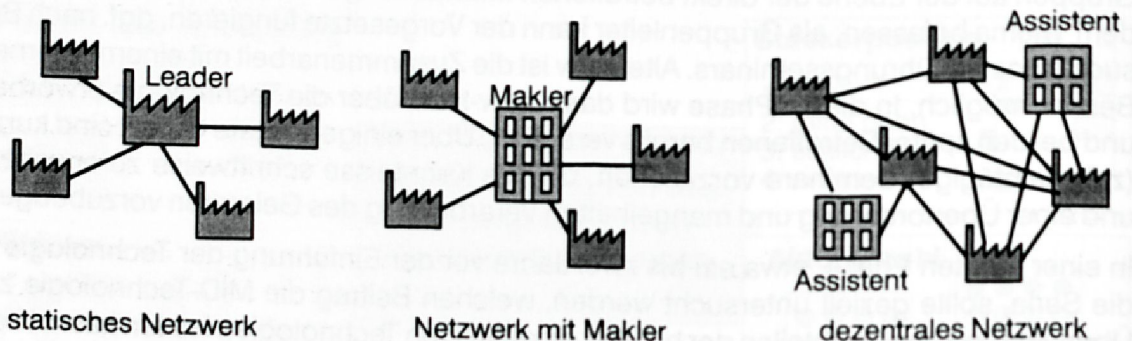


Bild 12: Unterschiedliche Netzwerktypen für virtuelle Unternehmen (nach [76])

In einem *statischen Netzwerk* sind die Randbedingungen von Anfang an bekannt, die Partner durch Verträge aneinander gebunden. Der Leader, das dominierende Unternehmen, koordiniert das Netzwerk, einschließlich der Kommunikation. Nur er ist in der Lage, ein virtuelles Unternehmen aufzubauen. In der Regel entsteht aus einem statischen Netzwerk nur ein virtuelles Unternehmen. Der Unterschied zu herkömmlicher Zusammenarbeit liegt darin, wie die Partner miteinander umgehen. Im Gegensatz zur herkömmlichen Generalunternehmersituation geht die Zusammenarbeit wesentlich weiter, es wird eine Vertrauensbasis hergestellt.

Bei einem *Netzwerk mit Makler* ist es Aufgabe des Maklers, das virtuelle Unternehmen aufzubauen. Er ist dafür verantwortlich, Kundenanfragen an die geeigneten Partner weiterzuleiten. Der Makler muß die Kompetenzen und Auslastung jedes Unternehmens in dem Netzwerk kennen und einen gewissen Grad von Autorität besitzen, um seine Aufgabe auszuführen. Die Partner müssen darauf vertrauen, daß der Makler in ihrem Sinne handelt. Da der Makler für die Partner extern ist, muß den rechtlichen Rahmenbedingungen besondere Beachtung geschenkt werden. Trotz dieser Nachteile kann ein Netzwerk mit Makler höchst effizient sein, wenn eine Reihe von KMUs zusammenarbeiten, um ein breiteres aber klar definiertes Programm von Produkten und Dienstleistungen anzubieten, weil vor der Bildung des virtuellen Unternehmens ein klares Regelwerk aufgestellt werden kann.

Die dritte Form ist das *dezentrale Netzwerk*. Die Partner arbeiten in einer offenen und variablen Gruppe zusammen. Im Vergleich zum Netzwerk mit Makler fehlt die zentrale Koordinationsinstanz. Jeder Partner ist in der Lage, ein virtuelles Unternehmen für einen eingehenden Auftrag aufzubauen. Mit dem dezentralen Netzwerk können drei Probleme des Netzwerks mit Makler gelöst werden: Es entfällt die zentrale Stelle, die entscheidet, welche Partner an einem Projekt teilnehmen. Auch entscheidet keine externe Instanz über interne Ressourcen. Außerdem entfällt das bei den anderen beiden Netzwerktypen erforderliche rechtliche Rahmenwerk. Somit ergibt sich das ideale Netzwerk für rechtlich unabhängige KMUs, die ein großes Produktangebot liefern möchten, während sie ihre Flexibilität im Markt erhöhen.

Im Bereich räumlicher Schaltungsträger existieren derzeit sowohl statische Netzwerke, bei denen sich Firmen vertraglich zur Zusammenarbeit verpflichtet haben, wie auch ein dezentrales Netzwerk in Form der "Forschungsvereinigung Räumliche elektronische Baugruppen 3-D MID e.V.", in dem sich die Mitgliedsunternehmen für einzelne Projekte geeignete Partner suchen, wobei die Geschäftsstelle der Forschungsvereinigung als Assistent fungiert. Für die momentane Struktur der MID-Industrie erscheint dies als optimale Netzwerkform, da sie weitestgehende Flexibilität zum Eingehen auf unterschiedlichste Anforderungen sicherstellt.

Typisch für ein virtuelles Unternehmen ist auch, daß es sich nach Beendigung der Aufgabe auflöst. Diese Tatsache kommt der Projektorientierung der MID-Technologie ebenso entgegen wie die Verknüpfung in verschiedenen Unternehmen vorhandener Kompetenzen.

Wichtig zum erfolgreichen Bestehen eines virtuellen Unternehmens ist dabei die optimale informationstechnische Vernetzung [78], deren Fehlen vor einigen Jahren die Zusammenarbeit noch enorm erschwerte. Heute ist jedoch auch kleinen Firmen ein problemloser Zugang zu ISDN-Netzen und Internet möglich.

3 Systematische Entwicklung einer MID-Baugruppe

Ebenso wichtig wie das Finden einer geeigneten Organisationsform ist für die erfolgreiche Durchführung eines MID-Projektes und damit die Einführung der MID-Technologie die Wahl des richtigen Projektablaufes. In der produzierenden Industrie hat sich seit Jahren für die Entscheidungsfindung bei der Einführung eines neuen Produktes oder einer neuen Technologie das Vorgehen nach VDI bewährt, nicht zuletzt deshalb, weil es eine Möglichkeit bietet, auch Lösungen als optimal auszuwählen, die nicht die geringsten Kosten mit sich bringen. Teilweise ist es auch sinnvoll, die Einführung der MID-Technologie selbst als Projekt durchzuführen. Hierbei empfiehlt sich eine fachabteilungsgestützte Projektorganisation.

Nachstehend soll auf den Ablauf eines Projektes bzw. der Produktentwicklung gemäß der VDI-Richtlinie 2222 [157] eingegangen werden. Die einzelnen Schritte werden dabei am Beispiel einer Datenträgerkarte beschrieben. Sie ist zum Einsatz in verschiedenen Consumer-Applikationen vorgesehen, etwa als elektronisches Telefonbuch oder zur Speicherung von Nutzerdaten. In einem ersten Schritt ist ein Nurlesespeicher vorgesehen, weitere Varianten mit beschreibbaren Speicherchips sollen folgen.

Die Kartenentwicklung fand in enger Zusammenarbeit zwischen dem Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung (FAPS) in Erlangen und der Fraunhofer-Einrichtung für Zuverlässigkeit und Mikrointegration (IZM), Berlin, statt. Durch die interdisziplinäre Zusammensetzung des Entwicklungsteams war eine wesentliche Voraussetzung der Aufbauorganisation für die Einführung der MID-Technologie gegeben (siehe Kapitel 2). Neben MID-Spezialisten waren Fachleute zur Chipverbindung und die Produktentwickler des Auftraggebers beteiligt, so daß Synergien genutzt werden konnten [62].

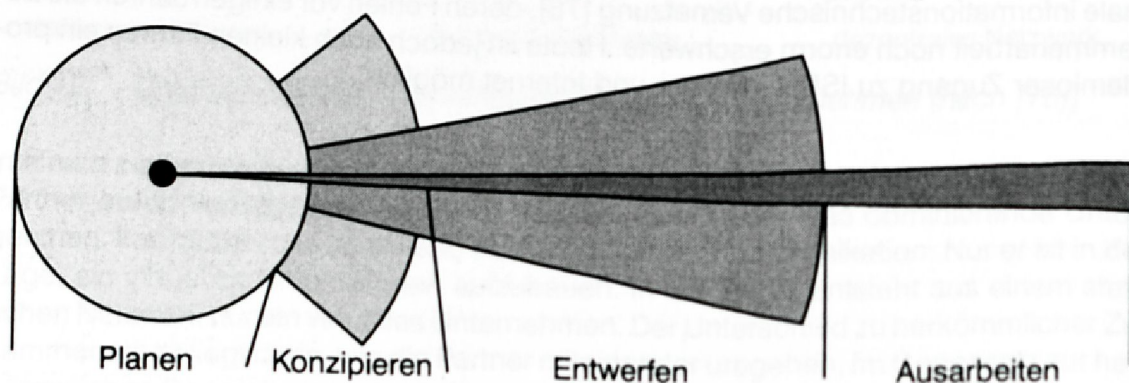


Bild 13: Phasen und Bandbreiten der Lösungsfindung bei einem technischen Projekt (Projektablauf gemäß VDI 2222 [157])

Der Ablauf gliedert sich in die Findung eines technischen Konzeptes und dessen technische wie wirtschaftliche Bewertung zur Auswahl der technologisch wie ökonomisch günstigsten Variante. Vom Ausgangspunkt aus werden zuerst in einem "Brainstorming" oder mit anderen geeigneten Verfahren, etwa der Delphi-Methode oder dem 6-3-5-Verfahren, mögliche Lösungsansätze gesucht. Dabei wird offen in alle Richtungen gedacht. In Abstimmung mit der Anforderungsanalyse werden dann erste Grobkonzepte erstellt, die immer noch einen breiten Bereich abdecken. Daraus wird eine stark eingeschränkte Anzahl von Varianten (weniger als 10) weiterverfolgt. Schließlich wird ein Entwurf als für die Aufgabe am besten geeignet ausgewählt und schließlich ausgearbeitet.

3.1 Technische Konzeptfindung

Ist die Planung des Produktes abgeschlossen - dieser Vorgang beinhaltet noch keine Entscheidung hinsichtlich der einzusetzenden Fertigungstechnologie und wird daher hier nicht behandelt - so muß das Konzept für die zu entwickelnde Baugruppe erarbeitet werden.

Die erste Stufe bei der Entwicklung eines neuen Produktes ist die Planung des technischen Konzeptes unter Berücksichtigung der verschiedenen Anforderungen aus Gebrauch und Produktion sowie der verfügbaren Lösungsmöglichkeiten mit geeigneten Hilfsmitteln.

Die Entscheidung hinsichtlich des Einsatzes einer bestimmten Technologie für ein Produkt wird systematisch getroffen. Dabei steht am Anfang die Analyse der Aufgabenstellung und der Anforderungen an das Produkt. Nach Abschluß der Analyse wird ein Anforderungskatalog, das Pflichtenheft, erstellt.

Aufbauend auf dessen Inhalten werden verschiedene Lösungsansätze erarbeitet. Diese können je nach angewandtem Fertigungsverfahren stark voneinander abweichen. Bei MIDs wird häufig dem zu entwickelnden MID eine bisher produzierte Variante in konventioneller Bauweise gegenübergestellt. Dies ist in Abbildung 14 gezeigt.

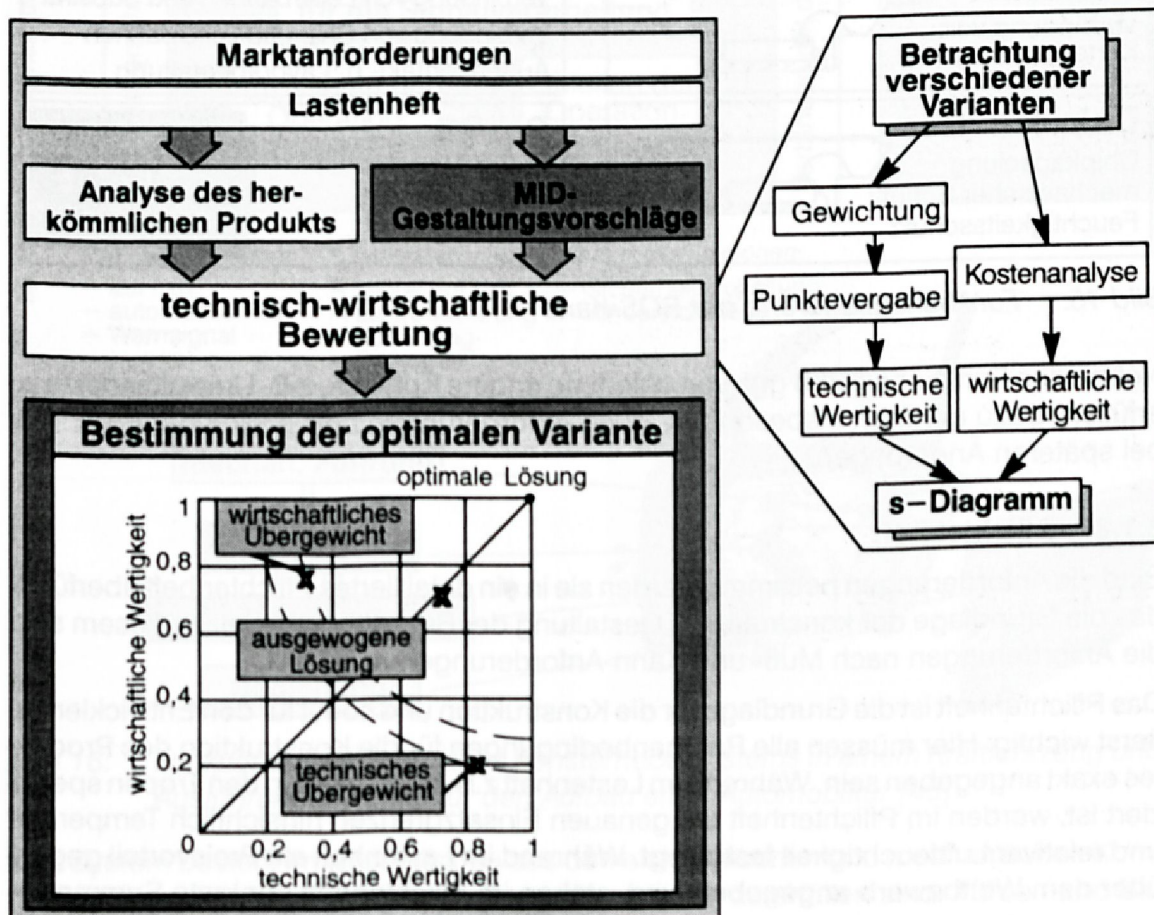


Bild 14: Vorgehensweise zur systematischen Entwicklung eines MID in der Konzeptionsphase

Die Vielzahl der Konzepte wird auf eine handhabbare Anzahl Entwürfe reduziert, die einer technisch-wirtschaftlichen Bewertung unterzogen werden.

In der technisch-wirtschaftlichen Bewertung wird eine optimale Variante bestimmt, deren Entwurf abschließend ausgearbeitet und in die Prototypenphase überführt wird.

3.1.1 Anforderungsanalyse

Am Beginn der Planung eines neuen Produkts steht die Bestimmung der zu erfüllenden Anforderungen. Diese müssen in enger Absprache zwischen dem Kunden und dem Hersteller ermittelt werden. Der zu erstellende Anforderungskatalog beschränkt sich auf strategische Angaben und Einsatzrandbedingungen. Im Lastenheft stehen daher Angaben zum Einsatzbereich, Abgrenzung gegenüber Wettbewerbsprodukten oder gewünschte Verbesserungen gegenüber der Vorgängergeneration. Auch können Anregungen für die weitere Entwicklung in Form eines Entwicklungsplanes ("Technologie-Roadmap") angeführt werden. Technologische Details dürfen hier noch nicht auftauchen, um eine Einschränkung der Auswahlmöglichkeiten zu verhindern.

Die von der Karte zu erfüllenden Funktionen sind in Abbildung 15 dargestellt.

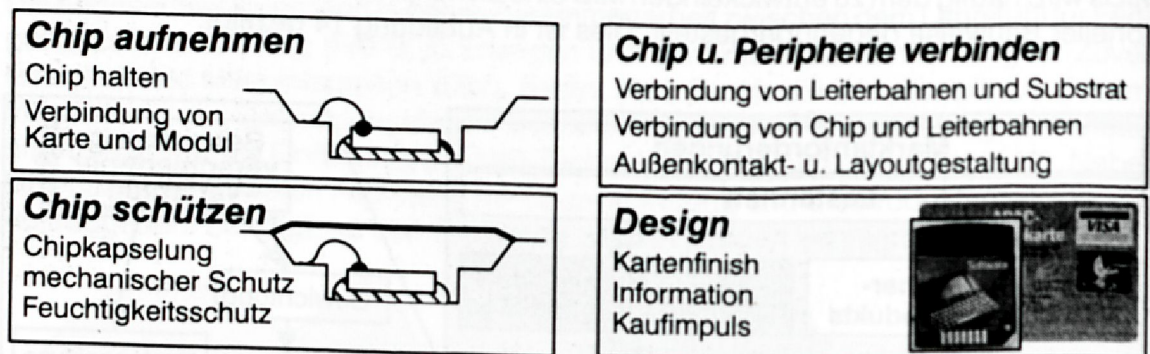


Bild 15: Funktionsgliederung der ROS-Karte

Neben den Funktionen sind ggf. verschiedene andere Kriterien, z.B. Umweltaspekte zu erfüllen. Dazu gehören insbesondere auch Anforderungen hinsichtlich der Flexibilität bei späteren Änderungen.

3.1.2 Pflichtenheft

Sind die Anforderungen bestimmt, werden sie in ein detailliertes Pflichtenheft überführt, das die Grundlage der konstruktiven Gestaltung der Baugruppe bildet. In diesem sind die Anforderungen nach Muß- und Kann-Anforderungen aufgeteilt.

Das Pflichtenheft ist die Grundlage für die Konstruktion und somit für den Entwickler äußerst wichtig. Hier müssen alle Rahmenbedingungen für die Konstruktion des Produktes exakt angegeben sein. Während im Lastenheft z.B. der Einsatz in den Tropen spezifiziert ist, werden im Pflichtenheft die genauen Einsatzgrenzen hinsichtlich Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit festgelegt. Während im Lastenheft ein Preisvorteil gegenüber dem Wettbewerb angegeben wird, stehen im Pflichtenheft konkrete Summen.

Im Pflichtenheft werden in der Regel auch die zu bestehenden Tests für die Zulassung bzw. Serieneinführung einer Baugruppe spezifiziert. Hier ist jedoch hinsichtlich der MID-Technologie Vorsicht angebracht, da häufig für bestehende Technologien taugliche

Tests ohne Änderung in ein Pflichtenheft übernommen werden. Wird eine Umweltbedingung durch einen spezifischen Test in für die Technologie ungünstiger Weise abgebildet, kann die MID-Technik eventuell nicht eingesetzt werden, obwohl sie der eigentlichen Umweltbelastung standhalten würde. Auch werden bisweilen spezifische Materialtypen vorgeschrieben, häufig weil sie bereits auf Lager sind. Die Logistikkosten für die Lagerung einer zusätzlichen Sorte Rohmaterial stehen jedoch in keinem Verhältnis zu den Einsparungen, die durch den Wegfall eines Einzelteils über die MID-Technologie entstehen können. Das Pflichtenheft muß immer alle Anforderungen an die Baugruppe oder das Bauteil exakt beschreiben, darf jedoch nicht durch bestimmte Spezifikationen einzelne Technologien ausschließen.

3.1.3 Grobkonzepte

Anhand einer Funktionsgliederung müssen in der nächsten Stufe mehrere Grobkonzepte entwickelt werden. Der Aufbau der Funktionsgliederung soll nachstehend am Beispiel eines Antriebs für den Fensterheber in einem Automobil dargestellt werden.

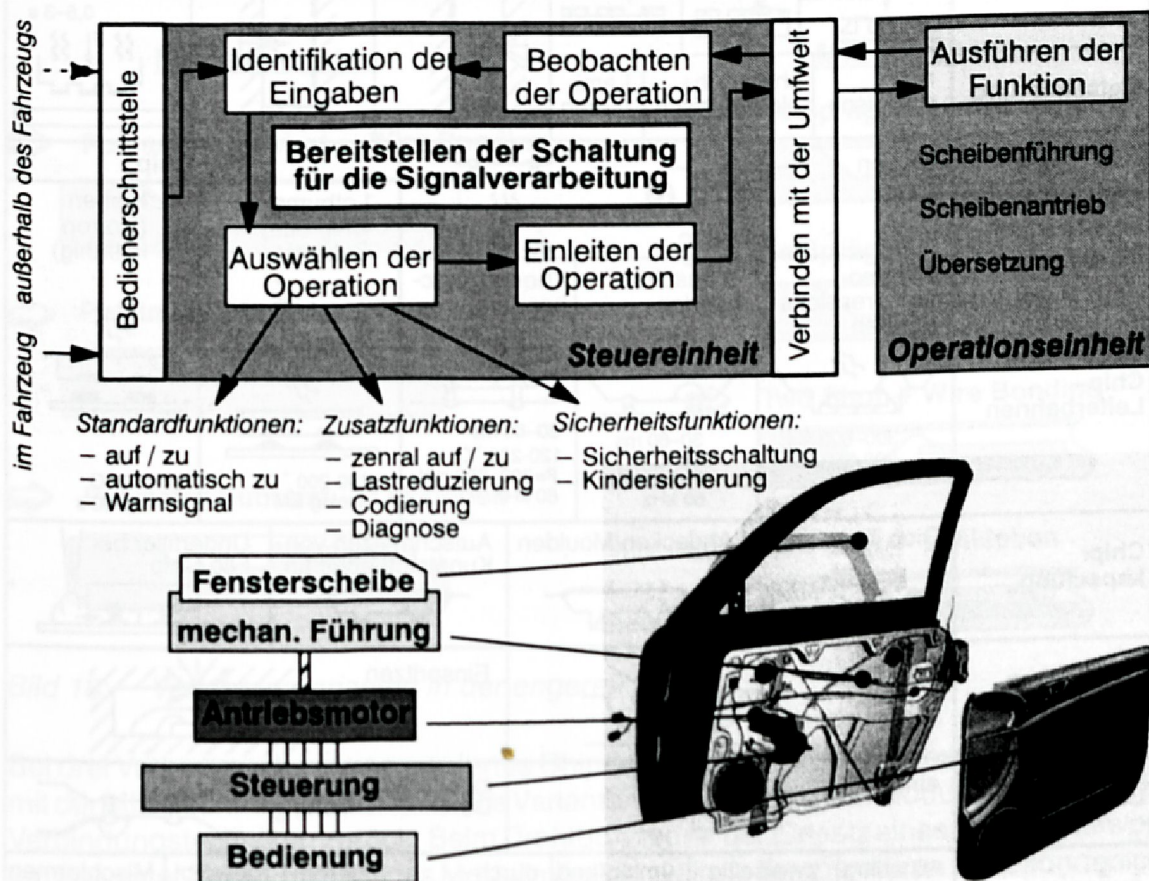


Bild 16: Funktionsgliederung eines Fensterhebersystems in einem Kraftfahrzeug und Ausführungsbeispiel für den Aufbau einer Automobiltür [43]

Das System besteht im wesentlichen aus den elektronischen und mechanischen Komponenten, wobei folgende grundlegende Funktionen zu erfüllen sind: Führen und Bewegen des Fensters, Bereitstellen der Benutzerschnittstelle (inner- und außerhalb des Fahrzeuges), Erkennen und Umwandeln der Befehle in Operationen sowie Beobachten und Überwachen der Operationen.

Diese Funktionen müssen in Einzelfunktionen aufgeteilt werden. Ihre Zusammenhänge sind in Abbildung 16 ausführlich dargestellt. Für jede Funktion des Moduls sind verschiedene Lösungsvarianten denkbar. Diese müssen in nachfolgenden Entwicklungsstufen erarbeitet, ausgestaltet und bewertet werden.

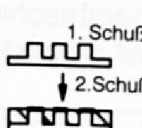

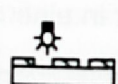

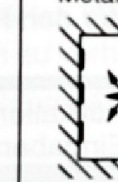
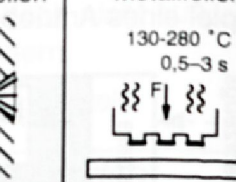
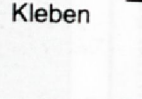
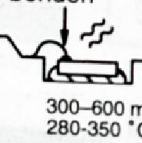
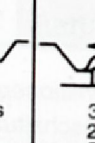
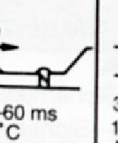
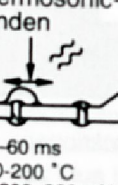
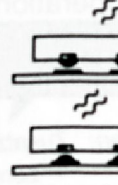
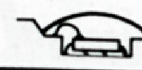

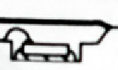

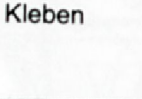

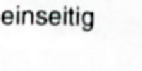








Substrat	Polyimid (PI)	Polyester	Phenol-Papier (FR2)	Epoxid-Glasgewebe (FR4)	Polycarbonat (PC)	ABS-Blends	Polystyrol (PS)	Polypropylen (PP)	Polybutylen-terephthalat (PBT)	Polyethylen-terephthalat (PET)	Polysulfon (PSU)	Polyamid (PA)	Polyetherimid (PEI)	Polyether-sulfon (PES)	Liquid Cristal Polymer (LCP)	Polyphthalamid (PPA)	Polyphenylensulfid (PPS)	
Strukturierung	Two Shot 		Direct Laser Marking 		Masking 		Einspritzen Kunststoff-Leiterfolien 		Einspritzen von Metallfolien 		Heißprägen von Metallfolien 130-280 °C 0,5-3 s 							
Metallisierung	rein chemisch		chemisch+elektrolytisch		Laminieren													
Chip halten	Kleben  80-150 °C																	
Verbindung Chip-Leiterbahnen	Thermokompressionsbonds  300-600 ms 280-350 °C		Ultraschallbonds  30-60 ms 25 °C F=300 mN 60 kHz		Thermosonicbonds  30-60 ms 120-200 °C F=300-900 mN 60 kHz				Flip Chip Lotbump auf Chip oder Substrat  180-200 °C analog SMT		Kleben (isotrop leitfähig)  80-180 °C 45 min-30 s							
Chip-kapselung	Glob Top 		Abdecken/Moulden 		Aufschmelzen von Kunststofftabletten 		Underfiller bei Flip Chip 											
Verbindung Modul-Karte	Kleben 				Einspritzen 													
Layout	einseitig 				zweiseitig mit Durchkontaktierung 													
Außenkontaktierung	einseitig 	zweiseitig 	umlaufend 	durchkontaktiert 	federnd 	gewölbt 	Mischformen 											
Kartenfinish	Bedrucken		Laminieren (Etikett)		Prägen		Einspritzen											

Bild 17: Morphologischer Kasten zu Funktionen einer Datenträgerkarte

Ein praktisches Hilfsmittel für die Synthetisierung von Lösungsvarianten ist der Morphologische Kasten. In ihm sind für jede von einem Produkt oder einer Dienstleistung zu

erfüllende Funktion alle möglichen Ausführungsvarianten dargestellt. Aus dem Morphologischen Kasten lassen sich alle möglichen Ausführungsvarianten generieren. Dabei können hier bereits unmögliche Varianten ausgesondert werden. Unter den in der Regel mehreren hundert theoretisch möglichen Alternativen lassen sich relativ schnell etwa fünf bis zehn technisch sinnvoll erscheinende Varianten auswählen, welche die Grundlage der nachfolgenden detaillierten technisch-wirtschaftlichen Betrachtung bilden. Die herkömmliche, bisher eingesetzte Technologie wird im Morphologischen Kasten nicht aufgeführt, obwohl sie aus Vergleichsgründen immer mitbetrachtet wird. Bild 17 zeigt einen Morphologischen Kasten für die bereits betrachtete Datenträgerkarte.

Nach kombinatorischer Auswertung der Verfahrensschritte ergeben sich in dem betrachteten Beispiel für den Kartenaufbau etwa 172 000 mögliche Varianten. Nicht alle Kombinationen sind technisch machbar, woraus sich eine deutliche Reduktion ergibt, so daß etwa 150 Versionen verbleiben. Hieraus werden diejenigen ausgewählt, die am sinnvollsten erscheinen. Im Fall der Datenträgerkarte sind dies sieben Varianten, deren Aufbau in Abbildung 18 gezeigt ist.

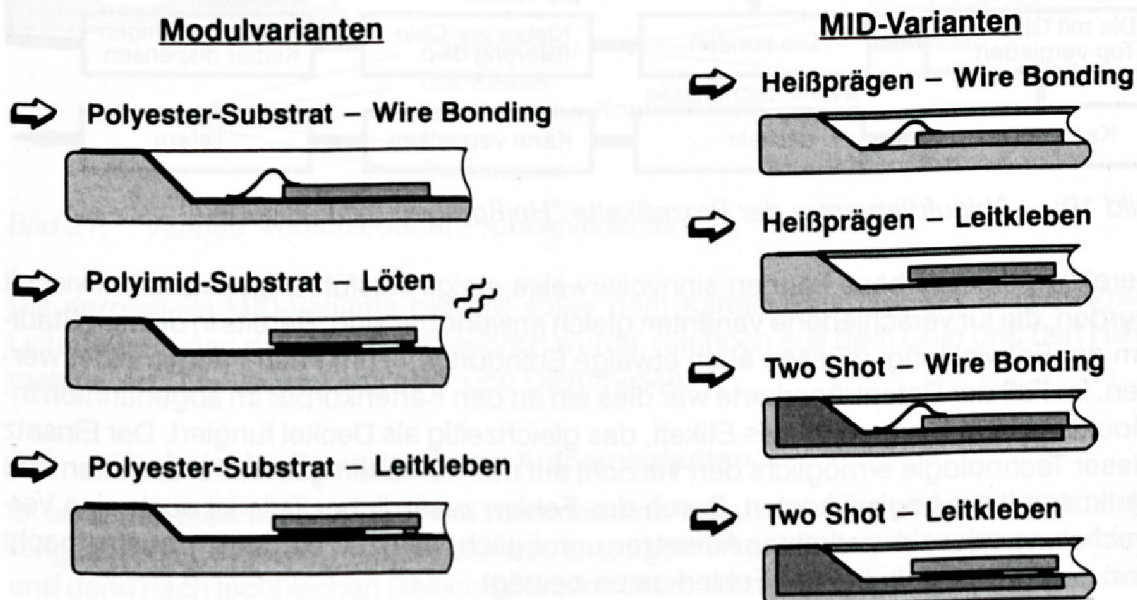


Bild 18: Verfahrensvarianten in der engeren Wahl

Bei drei Varianten wird ein gesondertes Chip-Modul eingesetzt, während vier Varianten mit der MID-Technologie arbeiten. Die Varianten mit eingesetztem Modul greifen auf drei Verbindungstechniken zurück: Beim Drahtbonden ist der Einsatz eines relativ preiswerten Polyester-Substrates für das Modul möglich, weil die Temperaturen nicht sonderlich hoch liegen. Da das Drahtbonden ein sequentieller Prozeß ist, wird angestrebt, dieses Verfahren durch eine Flip-Chip-Technologie zu ersetzen. Bislang am ausgereiftesten ist das Löten von Flip-Chips. Dazu ist jedoch ein (teures) temperaturbeständiges Polyimid-Substrat erforderlich. Die Vorteile der Flip-Chip-Montage mit einem preiswerten Basismaterial zu kombinieren, ermöglicht das Leitkleben von Flip-Chips. Dieses Verfahren weist jedoch gewisse technologische Risiken auf, die bewertet werden müssen.

Die MID-Varianten ergeben sich nach einer ersten Auswahl aus der Kombination von zwei Strukturierungsvarianten - Heißprägen und Zweikomponentenspritzguß - mit zwei

Verbindungstechniken - Drahtbonden und Leitleben von Flip-Chips. Das Lötten von Flip-Chips wurde aufgrund der erforderlichen teuren und spröden Substratmaterialien nicht berücksichtigt. Außerdem bietet der weichere Leitleber einen besseren Ausgleich der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Siliziumchip und Kunststoffsubstrat.

Zum besseren Verständnis ist nachfolgend eine Prozeßkette mit den jeweils zugeführten Rohstoffen dargestellt, die zu einer der Varianten gehört:

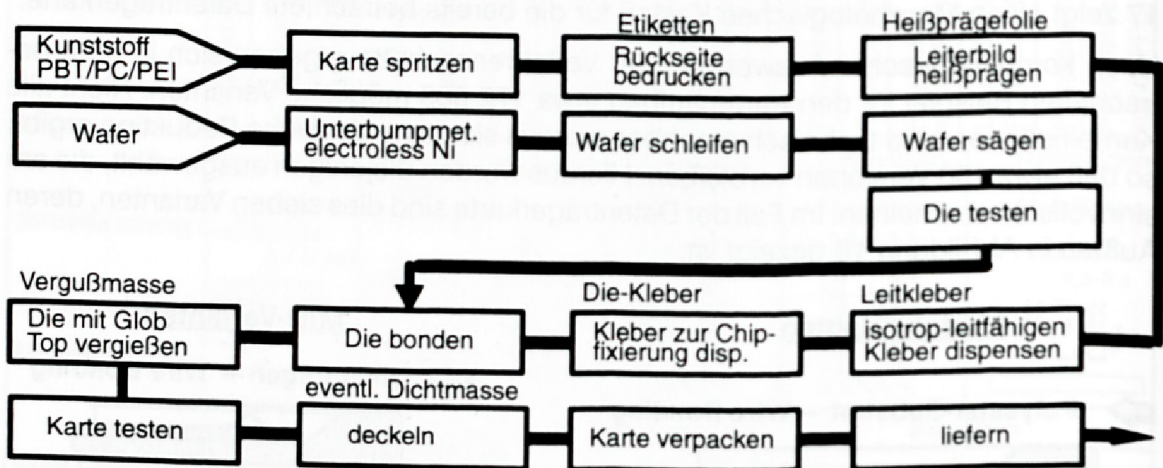


Bild 19: Ablaufdiagramm der Prozeßkette "Heißprägen mit Leitleben"

Bereits in dieser Phase können sinnvollerweise einige Ausführungsdetails entwickelt werden, die für verschiedene Varianten gleich anwendbar sind. Bereits in diesem Stadium der Entwicklung müssen auch etwaige Erfindungen zum Patent angemeldet werden. Im Fall der Datenträgerkarte war dies ein an den Kartenkörper im sogenannten In-Mould-Verfahren angespritztes Etikett, das gleichzeitig als Deckel fungiert. Der Einsatz dieser Technologie ermöglicht den Verzicht auf das Vorhalten getrennter Etiketten und senkt somit die Logistikkosten. Durch das Fehlen zusätzlicher Teile ist auch eine Verwechslung oder ein verdrehtes Aufsetzen unmöglich, was die Fertigung robuster macht und damit zur Senkung von Fehlerkosten beiträgt.

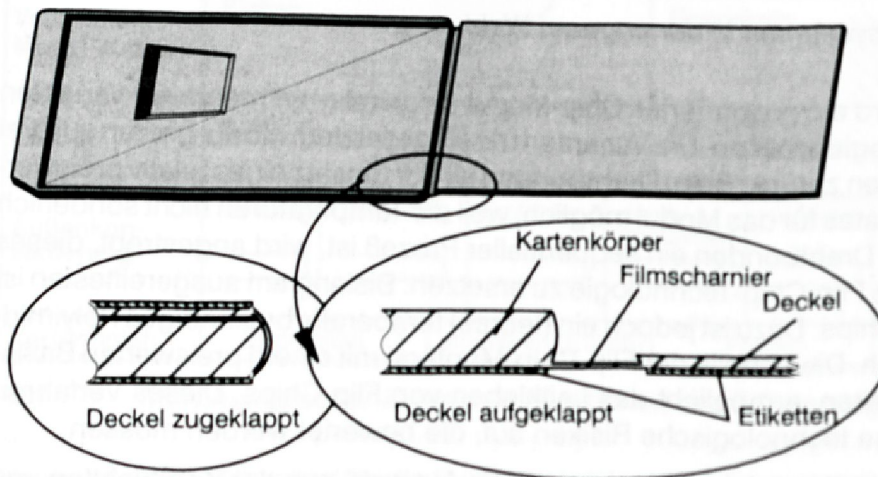
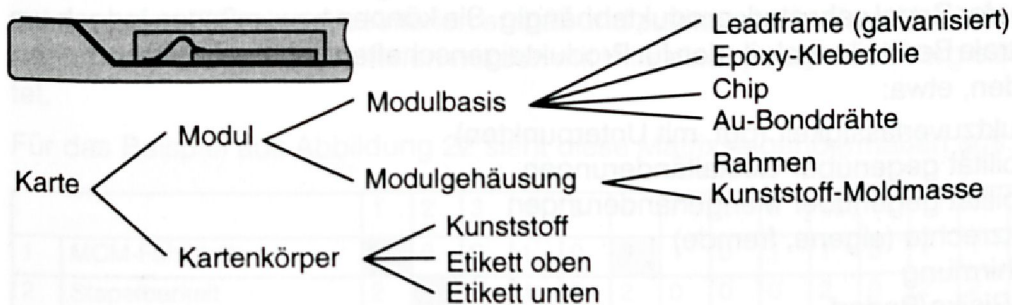


Bild 20: Integration des Etiketts als Deckel für die Datenträgerkarte

Die neu entwickelten Varianten werden mit Hilfe von Produktstrukturbäumen dargestellt und mit dem herkömmlichen Aufbau verglichen. In Abbildung 21 ist eine deutliche Vereinfachung des MIDs gegenüber der konventionellen Lösung zu erkennen.

konventionell: Leadframe und Drahtbonden



MID: Heißprägen und Leitkleben

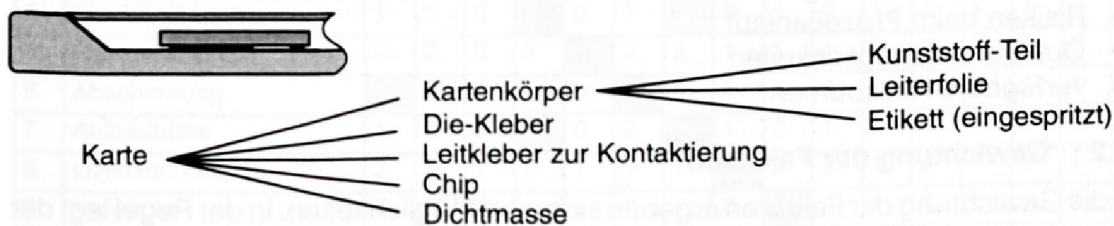


Bild 21: Aufbau verschiedener Produktvarianten

Die dargestellte MID-Variante besteht außer dem Kartenkörper mit der aufgeprägten Leiterfolie, in den das Etikett eingespritzt wurde, nur noch aus dem Chip und den Hilfsmaterialien Die-Kleber, Leitkleber und Dichtmasse.

3.2 Technische Bewertung von Aufbauvarianten

Ist unter den theoretisch möglichen Varianten eine Vorauswahl der sinnvollsten Ausführungsformen gefunden, müssen diese zu aussagekräftigen Entwürfen weiterentwickelt und dann nach technischen Gesichtspunkten bewertet werden, um die Version zu definieren, die die Anforderungen am besten erfüllt.

Eine konstruktive Lösung ist umso wertvoller, je besser es gelungen ist, die in der Aufgabe geforderten Mindestforderungen und Wünsche zu erfüllen. Daneben gibt es auch Forderungen an Produkt und Herstellungsprozeß, wie Produktzuverlässigkeit oder Prozeßbeherrschung, die ebenfalls bei einer technischen Bewertung berücksichtigt werden müssen. Die Ideallösung liegt vor, wenn alle diese Punkte, zusammenfassend als Bewertungskriterien bezeichnet, denkbar gut verwirklicht sind [157].

Auf der Basis der Anforderungsliste wird in gemeinsamer Arbeit aller Partner eine Anzahl von Bewertungskriterien erarbeitet. Es werden zwei Gruppen von Kriterien unterschieden, nämlich solche, die das Produkt betreffen und solche, die die Eigenschaften des Herstellungsprozesses bewerten.

Natürlich sind nicht alle Kriterien bei der Auswahl einer Variante gleich wichtig. Um dies auszudrücken, wird jedem Punkt ein bestimmtes Gewicht zugeordnet. Ein Wert von vier ist dabei die höchste Gewichtung.

3.2.1 Aufstellen der Einflußfaktoren

Als nächster Schritt erfolgte die Bewertung der einzelnen Varianten unter technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten. Um die technische Zielerfüllung möglichst objektiv beurteilen zu können, ist es zuerst erforderlich, die technischen Bewertungskriterien festzulegen. Diese können zum großen Teil dem Lastenheft entnommen werden und sind in der Regel sehr stark produktabhängig. Sie können bzw. müssen jedoch um einige neutrale Beurteilungskriterien für Produkteigenschaften und Prozeßsicherheit ergänzt werden, etwa:

- Produktzuverlässigkeit (ggf. mit Unterpunkten)
- Flexibilität gegenüber Gestaltänderungen
- Flexibilität gegenüber Mengenänderungen
- Schutzrechte (eigene, fremde)
- Abschirmung
- F+E-Risiko/Bedarf
- Prozeßbeherrschung
- Risiken beim Prozeßanlauf
- Outsourcingmöglichkeiten
- verfügbare Ressourcen

3.2.2 Gewichtung der Faktoren

Für die Gewichtung der Faktoren ergeben sich zwei Möglichkeiten. In der Regel legt der Anwender die Gewichtung nach Erfahrungswerten fest, wobei zur Vereinfachung nur Punktezahlen von 1 bis 4 vergeben werden sollten.

produktbezogen			prozeßbezogen	
MCM-Fähigkeit		1	F+E-Risiken/-bedarf	1
Stapelbarkeit		2	Prozeßbeherrschung	4
Produktzuverlässigkeit		4	zu erwartende Risiken bei Prozeßanlauf	2
Chipverbindung (mech./elektr.)	16/16			
Lebensdauer Steckkontakte	16/16		internes Know-How verfügbar	1
Haftung Leiterbahnen	16/16			
Widerstand gegen Umwelteinflüsse	16/16		Outsourcing möglich	3
Flexibilität bzgl. Kartengröße		2		
Flexibilität bzgl. Chipgröße		4	verfügbare Ressourcen	1
EMV-Abschirmbarkeit		2		
Aufbauhöhe des Verpackungskonzeptes		2		
Lizenzen, Patente		4		
eigene Patente	12/11			
bestehende Standards	16/11			
Fremdpatente (Gefahr)	16/11			
special features		4		

Bild 22: Übersicht der Bewertungskriterien

Die Kriterien sind aufgeteilt, je nachdem, ob sie sich auf das Produkt oder den Herstellungsprozeß beziehen. Wichtig waren für die Datenträgerkarte neben der Zuverlässigkeit insbesondere die Flexibilität hinsichtlich des Einsatzes anderer Chips und das Ein-

bringen besonderer Vorteile: "special Features". Auf der Prozeßseite wird besonderer Wert auf eine sichere Beherrschung der eingesetzten Verfahren und eine möglichst weitgehende Vergabemöglichkeit nach außen gelegt.

Um eine Überbewertung einzelner Punkte zu verhindern, können Blöcke gebildet werden, die dann nochmals aufgeteilt werden. Alternativ kann ein einfaches Schema eingesetzt werden [52], das alle Kriterien enthält und zueinander in einer Matrix in Beziehung setzt. Die relevanten Zielkriterien werden mit Hilfe eines *paarweisen Vergleichs* gewichtet.

Für das Beispiel aus Abbildung 22 sieht diese Matrix folgendermaßen aus:

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Σ
1	MCM-Fähigkeit		0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0	6
2	Stapelbarkeit	2		0	1	0	2	0	0	0	2	0	2	2	0	2	13
3	Zuverlässigkeit	2	2		2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	27
4	Flexibilität Karte	1	1	0		0	1	1	0	1	2	1	1	1	1	1	13
5	Flexibilität Chip	2	2	0	2		2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	22
6	Abschirmung	2	0	0	1	0		0	1	1	2	0	1	2	1	1	12
7	Aufbauhöhe	1	2	0	1	0	2		1	0	1	0	1	1	1	2	13
8	Lizenzen/Patente	2	2	1	2	1	1	1		2	2	1	2	1	2	2	22
9	sonstiges	1	2	0	1	1	1	2	0		2	1	1	2	2	0	16
10	F+E-Risiken	1	0	0	0	1	0	1	0	0		0	1	0	1	1	6
11	Prozeßbeherrschung	2	2	0	1	1	2	2	1	1	2		2	2	1	2	21
12	Prozeßanlaufisiko	1	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0		1	1	2	10
13	Internes Know-How	1	0	0	1	0	0	1	1	0	2	0	1		0	1	8
14	Outsourcing möglich	2	2	0	1	0	1	1	0	0	1	1	1	2		2	14
15	verfügbare Ressourcen	2	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0		6

Bild 23: Matrix zur Gewichtung der Einflußkriterien

Für die Bewertung jedes einzelnen Kriterienpaares gibt es drei Möglichkeiten [79]. Verdeutlichend sind in Bild 23 jeweils zwei zusammengehörige Felder hervorgehoben:

2:0 = Kriterium 1 ist viel wichtiger als Kriterium 2

1:1 = Kriterium 1 ist ungefähr gleich wichtig wie Kriterium 2

0:2 = Kriterium 1 ist weniger wichtig als Kriterium 2

Wie man gut erkennen kann, ergibt sich durch den paarweisen Vergleich ein feiner balanciertes System von Gewichtungsfaktoren als bei der groben Einstufung. Die Übereinstimmung in der Wichtigkeitsabschätzung ist jedoch sehr gut.

3.2.3 Bewertung der Einflußfaktoren

Wie die Gewichtung der Kriterien, wird auch deren Erfüllung durch die Varianten bewertet. Die Bewertungsskala reicht hier von 0 bis 4 Punkte in ganzen Schritten. Ist eine Eigenschaft ideal verwirklicht, werden vier Punkte vergeben. Ist die Realisierung unbefriedigend, gibt es null Punkte. Eine feinere Einteilung ist nicht unbedingt sinnvoll, da in dem frühen Entwicklungsstadium mit entsprechend geringem Detaillierungsgrad eine genaue Beurteilung einzelner Varianten noch nicht möglich ist.

Die Bewertung sollte in einer Gruppe von Personen stattfinden, um eine möglichst objektive Beurteilung zu ermöglichen [157, 158]. Für eine einheitliche Basis der Bewertung aller Varianten haben sich sogenannte Nutzwertfunktionen sowie Punktetabellen als hilfreich erwiesen. Bei den Nutzwertfunktionen ist die für das Kriterium relevante Größe an der Abszisse aufgetragen, während die Punktwertung an der Ordinate steht. Ist keine solche Funktion angebbar, tritt eine Bewertungstabelle an ihre Stelle, die Anhaltspunkte für die Bewertung gibt.

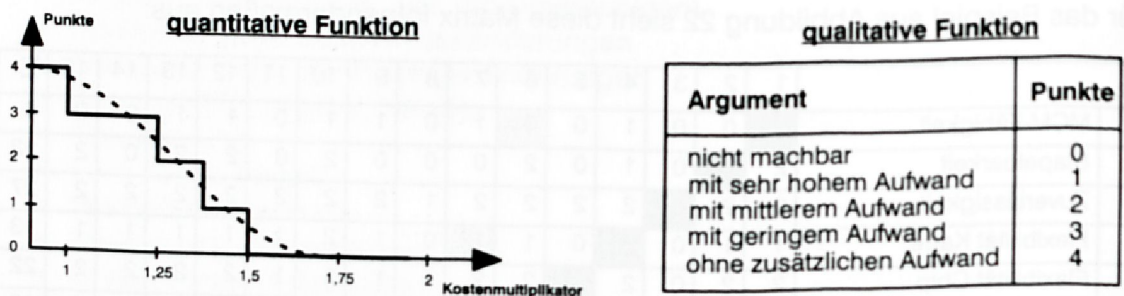
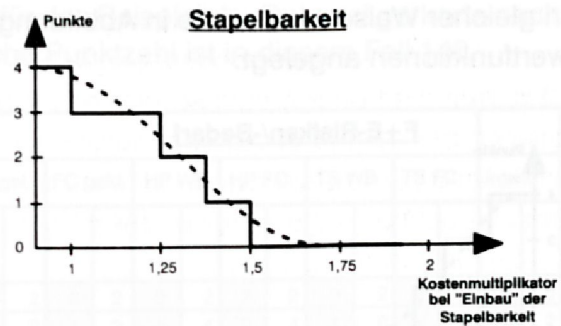
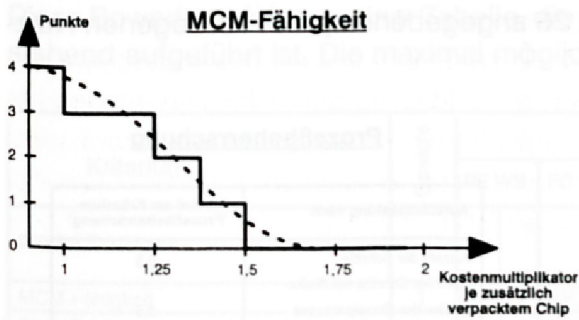


Bild 24: Beispiele für Nutzwertfunktionen

Natürlich sind beim Aufstellen der Nutzwertfunktionen individuelle Besonderheiten des jeweiligen Produkts und der Fertigungsumgebung zu berücksichtigen.

Beispielsweise sind bei der Datenträgerkarte für die Berücksichtigung von Eigenschaften wie MCM-Fähigkeit und Stapelbarkeit Kostenerhöhungen von über 50% untragbar (0 Punkte) während keine Zusatzkosten eine ideale Lösung darstellen würden (4 Punkte). Die durchgezogenen Treppenlinien dienen zum Ablesen der Punkte. Die gestrichelten Verläufe stellen nur den Trend dar. Bei den Tabellen muß individuell eingeschätzt werden, welche Charakterisierung am besten zutrifft. Da diese Angaben nicht präziser formuliert werden können, ist die Punktevergabe sehr sorgfältig durchzuführen und die Werte für die verschiedenen Varianten sind auch hier ständig paarweise miteinander zu vergleichen.



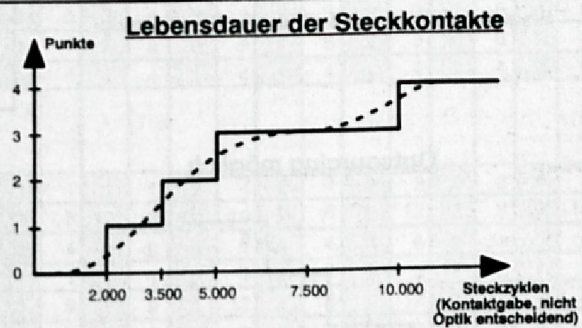
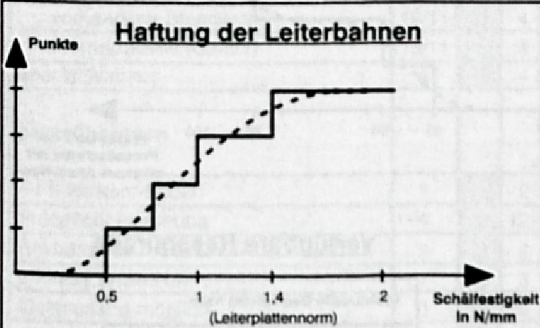
Flexibilität bzgl. Karten- und Chipgröße

Größenänderungen	Punkte
nicht machbar	0
mit sehr hohem Aufwand	1
mit mittlerem Aufwand	2
mit geringem Aufwand	3
ohne zusätzlichen Aufwand	4

EMV-Abschirmbarkeit

Abschirmung	Punkte
nach oben	0 – 2
nach unten	0 – 2
Summe	0 – 4

Gruppe 'Produktzuverlässigkeit'



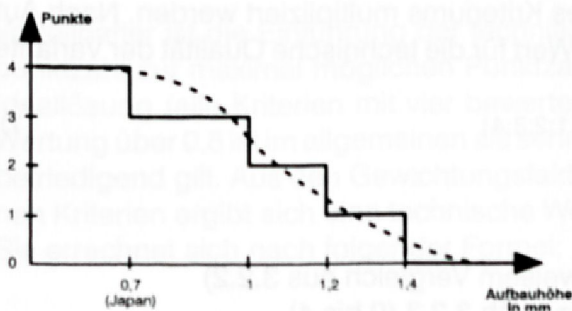
Chipverbindung (mechan. + elektr.)

Zuverlässigkeit der Chipverbindung	Punkte
erwiesen unzuverlässig	0
eher unwahrscheinlich	1
möglich	2
zugesagt zuverlässig	3
erwiesen zuverlässig	4

Widerstand gegen Umwelteinflüsse

Art der Belastung	Punkte
mechanisch	0 – 2
thermisch	0 – 1
Feuchte	0 – 1
Summe	0 – 4

Aufbauhöhe des Verpackungskonzeptes



Gruppe 'Lizenzen, Patente'

Kriterium	Bewertung der
eigene Patente	Ideenanzahl
vorhandene Standards	Kompatibilität
Fremdpatente	Gefahr

special features:

Bewertung erfolgt nach individueller Einschätzung

Bild 25: Produktbezogene Nutzwertfunktionen

In gleicher Weise werden die in Abbildung 26 angegebenen prozeßbezogenen Nutzwertfunktionen angelegt.

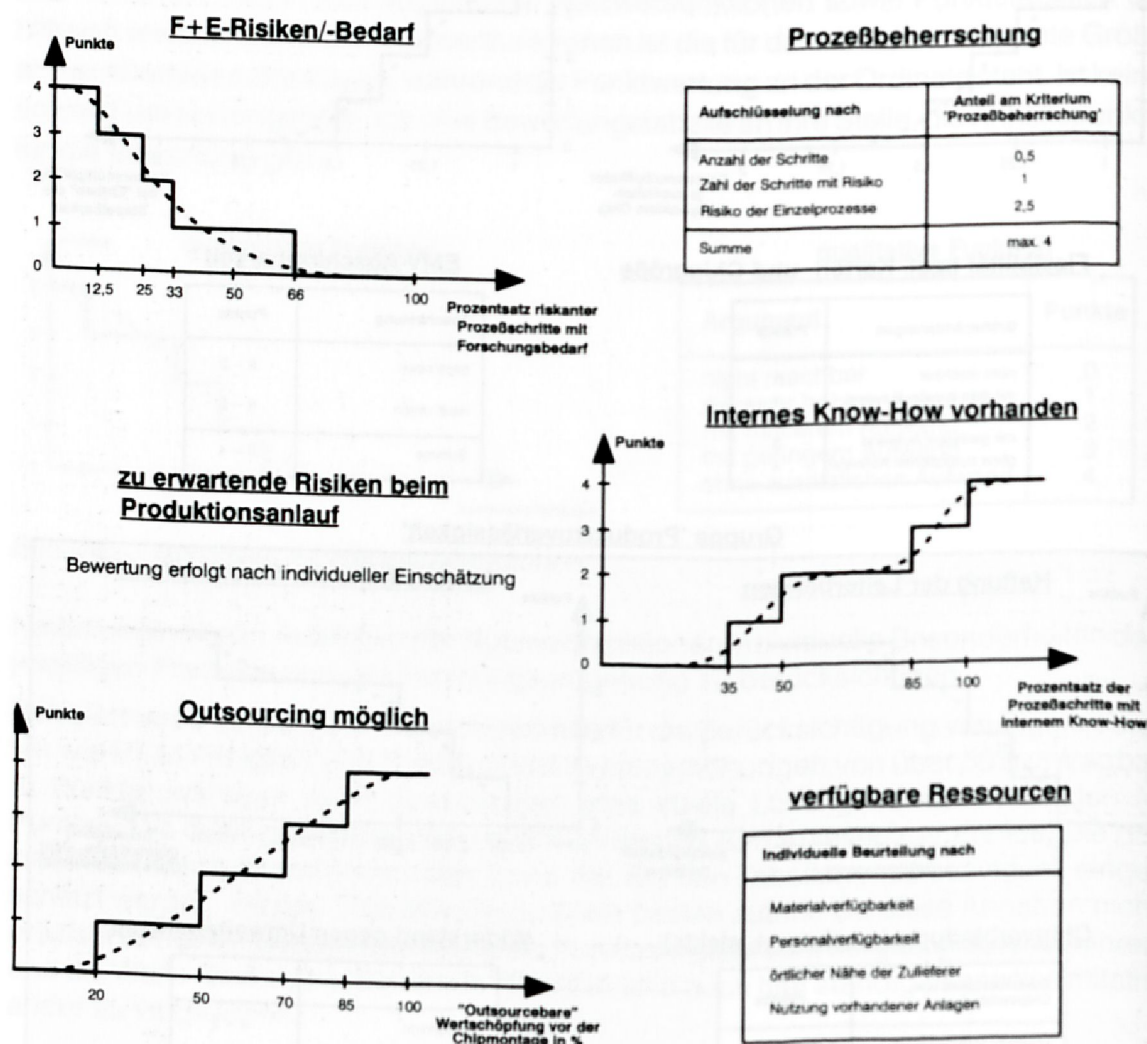


Bild 26: Prozeßbezogene Nutzwertfunktionen

3.2.4 Technische Bewertung der Konzepte

Sind alle Konzeptvarianten anhand der Nutzwertfunktionen bewertet, müssen die erreichten Punkte noch mit dem Gewicht des Kriteriums multipliziert werden. Nach Aufsummierung aller Produkte ergibt sich ein Wert für die technische Qualität der Variante.

$$P_t = \sum_{i=1}^n g_i \times W_i \quad W \in \{1;2;3;4\} \quad (1)$$

wobei

- P_t : technische Punktzahl
- g_i : Kriteriengewicht (nach paarweisem Vergleich aus 3.2.2)
- W_i : Bewertung der Einzelkriterien nach 3.2.3 (0 bis 4)
- i : Kriterienindex
- n : Anzahl der Kriterien

Diese Bewertung führt zu einer Tabelle, die für das Beispiel der Datenträgerkarte nachstehend aufgeführt ist. Die maximal mögliche Punktzahl ist in diesem Fall 148.

Kriterium	Gewicht																	konv.
		PE WB		FC gel.		FC gekl.		HP WB		HP FC		TS WB		TS FC				
produktbezogen																		
MCM-Fähigkeit	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	
Stapelbarkeit	2	1	2	1	2	1	2	2	4	2	4	4	8	4	8	1	2	
Produktzuverlässigkeit:																		
Chipverbindung (mech. + el.)	16/16	2	2	3	3	3	3	2	2	3	3	2	2	3	3	4	4	
Lebensdauer der Steckkontakte	16/16	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	4	4	
Haftung der Leiterbahnen	16/16	3	3	4	4	3	3	2	2	2	2	3	3	3	3	4	4	
Widerstand gg. Umwelteinflüsse	16/16	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	4	4	3	3	3	3	
Flexibilität Kartengröße	2	4	8	4	8	4	8	4	8	4	8	2	4	2	4	2	4	
Flexibilität Chipgröße	4	3	12	2	8	2	8	2	8	1	4	2	8	1	4	2	8	
EMV-Abschirmbarkeit	2	1	2	1	2	1	2	3	6	3	6	4	8	4	8	1	2	
Aufbauhöhe	2	1	2	2	4	2	4	2	4	3	6	1	2	2	4	2	4	
Lizenzen, Patente:																		
eigene Patente	12/11	3	3	2	2	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	2	2	
vorhandene Standards	16/11	3	4	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	4	6	
Fremdpatente (Gefahr)	16/11	3	4	1	1	2	3	3	4	4	6	2	3	4	6	2	3	
special features	4	1	4	1	4	1	4	1	4	1	4	1	4	1	4	0	0	
prozeßbezogen																		
F+E-Risiken/-Bedarf	1	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	4	4	
Prozeßbeherrschung	4	3	12	2	8	2	8	3	12	2	8	3	12	2	8	4	16	
Anlauftrisiken	2	3	6	2	4	3	6	3	6	2	4	3	6	2	4	3	6	
Internes Know-How	1	3	3	1	1	1	1	3	3	2	2	3	3	2	2	4	4	
Outsourcing möglich	3	3	9	3	9	3	9	4	12	4	12	4	12	4	12	1	3	
verfügbare Ressourcen	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	4	
Summe:			89		75		78		96		89		95		89		83	
technische Wertigkeit:			0,77		0,64		0,67		0,82		0,77		0,82		0,77		0,71	

Bewertung der Kriterien (0-4 Punkte):

0: Kriterium nicht vorhanden

1: unwichtig

2: weniger berücksichtigt

3: stark berücksichtigt

4: sehr wichtig

Erfüllung durch die Varianten: 0-4 Punkte
entsprechend den Nutzwertfunktionen

Die ideale Herstellvariante erreicht maximal
148 Punkte (technische Wertigkeit = 1)

Bild 27: Bewertungsschema zur Ermittlung der technischen Wertigkeit

Vorteilhafter ist die Einführung der technischen Wertigkeit, die die erreichte Gesamtpunktzahl zur maximal möglichen Punktzahl der Ideallösung in Beziehung setzt. Die Ideallösung (alle Kriterien mit vier bewertet) hat die technische Wertigkeit eins. Eine Wertung über 0,8 ist im allgemeinen als sehr gut anzusehen, während unter 0,6 als nicht befriedigend gilt. Aus den Gewichtungsfaktoren und den Erfüllungsgraden der einzelnen Kriterien ergibt sich eine technische Wertigkeit für jedes einzelne Aufbaukonzept. Sie errechnet sich nach folgender Formel:

$$W_t = \frac{\text{erreichte Punktzahl}}{\text{ideale Punktzahl}} = \frac{\sum_{i=1}^n (g_i \times w_i)}{4 \sum g_i} \quad (2)$$

3.3 Wirtschaftliche Bewertung nach VDI

Die technische Wertigkeit eines Konzepts ist nur ein Aspekt bei der Bewertung der verschiedenen Varianten. Wirtschaftliche Vergleiche spielen ebenso eine wichtige Rolle. Analog zum obigen Vorgehen, müssen als zweite Entscheidungsbasis also noch wirtschaftliche Wertungen berechnet werden, die angeben, ob die technisch wertvollen Varianten auch wirtschaftlich wertvoll umgesetzt werden können.

Bei der wirtschaftlichen Bewertung spielen nur die Herstellkosten jeder Variante eine Rolle. Anhand der jeweiligen Prozeßkette und der detaillierten Skizze kann der Aufwand der Herstellung gut abgeschätzt werden. Wichtig ist hierbei wieder die integrierte Betrachtung der gesamten Prozeßkette. In den nachfolgenden Tabellen sind die Kosten für zwei der betrachteten Chipkarten-Varianten nach Herstellschritten abhängig vom Produktionsjahr aufgeschlüsselt (Abbildungen 28 und 29). Basis ist die Planung einer vollständig neuen Produktionsanlage ohne Restriktionen. Hier ist gut der Einfluß der degressiven Abschreibung und der steigenden Produktionszahlen zu erkennen, die die Stückkosten senken. Anschließend (Abbildung 30) werden die Kosten von 4 MID-Konzepten der konventionellen Ausführung gegenübergestellt und daraus die wirtschaftliche Wertigkeit ermittelt. Als Kosten der Varianten wurden die Herstellungskosten im fünften Produktionsjahr bei einer Stückzahl von 20 Mio. Stück pro Jahr angenommen.

Heißprägen + Leitkleber	Jahr 1	Jahr 2	Jahr 3	Jahr 4	Jahr 5
Kartenkörper spritzen	0,32	0,32	0,22	0,21	0,20
Leiterbild heißprägen	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
Kleber dispensen	0,08	0,06	0,03	0,03	0,03
Dies bonden	0,04	0,03	0,02	0,01	0,01
Underfiller	0,16	0,11	0,07	0,04	0,04
Deckeln	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04
Summe	0,68	0,60	0,41	0,38	0,35

Bild 28: Ermittlung der Herstellkosten der ROS-Karte aus den Kosten der einzelnen Verfahrensschritte (Heißprägen - Leitkleben)

2K + Leitkleber	Jahr 1	Jahr 2	Jahr 3	Jahr 4	Jahr 5
1. Schuß spritzen	0,07	0,04	0,03	0,03	0,03
2. Schuß spritzen	0,13	0,13	0,11	0,10	0,10
Metallisieren	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
Bedrucken	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
Kleber dispensen	0,08	0,06	0,03	0,03	0,03
Dies bonden	0,04	0,03	0,02	0,01	0,01
Underfiller	0,16	0,11	0,07	0,04	0,03
Deckeln	0,05	0,05	0,04	0,04	0,03
Summe	0,85	0,74	0,62	0,57	0,55

Bild 29: Ermittlung der Herstellkosten der ROS-Karte aus den Kosten der einzelnen Verfahrensschritte (2-Komponenten-Spritzguß - Leitkleben)

Ähnlich der technischen Bewertung läßt sich auch hier eine wirtschaftliche Wertigkeit in Bezug auf ein Optimum angeben. Für diese wirtschaftliche Ideallösung müssen Zielko-

sten definiert werden, die das Produkt im Idealfall erreichen sollte. Der Quotient aus diesen Idealkosten und den tatsächlichen Stückkosten ist die wirtschaftliche Wertigkeit der jeweiligen Variante.

$$W_w = \frac{\text{Idealkosten}}{\text{Kosten der Variante}} \quad (3)$$

Für das Beispiel der Datenträgerkarte ergeben sich folgende Werte im Vergleich:

Stückkosten	herkömmlich	Two-Shot + Drahtbonden	Two-Shot + Leitkleben	Heißprägen+ Drahtbonden	Heißprägen+ Leitkleben
		1	2	3	4
Material	0,26	0,40	0,38	0,12	0,11
Personal	0,05	0,04	0,04	0,05	0,05
Kapital	0,07	0,08	0,06	0,12	0,09
sonst.	0,22	0,11	0,07	0,12	0,10
Gesamt	0,60	0,63	0,55	0,41	0,35
wirtschaftl. Wertigkeit	0,50	0,48	0,53	0,73	0,86
technische Wertigkeit	0,71	0,82	0,77	0,82	0,77

Bild 30: Ermittlung der wirtschaftlichen Wertigkeit verschiedener Konzeptvarianten für die ROS-Karte

3.4 Auswahl des weiterführenden Konzeptes

Anschaulich darstellen lassen sich technisch-wirtschaftliche Zusammenhänge in einem Stärkediagramm nach Kesselring. Die technische Wertigkeit wird auf der Abszisse, die wirtschaftliche Wertigkeit auf der Ordinate aufgetragen. Die technisch-wirtschaftliche Ideallösung hat die Koordinaten (1;1). Die Linie gleicher Wertigkeiten in der Diagonale des Diagramms heißt Entwicklungslinie. Alle Lösungsvarianten werden mit ihren Koordinaten in das Diagramm eingetragen. Es ist wünschenswert, möglichst nahe an die optimale Lösung zu gelangen, wobei man sich nicht zu weit von der Entwicklungslinie entfernen sollte, um die Ausgewogenheit des Produkts nicht zu gefährden. Punkte oberhalb der Entwicklungslinie haben Stärken auf wirtschaftlicher Seite, während unterhalb der Linie die technische Qualität betont ist. Oft wird bei Entscheidungen für ein Produkt eine höhere wirtschaftliche Stärke gewünscht.

Wichtig ist auch die Entscheidung, welche Variante als günstiger zu betrachten ist, wenn mehrere Versionen unterschiedlich weit von der Entwicklungslinie entfernt sind. Hier kann als Kriterium für die Stärke entweder das arithmetische oder das geometrische Mittel der technischen und wirtschaftlichen Wertigkeiten herangezogen werden. Beim geometrischen Mittel ergeben sich Hyperbeln um den Punkt (1;1), beim arithmetischen Mittel Geraden senkrecht zur Ausgewogenheitslinie. Hyperbeln betonen die Ausgewogenheit noch stärker als die Geraden.

Zur Ermittlung der dem Optimum nächsten Variante werden die technische Wertigkeit entlang der Abszisse eines s-Diagramms und die wirtschaftliche Wertigkeit entlang des-

sen Ordinate eingetragen. In dem dargestellten Beispiel kommt die Variante 4 dem Gesamtoptimum am nächsten, gefolgt von Variante 3.

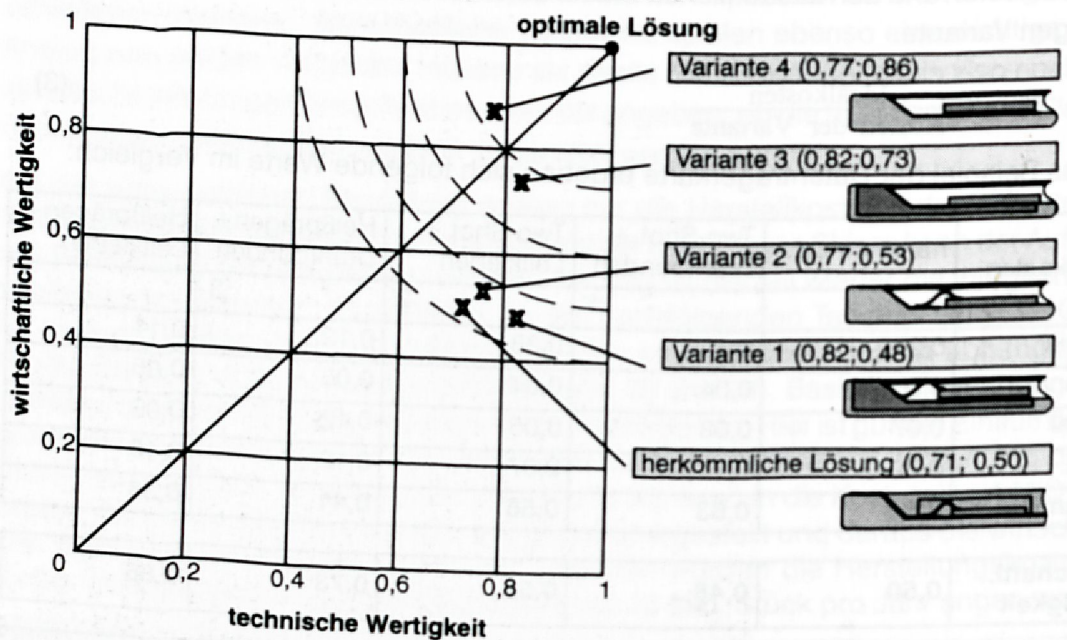


Bild 31: s-Diagramm zur Auswahl der besten Variante

Die Variante 1 ist gemeinsam mit Variante 3 technisch die hochwertigste. Aufgrund der besten Ausgewogenheit entscheidet jedoch Variante 4 die Bewertung für sich. Zusammenfassend bietet die Siegevriante 4 gegenüber herkömmlichen Aufbautechniken folgende Vorteile:

Nachdem das technisch-wirtschaftlich wertvollste Konzept aus allen Varianten ermittelt wurde, ist es sinnvoll, die Siegevriante in Bezug auf die am Anfang der Studie zu Grunde gelegten Forderungen nochmals kritisch zu überprüfen. Dadurch können die besonderen Merkmale der erarbeiteten Lösung übersichtlich dargestellt werden.

3.5 Ausarbeitung der weiterführenden Variante und Prototypenbau

Die als günstigste Lösung ermittelte Variante kann nun ausgearbeitet und die entsprechenden Unterlagen für die Anfertigung eines Prototypen erstellt werden. Zur raschen und kostengünstigen Erstellung (eingeschränkt) funktionsfähiger Muster ist Rapid Tooling, z.B. über im Lasersinter-Verfahren hergestellte Werkzeuge, eine bewährte Methode. Mit Abformungen aus solchen Werkzeugen kann das bei MIDs auftretende Problem umgangen werden, daß die meisten der üblichen Werkstoffe, die im Prototypenbau eingesetzt werden, etwa bei der Stereolithographie, nicht oder nur schlecht metallisierbar sind und sich somit nicht zur Fertigung von funktionierenden Demonstrationsteilen eignen.

Auch bei dem Chipkarten-Projekt wurde eine Reihe von Prototypen erstellt und verschiedenen Tests unterzogen, um die Ergebnisse des Projektes zu verifizieren. Auf Grundlage der Variante 4 und Vorgaben von Seiten des Kunden wurde gemeinsam mit dem Werkzeughersteller ein Design für die Karte mit entsprechenden Werkzeug- und

Spritztoleranzen ausgearbeitet. Anschließend wurden etwa 200 Prototypen gespritzt und geprägt. In den Versuchen zeigte sich die prinzipielle Tauglichkeit des Konzepts für den Einsatz. Natürlich sind zum Serieneinsatz verschiedene Verbesserungen erforderlich, insbesondere hinsichtlich der Biegesteifigkeit des Kartenkörpers.

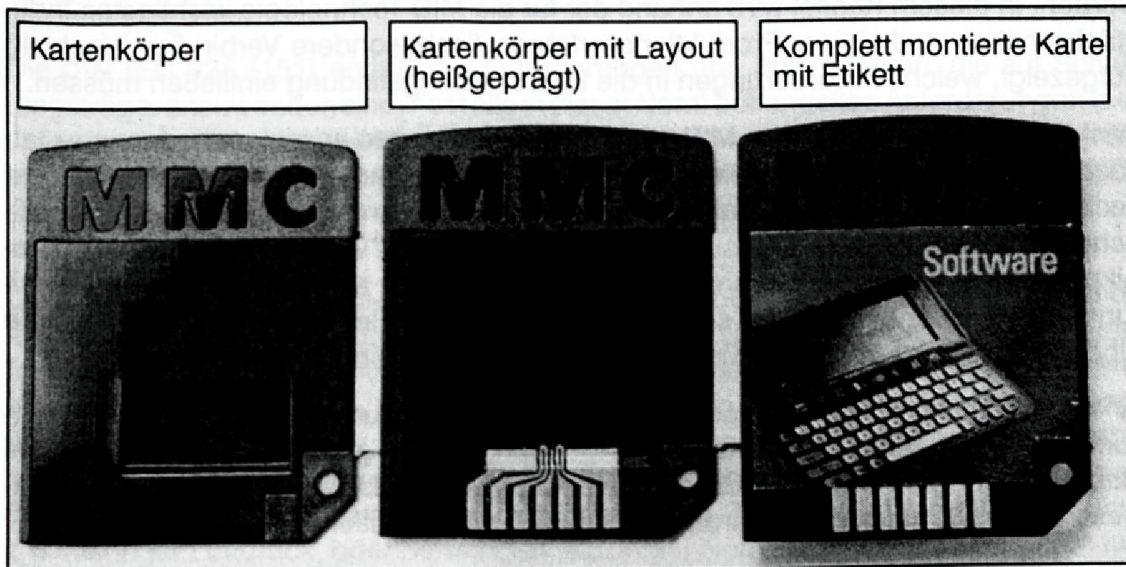


Bild 32: Aufbau der Prototypen

In dem Projekt "Datenträgerkarte" wurden die entwickelten Methoden durchgehend angewandt und haben sich als effizient bei der Beurteilung einer neuen Produktionstechnologie erwiesen. Durch die Bereitstellung einer an die optimale Aufbauorganisation angenäherten Teamstruktur im Netzwerk und durch die Anwendung der ablauforganisatorischen Hilfsmittel konnte die Aufgabenstellung zur Zufriedenheit aller beteiligten Partner gelöst und eine Basis für die Anwendung der MID-Technologie in der Datenträgerindustrie geschaffen werden.

4 Aufstellen eines Anforderungsprofils

Hauptpunkt der Entscheidungsfindung zum Einsatz der MID-Technologie ist die Analyse und Formulierung der an ein Produkt gestellten Anforderungen und die anschließende Auswahl von Materialien und Fertigungsverfahren, die diesen Anforderungen gerecht werden. In diesem Kapitel wird anhand der für die MID-Technologie wichtigsten Industriebranchen und einiger Produktionsverfahren (insbesondere Verbindungstechnik) aufgezeigt, welche Anforderungen in die Entscheidungsfindung einfließen müssen.

Wichtig ist in allen Fällen, das MID nur auf die Belastungen auszulegen, denen es tatsächlich ausgesetzt ist. Ein Messen an einzelnen Leistungswerten konventioneller Technologien kann einen Verfahrenswechsel verursachen und damit zu einer drastischen Verteuerung der MID-Lösung führen. Allerdings sind verschiedene in der Elektronikproduktion wichtige Normen nicht für die Anwendung auf spritzgegossene Schaltungsträger ausgelegt. Hier sollen einige Denkanstöße für eine entsprechende Überarbeitung des Technical Manual 600 der IPC gegeben werden.

An einen räumlichen Schaltungsträger wird eine Vielzahl unterschiedlichster Anforderungen gestellt. Neben den Einsatzbedingungen, die den größten Einfluß auf die Wahl des Herstellungsverfahrens und des verwendeten Materials haben, spielen auch nachgeschaltete Produktionsverfahren und natürlich wirtschaftliche Faktoren eine Rolle.

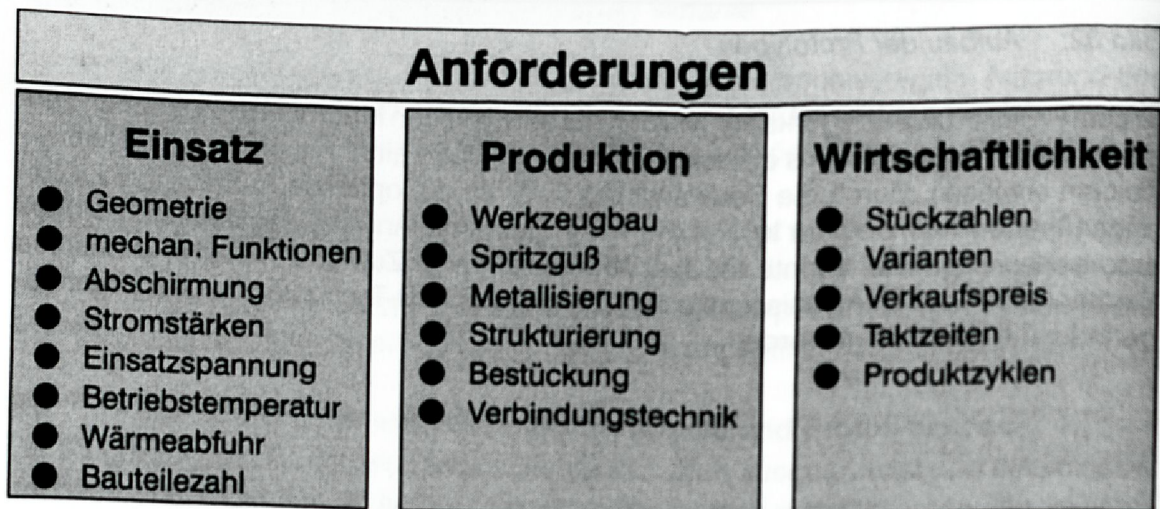


Bild 33: Anforderungen an MID-Baugruppen

4.1 Anforderungen aus dem Einsatz

Die Hauptlast der Anforderungen an einen räumlichen Schaltungsträger kommt aus dem Gebrauch des Produktes. Einige Anforderungsgruppen sind für jeden Einsatzbereich gleich. Sie sind in zahlreichen Normen definiert, wobei auf das Fertigungsverfahren keine oder nur geringe Rücksicht genommen wird. MIDs müssen die Betriebsanforderungen, die in der Regel an der kompletten, als "Black Box" behandelten Baugruppe geprüft werden, genauso überstehen, wie Baugruppen, die in einer beliebigen anderen Technologie hergestellt wurden. Es wird nicht eine Technologie geprüft, sondern das Ergebnis des Herstellprozesses.

Im DIN-Normenwerk, das auch DIN IEC (International Electrotechnical Commission) Normen enthält, sind eine Vielzahl von Normen enthalten, die auf alle elektrotechnischen, elektronischen und elektromechanischen Bauteile anwendbar sind und damit auch für spritzgegossene Schaltungsträger gelten. Sie sind bei der Entwicklung einer Baugruppe auf jeden Fall zu beachten. Im folgenden sind einige der übergreifenden Normen aufgelistet.

Die **DIN IEC 326** [151] enthält die Anforderungen und Prüfverfahren, die auf Schaltungsträger anzuwenden sind. Fast alle in dieser Norm behandelten Anforderungen lassen sich sinnvoll auf MID übertragen. Es sind Prüfverfahren für die folgenden Anforderungsbereiche enthalten: elektrische, thermische, chemische, mechanische, geometrische und physikalische Anforderungen sowie Anforderungen an das Brandverhalten von Schaltungsträgern.

Die **DIN IEC 60068** (teilweise umgewandelt in DIN EN 60068) [149] ist eines der grundlegenden Werke für Prüfungen hinsichtlich Umweltbedingungen. Prüfverfahren für die folgenden *mechanischen* Anforderungen sind enthalten: Schocken, Dauerschocken, Kippfallen und Umstürzen, frei Fallen, Prellen, Stoßen, Schwingen, Beschleunigung und mechanische Widerstandsfähigkeit der Anschlüsse. In DIN IEC 68 sind Prüfverfahren für die folgenden *thermischen* Anforderungen enthalten: Kälte, trockene Wärme, feuchte Wärme, Temperaturwechsel und kombinierte Prüfungen wie Temperatur und z.B. niedriger Luftdruck, oder Schwingen, etc. In der Norm sind auch Prüfverfahren für die folgenden *physikalischen* Anforderungen, die auch bei MID zutreffen, enthalten: Salznebel und Dichtheit. Im *chemischen* Bereich erstreckt sich die DIN IEC 68 auf Prüfverfahren für Schädigung durch Schwefeldioxid, Schwefelwasserstoff und Mehrkomponentenklima.

Die **DIN IEC 60112** [150] definiert ein Prüfverfahren zur Bestimmung der Vergleichszahl und Prüfzahl der Kriechwegbildung auf festen isolierenden Werkstoffen unter feuchten Bedingungen. Dieses Verfahren dient zur Ermittlung des relativen Widerstandes fester Elektroisierstoffe gegen Kriechwegbildung, wenn die Oberfläche unter elektrischer Spannung der Beanspruchung von Wasser mit Zusatz von Verunreinigungen ausgesetzt wird. Die nach dieser Norm ermittelten CTI- (Comparative Tracking Index) und PTI- (Proof Tracking Index) Werte dienen auch zur Beschreibung der Widerstandsfähigkeit von isolierenden Werkstoffen gegen elektrische Erosion.

In der **DIN EN 50081** [147] sind grundlegende Richtwerte der EMV-Störaussendung für Anwendungsfelder dokumentiert, für die noch keine eigene EMV-Norm erstellt wurde, die **DIN EN 50082** [148] definiert entsprechend die Richtwerte der EMV-Störfestigkeit für diese Anwendungen festgelegt.

In der **DIN IEC 60529** [153] ist ein Bezeichnungssystem erarbeitet worden, das die Schutzarten durch Gehäuse systematisiert. Zusätzlich sind Prüfungen dokumentiert, die die Schutzarten entsprechend nachweisen können.

Normen zu allgemeinen mechanischen Kennwerten (Oberflächenrauigkeiten, Toleranzen etc.) sollen hier nicht behandelt werden.

Die Prüfung für die Entflammbarkeit von Kunststoffen für Bauteile in Einrichtungen und Geräten ist vor allem in der amerikanischen Spezifikation **UL 94** geregelt [161]. Sie behandelt die Einteilung und Prüfung des Brandverhaltens von Kunststoffbauteilen. Das generelle Werkstoffverhalten wird mit Hilfe von Probekörpern ermittelt. Auch die IEC 695

enthält Richtlinien zur Bewertung der Brandgefährdung von elektrotechnischen Erzeugnissen. Im Teil 2 dieser Norm sind die Prüfungen mit dem Glühdraht und der Nadelflamme definiert, die eine sehr breite Anwendung gefunden haben.

Die Entsorgung elektronischer Geräte richtet sich - zumindest in Deutschland - nach dem Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz [143] sowie der Informationstechnikgeräteverordnung [142].

Neben diesen allgemeingültigen Normen kommen allerdings je nach Einsatzgebiet für bestimmte Bereiche stark unterschiedliche Anforderungsgruppen zum Tragen. Grob lassen sich vier Anforderungsgruppen unterscheiden, die im wesentlichen mit den wichtigsten Märkten korrelieren:

- Automobil
- Multimedia (Telekommunikation, Audio/Video, Datentechnik)
- Hausgeräte
- Industrieelektronik

Die Anforderungen der verschiedenen Märkte unterscheiden sich insbesondere hinsichtlich der Einsatztemperaturen, denen die Baugruppe ausgesetzt ist.

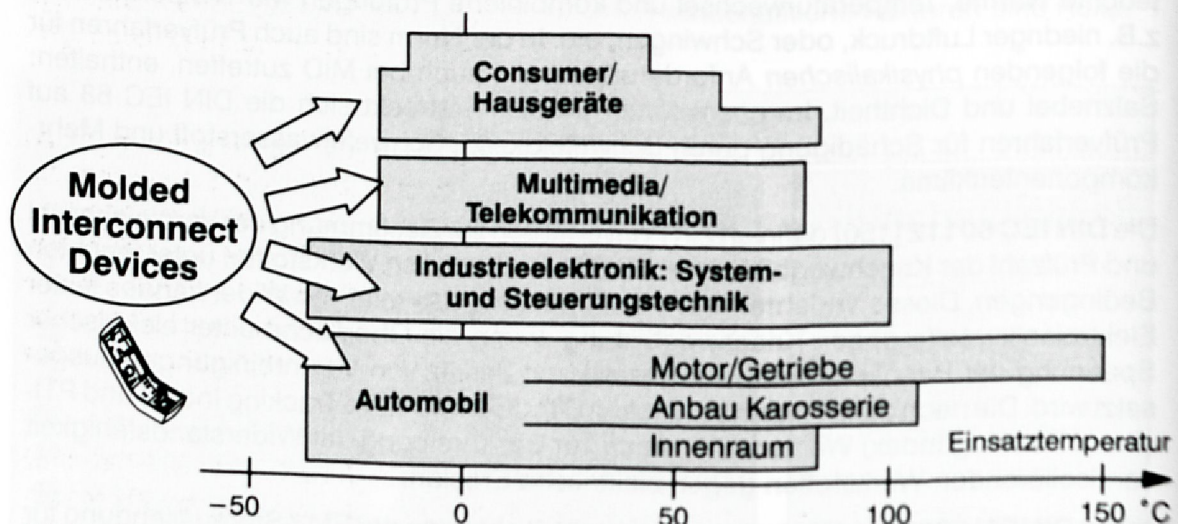


Bild 34: Einsatztemperaturgrenzen für die wichtigsten Märkte der MID-Technologie (nach [45])

Stellvertretend für alle Märkte sollen nachfolgend einige Anforderungen und Prüfverfahren aus der Automobilindustrie erläutert werden, da sie die schärfsten Anforderungen enthalten. Die Regelwerke sind unterteilt in mehrere Anforderungsklassen [162]:

- Innenraum (extra: Tür, Dach)
- Karosserieanbau
- Motorraum (unterteilt: entfernt vom Motor/am Motor, Spritzwasser/trocken)

Gerade hier ist es wichtig, den jeweiligen Einsatzbereich genau im Auge zu behalten, um nicht unnötig hochwertige und damit teure Lösungen einzusetzen. Einige Anforderungen sind in der Tabelle von Bild 35 dargestellt.

Dem Einsatzort entsprechend gelten unterschiedliche Temperaturbereiche. Als nahezu einheitlicher unterer Grenzwert werden -40°C angenommen. Höchstwerte von 150°C werden im Motor- und Getriebebereich gefordert. Die Anforderungen an Bauteile im Innenraum bzw. in / an der Karosserie betragen von 80°C bis 120°C . Für Karosserieaußenteile ist eine Nachlackiertemperatur im Bereich von 110°C zu berücksichtigen. Innerhalb der oberen und unteren Grenze des Temperaturbereichs werden auch Temperaturzyklen und Temperaturschock getestet. Das Verhalten von MID bei Temperaturzyklen mit der Überlagerung einer Vibrationsbelastung wird ebenfalls getestet. Die Testverfahren sind hier jedoch kundenspezifisch.

Als Nennspannung werden 12 Volt angesetzt. Die Prüfspannung wird in nahezu allen Fällen mit $14 \pm 0,2$ Volt angegeben. Während der Prüfung von Bauteilen, die während des Startvorgangs nicht funktionieren müssen, wird ein Spannungsbereich von 9 Volt bis 16 Volt gefordert, wobei der Verlauf der Betriebsspannung beliebig ist. Überprüft werden weiterhin die Ruhestromaufnahme, das Verhalten bei kurzzeitiger Über- bzw. Unterspannung sowie der Isolationswiderstand, um nur einige Parameter zu nennen. Wichtig für die MID-Gestaltung ist hierbei die Berücksichtigung der auftretenden Spitzenspannungen, sowie des geforderten Isolationswiderstandes. Diese Eckdaten beeinflussen direkt die notwendigen Leiterbahnquerschnitte und Geometrien. Ansonsten müssen bei der Gestaltung des MID die gleichen Gestaltungsrichtlinien beachtet werden, wie sie auch bei der Entwicklung eines PCB-Layouts zu berücksichtigen sind. (EMV, Verpolsicherheit, Kurzschlußfestigkeit, usw.).

Neben den eingangs erwähnten Temperaturbereichen sind weitere Anforderungen zu erfüllen. So ist für Bauteile, die an von außen zugänglichen Stellen verbaut werden, die Nachlackiertemperatur auch dann zu berücksichtigen, wenn sie selbst nicht nachlackiert werden. Ein weiterer Punkt ist die Chemikalienbeständigkeit. Zu berücksichtigen ist zudem der Einbauort des Bauteils. Ist dieser spritzwassergeschützt, so werden niedrigere Anforderungen an die Mediendichtheit des Bauteils gestellt. Neben Labortests, wie Thermoschock, Temperaturwechsel, Feuchte-Wärme, Schadgas etc. wird in der Regel auch eine Lebensdauerprüfung durchgeführt.

Je nach Einsatzort ergeben sich weitere Anforderungen an das MID. Bei Sichtteilen ist die Optik und Haptik ebenso zu beachten, wie z.B. Narbung und Glanzgrad. Zu beachten ist hierbei, daß die Montage des MID, insbesondere der Lötvorgang, Auswirkungen auf die Oberfläche des Bauteils hat. Dies muß durch eine geeignete Verfahrens- und Werkstoffauswahl berücksichtigt werden. Der tatsächliche Anforderungskatalog für MID-Anwendungen ist durch das jeweilige Lastenheft spezifiziert. Hieraus können sich Abweichungen gegenüber den unten genannten Anforderungen ergeben.

Der Berücksichtigung von Umweltaspekten dient im Automobilbau unter anderem die sogenannte "rote Liste". Sie bezeichnet Stoffe, die nicht oder nur gewissen Konzentrationen in Bauteilen der Automobilindustrie vorkommen dürfen.

Die nachfolgende Tabelle [66] stellt exemplarisch Teile der Anforderungen eines Automobilherstellers an elektronische Schaltungsträger dar. Sie kann jedoch nur als Orientierungshilfe gedacht. Für konkrete Anwendungen sind die Lastenhefte des jeweiligen Anwenders zu verwenden.

Eigenschaft		Norm	Wert
Elektrisch	Dauerstrom ¹⁾	DIN IEC 326-2-6.3	$\Delta T \sim I, A_{Cu}$
	Spitzenstrom ¹⁾	DIN IEC 326-2-6.3.2	$\Delta T \sim I, A_{Cu} 3.5 \times I_N$ für $t < 0,5$ sec
	Spannungs- festigkeit	VDE 0535	500 V Sinus, 50 Hz, $t=2$ sec
		DIN 72551-5-3.6.3 ⁶⁾	Kältefestigkeit bei -40°C , 3kV
		DIN 72551-5-3.5.3 ⁶⁾	4h NaCl Lösung $U_{eff} < 5\text{kV}$
		DIN 72551-5-3.6.2 ⁶⁾	Thermische Überlastbarkeit, 24h, 120°C
		Schnelladen: $16\text{V} < U_B < 25\text{V}$	3x (15 sec 25V, 10 sec 16V)
	Betriebsspannung	DIN 40839-1	Prüfimpuls 4, 12V
	EMV aktiv (Emission)	DIN VDE 0879-3	Entstörgrad III
	EMV passiv (Störfestigkeit)	DIN 40839-4	Schärfegrad III, 1-220 MHz/1GHz
Kriechstromfestigkeit	DIN IEC 68-2-30-Db,zyklisch	$> 1\text{M}\Omega$ bei 500V	
	DIN IEC 112	entsprechend Lastenheft	
Mechanisch	Vibrationsbelastung	DIN IEC 68- 2- 47	Temperaturwechselzyklus überlagert Sinus gemäß DIN IEC 68-2-14
		DIN IEC 68-2-6	0,2 g_n (0,75mm)
	Falltest	DIN IEC 68-2-32	RT, 1m; auf Betonboden, 2 x je Prüfling
	Haftfestigkeit der Leiterbahnen	DIN IEC 326-3-7.1	0,8 N/mm
	Reibverschleiß	DIN 72551-5-3.3.3 ⁶⁾	> 200 Schabzyklen
	Schockbeanspruchung	DIN 40046-7	Halbsinus: 30g, 6ms
DIN IEC 68-2-29 ¹⁰⁾		Halbsinus (DIN IEC 68-2-27)	
Thermisch	Min./Max. Betriebstemperatur	DIN IEC 68-2-2	$-40^\circ\text{C} < T < 80/100/120/150^\circ\text{C}^{2)}$ RH= 93%
	Min./ Max. Lagertemperatur	DIN IEC 68-2-3, Ca	$T=40^\circ\text{C}$; RH= 93%, 21d, konstant
		DIN IEC 68-2-30 Variante 1, Db	rel. Feuchte 95%, zyklisch $T_{U25^\circ\text{C}}$; $T_O < 55^\circ\text{C}$
	Temperaturwechselzyklen	DIN IEC 68-2-14, N_b	$-40^\circ\text{C} < T < 100/120/150^\circ\text{C}^{2)}, ^3)$
		DIN IEC 68-2-30, Var. 1	$T_U = 25^\circ\text{C}$; $T_O = 55^\circ\text{C}$; RH= 95%
	Temperaturschock	Lufttest ⁸⁾	$t_{\text{Anstieg}} < 5\text{sec}$; $-40^\circ\text{C} < T < +80/100/120/150^\circ\text{C}^{2)}$
		Wassertest ⁸⁾	$t_{\text{Schwall}} = 3\text{sec}$; $0^\circ\text{C} < T_{\text{Schwall}} < 4^\circ\text{C}$
Löttemperaturbeständigkeit	⁴⁾		
Chemisch	Lösungsmittelbeständigkeit	IPC TM 650-2.3.4.2A	Prüfung kann nach dieser Vorschrift erfolgen, abhängig vom Einsatzort
	Alterungs- und Korrosionsbeständigkeit	Mehrkomponentenklima: 0,2 ppm SO_2 , 0,01 ppm H_2SO_4 , 0,2 ppm NO_2 , 0,01 ppm Cl_2 , $T=25^\circ\text{C}$; RH 75%; 21 d; Volumenstrom: 1m^3 pro Stunde	
		Salzsprühnebelprüfung DIN 50021-SS	6Zyklen
		Chemikalienbeständigkeit	DIN EN 228, DIN EN 590, SAE 10 W 50, SAE J 726
	Die Berührung mit den Prüfmedien darf nicht zur Funktionsbeeinträchtigung führen		
Brandverhalten	Flammschutz	UL 94	V0/V1/V2 ⁷⁾

Eigenschaft		Norm	Wert
Physikalisch	Mediendichtheit (Feuchtigkeit, Staub)	SAE J 575	15 Zyklen
		DIN VDE 0470-1	SAE J 726 b
	UV-Beständigkeit	5)	
	Lebensdauer	DIN 72551-5-3.6.5 6)	max 1% Ausfall; T_U/T_0 berücksichtigen
		9)	max 1% Ausfall innerhalb der definierten Lebensdauer; T_U/T_0 berücksichtigen
Geometrisch	Oberflächenrauheit	produktspezifisch, abhängig von Anwenderspezifikation	
	Formgenauigkeit	produktspezifisch, abhängig von Anwenderspezifikation	
	Maßgenauigkeit	DIN IEC 326-3-5.6.3	Positionstoleranz der Lochachsen
	keine Formabweichung des Leiterbildes	DIN IEC 326-3-5.6	Toleranzen für Leiterbahnmaße
		IPC TM 650-2.2.10A	Toleranzen für Leiterbahnmaße
Umwelt, Recycling	Demontage	Folgende Vorgaben sind soweit wie möglich zu realisieren: - leichte Demontage/ Trennbarkeit sortenreiner Materialien - Reduzierung der Sortenvielfalt - Verwendung toxisch unbedenklicher Stoffe - Servicefreundlichkeit	
	Rezyklierbarkeit	- keine Stoffe und Materialien aus der "roten Liste" - Mehrkomponententeile mit kompatiblen Werkstoffen - Recyclingkonzept (Weiterverwertung, Wiederverwendung) - Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz	
	Entsorgung	- leichte Trennbarkeit von recyclinggeeigneten und nicht recyclinggeeigneten Bauelementen und Materialien - Gewichtsminimierung des schlecht recyclinggeeigneten Anteils - Vermeidung von abfallintensiven und schadstoffhaltigen Verfahren	

- 1) Die Dauer- oder Spitzenstrombelastung eines MID im Automobil ist stark vom Einsatz abhängig, es lassen sich daher keine Zahlenwerte angeben
- 2) Die hier angegebenen oberen Temperaturen sind abhängig vom Einbauort
- 3) Betauung bis maximal 20 g H₂O/m³ Luft darf nicht verhindert werden
- 4) Bestehende Normen für die Löttemperaturbeständigkeit sind auf MID nicht sinnvoll anwendbar, könnten allerdings nach DIN IEC 68-2-20, oder DIN IEC 326-2 geprüft werden
- 5) UV-Beständigkeit wird nicht gefordert von Schaltungsträgern, könnte nach DIN IEC 68-2-5 geprüft werden
- 6) Norm bezieht sich auf Niederspannungsleitungen
- 7) Je nach Einsatzort

Bild 35: Tabelle zu den Anforderungen an räumliche spritzgegossene Schaltungsträger und andere elektronische Baugruppen im Automobil

Natürlich sind MIDs nicht nur in der Automobilindustrie Prüfbedingungen unterworfen. Die Anforderungen der weiteren Anwendungsgebiete sind in [66] aufgeführt und dort ebenso tabellarisch dargestellt.

4.2 Anforderungen und Problembereiche aus der Fertigung

Neben den Gebrauchsanforderungen stellt auch die Herstellung verschiedene Anforderungen an einen räumlichen Schaltungsträger, die über die aus dem Gebrauch hinausgehen und daher bei der Konzeption besonders berücksichtigt werden müssen. Häufig bestimmen insbesondere die eingesetzten Verbindungstechnologien die Auswahl von Materialien und Verfahren. Da die Anforderungen und die auftretenden Problembereiche aus der Fertigung vom gewählten MID-Verfahren abhängen und durch die Ausgestaltung der Fertigungsabläufe und -anlagen auch beeinflusst werden können, wird ihnen hier breiterer Raum gewidmet.

4.2.1 Werkzeugbau und Spritzguß

Anforderungen, die über die Betriebsanforderungen hinausgehen oder der Auslegung für optimale Betriebsbewährung widersprechen, treten in beinahe allen Abschnitten der Verfahrenskette auf. Sollen zum Beispiel in einem dichten Gehäuse Schnapphaken eingebracht werden, so sollten im Sinne einer günstigen Werkzeuggestaltung Hinterschneidungen, die den Einsatz von Schiebern bedingen, vermieden werden. Dies bedingt jedoch ein Durchtauchen von Werkzeugteilen, was im späteren Gehäuse Öffnungen ergibt, die der Dichtigkeitsanforderung widersprechen.

Ein weiteres Konfliktfeld liegt in der Wahl MID-geeigneter Spritzparameter. Normalerweise ist es Ziel des Kunststoffverarbeiters, im Sinne kurzer Zykluszeiten mit möglichst hohen Spritzdrücken (kurze Formfüllungszeiten) und niedrigen Werkzeugtemperaturen (kurze Abkühlzeiten) zu arbeiten. Außerdem wird eine optisch möglichst ansprechende Oberfläche angestrebt, was in der Regel gleichbedeutend mit einem geringen Füllstoffgehalt in den Oberflächenschichten des Spritzgußteiles ist. Bei einigen Werkstoffen, z. B. Polyetherimid, ist für ein optimales Ergebnis hinsichtlich MID jedoch eine Parameterwahl erforderlich, die den klassischen Erfahrungswerten völlig widerspricht. Hier muß (meist zu 30% glasfasergefülltes) Material mit möglichst geringem Druck und hoher Werkzeugtemperatur (bis zu 180°C) verarbeitet werden, um eine langsame Formfüllung zu erreichen und das frühzeitige Einfrieren der Randschichten zu verhindern. Für den Metallisierungsprozeß ist nämlich ein hoher Füllstoffgehalt in der Oberflächenschicht erforderlich, damit der nachfolgende Ätzprozeß entsprechende Angriffsflächen für die spätere Metallisierung schaffen kann. Dieser Spritzprozeß verlängert nicht nur die Zykluszeiten, sondern führt auch zu optisch wesentlich schlechteren Oberflächen als sie bei für den Spritzguß allein optimierten Einstellungen zu erreichen wären.











Spritzgußteile		MID-Technologie
 schnelle Formfüllung	Spritzdruck	 gleichmäßige Morphologie
 kurze Abkühlzeit	Werkzeugtemperatur	 möglichst geringe Spritzhaut
 kurze Abkühlzeit, geringe therm. Schädigung	Massetemperatur	 gleichmäßige Faserverteilung
 glatte Oberfläche	Füllstoffanteil in der Randschicht	 aufschließbare Oberfläche
 niedrig  hoch		

Bild 36: Unterschiedliche Spritzparameter für die klassische Kunststoffverarbeitung und für den Spritzguß zur Metallisierung von Thermoplasten

4.2.2 Vorbehandlung, Metallisierung und Strukturierung

Der nächste kritische Schritt in der Verfahrenskette ist die Metallisierung nebst den zugehörigen Vorbehandlungsprozessen, wobei die Chemikalienbeständigkeit der verwendeten Kunststoffe die wichtigste Rolle spielt. Um während der Vorbehandlung die

Oberfläche aufzuschließen, werden die Kunststoffe für kurze Zeit bewußt aggressiven Medien, etwa Säuren oder Laugen ausgesetzt, die das Material schädigen. Der beabsichtigte Effekt, nämlich das Aufquellen bzw. Anätzen der Oberfläche, setzt sich jedoch bei mangelhafter Prozeßführung oder falschen Wirkmedien unkontrolliert fort und zerstört die Thermoplastmatrix. Insbesondere amorphe Kunststoffe reagieren auf einige Chemikalien sehr empfindlich mit Spannungsrißbildung.

Eine ähnliche Problematik beherrscht den Verfahrensschritt der eigentlichen chemischen Metallisierung. Während bei der Vorbehandlung die Konfrontationszeiten sehr kurz sind, verbleiben die Werkstücke bei der chemischen Metallisierung in der Regel mehrere Stunden im Wirkmedium, z.B. einer Kupferlösung. Hierbei ist der Kontakt noch wesentlich intensiver. Die Wirkung des Mediums bzw. darin enthaltener schädlicher Stoffe wird dadurch verstärkt, daß das Metall ausgefällt wird und an der Oberfläche des Kunststoffteils verbleibt. Hierbei lagern sich auch Verunreinigungen ab [46], von denen nur sehr schwer zu bestimmen ist, wie sie auf das Basismaterial wirken.

Die Schwierigkeit bei der Beurteilung der Schädigung durch den Vorbehandlungs- und Metallisierungsprozeß liegt darin, daß ein chemischer Abbau etwa der Molekülketten nur sehr schwer zu erkennen ist. Versuche haben gezeigt, daß selbst bei unveränderter Zugfestigkeit unerwartete Spannungsrisse im Material auftreten können [87].

Die Aussagen zur Vorbehandlung und zur chemischen Metallisierung lassen sich auch auf die elektrolytische Metallisierung und subtraktive bzw. semiadditive Strukturierungsverfahren übertragen, bei denen Ätzmedien eingesetzt werden. Die hier eingesetzten Chemikalien können auch zu einer Schädigung des Kunststoffs führen.

4.2.3 Auftrag eines Verbindungsmediums und Bestücken

Häufig sollen MIDs mit Bauelementen versehen werden. In diesem Fall sind bei den Weiterverarbeitungsprozessen Medienauftrag, Bestücken und Löten/Aushärten verschiedene Grenzen zu beachten, die ausschließlich von der Herstellung der Baugruppe herühren und für den Gebrauch des MIDs völlig irrelevant sind, z.B. Randabstände oder die Aushärtetemperatur.

Für diese Fertigungsabläufe sind für das Verarbeiten von MIDs geeignete Maschinen auszuwählen. Oft müssen z.B. die Geometrie der Baugruppe und die Durchlaßhöhe von Anlagen aneinander angepaßt werden. Können die vorhandenen Maschinen nicht adaptiert werden, muß die Geometrie der räumlichen Schaltungsträgersubstrate den Anforderungen entsprechend gestaltet werden.

Nach Fertigstellung des Substrates erfolgt zur Vorbereitung auf das Bestücken des Schaltungsträgers mit Bauelementen als erster Schritt in der Weiterverarbeitungskette der Auftrag eines Verbindungsmediums. Dies kann entweder Lotpaste, SMD-Kleber oder ein leitend gefüllter Klebstoff sein.

Bei herkömmlichen Leiterplatten erfolgt dies in der Regel mittels Sieb- oder Schablonendruck, was eine glatte Oberfläche des Substrates erfordert. Um den Einsatz eines dieser parallelen und ökonomischen Verfahren zu ermöglichen, ist eine sich aus dem Medienauftrag ergebende Forderung an ein MID, die Prozeßfläche(n) zur Bestückung von Bauelementen möglichst ohne hervorstehende Hindernisse zu gestalten. Soll hingegen die geometrische Freiheit der MID-Technologie im größten möglichen Maß ausgenutzt werden, so wird es erforderlich, das Verbindungsmedium anders aufzubringen, in der Regel durch Dispensen.

Das Dispensieren ist ein serielles Verfahren, bei dem nacheinander einzelne Medientropfen auf das Substrat aufgebracht werden. Durch geeignete Gestaltung von Dispenskopf und Schaltungsträger muß die Zugänglichkeit der Prozeßfläche bzw. aller darauf befindlichen Verbindungsstellen für den Dispenskopf gewährleistet sein. Dies bedingt das Einhalten gewisser Randabstände, die je nach eingesetztem Fertigungsequipment stark schwanken können.

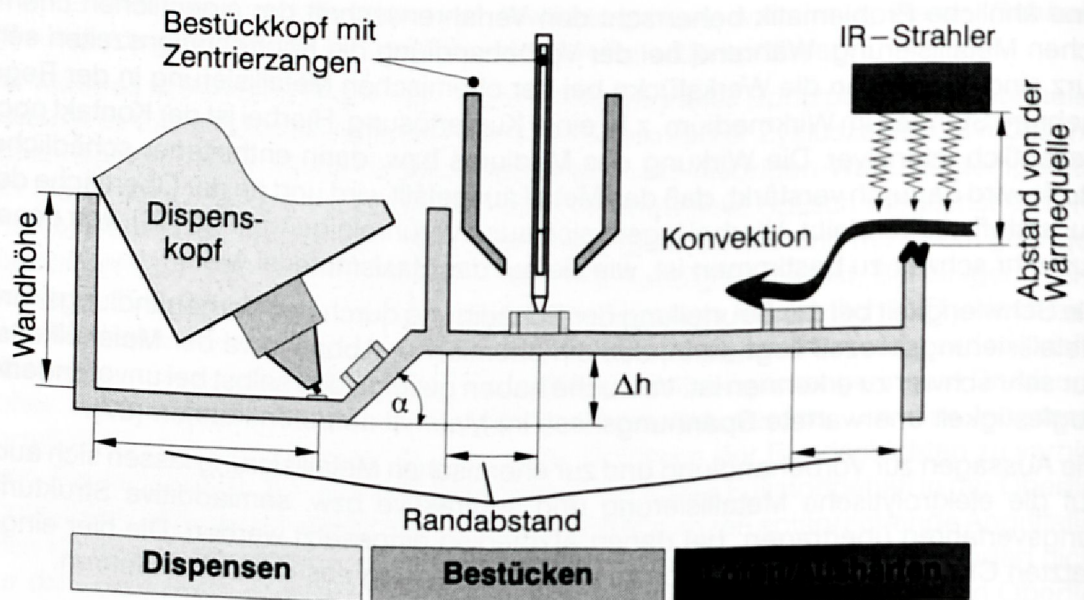


Bild 37: Geometrische Restriktionen bei "Weiterverarbeitungsvorgängen" zum Sicherstellen der Verarbeitbarkeit von MIDs [13]

Der nächstfolgende Verfahrensschritt, das Bestücken, führt im wesentlichen zu ähnlichen Anforderungen wie der Medienauftrag. Bei den handelsüblichen Bestückautomaten unterscheidet man insbesondere nach Hochgeschwindigkeitsautomaten, die mit relativ voluminösen Bestückköpfen zur gleichzeitigen Aufnahme mehrerer Bauelemente und deren Absetzen in rascher zeitlicher Folge ausgerüstet sind, und etwas langsameren, dafür häufig genaueren Pick-and-Place-Automaten, die jeweils nur ein Bauelement aufnehmen [128].

Bei beiden Varianten, insbesondere jedoch bei den Hochgeschwindigkeitsautomaten, ist der Platzbedarf und der mögliche z-Hub des Bestückkopfes sorgfältig bei der Gestaltung des Schaltungsträgers zu berücksichtigen, sofern eine ebene Gestaltung nicht möglich ist. Hier sind je nach Maschinenpark sehr unterschiedliche Restriktionen zu beobachten [13]. Insbesondere ist (vor allem bei externer Bestückung) auch darauf zu achten, ob der Bestückkopf mit einer mechanischen Zentrierung ausgerüstet ist, oder ob eine optische "Zentrierung" und Lagekorrektur erfolgt.

Neben dem Platzbedarf des Bestückkopfes ergeben sich aus der Fertigung auch Anforderungen hinsichtlich der Anordnung der Bauelemente auf schrägen Flächen. Während sich kleine Bauteile, z.B. Chipkondensatoren und -widerstände, bei Verwendung geeigneter Verbindungsmedien problemlos auch auf senkrechten Wandflächen anordnen lassen, gelten für größere (schwerere) Komponenten Grenzwinkel, ab denen die Gefahr eines Abrutschens besteht. Die entsprechenden Winkel sind in den Gestaltungsrichtlinien (Kapitel 8) aufgeführt.

4.2.4 Verbindungstechnik

Als Verbindungstechnik zwischen Bauelementen und Substrat kommen für spritzgegossene Schaltungsträger im wesentlichen drei Verfahrensgruppen zum Tragen:

- Löten
- Leitleben
- Bonden

Bei allen Gruppen unterliegt der Kunststoffkörper während der Fertigung wesentlich anderen Bedingungen als im späteren Einsatz. Das Material muß daher hinsichtlich der Fertigung ausgewählt werden, auch wenn es bezüglich der Gebrauchsanforderungen unnötig hoch spezifiziert zu sein scheint. Allerdings können Thermoplaste gegenüber kurzfristiger Temperaturschädigung durch Zugabe geeigneter Stabilisatoren wesentlich besser geschützt werden als gegenüber langfristiger Temperaturbelastung.

Während im Gebrauch selbst bei den härtesten Automobilanforderungen für elektronische Geräte maximal 150°C gefordert werden (darüber fällt der Metall-Kunststoffverbund bei herkömmlichen Leiterplatten aus), treten beim Löten Spitzentemperaturen von bis zu 270°C (Reflow-Löten) bzw. 350°C (Wellenlöten) auf.

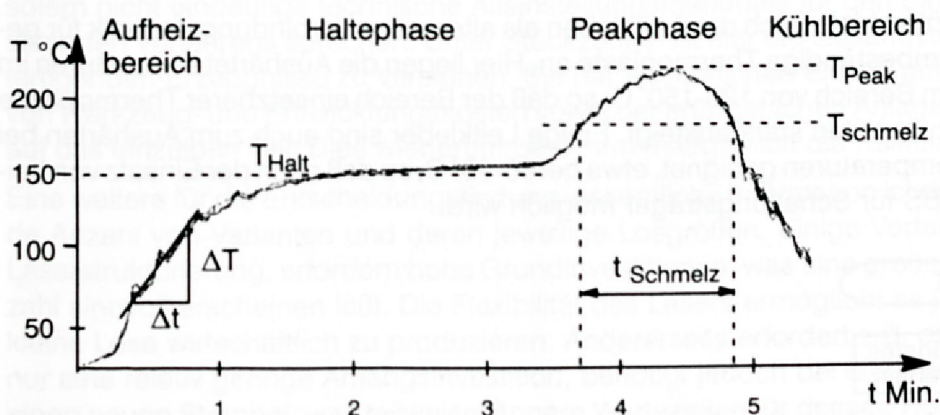


Bild 38: "Typisches" Infrarot-Lötprofil [45]

Dies liegt weit über den Dauergebrauchstemperaturen, aber unterhalb der Schmelztemperatur der meisten gebräuchlichen Thermoplaste. Falls eine Anpassung des Verbindungsverfahrens nicht möglich ist, muß ein entsprechend temperaturfester (teurer) Kunststoff eingesetzt und die Konstruktion darauf abgestimmt werden [37]. Die Verwendung eines neuen Materials zieht eine Reihe von Qualifikationsprozessen für Material, Verarbeitung und ggf. Zulieferer nach sich.

Ein Problem bei der Kunststoffauswahl ist, daß die herkömmlichen, in der Literatur verfügbaren Kennwerte nicht aussagekräftig sind. Während sich diese Werte (z.B. Vicat A und B, Heat Deflection Temperature HDT) auf Langzeitbelastungen unter Einbringung einer mechanischen Last beziehen, tritt beim Löten eine sehr kurzzeitige, dafür sehr heftige Temperaturerhöhung ohne externe mechanische Belastung des Substrates auf. Zusätzlich spielt der Wassergehalt beim Löten eine Rolle. Das im Kunststoff enthaltene Wasser verdampft bei der plötzlichen Temperaturerhöhung, kann nicht geregelt aus dem Spritzling entweichen und führt zu Blasenbildung.

Einige Thermoplaste reagieren unter Lötbedingungen anders, als nach den Kennwerten zu erwarten wäre. So weist Polyetherimid eine höhere Wasseraufnahme auf als Po-

lyethersulfon, läßt sich aber wesentlich einfacher verlöten, da die Matrix von PEI bei Löttemperaturen noch wesentlich stabiler ist als die von PES und somit dem Dampfdruck des entweichenden Wassers besser standhalten kann [130]. Die Blasenbildung kann nur durch entsprechend langes Vortrocknen verhindert werden.

Neben der Wasseraufnahme und der daraus resultierenden Gefahr einer Blasenbildung muß beim Löten von Kunststoffen auch berücksichtigt werden, daß Temperaturen auftreten, die oberhalb der Glasübergangstemperatur des betreffenden Thermoplasts liegen, was zu Rekristallisationsvorgängen und damit zum Verzug des Werkstückes führt. Dem kann durch entsprechende geometrische Auslegung, z.B. eine geeignete Verrippung des Schaltungsträgers entgegengesteuert werden. Natürlich spielt auch die geeignete Wahl der Verarbeitungsparameter eine entscheidende Rolle.

Ist der gewählte Werkstoff nicht für das Löten mit Standardloten geeignet, kann eine Lösung im Einsatz von niedrigschmelzenden Loten, etwa auf Wismutbasis, liegen [100]. Eine weitere Ausweichmöglichkeit besteht im Einsatz von selektiven Lötverfahren, etwa mittels einer Lötfontäne oder eines Lichtlötsystems, die jeweils nur die nächste Umgebung der jeweils bearbeiteten Lötstelle erhitzen und somit die Wärmeeinbringung in das Substrat drastisch verringern.

Neben dem Löten bietet sich das Leitleben als alternative Verbindungstechnik für gering wärmeformbeständige Thermoplaste an. Hier liegen die Aushärtetemperaturen im allgemeinen im Bereich von 120-150°C, so daß der Bereich einsetzbarer Thermoplaste im Vergleich zum Löten stark ansteigt. Einige Leitleber sind auch zum Aushärten bei niedrigeren Temperaturen geeignet, etwa bei 80-90°C, so daß auch der Einsatz von beispielsweise ABS für Schaltungsträger möglich wird.

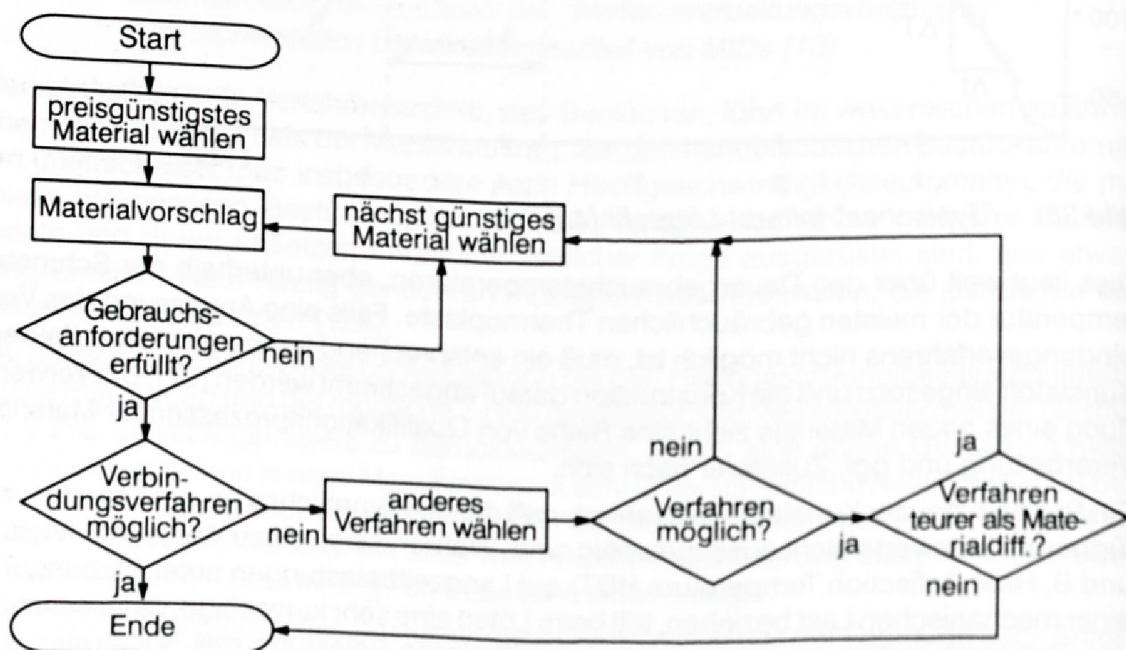


Bild 39: Reihenfolge beim Abstimmen der Verbindungsverfahren und der Materialauswahl auf die Gebrauchsanforderungen

In Abbildung 39 ist ein iteratives Vorgehen zum Abstimmen der Temperaturbeständigkeit des verwendeten Kunststoffs und des eingesetzten Verbindungsverfahrens unter

Berücksichtigung der Anforderungen aus dem Betrieb der Baugruppe aufeinander vorgeschlagen. Dies erfolgt ausgehend vom preiswertesten Werkstoff und dem kostengünstigsten Verbindungsverfahren.

4.3 Wirtschaftlichkeitsanforderungen

Neben den Anforderungen aus Gebrauch und Produktion werden auch Anforderungen aus wirtschaftlicher Sicht an ein MID gestellt. In der Regel müssen die Systemkosten des als räumlicher Schaltungsträger ausgelegten Produktes niedriger liegen als die einer herkömmlichen Variante, um die Technologie erfolgreich einzuführen.

4.3.1 Gesamtstückzahlen und Losgrößen

Eine wesentliche Randbedingung für die Entscheidung für oder gegen die MID-Technologie und für die Auswahl eines Fertigungsverfahrens sind die zu erwartenden Stückzahlen des Produktes. Während sich einige Fertigungsverfahren, etwa das Heißprägen bereits bei relativ geringen Stückzahlen lohnend einsetzen lassen, machen andere, etwa der Zweikomponentenspritzguß, in der Regel erst bei größeren Stückzahlen Sinn, sofern nicht eindeutige technische Alleinstellungsmerkmale für den Einsatz eines bestimmten Verfahrens sprechen. Unter Stückzahlen ist hier die Gesamtstückzahl der zu fertigenden Erzeugnisse zu verstehen. Sie hat wesentlichen Einfluß auf das Umlegen von Werkzeug- und Entwicklungskosten sowie der erforderlichen Anlageninvestitionen auf das einzelnen Teil. Dies wiederum bestimmt maßgeblich die Kalkulation.

Eine weitere für die Entscheidungsfindung wesentliche Information ist die zu erwartende Anzahl von Varianten und deren jeweilige Losgrößen. Einige Verfahren, etwa die Laserstrukturierung, erfordern hohe Grundinvestitionen, was eine große Gesamtstückzahl sinnvoll erscheinen läßt. Die Flexibilität des Lasers ermöglicht es jedoch, bereits kleine Lose wirtschaftlich zu produzieren. Andererseits erfordert z.B. das Heißprägen nur eine relativ geringe Anfangsinvestition, benötigt jedoch bei Geometrievariationen einen neuen Stempel, was teilweise längere Wartezeiten für dessen Herstellung erfordert, wähen der Laser einfach und schnell umprogrammiert werden kann.

4.3.2 Verkaufspreis und Customer Added Value

Ganz wesentlich sind der erzielbare Verkaufspreis des Produktes und die Kostenstruktur. Ziel muß es sein, durch den Einsatz der MID-Technologie nicht in erster Linie nur die Kosten zu senken, sondern dem Produkt einen technologischer Mehrwert mitzugeben, für den ein Kunde bereit ist, einen höheren Preis zu bezahlen (Customer Added Value).

Ein solches Beispiel ist ein Sensor, dessen MID-Sensorkopf es ermöglicht, durch eine Trennung von Sensor und Anschlußkabel den Austausch eines verschlissenen Sensors wesentlich zu erleichtern und damit Stillstandszeiten an der Maschine reduziert. Der Kunde ist bereit, für einen solchen Sensor mehr zu bezahlen als für ein Wettbewerbsprodukt ohne diesen Vorteil, so daß ein höherer Preis des MID gerechtfertigt ist.

Ein weiteres Beispiel für den Customer Added Value ist eine verbesserte Telekommunikationssteckdose. Durch den Einsatz der MID-Technologie konnte ihre Geometrie so gestaltet werden, daß die Installation der Dose wesentlich rascher durchgeführt werden kann als bei einem herkömmlichen Modell. Dadurch kann Montagelohn eingespart werden, wodurch der Kunde trotz gleichen Preises einen Vorteil auf Systemebene erzielt.

4.3.3 Taktzeiten

Die Wirtschaftlichkeit erfordert das Einhalten bestimmter Taktzeiten in der Produktion. Dies gilt besonders für die chemische bzw. galvanische Metallisierung. Großflächige MIDs können technisch einwandfrei auf diesem Wege hergestellt werden. Durch die Abmessungen und den in der Regel beträchtlichen Oberflächeninhalt der nicht zu metallisierenden Bereiche solcher großvolumigen Teile würden jedoch die Metallisierungsbänder mehrere Stunden jeweils von nur einigen wenigen Teilen blockiert, während in der gleichen Zeit tausende kleiner Teile gefertigt werden können. Dies schlägt auf die Metallisierungsstückkosten durch und setzt der Herstellung großer Teile enge Grenzen.

Gleiches gilt für die Montage- und Verbindungstechnik. Es ist zwar möglich, hochkomplexe Geometrien mittels Dispenser und Sondermaschinen zu bestücken. Die durch die zusätzlichen Freiheitsgrade prinzipbedingt verringerte Geschwindigkeit führt jedoch zu verlängerten Taktzeiten, deren Mehrkosten auch durch geschickte Einsparungen in der Systemmontage nur schwer zu kompensieren sind. Daran sind bislang viele der Lösungen gescheitert, die das direkte Strukturieren und Bestücken komplexer elektronischer Schaltungen auf der Innenseite eines Gehäuses vorsahen.

4.3.4 Produktzyklen

Wichtig für die Entscheidung zugunsten einer bestimmten MID-Herstellertechnologie, insbesondere in der Einführungsphase, ist auch der zu erwartende Produktlebenszyklus. Maßgebend für den wirtschaftlichen Erfolg eines Produktes ist der Nettowert, den es über seine Lebensdauer erzielt. Ein typischer Verlauf ist in Abbildung 40 dargestellt.

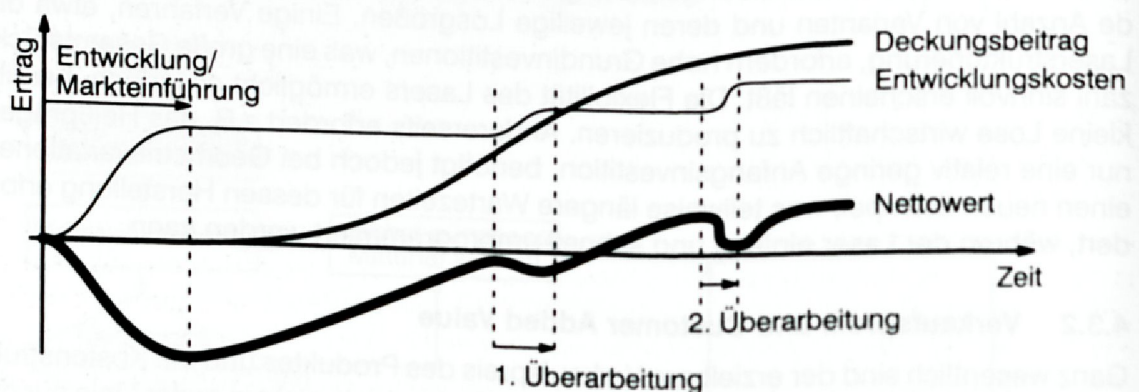


Bild 40: Typischer Verlauf des Produktnettowertes über die Lebensdauer [117]

Nicht nur in den MID-Hauptmärkten Automobil und Telekom ist es erforderlich, jedes neue Verfahren vor Einführung ausgiebig zu untersuchen und durch geeignete Testreihen für den Serieneinsatz zu qualifizieren. Die Testzyklen dauern in der Regel bei einer neuartigen Technologie aufgrund der noch fehlenden Erfahrungs- und Vergleichswerte länger als bei der Konstruktion eines neuen Produktes in einer herkömmlichen Technik. Bei sich rasch wandelnden Märkten mit kurzen Produktlebenszyklen, etwa dem Markt für Mobilkommunikation, ist die Einführung der MID-Technologie in einem Unternehmen daher ein logistisch äußerst anspruchsvolles Projekt. In der Regel wird es erforderlich sein, ein oder mehrere Herstellungsverfahren anhand eines parallel entwickelten "Dummy"-Produktes zu qualifizieren, um dann die gewonnen Erkenntnisse ebenso schnell wie bei einer herkömmlichen Technik in ein Serienprodukt umzusetzen.

Eine Lösung für Märkte, die sehr stark abhängig von Modeerscheinungen und Designwandel sind (z.B. Hausgeräte, Unterhaltungselektronik), liegt darin, die Elektronik in Technologiemodulen zusammenzufassen, die nur bei jeder zweiten oder dritten Überarbeitung neu konstruiert werden müssen.

4.3.5 Risikobewertung

Eine weitere wirtschaftliche Anforderung wirtschaftlicher Natur an die MID-Technologie ist die bei jeder Neueinführung durchzuführende Risikoanalyse. Diese kann anhand einer Prozeß-FMEA erfolgen und ergibt für verschiedene Technologien (MID wie konventionell) Risikoprioritätszahlen, nach denen das jeweilige technische Risiko abgeschätzt werden kann [92]. Dabei gehen der Neuheitsgrad der Einzelprozesse sowie die Anzahl neuer Verfahrensschritte ebenso ein wie die Beherrschung bestehender Prozesse.

Auch die Investitionen stellen ein Risiko dar. In der Anforderungsliste kann z.B. festgelegt sein, daß die Montage auf bestehenden Anlagen zu erfolgen hat. Je nach deren Eignung für die Verarbeitung von dreidimensionalen Schaltungsträgern, z.B. hinsichtlich der Durchlaßhöhe oder der Bearbeitung dreidimensionaler Prozeßflächen hat dies natürlich Auswirkungen auf die Gestaltung der Produkte. Für jeden Einzelfall ist erneut zu ermitteln, welches Risiko für die Einführung getragen werden kann.

4.4 Vereinheitlichung der Anforderungen

Ein wichtiger Punkt für die Weiterentwicklung der MID-Technologie ist der Übergang von der Baugruppen- zur Einkaufsteilprüfung bzw. das Erarbeiten von Regeln, die sichere Rückschlüsse von den Testwerten der Eingangsprüfungen auf die Erfüllung der verschiedenen Anforderungen durch die Baugruppe zulassen. Im konventionellen Bereich kann z.B. davon ausgegangen werden, daß eine Leiterplatte substratseitig zuverlässig arbeitet, wenn die Haftfestigkeit der Bahnen auf dem Substrat 1,0 N/mm übersteigt. Für MIDs werden in der Regel diese Werte unverändert übernommen, ohne die Mechanismen zu hinterfragen.

Neben einer Forschungsgruppe für die Erstellung des Handbuches wurde unter Mitwirkung des Autors auch eine Gruppe zur Vereinheitlichung von Testverfahren und das Anpassen der Akzeptanzkriterien von Substraten für elektronische Baugruppen gegründet. Eine für alle potentiellen Anwender einheitliche Norm zur Baugruppenprüfung ist derzeit allerdings nicht durchsetzbar. Bereits bei konventionellen elektronischen Geräten verwendet jeder Hersteller seine eigenen Hausnormen in der Eingangsprüfung. Da bereits die Einzelbereiche nicht einheitlich sind, ist die Vereinheitlichung von Eingangsprüfungen für Produkte mit so vielgestaltigen Ausprägungen wie räumlichen Schaltungsträgern ein nahezu aussichtsloses Unterfangen.

Nachfolgend werden einige Vorschläge erarbeitet, die z.B. zur Erweiterung der US-Industrienorm IPC TM A - 600 [155] dienen können, die der in der Elektronikindustrie für die Annahme von Schaltungsträgersubstraten anerkannte Standard ist - auch in Europa. Bei genauer Analyse der Norm zeigt sich, daß die sich meisten Regeln der IPC 600 hinsichtlich der Beurteilung von layoutspezifischen Qualitätsmerkmalen sich unverändert auf die MID-Technologie anwenden lassen. Insofern sind sie eine gute Ausgangsbasis für die vereinheitlichte Beurteilung von MIDs. Einige basismaterial-, also epoxidharz- bzw. hartpapierspezifische Beurteilungskriterien sowie Kriterien, die sich speziell auf laminierte Mehrlagenschaltungen beziehen, sind für die MID-Technologie irrelevant

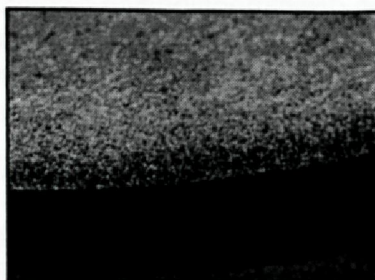
und können daher unbeachtet bleiben. Allerdings weisen spritzgegossene Schaltungs-träger auch einige spezifische Eigenschaften auf, denen die Norm in der derzeitigen Form nicht gerecht werden kann. Hierzu werden nachstehend einige Vorschläge für Regeln unterbreitet. Diese können bei Bedarf in das Normenwerk der IPC TM A-600 eingearbeitet werden.

4.4.1 Kantenbeschaffenheit

Diese Annahmebedingung (IPC-Abschnitt 2.1.2 "Burr"), die sich mit Absplitterungen und Dellen an den Rändern des Substrates beschäftigt und sie in der IPC zweidimensional betrachtet, muß die Dreidimensionalität von MIDs berücksichtigen. Grundsätzlich gelten die Maß- und Formtoleranzen gemäß DIN 4760 [145]. Zusätzlich ist die Lage von Fehlerstellen zu Leiterzügen zu beachten. Eine zu unregelmäßige Kantenausprägung kann zu Absplitterungen nach der Metallisierung und zu Fremdabscheidungen führen. Auch muß die Gratfreiheit in zu metallisierenden Bereichen festgelegt werden.



optimal



annehmbar



zurückzuweisen

Bild 41: Akzeptanzkriterien für den Kantenzustand von MIDs

Besonderen Einfluß auf die Metallisierung hat die Lage des Anspritzpunktes und der Anspritzrest. Ein Anspritzpunkt oder eine Auswerfermarke darf keinesfalls auf einem Funktionsbereich der metallisierten Fläche liegen, da durch die Kristallstruktur um den An- guß eine einwandfreie Metallisierung nicht möglich ist. Selbstverständlich sind auch große Fehlstellen oder Blasen (Durchmesser größer als 0,5mm) nicht zulässig.

4.4.2 Oberflächeneigenschaften von MIDs

Die Oberfläche sollte nach dem Metallisieren insgesamt relativ glatt sein und keine zu hohe Rauigkeit aufweisen. Einige sichtbare Anzeichen können Qualitätsprobleme anzeigen.

Unzulässig in den Oberflächen von MID-Teilen sind deutliche Fließlinien oder Bindenähte in metallisierbaren Bereichen, da sie eine schlechte Haftung der Metallisierung und eine verringerte Stabilität des Kunststoffteiles bewirken können. Zusätzlich muß bei Zweischußteilen das Auftreten großer Fehlstellen, vor allem am Übergang zwischen beiden Schüssen, als Zurückweisungskriterium aufgenommen werden. Unsaubere Trennflächen können zum Eindringen von Metallisierungschemikalien führen, was zu am fertigen Teil nicht zu erkennenden Fremdmetallisierungen im Inneren des Bauteils und somit zu einer Verfälschung der elektrischen Eigenschaften führen kann. Brandstellen sind ein Zeichen für schlechte Spritzbedingungen.

Bei nicht sichtbaren Teilen sind relativ unsauber gespritzte Oberflächen tolerierbar, solange Fehlstellen, Poren etc. einen Mindestabstand von den Leiterbahnen einhalten.

Kontamination auf der Oberfläche ist hingegen nicht zulässig, ebenso eine Verfärbung, weil diese auf Beschichtungsparameter außerhalb der zulässigen Toleranzen hinweist.

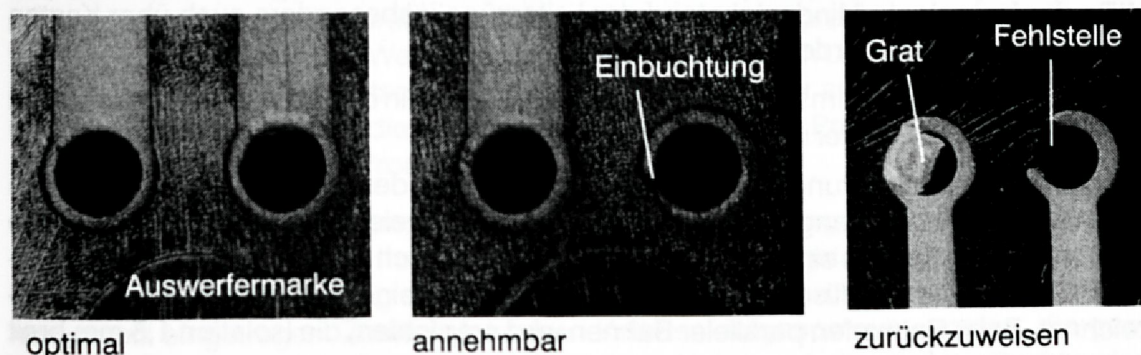


Bild 42: Akzeptanzkriterien für die Oberflächenbeschaffenheit von MIDs

Laut IPC TM-A 600 dürfen bei FR 4-Substraten Glasfasern der Verstärkungsmatten an der Oberfläche sichtbar sein, jedoch nicht freiliegen (Abschnitt 2.2.1). Dieses Kriterium ist für die MID-Technologie ungeeignet, weil teilweise sogar Glas oder andere Füllstoffe an der Oberfläche liegen müssen, um eine Metallisierung zu ermöglichen. Ein geeignetes Akzeptanzkriterium ist hier eine ausreichende Umhüllung mit Matrixmaterial. Zurückzuweisen sind Bauteile, bei denen die Oberflächenschicht keine Fasereinschlüsse aufweist, da dann eine haftfeste Metallisierung ebenfalls nicht möglich ist. Bei der optischen Prüfung der metallisierten Teile fällt dies im nichtmetallisierten Bereich auf.

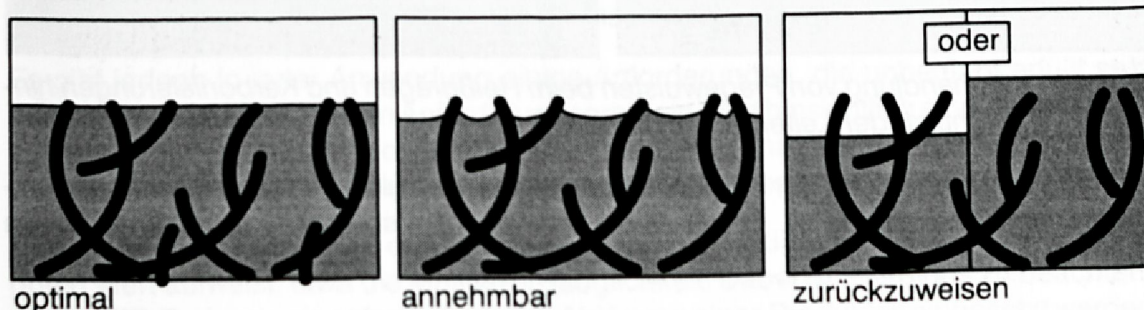


Bild 43: Akzeptanzkriterien für die Oberflächentextur von MIDs

Auch im Inneren des Substrates sind nur gewisse Fehlstellen zulässig. Hier kann der Abschnitt 3.1.1 "Laminate Voids" der IPC unverändert übernommen werden, sollte jedoch in "Base Material Voids" umbenannt werden. Gleiches gilt für Abschnitt 3.3.9 "Wicking", der Innenlagenfehler bei Mehrlagensubstraten behandelt.

4.4.3 Kennzeichnung des Schaltungsträgers

Die bei den herkömmlichen Leiterplatten möglichen Kennzeichnungsverfahren (IPC TM A-600, Abschnitt 2.8) müssen um das Einbringen von Kennzeichnungen in das Werkzeug, die sich am gespritzten Bauteil durch erhabene oder vertiefte Markierungen zeigen, ergänzt werden. Eine solche Markierung ist immer zulässig, solange sie die Eigenschaften von Leiterzügen bzw. die spätere Montage von Bauelementen nicht nachteilig beeinflusst. Unzulässig sind insbesondere erhabene Markierungen zwischen Pads, auf die später ein Teil montiert wird. Vertiefte Markierungen sind hier hingegen erlaubt. Erhabene Markierungen sind generell unzulässig auf Prozeßflächen, die im Sieb- bzw. Schablonendruck bearbeitet werden sollen.

4.4.4 Abstand der Leiterzüge

Als Ergänzung der bestehenden Norm (Abschnitt 2.10.1.2) ist festzuhalten, daß bei MIDs der festgelegte Mindestabstand der Leiterzüge insbesondere auch über Kanten nicht unterschritten werden darf.

Prägewulste, wie sie beim Heißprägen auftreten, können in den Abstand d eingerechnet werden (d.h. es zählt der Abstand der Kupferkanten).

Bei der Laserstrukturierung mögliche Karbonisierungen des Materials dürfen hingegen nicht auf den Abstand angerechnet werden, da sie teilweise leitend sein können. Eine Karbonisierung kann in einem etwa 500 μm breiten Bereich neben den Leiterzügen auftreten. Sie enthält metallische Rückstände und ist durch eine starke Rauigkeit gekennzeichnet. Beim Entwerfen paralleler Bahnen wird empfohlen, die Isolation 1,5 mm breit vorzusehen.

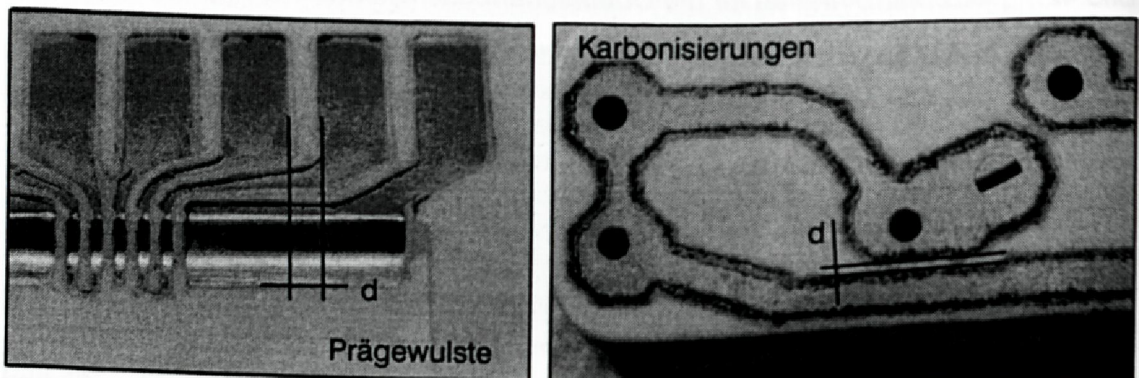


Bild 44: Behandlung von Prägewulsten beim Heißprägen und Karbonisierungen hinsichtlich der Leiterbahnabstände

Ein Weg zur Vermeidung der Karbonisierung ist die subtraktive Variante der Laserstrukturierung (siehe Kapitel 6). Damit sind Leiter-/Isolationsbreiten von minimal 25 μm möglich.

4.4.5 Durchkontaktierte Löcher

Mit Zweischuß-MIDs sind im Gegensatz zu herkömmlichen Leiterplattentechnologien teilweise durchkontaktierte Löcher möglich. Im übrigen gelten die Vorschriften der IPC (Abschnitt 2.10.4). Ergänzend ist auch darauf hinzuweisen, daß bei heißgeprägten MIDs Durchkontaktierung nur mit Zusatzwerkstoffen möglich sind.

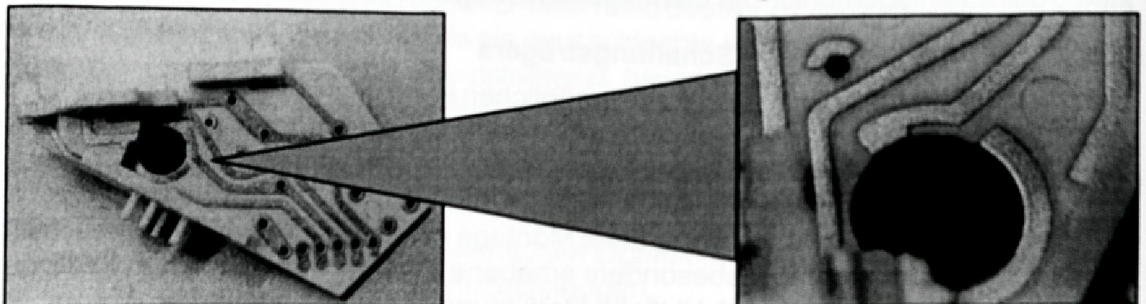


Bild 45: Teilweise durchkontaktierte Öffnung an einem Trägerbauteil für Mikroschalter in einem Joystick (Microsoft / Mitsui-Pathtek)

4.5 Aufstellen von Anforderungsprofilen

Aus den Anforderungslisten lassen sich relativ einfach Material- bzw. verfahrensspezifische Anforderungsprofile erstellen. Diese können mit entsprechend zu erstellenden Eignungsprofilen einzelner Werkstoffe bzw. Werkstoffgruppen und von Verfahren korreliert werden und so eine Entscheidung für ein Verfahren oder einen Kunststoff wesentlich erleichtern: je geringer die Abweichungen zwischen den Profilen, desto besser die Eignung für das jeweilige Produkt.

Prinzipiell sind die Anforderungen aus Gebrauch und Fertigung über das Verfahren aus Kapitel 4.2.1/4.2.2 bekannt. Ihre dort bestimmten Gewichtungsfaktoren, die in die Nutzwertanalyse zur Bestimmung der optimalen Variante einfließen, werden in das Anforderungsprofil eingetragen. Zusätzlich können Kriterien aufgenommen werden, die geometriebedingt sind. Die Gewichtungsfaktoren werden auf die sieben Punkte des Anforderungsprofils normiert. Die Erfüllung der Kriterien kann dann gemäß der in Kapitel 4.2.2 dargestellten Nutzwertfunktionen eingezeichnet werden.

Um dem Anwender eine Entscheidungshilfe für die Auswahl des für seine Zwecke am besten geeigneten Verfahrens zu geben, werden in Kapitel 6 aus den Erfahrungen von Anwendern und Forschungsarbeiten Eigenschaftsprofile für die gebräuchlichsten MID-Herstellverfahren abgeleitet. Dasjenige Verfahren, dessen Eigenschaftsprofil die geringsten Abweichungen zum Anforderungsprofil der Anwendung aufweist, ist am besten für das jeweilige Projekt geeignet. Der Grad der Abweichung läßt sich dabei anhand der Flächen zwischen den Linien des Anforderungs- und des Eigenschaftsprofils ablesen. Je kleiner die sich ergebende Fläche, desto besser die Eignung.

Es gibt jedoch in jeder Anwendung einige Anforderungen, die unbedingt erfüllt sein müssen. Taucht also in einem Anforderungsprofil ein Wert hinsichtlich einer Eigenschaft auf, bei dem das betrachtete Verfahren den Wert "Null" hat, so muß dieses Verfahren von vornherein aus der weiteren Auswahl ausgeschlossen werden.

Dies gilt auch für Punkte, bei denen keines der derzeit verfügbaren MID-Verfahren einen guten Wert aufweist, etwa die Multilayer-Tauglichkeit. Dabei ist allerdings zu beachten, ob die MID-Technologie sofort in Serie zur Ablösung eines Produktes eingesetzt werden soll, oder ob einige Entwicklungszeit zur Verfügung steht.

Es ist z. B. durchaus denkbar, Mehrlagen-Oberflächenverdrahtungen (analog der SI-MOV-Technik [134]) für den Einsatz auf thermoplastischen Substraten zu modifizieren. Unter bestimmten Voraussetzungen (ebene Substrate) ist ein Einsatz schon jetzt machbar, es ist jedoch momentan kein Verfahren bekannt, um die Dielektrikumsschichten in drei Dimensionen zuverlässig und vor allem gleichmäßig auf das Substrat aufzubringen.

Jede Eigenschaft eines Verfahrens wird mit 0 bis 4 bewertet, wobei die Skala wie folgt aufgeschlüsselt ist:

- | | |
|----|--|
| 0: | nicht möglich / völlig ungeeignet |
| 1: | hoher Aufwand / schlechte Werte |
| 2: | mittlerer Aufwand / mittlere Werte |
| 3: | niedriger Aufwand / gute Werte |
| 4: | ohne Probleme möglich / bestens geeignet |

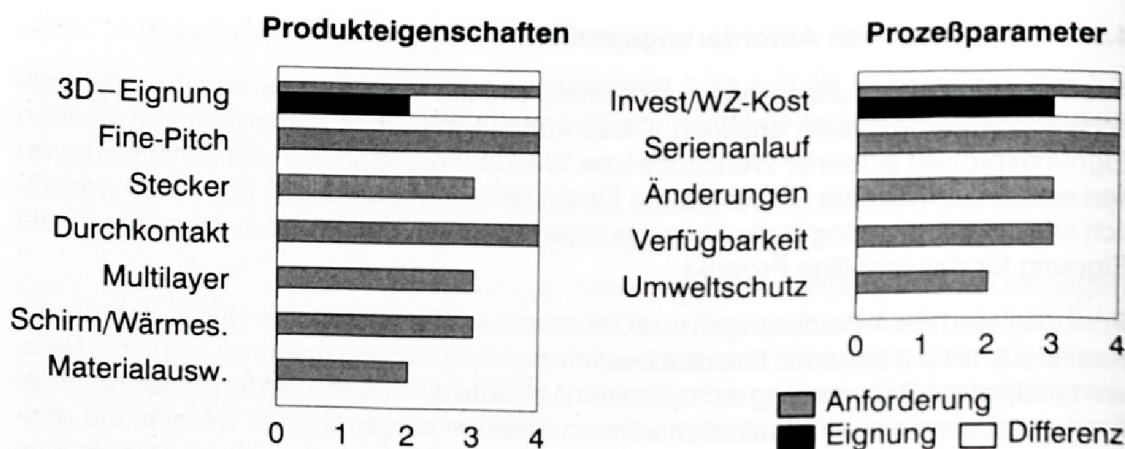


Bild 46: Aufbau der Eigenschaftsprofile

Es ist besonders darauf zu achten, ob die Werte gleichmäßig voneinander abweichen, oder ob viele Werte gut übereinstimmen, einzelne Ausreißer jedoch das Gesamtergebnis verschlechtern. In diesen Fällen muß die Wichtigkeit des Kriteriums für das Gesamtergebnis überprüft werden.

Abweichungen sind sowohl nach oben als auch nach unten möglich. Liegen die Werte des Eigenschaftsprofils des Verfahrens unterhalb denen des Anforderungsprofils der Anwendung, so ist davon auszugehen, daß durch zusätzliche Maßnahmen (und Kosten) die Werte verbessert werden können. Andererseits bedeutet eine Übererfüllung von Kriterien, daß ein technologisch zu hochwertiges Verfahren betrachtet wird, dessen Einsatz ebenfalls die Gefahr unnötig hoher Kosten in sich birgt. Die Eigenschaftsprofile sind somit ein praktisches Mittel, schnell einen Überblick über die Stärken und Schwächen der verschiedenen dem Konstrukteur zur Wahl stehenden Verfahren zu geben.

Neben den allgemeingültigen Kriterien sind je nach Anwender noch zusätzliche Punkte in die Eignungsprofile der Prozesse einzutragen. Hierzu gehören vor allem das Vorhandensein der nötigen Anlagen und des erforderlichen Know-Hows im Betrieb bzw. die Infrastruktur an Prozeßpartnern. Die Eigenschaftsprofile werden für jedes Verfahren getrennt nach Produkt- und Fertigungsanforderungen aufgestellt. Im Einzelnen sind folgende Parameter zu beachten:

3D-Eignung: Anwendungen, bei denen das Leiterbild stark dreidimensional ausgeprägt ist, können nur mit bestimmten Verfahren wirtschaftlich hergestellt werden. Bewertungskriterium ist hierbei z. B. die Möglichkeit, Hinterschneidungen zu strukturieren.

Fine-Pitch-Eignung: Dies ist wichtig, wenn Strukturen unterhalb etwa 1 mm Breite erzeugt werden sollen, z.B. Anschlüsse hochpoliger ICs oder Durchführungen mehrerer Leiterbahnen unter einem Bauteil. Einige Verfahren haben hier klare physikalische Grenzen.

Steckerstifte: Einige Verfahren eignen sich besonders gut zur Realisierung rundum metallisierter, von der Umgebung weiträumig isolierter Steckerstifte und ähnlicher Kontaktelemente.

Durchkontakt: Verschiedene Verfahren eignen sich nur mit Zusatzmaßnahmen oder gar nicht für Durchkontaktierungen. Dies ist bei der Auswahl zu berücksichtigen.

Multilayer: Die meisten MID-Verfahren sind nicht für Multilayer-Anwendungen ausgelegt. Lediglich einige Folientechnologien können derzeit mehrlagige Schaltungsbilder

realisieren. Allerdings ist die Entwicklung von Multilayer-MIDs mittels mehrfacher Beschichtung und Strukturierung gut denkbar.

Abschirmung und Wärmesenken: Die Verfahren unterscheiden sich in ihrer Eignung, großflächige Metallschichten aufzubringen, die als Abschirmflächen geeignet sind. Gleiches gilt für die Nutzung großer zusammenhängender Metallvolumina als Wärmesenken oder -ableitungen.

Materialauswahl: Die Anzahl der beschichtbaren Materialien hängt von der je nach Prozeß verwendeten Chemie ab. Hier ergeben sich leichte Unterschiede zwischen den Verfahren.

Investitionen und Werkzeugkosten: Die erforderlichen Investitionen für das Verfahren bestimmen die Untergrenze an insgesamt herzustellenden Teilen, ab der die Fertigung wirtschaftlich wird. Hierbei ist natürlich zu beachten, daß die in den hier wiedergegebenen Profilen enthaltenen Werte von einer Investition "auf der grünen Wiese" ausgehen. Bereits in Unternehmen vorhandene Anlagen können die Werte stark verändern. Die Kosten für die Werkzeuge sind ein wesentlicher Teil der Investitionskosten jedes Spritzgußteiles. Bei Einlege- oder Mehrkomponentenverfahren sind sie höher als bei anderen Spritzgußanwendungen.

Serienanlauf: Die Summe der Komplexitäten der Prozeßschritte und Werkzeuge bestimmt die Zeit, mit der für den Übergang vom Prototypen zur Serienfertigung zu rechnen ist. Auch dies ist von Verfahren zu Verfahren stark unterschiedlich.

Änderungsaufwand: Je nach Strukturierungswerkzeug ist der Aufwand zur Änderung des Leiterbildes und damit die Flexibilität des Verfahrens hinsichtlich kleiner Losgrößen unterschiedlich.

Die Werte bei den Faktoren Invest/Werkzeugkosten, Serienanlaufzeiten und Änderungsaufwand liefern einen guten Anhaltspunkt dafür, ob sich das Verfahren für kleine Losgrößen bzw. Stückzahlen eignet.

Verfügbarkeit: Bei einigen Verfahren ist die Abhängigkeit von einzelnen Firmen relativ groß, sei es aus patentrechtlichen oder technischen Gründen. Dies kann für eine Entscheidung relevant werden, wenn eine zweite Bezugsquelle erforderlich ist.

Umweltschutz: Alle MID-Verfahren sind ökologischträglicher als herkömmliche Leiterplatten, da Duroplaste, die nur "energetisch recycelt" - also verbrannt - werden können, durch regranulierbare Thermoplaste ersetzt werden [112]. Der durch die Metallisierung entstehende Verbundstoff kann über geeignete Verfahren in Metall und Kunststoff getrennt werden [42]. Einige Verfahren sind darüber hinaus beim Anwender sehr umweltfreundlich, weil keine naßchemischen Prozesse erforderlich sind.

Natürlich sind solche Anforderungsprofile und ihr Abgleich mit den Eignungsprofilen von Verfahren und Materialien nur zu einer ersten Vorentscheidung bei der Auswahl von Kunststoff und Herstellprozeß geeignet. Für jede Anwendung ergeben sich neben den hier enthaltenen, immer wieder auftretenden Anforderungen, neue spezifische Kriterien, um die das Profil dann jeweils zu ergänzen ist.

Die Verfahren, bei denen die größte Übereinstimmung mit dem Anforderungsprofil zu erkennen ist, müssen anschließend genau hinsichtlich der Zielführung "Reduzierung der Systemkosten" analysiert werden. Die Grundlagen dafür werden im nachfolgenden Kapitel vorgestellt, in dem die Vor- und Nachteile sowie die technischen Grenzen verschiedener Verfahren aufgezeigt sind.

5 Technische Grenzen von MID-Verfahren

Ein wesentliches Kriterium bei der Auswahl der MID-Technologie als Lösung für ein bestimmtes Problem oder für den Einsatz in einem bestimmten Produkt sind die technischen Grenzen der Technologie im allgemeinen und bestimmter einzelner Herstellverfahren. Die MID-Technologie muß die aus der Anwendung und den Fertigungs- sowie den wirtschaftlichen Rahmenbedingungen resultierenden Anforderungen möglichst optimal erfüllen. Die jeweiligen Stärken verschiedener Technologien lassen sich anhand von Eigenschaftsprofilen, die dann dem gemäß Kapitel 5 hergeleiteten Anforderungsprofil der jeweiligen Anwendung gegenübergestellt werden, übersichtlich darstellen.

5.1 Stromtragfähigkeit von thermoplastischen Substraten

Um bestehende, immer wieder in Projekten hinderliche Wissenslücken zu füllen, wurden verschiedene Untersuchungen zur Stromtragfähigkeit von thermoplastischen Schaltungsträgern durchgeführt.

Eine Frage, die bei Überlegungen zum Einsatz spritzgegossener Schaltungsträger immer sehr häufig auftaucht, ist die Strombelastbarkeit von Leiterbahnen auf thermoplastischen Kunststoffen. Folgende Faktoren haben Einfluß auf die Strombelastbarkeit von Schaltungsträgern: Breite, Dicke und Form der Leiterbahn sowie Umgebungstemperatur und zulässige Temperaturerhöhung.

Insbesondere beim Design von Baugruppen, in deren herkömmlicher Ausführung umspritzte oder eingelegte Stanzgitter die Leiterfunktion übernehmen, treten häufig hohe Ströme auf, die in Automobilanwendungen bis zu 115 Ampère betragen können [135]. Dies geht weit über den Bereich hinaus, für den bei Leiterplatten genormte Werte vorliegen [152,156]. Die Diagramme enden bei Werten zwischen 10A und 20A und bei Leiterbreiten von 2,5 mm.

Es war bislang nicht bekannt, wie sich die aus solch hohen Strömen resultierenden Temperaturanstiege bei Thermoplastsubstraten gegenüber herkömmlichen, duroplastischen Substraten verhalten. Ausgehend von den Normen wurden über die zu erwartende Verlustleistung theoretische Stromtragfähigkeiten bestimmt. Diese wurden anschließend anhand von zwei Testlayouts verifiziert. Layout 1 diente der Beurteilung des Längeneinflusses der Leiterbahn, Layout 2 den eigentlichen Untersuchungen.

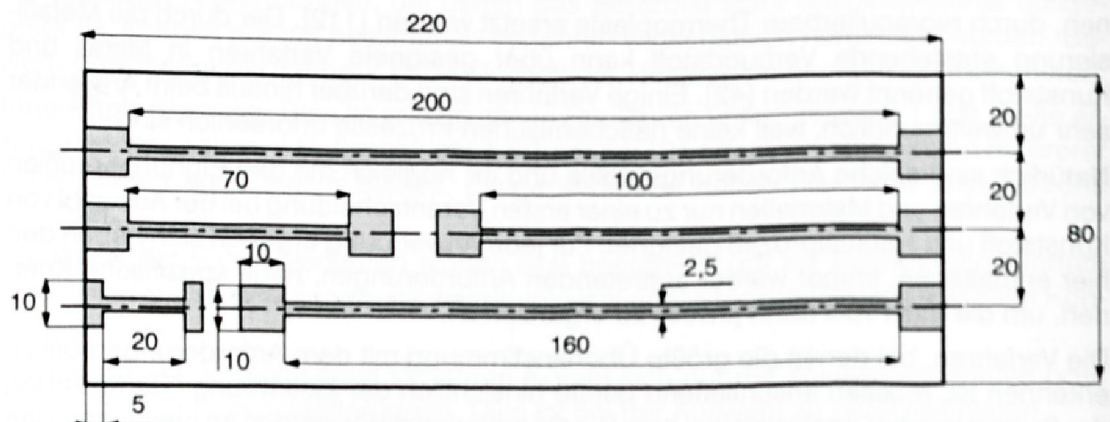


Bild 47: Leiterbahnlayout 1 zur Bestimmung der Stromtragfähigkeit von thermoplastischen Schaltungsträgern: Elimination des Längeneinflusses

Es zeigte sich, daß ab einer Leiterbahnlänge von 70 mm der Längeneinfluß vernachlässigbar ist. Layout 2 wurde auf Testplatten aus Polyetherimid (PEI), Polyethersulfon (PES), Flüssigkristallpolymer (LCP), und Polyamid (PA) aufgebracht und mit bis zu 120 A belastet. Zu Vergleichszwecken wurden auch Platten aus herkömmlichem FR-4-Material untersucht. Um den theoretisch nicht herleitbaren Einfluß verschiedener Metallisierungsverfahren beurteilen zu können, wurde das Polyamid durch Heißprägen (siehe Abschnitt 6.3) metallisiert, die übrigen Werkstoffe auf chemisch-galvanischem Wege. Die Untersuchungen berücksichtigten auch unterschiedliche Lagen der Testkörper.

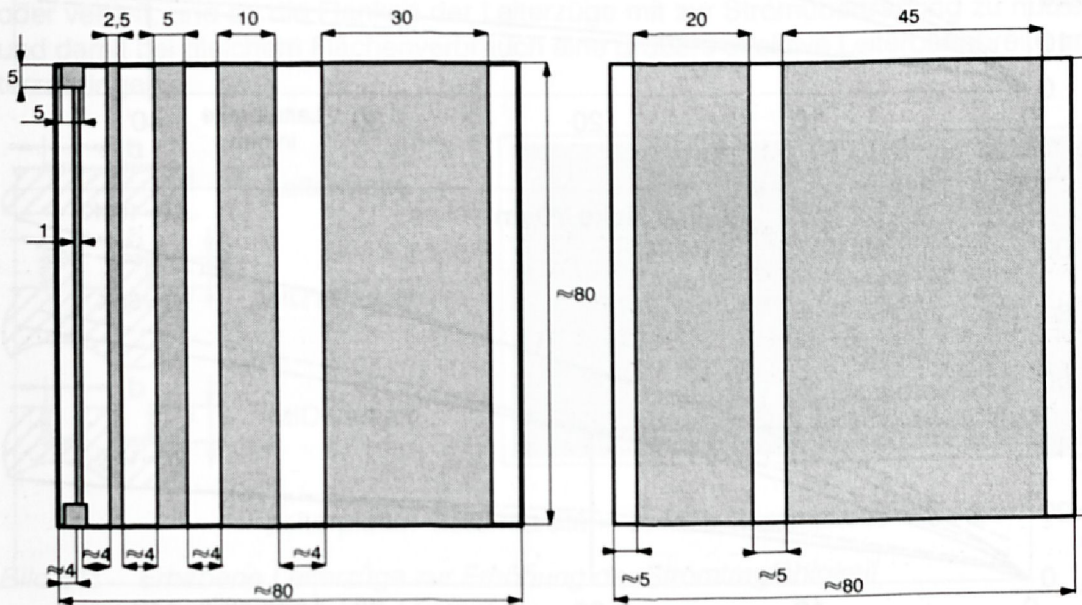


Bild 48: Layout 2 zur Bestimmung der Stromtragfähigkeit von Thermoplastsubstraten

Um die erforderlichen hohen Stromstärken zu erreichen, wurde mit einer zweistufigen Transformatoranordnung gearbeitet. Die Stromstärke wurde mit einem Zangenampèremeter gemessen, die Temperatur mittels Thermofühler und Meßwiderstand.

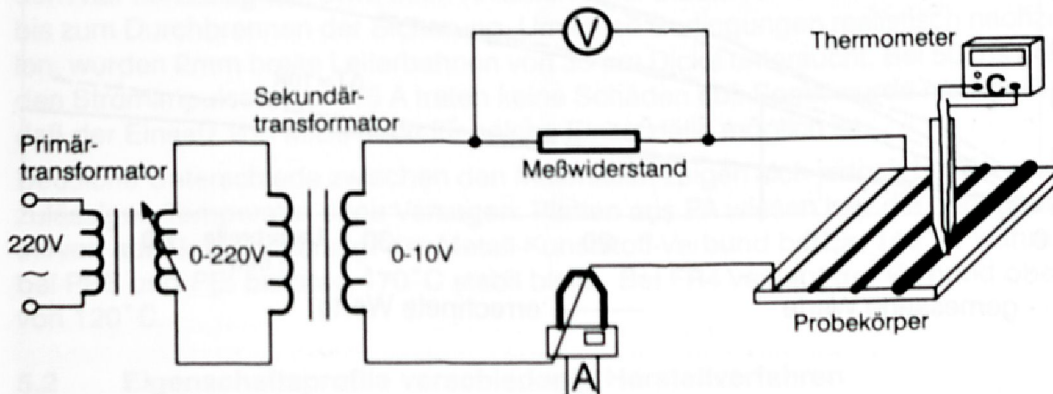


Bild 49: Aufbau der Meßzelle für die Stromtragfähigkeit

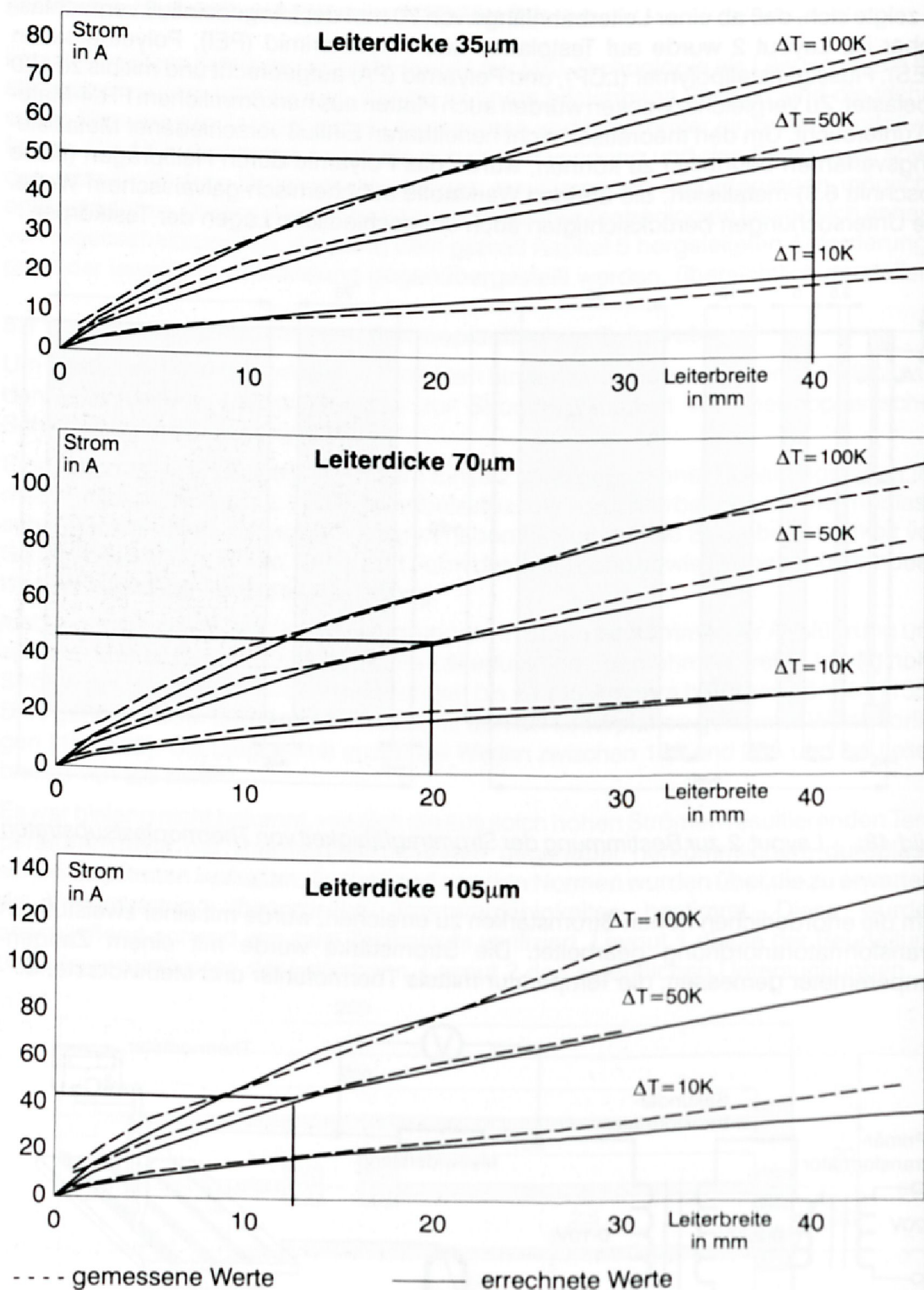
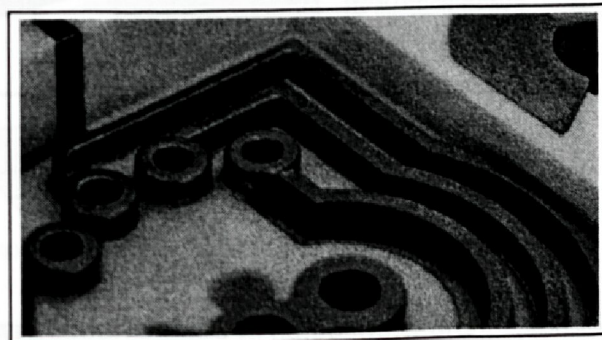
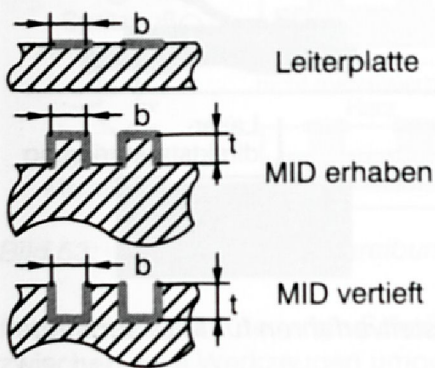


Bild 50: Vergleich unterschiedlicher Stromtragfähigkeiten bei unterschiedlichen Leiterdicken

Die gemessenen Werte machen deutlich, daß der Einsatz thermoplastischer Schaltungsträger auch unter Belastungen möglich ist, bei denen herkömmliche Leiterplatten versagen. In den Versuchen konnte weder ein Einfluß der Substratmaterialien noch des Metallisierungsverfahrens auf die Stromtragfähigkeit festgestellt werden, so daß die Ergebnisse nach Abbildung 50 als allgemein gültig betrachtet werden können. Wie zu erwarten, sind dünne, breite Leiterbahnen aufgrund des besseren Abstrahlungsverhaltens bei gleichem Querschnitt höher belastbar als relativ schmale, dickere Bahnen.

Spritzgegossene Schaltungsträger ermöglichen es, Leiterbahnen nicht nur in einer Ebene mit dem umgebenden Substratmaterial auszubilden, sondern auch erhaben oder vertieft, und so die Flanken der Leiterzüge mit zur Stromübertragung zu nutzen und damit bei gleichem Flächenverbrauch eine größere effektive Leiterbahnbreite unterzubringen.



Leiterplatte: Gesamtbreite = b ; MID: Gesamtbreite = $b + 2xt$

Bild 51: Erhabene Leiterzüge zur Erhöhung der Stromtragfähigkeit
(Mitsui-Pathtek Inc. / Eaton)

Um den Einfluß dieser Ausprägung von Leiterzügen zu bestimmen, wurden frühere Referenzmessungen [42] verifiziert. Es zeigte sich erneut, daß vertiefte Leiterzüge eine höhere Stromtragfähigkeit aufweisen als erhabene, so daß dieser Ausprägung der Vorzug zu geben ist.

Hohe Ströme treten beim Betrieb elektrischer Geräte in der Regel nicht dauernd, sondern nur kurzzeitig auf, etwa beim Anlaufen einer induktiven Last oder im Störfall bis zum Durchbrennen der Sicherung. Um diese Bedingungen realistisch nachzustellen, wurden 2mm breite Leiterbahnen von 35 µm Dicke untersucht. Bei 50 ms dauernden Stromimpulsen von 115 A traten keine Schäden auf. Somit wurde nachgewiesen, daß der Einsatz von MIDs auch für solche Einsatzfälle möglich ist.

Deutliche Unterschiede zwischen den Materialien zeigen sich jedoch bei der maximal zulässigen Temperatur ohne Versagen. Platten aus PA wiesen hier die geringsten Reserven auf. Bei LCP versagt der Metall-Kunststoff-Verbund bei ca. 140°C, während er bei PES und PEI bis etwa 170°C stabil bleibt. Bei FR4 versagt der Verbund oberhalb von 120°C.

5.2 Eigenschaftsprofile verschiedener Herstellverfahren

Zur Herstellung von MIDs sind viele unterschiedliche Herstellverfahren bekannt. Die zahlreichen Variationen wurden im Rahmen einer Patentrecherche untersucht, auf die

in Abschnitt 8 näher eingegangen wird. Die Verfahren lassen sich in Gruppen zusammenfassen [97], von denen die fünf gebräuchlichsten in Abbildung 52 dargestellt und nachfolgend ausführlich beschrieben sind.

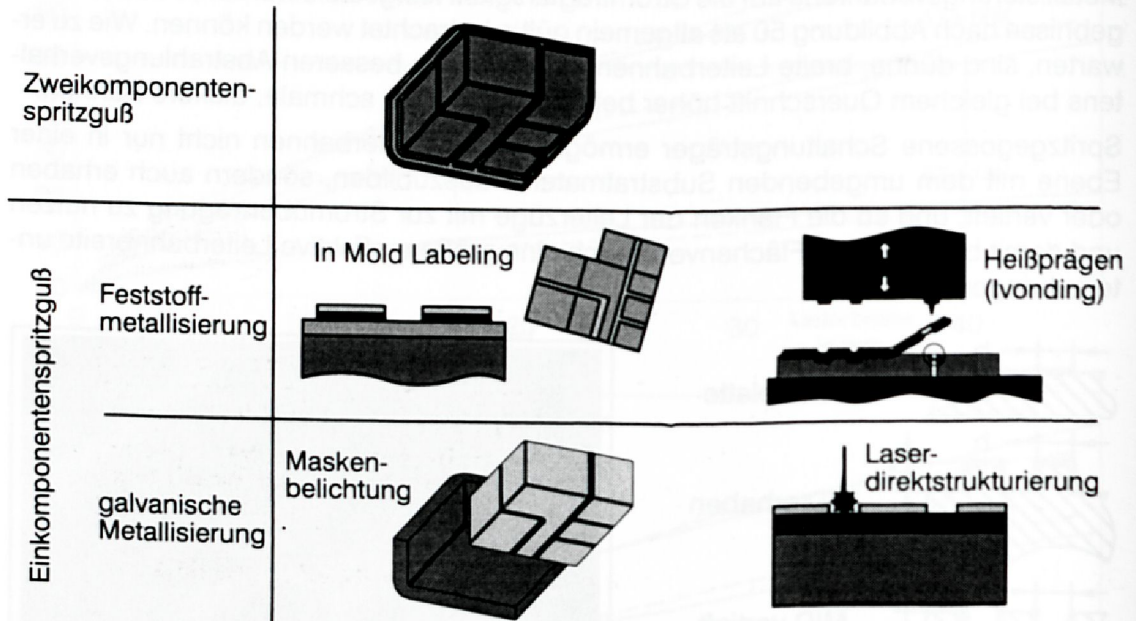


Bild 52: Die wichtigsten in Serie eingesetzten Herstellverfahren für MID-Substrate

Man kann die Verfahren nach der Art der Substratherstellung (Ein- oder Zweikomponentenspritzguß) und dem Aufbringen der Metallisierung (Feststoff oder chemisch-galvanische Verfahren) klassifizieren. Nachfolgend wird zu den gebräuchlichsten Verfahren jeweils eine kurze Beschreibung abgegeben, dann die Stärken und Schwächen des jeweiligen Prozesses herausgearbeitet und abschließend ein Eigenschaftsprofil erstellt.

5.2.1 Zweikomponentenspritzguß

Beim Zweikomponentenspritzguß handelt es sich um eine Verfahrensgruppe, bei der die Differenzen in der Metallisierbarkeit unterschiedlicher Kunststoffe zur Erzielung einer selektiven Beschichtung genutzt werden. Die Metallisierung erfolgt im allgemeinen stromlos volladditiv, kann jedoch bei Bedarf galvanisch verstärkt werden. Dabei werden externe Brücken zur Stromleitung erforderlich. Diese können über eine Klemmvorrichtung beim Galvanisieren realisiert, aber ggf. auch direkt an die zu metallisierenden Bauteile ankonstruiert und nachträglich entfernt (gebrochen, gestanzt, abgesägt) werden.

Bei den Verfahrensvarianten unterscheidet man zwischen solchen, bei denen die beiden Schüsse direkt nacheinander in einem oder zwei Werkzeugen erfolgen und anschließend die vollständige Metallisierungs-Verfahrensfolge durchgeführt wird und solchen, bei denen der erste Schuß vor dem Umspritzen chemisch behandelt und dadurch katalysiert wird (SKW-Verfahren = **S**ankyo **K**asei **W**iring Board). Da das SKW-Verfahren durch den zwischen die Spritzgußprozesse geschalteten Katalysevorgang logistische Nachteile aufweist, ist davon auszugehen, daß neben technischen Vorteilen, etwa einem Aufräumen des ersten Schusses durch das Katalysieren und ein damit verbundenes besseres Haften des zweiten Schusses, auch patentrechtliche Überlegungen eine wesentliche Rolle bei der Entwicklung des Verfahrens gespielt haben.

Bei den Verfahrensvarianten ohne zwischengeschaltete Katalyse unterscheidet man noch das PCK-Verfahren (nach der entwickelnden Firma "Printed Circuit Board Kollmorgen" genannt), das mit palladiumdotierten Werkstoffen für den metallisierbaren Schuß arbeitet, und solchen Verfahren, die ohne zusätzliches Katalysieren metallisierbare Materialien sind, etwa bestimmte Polyamid-Typen.

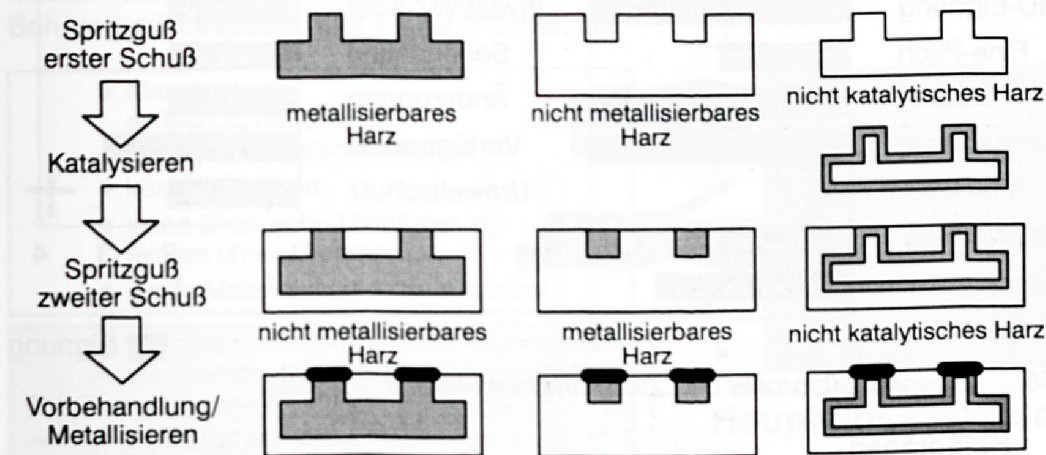


Bild 53: Verfahrensbeschreibung Zweikomponentenspritzguß (nach[66])

In der Praxis wird der erste Schuß gespritzt und als Einlegeteil behandelt, d.h. er wird zwischen zwei Werkzeugen umgesetzt. Bis jetzt ist keine Serienanwendung bekannt, bei der beide Schüsse auf einer Maschine erfolgen. Durch die komplexe Geometrie der Leiterbahnführung auf den meisten Zweischuß-MIDs würde ein Schaltschieber- oder Drehwerkzeug so aufwendig, daß das manuelle oder automatisierte Umsetzen des Vor-spritzlings in die Form für den zweiten Schuß bislang wirtschaftlicher ist.



Bild 54: Merkmale des Zweifachspritzgusses

Aus der sehr hohen möglichen geometrischen Komplexität, dem hohen Aufwand beim Werkzeugbau und der Grenzen durch die Strukturierung während des Spritzgußprozesses ergibt sich als hauptsächliches Einsatzgebiet für die verschiedenen auf dem Zweikomponentenspritzguß aufbauenden Verfahren der Bereich von Baugruppen mit relativ

wenigen, jedoch sehr komplex geformten Verbindungen bei hohen Stückzahlen. Eine weitere Domäne der Zweikomponentenverfahren ist die Realisierung von Steckverbindern und anderen stark dreidimensional geformten Verbindungselementen.

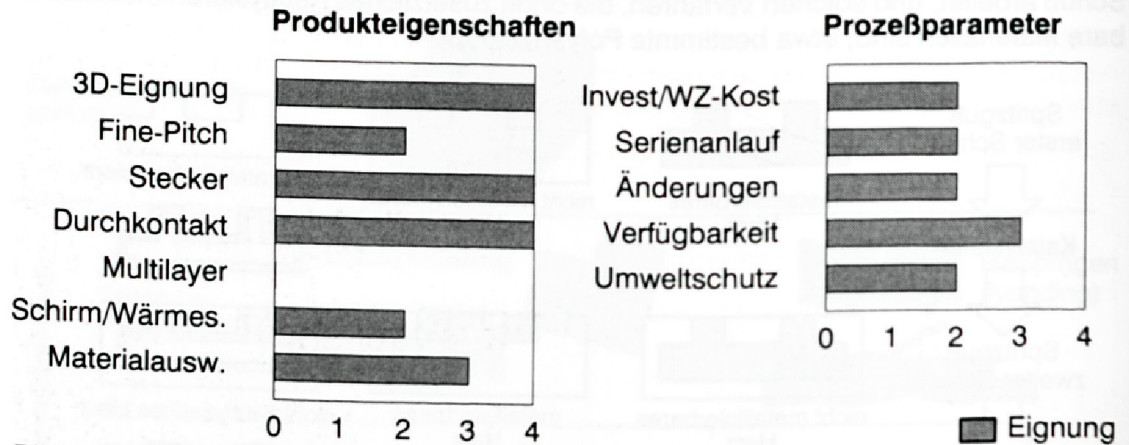


Bild 55: Eigenschaftsprofile des Zweikomponentenspritzgusses

5.2.2 Heißprägen

Beim Heißprägen wird eine speziell galvanisch hergestellte, leicht abscherbare Kupferfolie über einen strukturierten Stempel auf das Substrat aufgebracht und mit diesem verbunden. Durch die Entwicklung einer speziell aufgerauten Prägefolie [20] wurde es möglich, eine große Palette verschiedener Kunststoffe haftfest zu beprägen. Ein großer Vorteil des Heißprägens ist die schnelle Taktzeit von nur etwa 1 Sekunde. Auch die erforderlichen Investitionen beschränken sich auf eine Prägepresse und - je nach erforderlichem Automatisierungsgrad - entsprechende Handhabungseinrichtungen. Auch das Fehlen einer naßchemischen Behandlung im Metallisierungsbetrieb ist günstig zu werten. Die überschüssige Folie kann bei der Herstellfirma rezykliert werden.

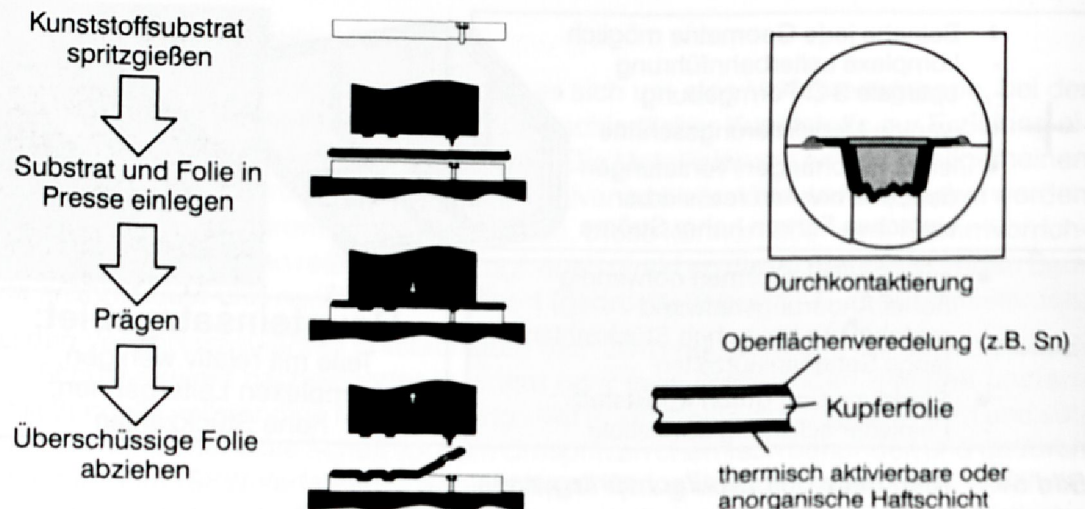


Bild 56: Verfahrensfolge beim Heißprägen

Wichtigste Grenzen beim Heißprägen sind zum einen die Kinematik des Stempels, welche die erreichbare Dreidimensionalität einschränkt, und zum anderen die Struktur-

rung durch Abscheren des Metalls, die eine untere Grenze für die Strukturfeinheit setzt. Aus beiden Einschränkungen ergibt sich z.B., daß Steckerstifte nur sehr schwierig realisierbar sind. Sie müssen in der Regel gesondert in das Substrat eingebracht werden, z.B. über Einpressen. Auch Durchkontaktierungen sind nur mit Zusatzmaßnahmen realisierbar, da die Folie zwar von beiden Seiten in das Loch geprägt werden kann, sich die beiden Folienabschnitte jedoch nicht unbedingt kontaktsicher berühren. Ein Füllen der Bohrung mit Leitpaste oder Lot ist erforderlich.

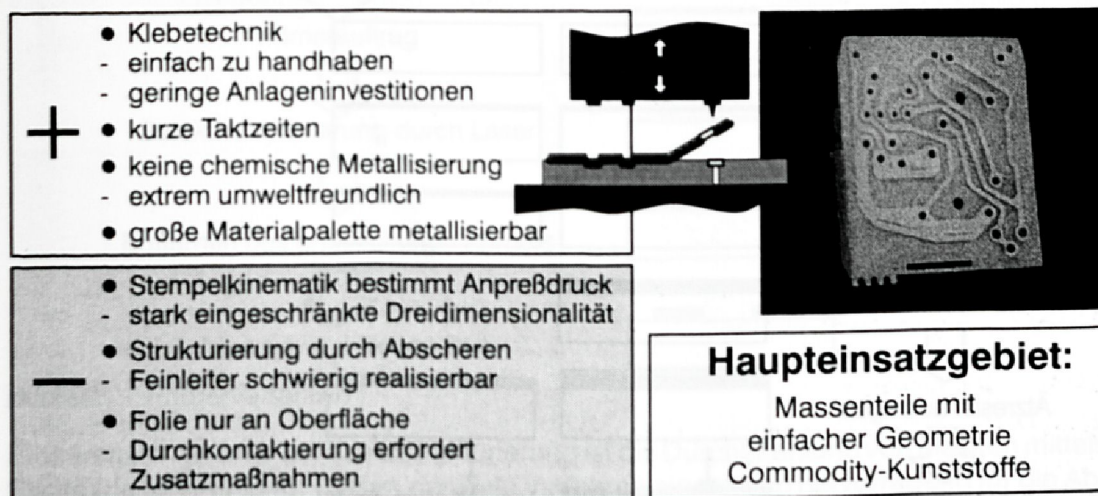


Bild 57: Merkmale des Heißprägeverfahrens

Aus den spezifischen Vor- und Nachteilen des Heißprägeverfahrens ergibt sich seine Eignung insbesondere für den Einsatz bei Massenteilen mit relativ einfacher Geometrie. Die Unabhängigkeit von chemischen Metallisierungsverfahren und die geringe Belastung der Basismaterialien prädestiniert das Verfahren auch für den Einsatz bei Commodity-Kunststoffen.

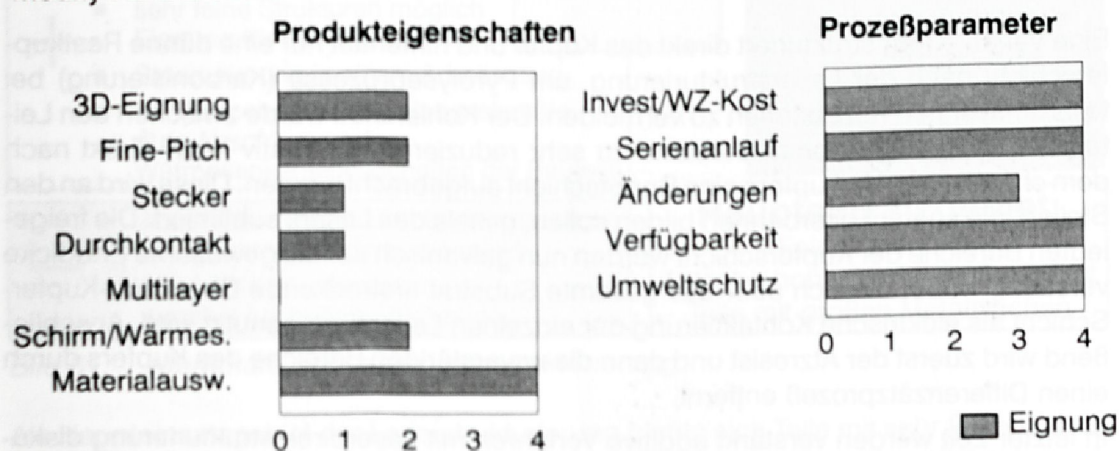


Bild 58: Eigenschaftsprofile des Heißprägens

5.2.3 Laserstrukturierung

Von der Laser-Direktstrukturierung ist eine Vielzahl von Varianten bekannt. Das gebräuchlichste Verfahren ist das von Siemens entwickelte SIL-Verfahren [50]. Nach dem

Aufbringen einer chemischen Grundverkupferung von einigen wenigen μm wird die Kupferschicht galvanisch auf das gewünschte Endmaß verstärkt. Anschließend wird auf galvanischem Wege eine Zinnschicht als anorganischer Ätzresist aufgebracht. In diese Zinnschicht koppelt beim anschließenden Strukturieren, bei dem lediglich die Isolationskanäle freigelegt werden, der Nd:YAG-Laser ein. Das in den Isolationskanälen freigelegte Kupfer kann dann bis auf den Kunststoff abgeätzt und so die Leiterbahnen isoliert werden. Statt Zinn kann auch ein organischer Ätzresist eingesetzt werden [129].

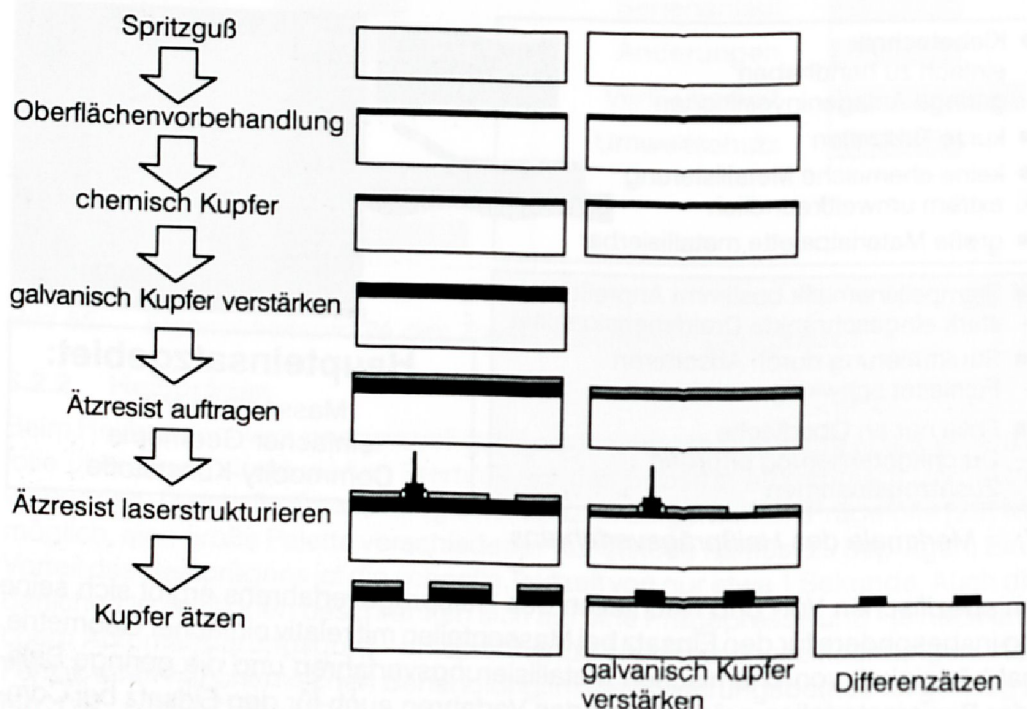


Bild 59: Verfahrensketten bei der Laserdirektstrukturierung

Eine Variante [66] strukturiert direkt das Kupfer und hinterläßt nur eine dünne Restkupferschicht nach der Laserstrukturierung, um Pyrolyseprozesse (Karbonisierung) bei teilaromatischen Kunststoffen zu vermeiden. Der Kohlenstoff würde zwischen den Leiterbahnen den Isolationswiderstand zu sehr reduzieren. Alternativ kann direkt nach dem chemischen Verkupfern eine Resistschicht aufgebracht werden. Diese wird an den Stellen, die später Leiterbahnen bilden sollen, mittels des Lasers sublimiert. Die freigelegten Bereiche der Kupferschicht werden nun galvanisch auf die gewünschte Enddicke verstärkt, wobei die sich über das gesamte Substrat erstreckende Chemisch-Kupfer-Schicht als elektrische Kontaktierung der einzelnen Leiterzüge genutzt wird. Anschließend wird zuerst der Ätzresist und dann die unverstärkten Bereiche des Kupfers durch einen Differenzätzprozeß entfernt.

In letzter Zeit werden verstärkt additive Verfahren mit Laserdirektstrukturierung diskutiert [31, 57], etwa das Auftragen und anschließende selektive Aktivieren eines Katalysators mit Laserstrahlen oder das selektive Aktivieren im Kunststoff enthaltener Zuschläge. Ein wesentlicher Vorteil dabei ist die im Vergleich zum Abtragen des metallischen oder organischen Resists wesentlich geringere erforderliche Aktivierungsenergie. Die Strukturierung erfolgt in allen bisher genannten Fällen sequentiell, d.h. durch Abfahren der Strukturen mit dem Laserstrahl. Dies ermöglicht eine sehr hohe Flexibilität der Struk-

turierung, da für eine Layoutänderung lediglich die Strahlführung der Laseranlage neu programmiert werden muß. Ein neues Werkzeug o.ä. ist nicht erforderlich.

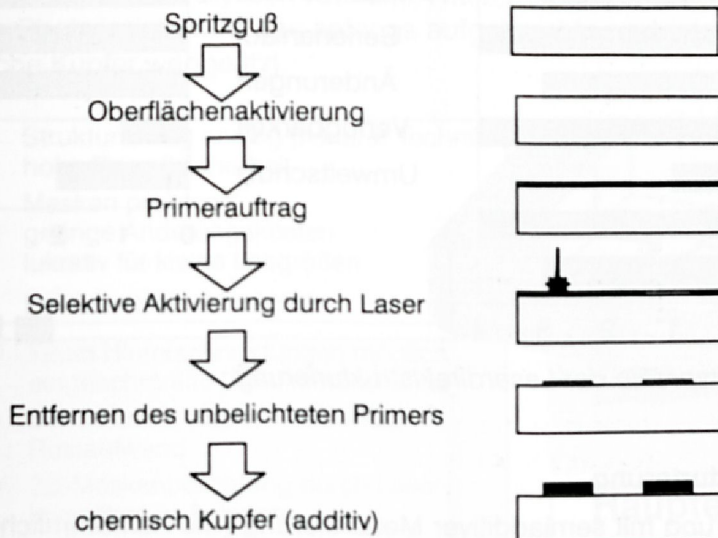


Bild 60: Primerverfahren

Eine weitere Variante der Laserstrukturierung ist die Durchstrahlung von Masken mittels Excimerlaserstrahlung. Dieses parallele Verfahren eignet sich hervorragend für die Abbildung feinsten Strukturen, ist aber nach dem derzeitigen Stand der Technik nur für relativ kleine Bereiche und ebene Strukturen verfügbar. Eine Anlage zum Strukturieren dreidimensionaler Substrate wird gerade entwickelt [30].

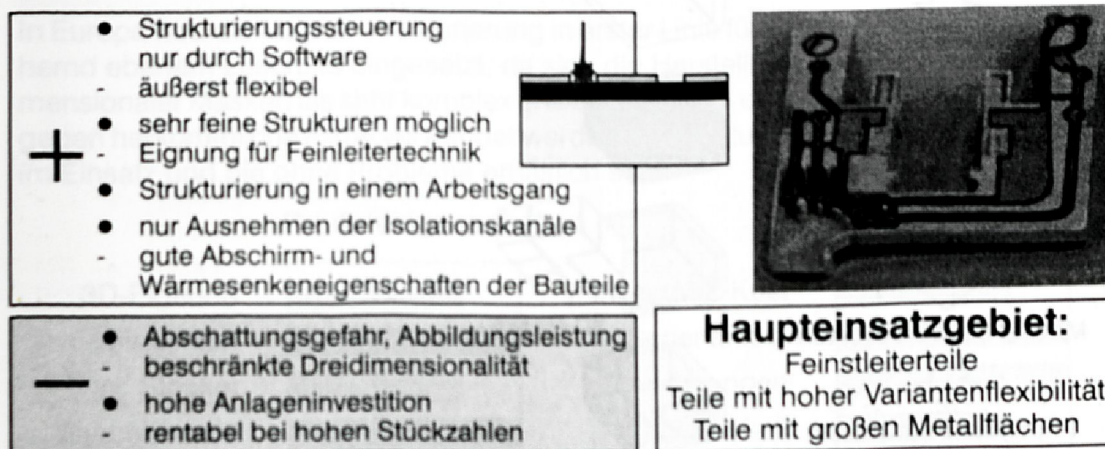


Bild 61: Merkmale der Laserdirektstrukturierung

Als Haupteinsatzgebiet der Laserstrukturierung bieten sich Teile mit sehr feinen Leiterstrukturen an, die in einer Vielzahl von Varianten gefertigt werden sollen. Kleine Losgrößen sind problemlos realisierbar. Ein weiterer Vorteil des subtraktiven Verfahrens kann sein, daß relativ große Metallflächen stehen bleiben, die zur elektromagnetischen Abschirmung eingesetzt werden können. Dies kann jedoch bei anderen Einsatzfeldern auch zum Problem werden, wenn etwa unter Netzspannung erforderliche Luft- und Kriechstrecken nur schwierig erreicht werden können.

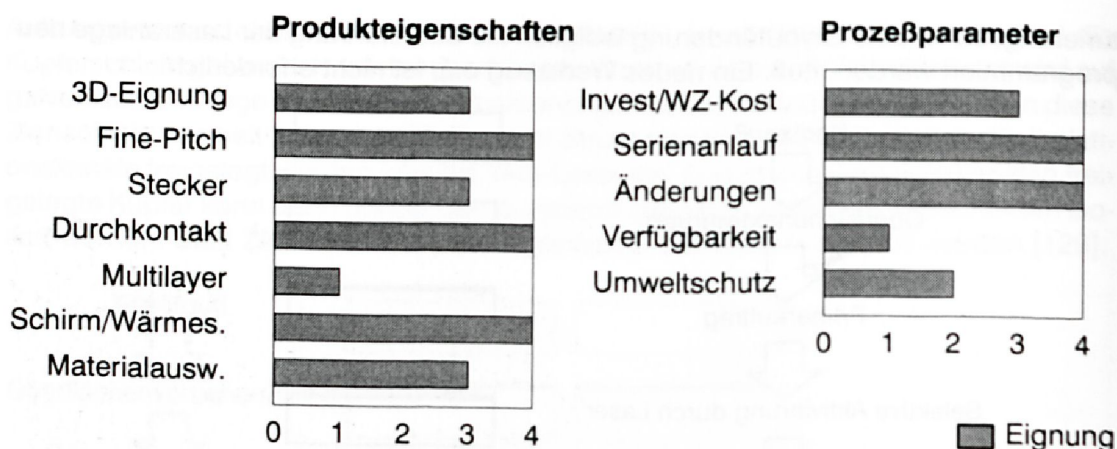


Bild 62: Eigenschaftsprofile der Laserdirektstrukturierung

5.2.4 Maskenstrukturierung

Die Maskenstrukturierung mit semiadditiver Metallisierung (wie herkömmliche Leiterplatten) ist das älteste bekannte Herstellverfahren für räumliche Schaltungsträger. Nach dem Spritzgießen des Kunststoffteils und der Oberflächenaktivierung erfolgt eine ganzflächige chemische Grundmetallisierung mit einer ca. $2\mu\text{m}$ dünnen Kupferschicht. Darauf wird ein elektrophoretischer Photoresist aufgebracht. Das Aufbringen des Resists ist ein selbstlimitierender Prozeß, so daß eine gleichmäßige Schichtdicke entsteht.

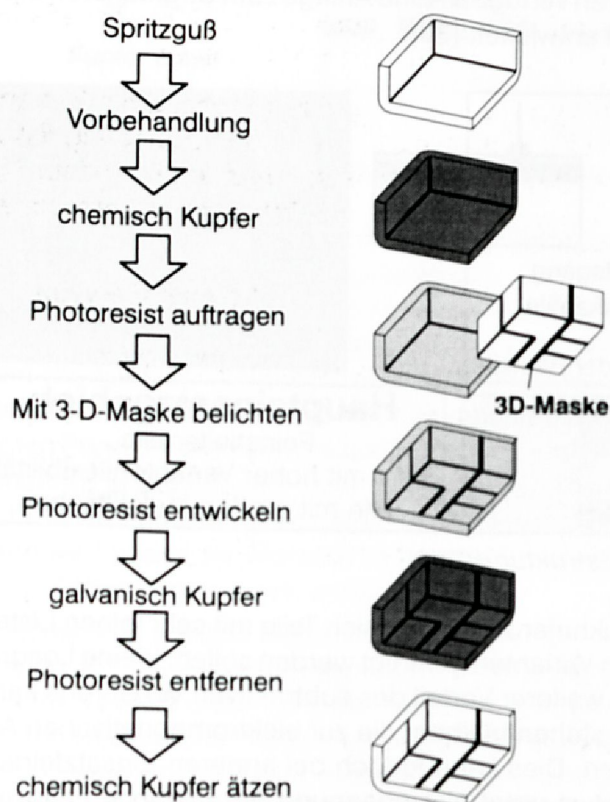


Bild 63: Verfahrenskette beim Maskenstrukturieren mit semiadditiver Metallisierung

Das Belichten erfolgt mit Hilfe einer Photomaske und mit UV-Licht. Der belichtete Photoresist wird entwickelt und im nächsten Schritt die Leiterbahngeometrie zur gewünschten Schichtdicke elektrolytisch verstärkt. Nach Aufbringen einer Ätzmaske und Entfernen des Photoresists wird das anfangs aufgebrachte und jetzt nicht mehr benötigte chemische Kupfer weggeätzt.

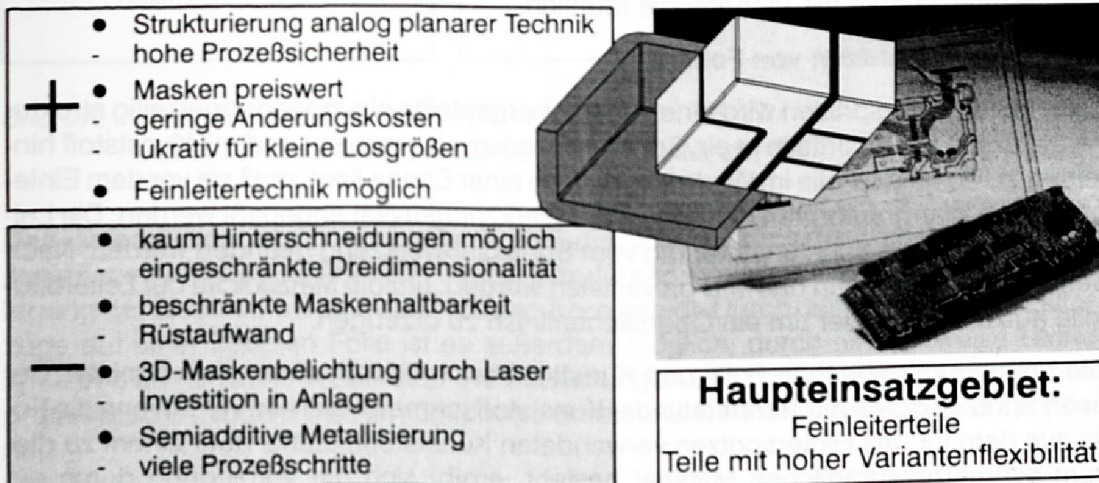


Bild 64: Merkmale der Maskenstrukturierung

Mit dem Maskenbelichtungsverfahren sind feine Leiterbahnbreiten ($\geq 150\mu\text{m}$) möglich. Durchkontaktierungen sind problemlos zu erzeugen. Die Ausführung der Photomasken in zwei Hälften bedingt allerdings Einschränkungen bei der Komplexität der Leiterbahngeometrie, da die Photomaske in der Trennebene nicht am MID anliegt.

In Europa wird die Maskenstrukturierung in erster Linie für Teile mit ebenem oder annähernd ebenem Leiterbild eingesetzt, da sich die Herstellung und Handhabung dreidimensionaler Masken als sehr komplex erwiesen hat. Bei ebenem Leiterbild können hingegen herkömmliche Filme verwendet werden, wie sie zur Belichtung von Leiterplatten im Einsatz und die ohne Probleme erhältlich sind.

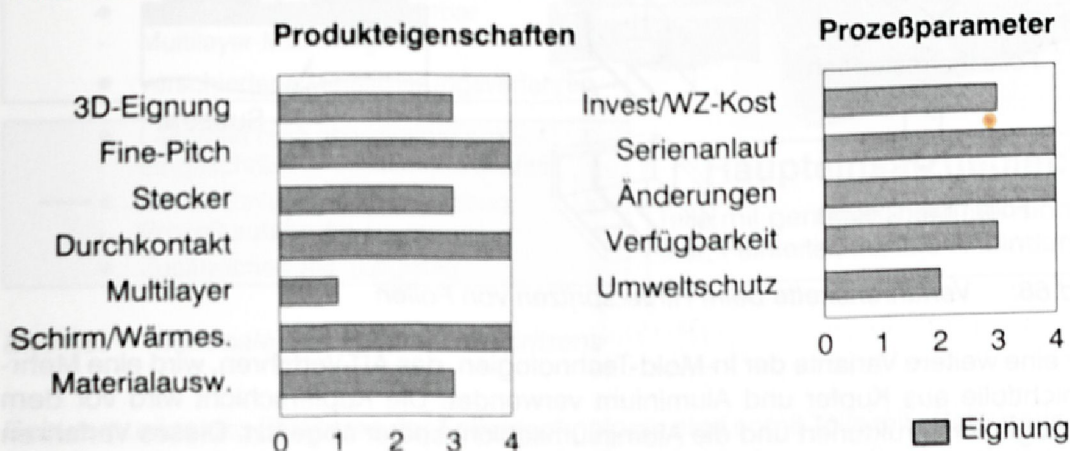


Bild 65: Eigenschaftsprofile der Maskenstrukturierung

Wesentliche Vorteile der Maskentechnologie liegen in ihrer weitgehenden Analogie zur Strukturierung herkömmlicher Leiterplatten, was das Risiko bei der Einführung dieser

Technologie relativ gering hält, und in der Änderungsflexibilität, die bei planaren Filmen ebenso hoch ist wie für konventionelle Leiterplatten.

Die Eigenschaften der Maskenstrukturierung und ihrer Varianten führen als Haupteinsatzgebiete zu feinstrukturierten Teilen mit hoher Variantenflexibilität. Gelingt es, das Leiterbild über ebene Filme abzubilden, ist auch schon bei geringer Stückzahl ein lohnender Einsatz der MID-Technologie möglich.

5.2.5 Hinterspritzen von Folien

Beim Folienhinterspritzen wird eine separat hergestellte ein- oder doppelseitig strukturierte flexible Leiterbildfolie in ein Spritzgießwerkzeug eingelegt und mit Kunststoff hinterspritzt. Wenn die Folie im Werkzeug nicht in einer Ebene liegt, muß sie vor dem Einlegen durch Warmumformen der Kontur der Werkzeugkavität angepaßt werden. Die Leiterbahngeometrie kann unabhängig vom Spritzgießwerkzeug geändert werden. Nach dem Spritzgießen kann das MID galvanisiert werden, um die Metalldicke der Leiterbildfolie aufzubauen, oder um ein Oberflächenfinish zu erzeugen.

Die Verbindung zwischen Folie und Kunststoff erfolgt durch einen Haftvermittler, der beim Spritzen durch die Temperatur der Kunststoffschmelze aktiviert wird. Wenn die Folie aus dem für das Hinterspritzen verwendeten Kunststoffmaterial oder einem zu diesem schmelzeverträglichen Material besteht, ergibt sich die Verbindung durch ein leichtes Anschmelzen und Verschweißen der Folie mit dem Kunststoff.

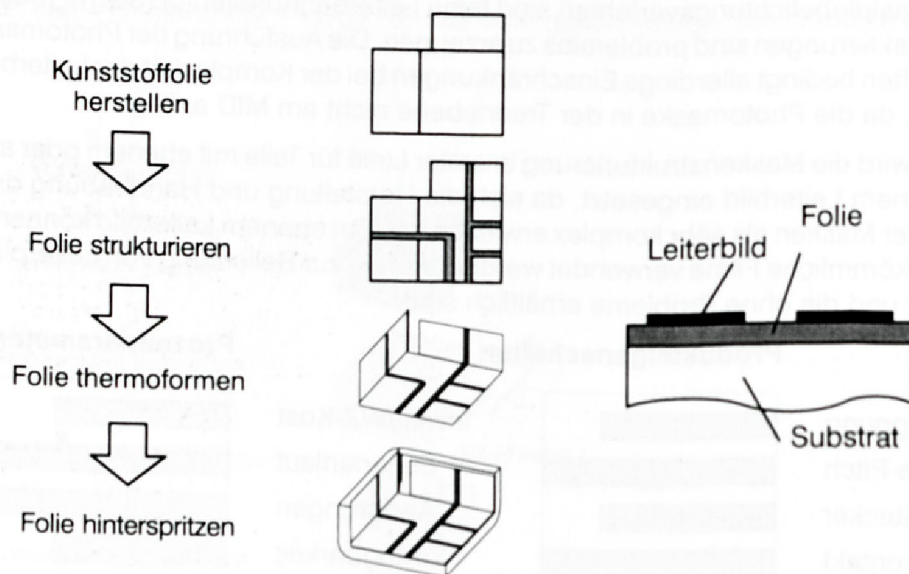


Bild 66: Verfahrenskette beim Hinterspritzen von Folien

Für eine weitere Variante der In-Mold-Technologien, das AIT-Verfahren, wird eine Mehrschichtfolie aus Kupfer und Aluminium verwendet. Die Kupferschicht wird vor dem Spritzgießen strukturiert und die Aluminiumschicht später abgeätzt. Dieses Verfahren erlaubt den Einsatz von PPS als Substratmaterial, da es auf einer mechanischen Verbindung zwischen Substrat und Metallisierung basiert. Bei einer Variante, dem Transfer Decal-Verfahren, wird das Leiterbild von einer Trägerfolie übertragen und diese Trägerfolie nach dem Spritzgießen vom Werkstück entfernt.

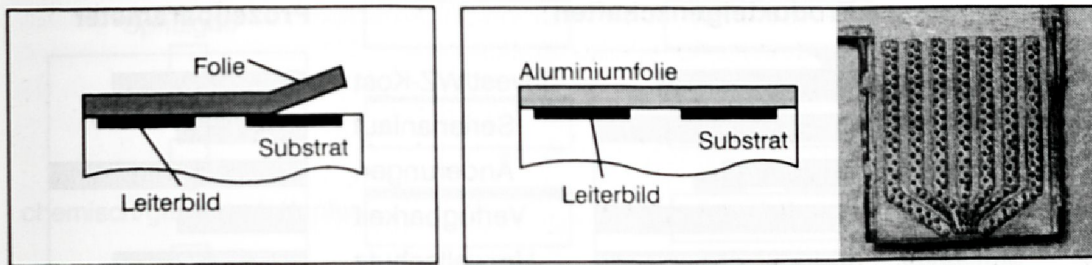


Bild 67: Transfer-Decal-Verfahren (links) und AIT-Verfahren (rechts, mit Druckknopfstruktur der Folie)

Das Hinterspritzen erlaubt als großen Vorteil, die Strukturierung des Leiterbildes auf verschiedene Weise an der ebenen Folie durchzuführen, bevor die dreidimensionale Festlegung der Geometrie durch das Hinterspritzen erfolgt. Durch das Vorliegen der Leiterzüge auf einer flexiblen Folie ist es außerdem möglich, durch eine teilweise Hinterspritzung auf einfache Weise Starr-Flex-Schaltungen ohne aufwendige Laminierungsprozesse zu erzeugen. Dies ermöglicht die einfache Einbindung des MID in die Peripherie.

Ein weiterer Vorteil der Folientechnologie liegt darin, daß kein ganzes (großes) MID metallisiert werden muß, wenn nur einige Leiterbahnen benötigt werden. Nachteilig ist vor allem, daß das Leiterbild in abwickelbarer Form vorliegen muß, und daß im Spritzgußprozeß die Folie als labiles Einlegeteil gehandhabt werden muß.

<p>+</p> <ul style="list-style-type: none"> • Strukturierung erfolgt zweidimensional - bekannte Prozesse, einfache Anlagen - hohe Prozeßsicherheit • Filmgröße kaum beschränkt - große MIDs wirtschaftlich herstellbar • Film mehrlagig beschichtbar - Multilayer-MID möglich • verschiedene Metallisierungsverfahren 	
<p>—</p> <ul style="list-style-type: none"> • Leiterbild muß abwickelbar sein - eingeschränkte Dreidimensionalität • labiles Einlegeteil im Werkzeug - Prozeß aufwendig • Zusätzliches Teil (Logistik) 	<p>Haupteinsatzgebiet:</p> <p>Teile mit geringer Dreidimensionalität, Feinleiter, flexible Anbindung</p>

Bild 68: Merkmale des Folienhinterspritzens

Schwerpunkte des Einsatzes der Folientechnologie sind somit Teile mit relativ geringer dreidimensionaler Ausprägung und einer flexiblen Anbindung an die Umgebung, bei denen ein komplexes, feines Leiterbild gefordert ist, das in der Ebene kostengünstig strukturiert werden kann, bevor die Folie beim Hinterspritzen dreidimensional verformt wird.

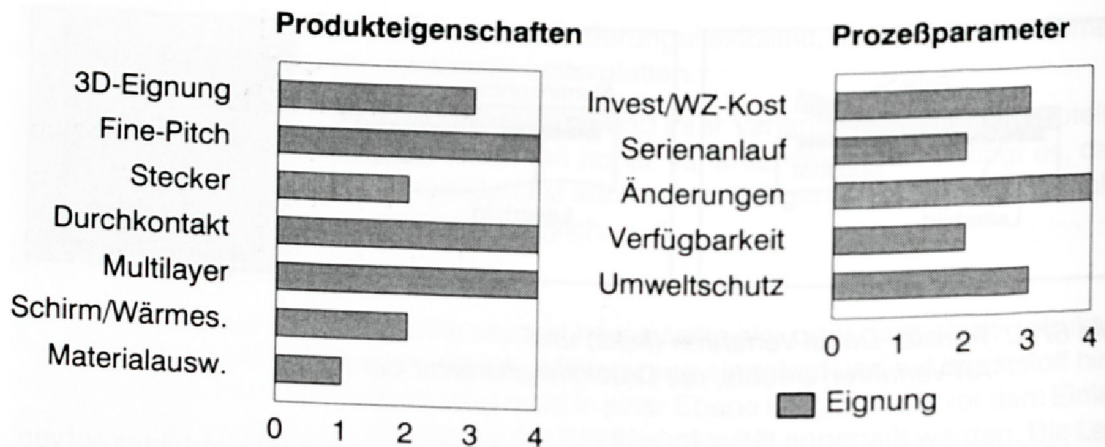


Bild 69: Eigenschaftsprofile Folien hinterspritzen

5.2.6 Mechanische Strukturierung und Siebdruck

Neben den fünf in den vorangegangenen Kapiteln vorgestellten gebräuchlichsten Familien von Strukturierungsverfahren existieren noch einige weitere. Da sie jedoch sehr fall-spezifisch eingesetzt werden, werden sie hier zusammenfassend beschrieben. Das Aufstellen eines Eignungsprofils für diese speziellen Verfahren erscheint aufgrund der spezifischen Randbedingungen des jeweiligen Einsatzes nicht sinnvoll.

Bei den mechanischen Strukturierungsverfahren werden zwei Varianten unterschieden, die sich nur geringfügig voneinander unterscheiden. Für beide Verfahren gilt, daß der Einkomponentenspritzling ganzflächig metallisiert wird. Die Strukturierung erfolgt durch Fräsen.

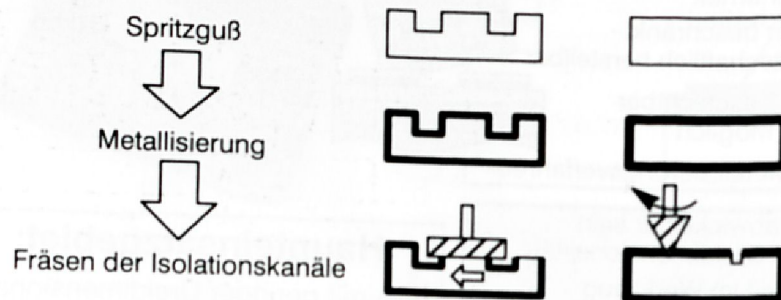


Bild 70: Mechanische Strukturierung

Ein organischer Ätzresist oder ein direkt metallisierbarer Primer kann bei geeigneter Form der Prozeßfläche auch direkt mittels Siebdruck aufgebracht werden. Alternativ kann das Leiterbild im Siebdruckverfahren auch in Form einer Leitpaste direkt auf die unmetallisierte Oberfläche des Spritzgußteils aufgetragen und anschließend ausgehärtet werden.

Zum Aufbringen von Katalysator, Ätzresist oder Leitpaste sind auch andere Druckverfahren, z.B. Tampondruck, denkbar.

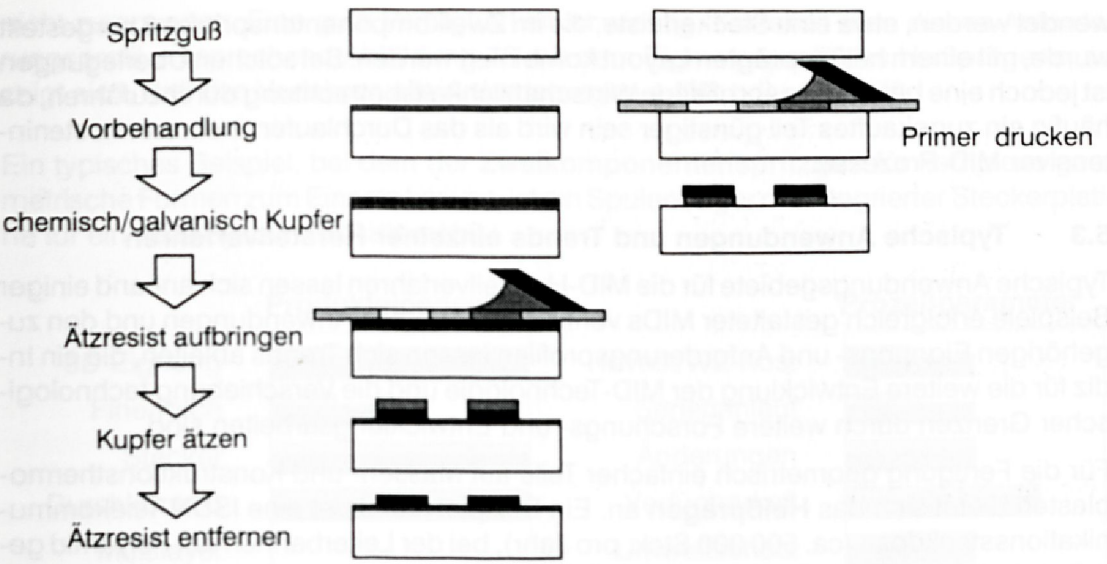


Bild 71: Siebdruck von Ätzresist

5.2.7 Kombinationen von Herstellverfahren

In bestimmten Situationen kann ein einzelnes Herstellverfahren nicht die optimale Lösung bieten. Dann ist es sinnvoll, mehrere Prozesse zu kombinieren. Z. B. kann ein Anschlußmuster per Heißprägen strukturiert und anschließend teilweise für das Aufbringen eines Fine-Pitch-Bauelementes nachbearbeitet werden oder es kann in einem Zweischußteil eine durchgehend metallisierte Fläche vorgesehen sein, die über eine Maske für verschiedene Layoutvarianten unterschiedlich strukturiert wird. Folgende Kombinationen erscheinen hierbei sinnvoll:

Verfahrenskombination	Pins einpressen	Leadframe/Pins einspritzen	Folie hinter-spritzen	Primer-technologie	Masken-strukturierung	Laser-direkt-strukturierung	Heiß-prägen
Zweikomponentenspritzguß	x	x	x	-	x	x	-
Heißprägen	x		-	addit.	subtr.	subtr.	
Laserdirektstrukturierung	x	addit.	-	x	-		
Maskenstrukturierung	x	x	x	x			
Primertechnologie	x	-	x				
Folie hinterspritzen	x	-					
Leadframe / Pins einspritzen	-						

addit.: nur additiv sinnvoll
subtr.: nur subtraktiv sinnvoll

Bild 72: Kombinationsmöglichkeiten von Strukturierungsverfahren

In der Tabelle als sinnvoll dargestellte Kombinationen betreffen ein *direktes* Aufeinander-treffen bzw. Kontaktieren der Technologien untereinander. Darüberhinaus können natürlich an einem Teil unabhängig voneinander mehrere Verfahren gleichzeitig ver-

wendet werden, etwa eine Steckerleiste, die im Zweikomponentenspritzguß hergestellt wurde, mit einem heißgeprägten Layout kombiniert werden. Bei solchen Überlegungen ist jedoch eine besonders sorgfältige Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durchzuführen, da häufig ein zugekauftes Teil günstiger sein wird als das Durchlaufen mehrerer kostenintensiver MID-Prozesse.

5.3 Typische Anwendungen und Trends einzelner Herstellverfahren

Typische Anwendungsgebiete für die MID-Herstellverfahren lassen sich anhand einiger Beispiele erfolgreich gestalteter MIDs verifizieren. Aus den Anwendungen und den zugehörigen Eignungs- und Anforderungsprofilen lassen sich Trends ableiten, die ein Indiz für die weitere Entwicklung der MID-Technologie und die Verschiebung technologischer Grenzen durch weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sind.

Für die Fertigung geometrisch einfacher Teile auf Massen- und Konstruktionsthermoplasten bietet sich das **Heißprägen** an. Ein Beispiel hierfür ist eine ISDN-Telekommunikationssteckdose (ca. 500 000 Stck. pro Jahr), bei der Leiterbahnen auf Polyamid geprägt sind. Die MID-Technologie ermöglicht es bei dieser Anwendung, die Endgeräte-Anschlußbuchsen schräg zu stellen, während die Anschlußklemme für die Verdrahtung gerade bleibt und so die Dose einfach zu installieren ist. Die Anschlußklemmen werden als separate Bauteile aufgebracht.

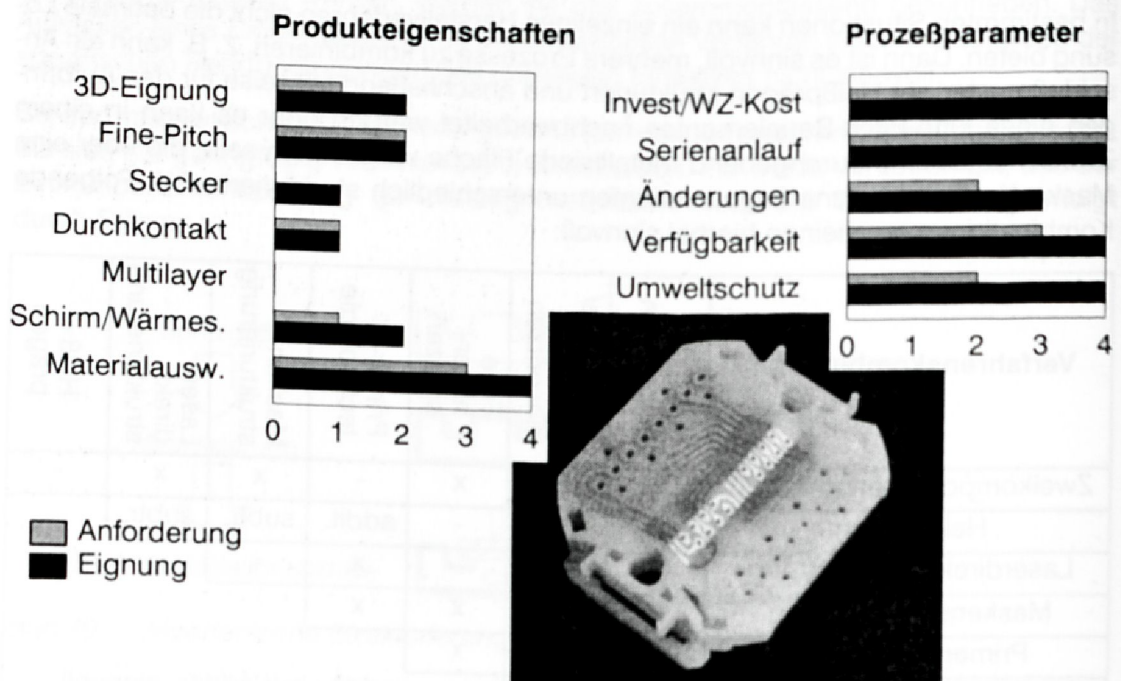


Bild 73: Anforderungs- und Eigenschaftsprofil Telekommunikations-Anschlußdose in Heißprägetechnologie auf Polyamid (A. Ackermann GmbH)

Das Produkt ist mäßig dreidimensional ausgeprägt und hat einen mittleren Pitch. Ange-spritzte Stecker oder echte Durchkontaktierungen sind nicht vorhanden. Eine Abschirmung ist nur bei einigen Varianten erforderlich, der Hersteller möchte jedoch auf eine möglichst breite Materialpalette zurückgreifen können. Die Fertigung sollte schnell und mit geringem Investitionsvolumen anlaufen können, umfangreiche Änderungen sind

nicht zu erwarten. Eine gute Verfügbarkeit ist wichtig. Korreliert man dieses Anforderungsprofil entsprechend Abbildung 73 mit dem Eignungsprofil des Heißprägens, so zeigt sich, daß das Verfahren alle Anforderungen erfüllt oder übertrifft.

Ein typisches Beispiel, bei dem der **Zweikomponentenspritzguß** für komplexe geometrische Formen zum Einsatz kommt, ist ein Spulenträger mit integrierter Steckerplatine für ein ABS-System im Automobil.

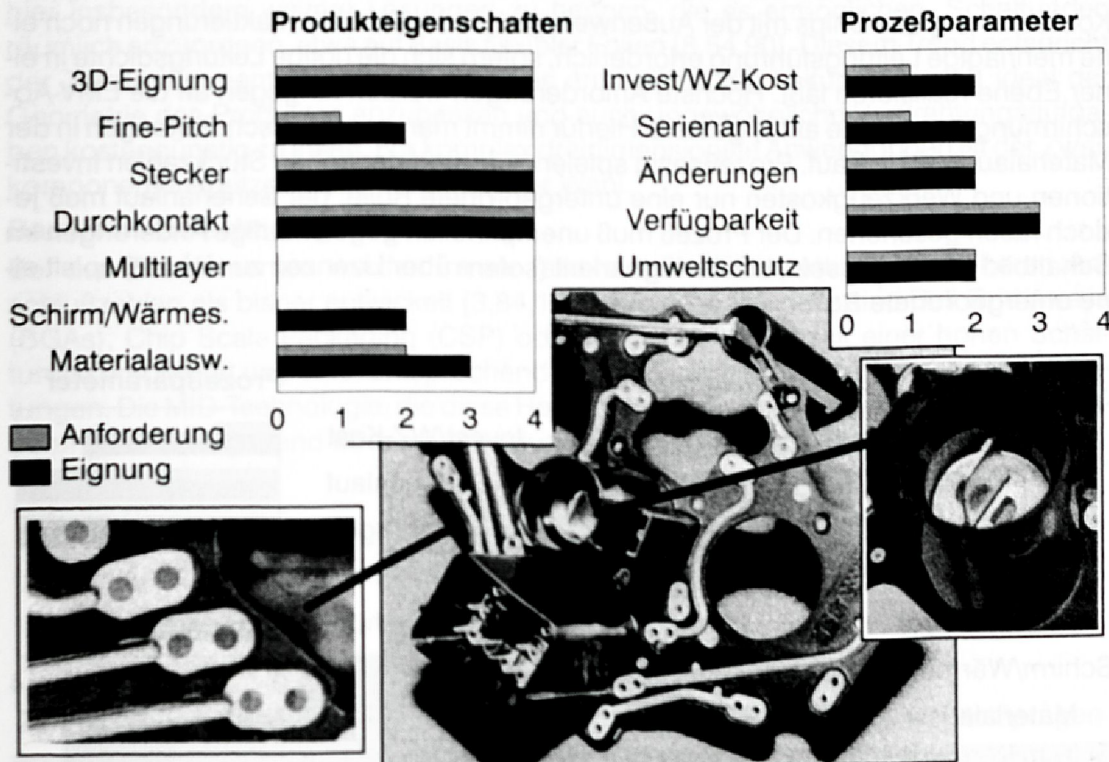


Bild 74: Anforderungs- und Eigenschaftsprofil Spulenträger
(Inotech / AHC Oberflächentechnik / Siemens / Wabco Fahrzeugbremsen)

Die äußere Form der Baugruppe ist sehr komplex, die Leiterzüge jedoch relativ grob. Steckerstifte müssen integriert werden, was hinsichtlich der Leitungsführung Durchkontaktierungen erfordert. Es ist nur eine Lage Leitungen und keine Abschirmung erforderlich. Aufgrund der Stückzahlen und der langfristigen Vorausplanung spielen Werkzeugkosten und Serienanlaufzeiten eine untergeordnete Rolle. Änderungen treten nicht häufig auf, hinsichtlich der Verfügbarkeit wird vom Kunden eine enge Entwicklungspartnerschaft mit dem Zulieferer und somit eine gewisse Abhängigkeit akzeptiert. Umweltaspekte spielen die im Automobilbau übliche Rolle. Auch hier läßt sich durch Korrelation des Anforderungsprofils mit dem Eigenschaftsprofil des Zweikomponentenspritzgusses die Entscheidung für das Verfahren als richtig verifizieren. Alle Anforderungen werden erfüllt bzw. übertroffen. Bei der vorgegebenen geometrischen Form des Bauteils wären die Werkzeuge für die in herkömmlicher Bauweise erforderlichen Stanzgitter sehr teuer gewesen. Der Übergang zur MID-Technologie konnte hier etwa 60% Kosten einsparen [21]. In Abbildung 74 kann man gut erkennen, wie die Möglichkeit zur dreidimensionalen Ausformung der Leiterzüge genutzt wurde.

Ein gut geeignetes Verfahren für gering dreidimensional ausgeprägte Bauteile mit feinen Strukturen ist die **Laserdirektstrukturierung**. Ein Beispiel, das auch den Einsatz der MID-Technologie zur Gestaltung von Bauelementgehäusen demonstriert, ist das PSGA (Polymer Stud Grid Array) der Firma Siemens [11]. Das Anforderungsprofil ist produkt- wie prozeßseitig typisch für die Halbleiterindustrie. Einer geringen räumlichen Ausprägung des Packaging steht eine hohe Anforderung hinsichtlich der Anschlußdichte gegenüber. Steckerartige Kontaktelemente treten in Form von "Studs", kleinen Zapfen an der Unterseite zur Verbindung des Bauelementes mit dem Substrat auf. Zur Kontaktierung des Chips mit der Außenwelt sind weder Durchkontaktierungen noch eine mehrlagige Leitungsführung erforderlich, sofern sich die nötige Leitungsdichte in einer Ebene realisieren läßt. Höchste Anforderungen werden hingegen an die EMV-Abschirmung (passiv wie aktiv) gestellt. Hierfür nimmt man gerne Einschränkungen in der Materialauswahl in Kauf. Prozeßseitig spielen aufgrund der hohen Stückzahlen Investitionen und Werkzeugkosten nur eine untergeordnete Rolle, der Serienanlauf muß jedoch rasch geschehen. Der Prozeß muß unempfindlich gegen häufige Änderungen im Schaltbild des Chips sein, die Verfügbarkeit (sofern über Lizenzen zu sichern) spielt eine untergeordnete Rolle.

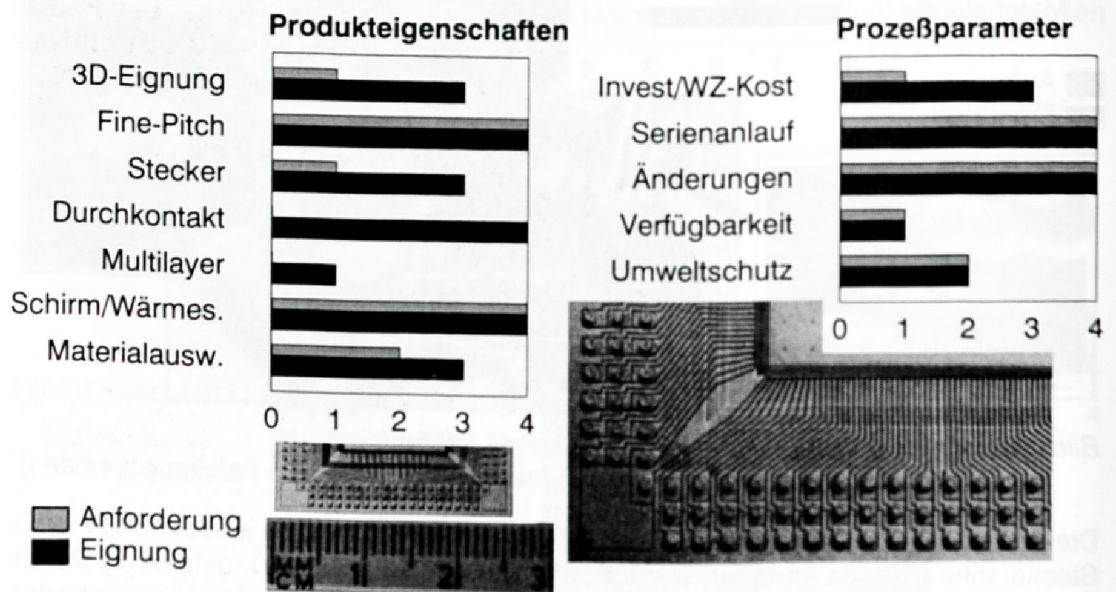


Bild 75: Laserstrukturiertes Fine-Pitch Chipgehäuse Bauart PSGA (Polymer Stud Grid Array [11] (Siemens AG)

Bei der hier vorgestellten Lösung erfüllt die Laserstrukturierung diese Anforderungen ausgezeichnet. Die zum Anschluß des hochpoligen Bauelementes auf einer Leiterplatte - oder einem MID - erforderlichen Beinchen sind als Zapfen direkt als Bestandteil des Polymergehäuses für den Chip mitgespritzt und -metallisiert. Dadurch entfällt die Notwendigkeit des anschließenden Aufbringens von Lotbumps auf das Chipgehäuse, wie bei herkömmlichen BGAs. Die extrem feine Strukturierung der Metalloberfläche mittels des Lasers ermöglicht es, die Umverdrahtung vom Chip zu den Anschlußbahnen in einer einzigen Leitungslage durchzuführen und spart so die Multilayer-Leiterplatte, die anschließend vergossen werden muß.

5.4 Entwicklungstrends der Herstellverfahren

Aus einer Analyse der derzeit weltweit bekannten MID-Anwendungen und einem Vergleich mit älteren Projekten lassen sich im wesentlichen drei Tendenzen ableiten. Diese gehen einher mit den allgemeinen Technologietreibern in der Elektronikproduktion:

Substrattechnologie:

In den letzten Jahren wurde eine Vielzahl neuartiger Substrate entwickelt, um den sich wandelnden Ansprüchen gerecht zu werden [127]. Neben der MID-Technologie sind hier insbesondere weitere Lösungen zu nennen, die es ermöglichen, Schaltungen räumlich anzuordnen, etwa auf Basis flexibler Folien [8,54,90]. Diesem Trend entspricht der Zweikomponentenspritzguß, da er es ermöglicht, die Leitungsführung ideal der Geometrie des Produktes anzupassen und auch ungewöhnliche Verdrahtungsaufgaben kostengünstig zu lösen. Für komplex dreidimensionale Anwendungen ist der Zweikomponentenspritzguß das Verfahren der Wahl.

Bauelementetechnologie:

Bei den Bauelementen werden immer feinere Anschlußstrukturen mit höheren Anschlußzahlen als bisher entwickelt [3,84,108]. Typische Vertreter sind Ball Grid Arrays (BGAs), Chip Scale Packaging (CSP) oder Multichipmodule mit einer hohen Schaltungskomplexität und einer entsprechend großen Zahl an Ein- und Ausgangssignalleitungen. Die MID-Technologie, die diese Herausforderung annimmt, ist die Laserstrukturierung. Für weitgehend ebene Anwendungen mit feinen Strukturen ist sie optimal.

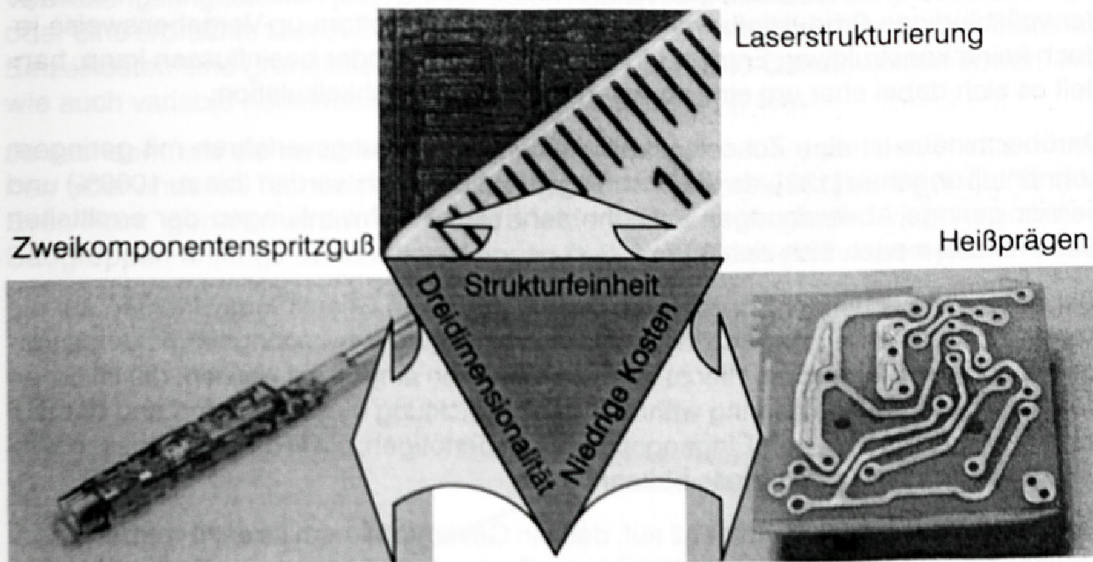


Bild 76: Entwicklungsrichtungen der MID-Technologie und Einsatzgebiete der verschiedenen Herstellverfahren

Kosten:

Der dritte Technologietreiber in der Elektronikproduktion schließlich ist die Kostensituation. Den ständig sinkenden Preisen auf Bauelemente- und Endverbraucherseite muß die Substrattechnologie folgen. Für Anwendungen im Consumerbereich mit hohem Kostendruck ist die Heißprägetechnik prädestiniert. Sie fordert nur geringe Anfangsinvestitionen und ermöglicht die Strukturierung einer großen Zahl auch preiswerter Werkstoffe.

6 Wirtschaftliche Betrachtung der MID-Technologie

Der Hauptgrund für die Einführung einer neuen Technologie sind meist erwartete Kostensenkungen. Aufgrund des mit der Technologieeinführung verbundenen Risikos macht eine Umstellung in der Regel jedoch nur Sinn, wenn wenigstens ca. 20% der Kosten eingespart werden können.

MIDs weisen dieses Potential auf. Um es ausschöpfen zu können, ist es jedoch erforderlich, die Einflüsse auf die Kostenstruktur zu kennen und genau zu analysieren. Gerade bei MID ist diese Betrachtung besonders schwierig, da eine Vielzahl von Einflußfaktoren die Kosten bestimmt. Das Kunststoff-Substrat an sich ist in der Regel nicht wesentlich kostengünstiger als konventionelle Einzelteile, häufig sogar teurer. Der Kostenvorteil ergibt sich aus der Integration mehrerer Bauteile und einer entsprechend vereinfachten Bauteil- und Systemmontage. Die Systemkosten treten gegenüber den Kosten der Einzelteile deutlich in den Vordergrund.

Herkömmliche Kalkulationsmodelle basieren häufig auf einer Zuschlagskalkulation, bei der auf die direkten Kosten (z.B. Lohn und Material) Zuschläge für Gemeinkosten nach bestimmten Zuschlagssätzen aufgeschlagen werden. Sie betrachtet zuerst die Einzelteile, dann die Baugruppen und kalkuliert schließlich das Endprodukt. Hierzu werden neben den Daten der Konstruktion auch die Ergebnisse der Arbeitsplanung, die technologischen Daten, benötigt. Die klassische Vorkalkulation setzt also erst nach Vorliegen der vollständigen Produktinformationen ein. Da diese bottom-up-Vorgehensweise jedoch keine konstruktiven Entscheidungen unterstützen oder beeinflussen kann, handelt es sich dabei eher um eine vorweggenommene Nachkalkulation.

Darüber hinaus ist eine Zuschlagskalkulation bei Fertigungsverfahren mit geringem Lohnanteil ungenau [132], da die Zuschlagssätze sehr hoch werden (bis zu 1000%) und bereits geringe Abweichungen im Lohn sehr starke Schwankungen der ermittelten Gesamtkosten nach sich ziehen.

Ziel ist es, bereits bei der Konstruktion die Einflüsse von Gestaltungsvarianten auf die Kosten abschätzen zu können. Erforderlich ist daher eine entwicklungsbegleitende Vorkalkulation der Baugruppe. Hierzu müssen Verfahren eingesetzt werden, die im Sinne des Simultaneous Engineering während der Entwicklung einsetzbar sind und demzufolge auch nur die Daten als Eingangsparameter benötigen, die in diesen Prozessen festgelegt werden bzw. dort bereits bekannt sind.

Gerade bei MID tritt häufig der Fall auf, daß ein Gesamtoptimum erreicht werden kann, obwohl die Teiloptima eventuell bei anderen Technologien liegen. Die Verwendung eines einzelnen Teilgebietes als Indikator für die Kosten der Gesamtbaugruppe ist häufig ungeeignet. Die wirtschaftliche Betrachtung gestaltet sich für den Anwender insofern schwierig, als viele unterschiedliche Technologien die Kosten der Baugruppe bestimmen; meist sind aber nur Kenntnisse für die Kalkulation eines Teilbereiches vorhanden. Daher müssen dem Entwickler Hinweise zur kostengünstigeren Gestaltung einzelner Bereiche gegeben werden.

In diesem Kapitel werden Ansatzpunkte geschaffen, mittels derer ein Überblick über die Kostenstrukturen der Fertigungsschritte einer MID-Baugruppe und ihre zu erwartenden Gesamtkosten zu erhalten ist.

6.1 Grundlegende Einflußfaktoren auf die Kosten einer MID-Baugruppe

Für die Entscheidung zugunsten einer Fertigungstechnologie sind eine Anzahl Einflußfaktoren relevant, auf die im Folgenden eingegangen werden soll. Eines der wichtigsten Kriterien sind die Kosten. Dabei gilt als grundlegende Definition: "Unter Kosten wird der in Geld bewertete Verzehr an Gütern (Materialverbrauch, Abschreibungen usw.) und Dienstleistungen (Löhne, Sozialkosten usw.) zur Erstellung und zum Absatz der betrieblichen Erzeugnisse und zur Aufrechterhaltung der Betriebsbereitschaft verstanden" [4].

Kosten können nach dem Ort ihrer Entstehung (Kostenstelle), der zugrundeliegenden Verbrauchsart (Kostenarten) oder dem entstehenden Produkt (Kostenträger) gegliedert werden. Da die Einführung der Technologie spritzgegossener Schaltungsträger in erster Linie von den Gesamtkosten und nicht von der Kostenstelle abhängen sollte, wird im folgenden auf eine Gliederung nach der Entstehungsstelle verzichtet. Die drei verbleibenden Gliederungsmöglichkeiten finden jedoch Berücksichtigung.

Insbesondere bei der MID-Technologie ist dabei wichtig, das Gesamtsystem mit allen Folgekosten im Auge zu behalten. Je nach Blickwinkel der jeweiligen Firma können auch Montagekosten bereits zu den Folgekosten gehören.

Bei der Herstellung jedes Produktes fallen Fixkosten und variable Kosten an. Fixkosten sind die Kosten, die allein schon für die Aufrechterhaltung der Produktionsbereitschaft anfallen. Hierzu zählen z.B. Maschinenabschreibungen, Hallenmiete oder Gehälter der Verwaltungsangestellten [58]. Die variablen Kosten sind direkt auf ein produziertes Gut oder eine erbrachte Dienstleistung zurückführbar, z.B. Fertigungslöhne oder -material. Einzelkosten sind grundsätzlich variable Kosten, während Gemeinkosten sowohl fixe wie auch variable Kostenbestandteile enthalten können [159].

Je nachdem, wie die variablen und fixen Kosten verlaufen, lohnt sich der Einsatz der einen oder anderen Technologie ab einer gewissen Grenzstückzahl, die auch "Break-Even-Point" genannt wird. In der Regel erfordern MIDs im Vergleich zu konventionellen Baugruppen anfangs höhere Investitionen (z.B. in Werkzeuge), weisen jedoch meist geringere variable Kosten auf (etwa Metallisierung gegenüber Metallisierung und Montage), so daß sich der Einsatz eher bei höheren Stückzahlen lohnt.

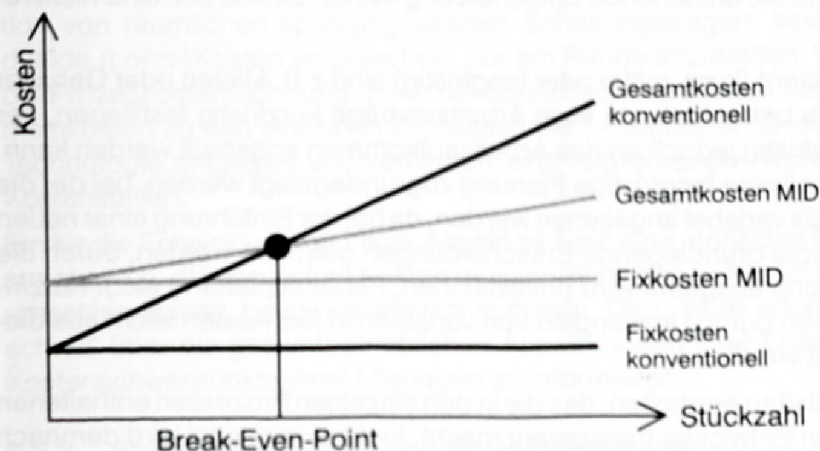


Bild 77: Break-Even-Betrachtung zum Vergleich von MID und herkömmlichen Schaltungsträgern

Bisweilen kann jedoch auch der umgekehrte Fall eintreten: Beispielsweise erfordern komplexe Stanzgitter extrem teure Werkzeuge, die Teile selbst sind dann jedoch sehr kostengünstig fertigbar, was zu niedrigen variablen Kosten führt. MID-Werkzeuge sind billiger, jedoch erfordert jedes einzelne Teil eine galvanische Behandlung. Im Vergleich zu Stanzgittern ist MID eher bei kleineren Stückzahlen kostengünstiger.

Wünschenswert für eine aussagekräftige entwicklungsbegleitende Vorkalkulation wäre eine absolute quantitative Aussage über die zu erwartenden Kosten einer MID-Baugruppe und deren Veränderung mit der Auswahl von konstruktiven Alternativen. Die meisten der Methoden zur Kalkulation bzw. Abschätzung von Kosten benötigen jedoch einen umfangreichen Bestand bereits vorhandener Kostendaten von früheren Produkten, aus denen dann mittels verschiedener Algorithmen die zu erwartenden Kosten einer Lösung ermittelt und zugeordnet werden.

Diese Datenbasis fehlt bei der MID-Technologie aufgrund der kurzen Reifezeit der Technik und der geringen Anzahl von Anwendungen, die bislang in Serie gegangen sind. Darüberhinaus sind bei den Serienanwendungen die Kostendaten nicht in der erforderlichen Tiefe verfügbar, um daraus Regeln für andere Konstruktionen ableiten zu können.

Um für Entwickler, Konstrukteure und potentielle Anwender der Technologie dennoch eine möglichst aussagekräftige Basis für die Entscheidung zugunsten oder gegen die MID-Technologie und für ein bestimmtes Herstellverfahren zur Verfügung zu stellen, werden nachfolgend die wichtigsten Einflußfaktoren dargestellt, die bei der Entwicklung eines MIDs zu berücksichtigen sind.

6.2 Einflußfaktoren in den Phasen des Produktlebenszyklus

6.2.1 Phasen des Lebenszyklus und relevante Kosten

Die Kosten eines MID entstehen bei Herstellung, Nutzung und Entsorgung des Produktes. Um eine möglichst nützliche Basis zu schaffen, dürfen in eine Kostenrechnung nur die relevanten Kosten eingehen, also die Kosten, welche durch die getroffene Entscheidung beeinflussbar sind [61]. Kosten, die durch frühere Entscheidungen festgelegt sind oder solche, auf welche die anstehende Entscheidung keinen Einfluß hat, sind nicht relevant.

Je nach Planungshorizont (kurz- mittel oder langfristig) sind z.B. Mieten oder Gehälter als fix oder variabel zu betrachten, da etwa Arbeitsverträge kurzfristig festliegen, der Personalbestand langfristig jedoch an das Arbeitsaufkommen angepaßt werden kann. Im vorliegenden Fall soll eine langfristige Planung zugrundegelegt werden, bei der die meisten Kostenarten als variabel angesehen werden, da bei der Einführung einer neuen Technologie in der Regel grundlegende Entscheidungen getroffen werden, durch die Einfluß auf viele Bereiche ausgeübt wird (Investitionen, Personalplanung etc.). Kurzfristige Planungen können durch Umwandeln von variablen in fixe Kosten leicht aus diesem Modell abgeleitet werden.

Sinnvoll ist es, ein Modell zu erarbeiten, das die in den einzelnen Prozessen enthaltenen Kostenfaktoren für den Entwickler transparent macht. In diesem Kapitel wird demnach auf die in den Phasen des Produktlebenszyklus entstehenden und zu beeinflussenden Kosten eingegangen. Darüberhinaus entstehen logistisch bedingte Kosten, und die Abschreibungsmodelle haben Einfluß auf die Kostenrechnung.

6.2.2 Prozeßkostenrechnung

Kaum ein Betrieb wird die gesamte Prozeßkette zur Herstellung eines MIDs im Haus durchführen und als Ganzes abrechnen. Einzelne Schritte werden in unterschiedlichen Cost Centern durchgeführt oder nach außen zu Zulieferern vergeben. Daher sind für die Ermittlung der Kosten des Produktes durch den Entwickler nicht die Beiträge der einzelnen Kostenarten, sondern die Kosten der einzelnen Prozesse interessant. Daher wird zur Charakterisierung der Kosten sinnvollerweise eine Prozeßkostenrechnung gewählt.

Zentrales Element dieses Modells ist der Prozeß. Ein Prozeß ist ein Vorgang in einer Kostenstelle eines Produktionsbetriebes, der bei seiner Ausführung Ressourcen verzehrt [88]. Für die Prozeßkostenrechnung sind folgende Merkmale charakteristisch (nach[69]):

- Die Messung des Produktionsfaktorverbrauchs ist nach Aktivitäten gegliedert.
- Die Gesamtkosten werden in leistungsmengeninduzierte und -neutrale Kosten aufgespalten
- Kriterium zur Kostenaufspaltung ist die Veränderbarkeit des Arbeitsvolumens
- Die Gemeinkosten werden kostenstellenübergreifend über die (leistungsmengeninduzierten) Hauptprozesse den Erzeugnissen zugeordnet
- Die Anwendung ist auf indirekte Leistungsbereiche ausgerichtet
- Die Prozeßkostenrechnung ist gut für eine (projektbezogene) Matrixorganisation geeignet
- Die Ergebnisse sind für kurz- und langfristige Planungen geeignet, da auch Kapazitätsanpassungen der Produktionsfaktoren berücksichtigt werden können.

Eine grundlegende Idee der Prozeßkostenrechnung ist also die Aufteilung von Gemeinkosten auf die einzelnen Prozesse. Damit wird eine der Aufteilungsarten für die Kosten eliminiert, da die Gemeinkosten nicht mehr als solche in Erscheinung treten.

Das Prozeßkostenmodell eignet sich gut für die wirtschaftliche Bewertung und Vorkalkulation zur Einführung der MID-Technologie, da insbesondere in der Entwicklungsphase viele indirekte Leistungen erbracht werden müssen. Auch in der Serienproduktion von räumlichen spritzgegossenen Schaltungsträgern sind Prozesse, die hohe direkte (Lohn-)Kosten verursachen, nur am Rande anzutreffen. Vor allem aber kommt die Prozeßkostenrechnung durch die bereichsübergreifende Aufschlüsselung der Gemeinkosten zu den einzelnen Prozessen dem integrativen Gedankenansatz der MID-Technologie entgegen und verhindert eine abgrenzende Rechnungsweise einzelner Kostenstellen.

Ein für die Entwicklung wichtiger Aspekt ist auch eine möglichst kurze Rückkopplungsstrecke, d.h. die ermittelten Kosten müssen sich noch in Änderungen der Konstruktion umsetzen lassen, bevor sie wirklich auftreten. Dazu ist es erforderlich, die Entwickler schnell über die gesamtbetrieblichen Auswirkungen ihrer Entscheidungen und über Kostenschwerpunkte ihrer Lösungen zu informieren.

6.2.3 Summationsmodell und Prozeßgliederung

Der grundlegende Ablauf der Prozeßkostenermittlung ist in Abbildung 78 dargestellt. Es werden die Kosten der Einzelteile summiert, um die Gesamtkosten der Baugruppe

zu ermitteln. Jedes Teil weist wiederum eine Aufgliederung nach Herstellprozessen auf. Wichtig ist auch die Berücksichtigung der Prozeßkosten, die anfallen, um aus den einzelnen Teilen die Baugruppe herzustellen.

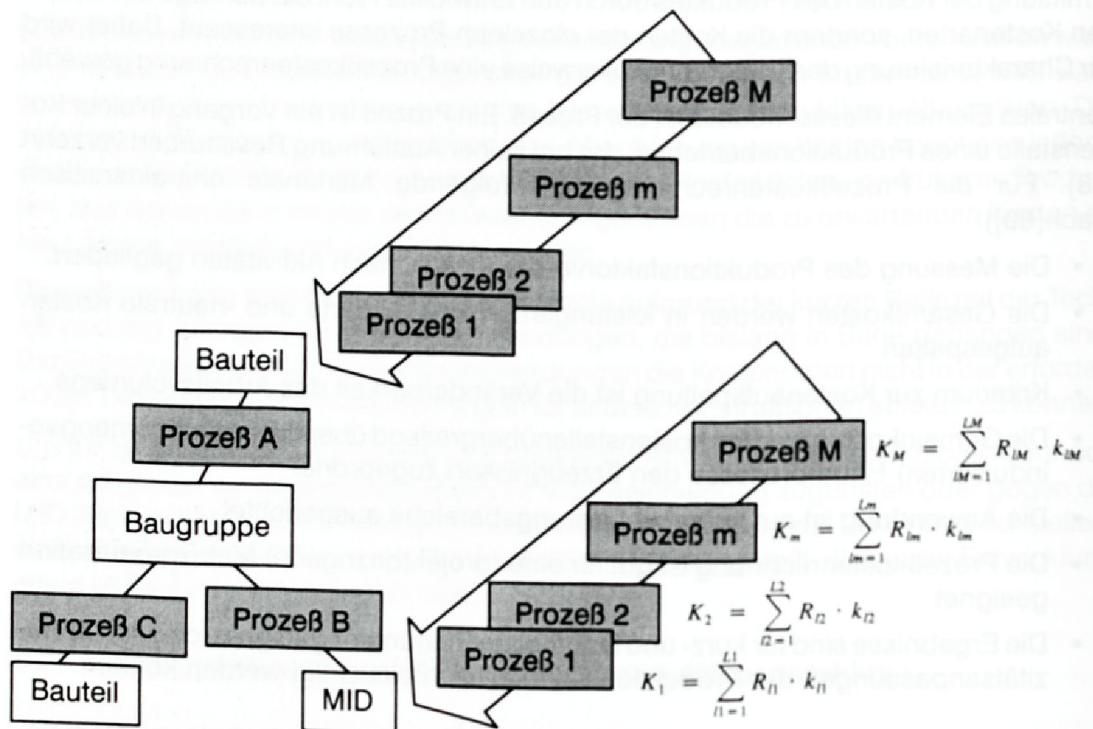


Bild 78: Summation der Kosten der Einzelprozesse (nach[29])

Zunächst wird der Ressourcenverbrauch R_{lm} für jeden Teilprozeß bestimmt und mit dem Kostensatz k_{lm} multipliziert. Die Summe über alle L_m Ressourcen ergibt die Kosten des Prozesses m :

$$K_m = \sum_{lm=1}^{Lm} R_{lm} \cdot k_{lm} \quad (4)$$

Alle Einzelprozeßkosten werden über die Anzahl M der Prozesse zu den Prozeßkosten K_p des MIDs summiert.

$$K_p = \sum_{m=1}^M \sum_{lm=1}^{Lm} R_{lm} \cdot k_{lm} \quad (5)$$

Um eine sinnvolle Prozeßkostenrechnung durchführen zu können, muß zuerst die Aufgliederung der dem Produkt zugeordneten Prozesse erfolgen. Dies geschieht am günstigsten in einem Prozeßhierarchiediagramm oder dem Prozeßplan gemäß Abbildung 79, dem die erforderlichen Prozesse je nach gewähltem MID-Herstellverfahren entnommen werden können.

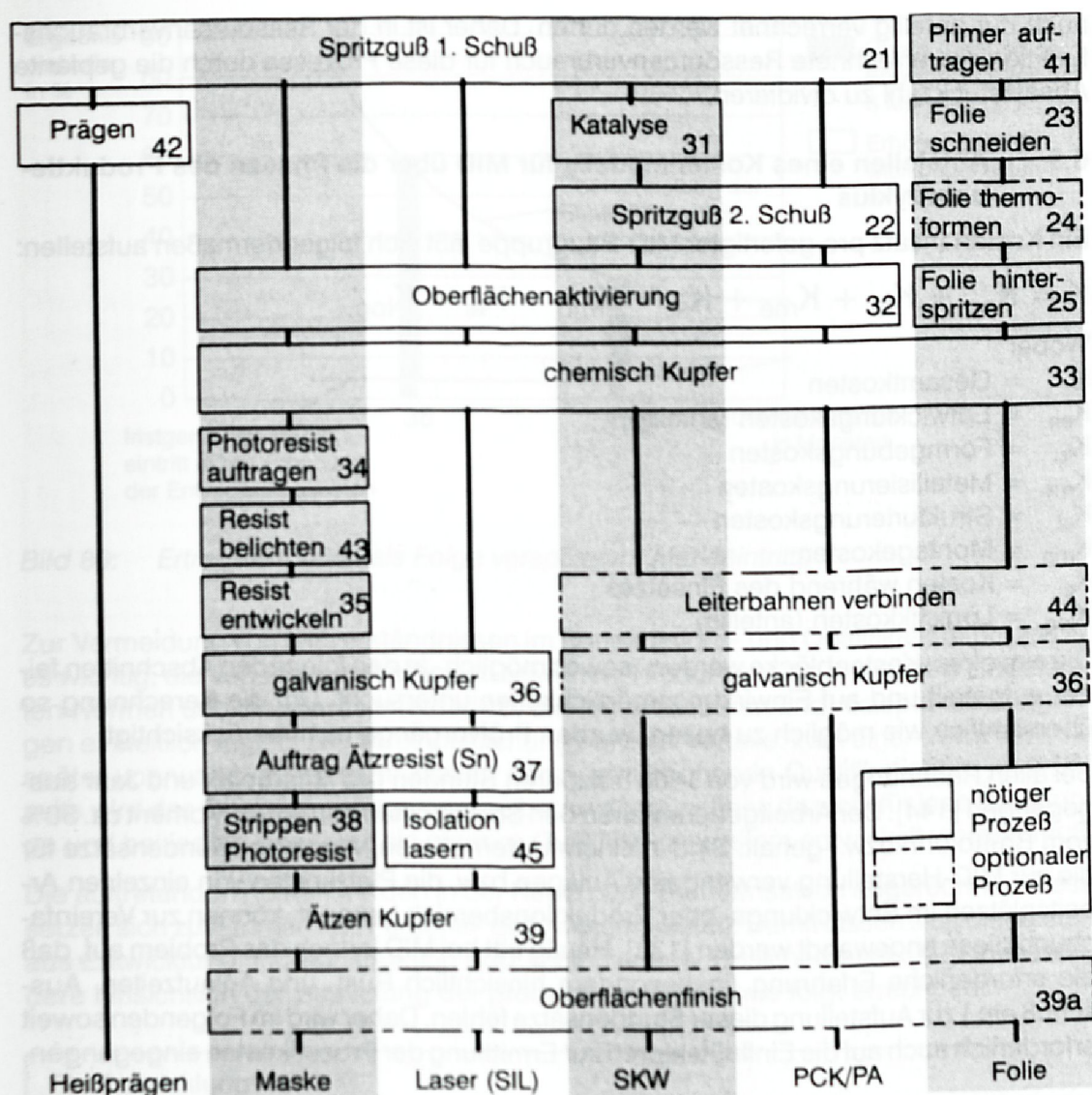


Bild 79: Einzelprozesse der Strukturierungsvarianten

Die einzelnen Prozesse sind zu Gruppen zusammengefaßt:

- 1x: Entwicklung und Konstruktion
- 2x: Formgebung (Spritzguß, Stanzen etc.)
- 3x: chemisch/galvanische Badprozesse (Vorbehandlung/Metallisierung)
- 4x: Strukturierung außerhalb der Galvanoanlage
- 5x: Montage
- 6x: Gebrauch und Entsorgung

In der Abbildung sind nur die Prozesse der Gruppen 2 bis 4 dargestellt, da die übrigen Gruppen für alle Herstellverfahrens-Varianten gleich sind. Die Prozesse enthalten in der Abbildung nicht dargestellte Unterprozesse, auf die in den Folgekapiteln im Einzelnen eingegangen wird.

Zu beachten ist, daß die Kosten für Prozesse, welche unabhängig von der insgesamt hergestellten Stückzahl nur einmal durchgeführt werden, sogenannte Einmalkosten,

auch nur anteilig verrechnet werden dürfen. Daher ist in der Ressourcenverbrauchsfunktion der errechnete Ressourcenverbrauch für diese Prozesse durch die geplante Absatzstückzahl zu dividieren.

6.3 Aufstellen eines Kostenmodells für MID über die Phasen des Produktlebenszyklus

Ein Kostenansatz pro gefertigter MID-Baugruppe läßt sich folgendermaßen aufstellen:

$$K = K_{en} + K_{fo} + K_{me} + K_{st} + K_{mo} + K_{ei} + K_{log}$$

Wobei

- K = Gesamtkosten
- K_{en} = Entwicklungskosten (anteilig)
- K_{fo} = Formgebungskosten
- K_{me} = Metallisierungskosten
- K_{st} = Strukturierungskosten
- K_{mo} = Montagekosten
- K_{ei} = Kosten während des Einsatzes
- K_{log} = Logistikkosten (anteilig)

Die einzelnen Kostenblöcke werden - soweit möglich - in den folgenden Abschnitten feiner aufgeteilt und auf Einwirkungsmöglichkeiten untersucht. Um die Berechnung so übersichtlich wie möglich zu halten, wurden Prüfvorgänge nicht berücksichtigt.

Bei allen Rechnungen wird von 1600 nutzbaren Stunden pro Mitarbeiter und Jahr ausgegangen [144]. Der Arbeitgeberanteil an den Sozialkosten beträgt im Moment ca. 30% vom Bruttolohn bzw. -gehalt. Sind in einem Unternehmen Maschinenstundensätze für die zur MID-Herstellung verwendeten Anlagen bzw. die Platzkosten von einzelnen Arbeitsplätzen im Entwicklungs- oder Produktionsbereich bekannt, können zur Vereinfachung diese angewandt werden [132]. Häufig tritt bei MID jedoch das Problem auf, daß die erforderliche Erfahrung (insbesondere hinsichtlich Rüst- und Anlaufzeiten, Ausschuß etc.) zur Aufstellung dieser Stundensätze fehlen. Daher wird im Folgenden soweit erforderlich auch auf die Einflußfaktoren zur Ermittlung der Prozeßkosten eingegangen.

6.3.1 Entwicklung und Prototypenbau (Kostengruppe 1n)

In der Definitions- und Entwicklungsphase werden zwar nur etwa 6% der Produktkosten direkt verursacht, aber etwa 70% festgelegt [160]. Daher ist gerade in diesem Stadium der Produktentstehung ein hohes Kostenbewußtsein, aber auch exzellentes Wissen um die Möglichkeiten der MID-Technologie unerläßlich. Sinnvoll für die erfolgreiche Einführung der MID-Technologie ist es auch, das Vorhaben mit Methoden des Projektmanagements zu behandeln. Eine klare Strukturierung und Verteilung der bei der Einführung anfallenden Aufgaben schützt vor katastrophalen Folgen unvorhergesehener Ereignisse [105].

Allgemein ist die Verkürzung der Entwicklungszeiten erklärtes Ziel in vielen Unternehmen. Ein rascher Markteintritt bringt hohe Gewinnspannen und eine Alleinstellung im Markt - zumindest eine zeitlang. Bei überhastetem Markteintritt besteht jedoch die Gefahr, durch unausgereifte Produkte mit Qualitätsproblemen zusätzliche Kosten zu verursachen. Sinnvoll ist in diesem Zusammenhang auch das Erstellen einer Risikoanalyse, die oft psychologisch bedingte Unsicherheiten bewertbar und objektivierbar macht.

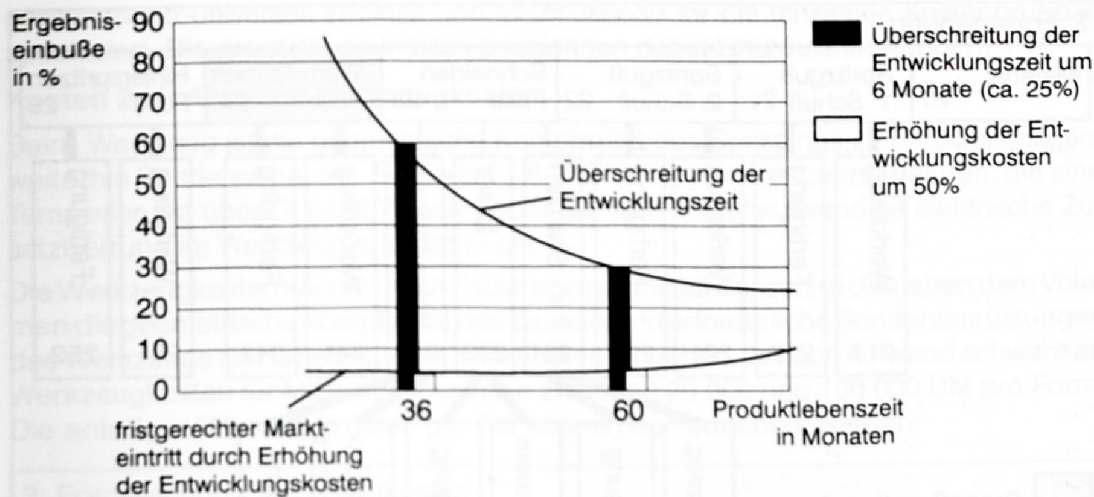


Bild 80: Ertragseinbußen als Folge verspäteten Markteintritts

Zur Vermeidung von Mißverständnissen im Konstruktions- und Qualifikationsprozeß ist es wichtig, die Verfahren einheitlich zu bewerten. Hierfür sind die in Kapitel 5 eingeführten Normen und Standards erforderlich, die Testprozeduren und Akzeptanzbedingungen einheitlich regeln. Die Vereinheitlichung hat zwei Vorteile: zum einen verhindert sie später unerwartet auftretende Kosten durch unzureichende Qualifikationen, andererseits wird das Qualitätsmanagement selbst kostengünstiger, da nicht für jede Baugruppe und bei jedem Hersteller ein eigenes Qualifikationssystem entwickelt werden muß.

Die auftretenden Kosten werden in der Regel nach Stundensätzen abgerechnet. Diese setzen sich zusammen aus Personal- und Anlagenkosten. Damit lassen sich die Kosten aus Entwicklung und Konstruktion trotz verschiedener Unsicherheiten [82], insbesondere hinsichtlich der Bewertung der produktiven Zeiten, wie folgt errechnen:

1: Entwicklung				
Personal	11	Anlagen	12	Hilfslöhne/ Mieten
			13	Prototypen- erstellung
				14

$$K_1 = K_{en} = \sum_{k=1}^4 k_{1k} \cdot t_{entw} \quad (6)$$

mit t_{entw} = für die Entwicklung veranschlagte Zeit in Stunden. Faßt man die Kostengruppen 11 bis 13 zusammen, erhält man eine klassische Platzkostenrechnung. Die Kosten­gruppe 14 tritt nur auf, wenn ein Prototyp erforderlich ist.

6.3.2 Formgebung (Kostengruppe 2n)

Hier ist eine feinere Unterteilung der Kosten erforderlich als in der Entwicklung. Verschiedene Herstellverfahren weisen unterschiedliche Prozeßschritte und damit unterschiedliche Kostengruppen auf.

nachstehend universell ermittelt und anschließend für die einzelnen Kostengruppen spezifiziert. Die dreistelligen Indices bezeichnen dabei Unterkostengruppen.

Kosten 2n1: Anteilige Werkzeugkosten

Beim Werkzeug ist die geometrische Komplexität des Spritzlings zu berücksichtigen, weiterhin Sondereinbauten. So bedarf z.B. PEI hoher Werkzeugtemperaturen, die eine Temperierung über Öl (statt Wasser) oder gar eine kostenaufwendige elektrische Zusatzheizung im Werkzeug erfordern kann.

Die Werkzeugkosten können nach Faustregeln ermittelt werden, in die neben dem Volumen die geometrische Komplexität des Bauteils und erforderliche Sonderausrüstungen des Werkzeugs als Hebefaktoren für die Kosten eingehen. Je nach Aufwand schwanken Werkzeugkosten für MIDs üblicherweise zwischen 20 000 und 100 000 DM pro Form. Die anteiligen Werkzeugkosten pro Teil können nun errechnet werden:

2: Formgebung - Werkzeugkosten					
Material 20	Spritzguß 1. Schuß 21	Spritzguß 2. Schuß 22	Schneiden Folie 23	Warmformen Folie 24	Hinterspritzen Folie 25
	Werkzeug 211	Fertigung 212	Werkzeug 221	Fertigung 222	
					Werkzeug 251
					Fertigung 252
$K_{2n1} = \frac{\text{Werkzeugkosten} + \text{Instandhaltungspauschale}}{\text{geplante Schußzahl pro Werkzeug} \times \text{Anzahl Formnester } N} \quad n \in 1;2;5 \quad (7)$					

Mehrfachwerkzeuge mit mehreren Formnestern ($N > 1$) können eingesetzt werden, wenn es erforderlich ist; die geplante Stückzahl pro Werkzeug erhöht sich entsprechend. Die optimale Anzahl von Formnestern pro Werkzeug läßt sich aus der folgenden Formel ermitteln [136]:

$$N_{opt} = \sqrt{\frac{\text{Maschinenstundensatz [DM]} \times \text{Zykluszeit [s]} \times \text{Gesamtzahl von Teilen pro Werkzeug}}{3600 \text{ s} \times \text{Kosten pro Formnest [DM]}} \quad (8)$$

Bei den Kosten 251 (Werkzeugkosten für Prozeß 25: Hinterspritzen von Folien) muß der Werkzeugmehraufwand für das Positionieren der Folie im Werkzeug berücksichtigt werden (Paßstifte etc.). Die Zusatzkosten für die Positioniereinheit sind Gruppe 252 dem Bereich Anlagenabschreibung und somit den Maschinenstundensätzen zuzuschlagen.

Kosten 2n2: Fertigungskosten

Der zweite Kostenblock sind die Maschinenkosten für die Spritzgußmaschine und die Peripherie. Hier unterscheidet sich ein MID kaum von herkömmlichen Kunststoffteilen. Einzig die Maschinenparameter müssen zur Sicherstellung der Metallisierbarkeit eventuell angepaßt werden, so daß sich z.B. bei Polyetherimid (PEI) längere Zykluszeiten und damit leicht erhöhte Kosten ergeben können. Die Zykluszeiten werden jedoch auch maßgeblich von der spritzgießgerechten Konstruktion der Bauteile beeinflusst [23]. So ist auf hinterschnittarme Gestaltung zu achten, um das Verfahren von Schiebern im Werkzeug zu ersparen, und die Wandstärken sollen möglichst gleichmäßig sein.

Beim Spritzgußprozeß lassen sich durch Handhabungsgeräte und andere Automatisierungshilfsmittel beträchtliche Kosteneinsparungen realisieren [80]. Sie gehen vor allem in die Kostenermittlung durch eine verkürzte Zykluszeit ein. Die Zykluszeit umfaßt die Handhabungsoperationen bei eventuell nötigen Einlegeteilen, das Schließen der Form, das Einspritzen des Kunststoffes, die Nachdruck- und Abkühlzeit, das Formöffnen und die für das Entnehmen des fertigen Spritzlings, ggf. unter Abtrennen des Angußsystems, erforderliche Zeit. Es ist jedoch auch zu bedenken, daß ein höherer Automatisierungsgrad des Spritzgußsystems dessen Zuverlässigkeit negativ beeinflussen kann. Auch bedingen natürlich die Investitionskosten für das Handhabungsgerät einen höheren Maschinenstundensatz für das Gesamtsystem.

2: Formgebung - Spritzgußkosten

Material	20	Spritzguß 1. Schuß	21	Spritzguß 2. Schuß	22	Schneiden Folie	23	Warmformen Folie	24	Hinterspritzen Folie	25
		Werkzeug 211	Fertigung 212	Werkzeug 221	Fertigung 222					Werkzeug 251	Fertigung 252

Bei der Ermittlung entsprechender Maschinenstundensätze ist zu beachten, daß die Position "Abschreibung Anlage" die Spritzgießmaschine sowie die Peripherie, etwa Trockner und Zuführeinheiten umfaßt. Bei der Verfahrensgruppe 25 "Folie hinterspritzen" fallen hierzu auch die Kosten für die Positioniereinheit der Folie. Die Anlagentechnik für eine solche Einheit ist ähnlich der beim Verfahren der In-Mold-Decoration (IMD). Die Investitionskosten liegen bei ca. 75 000 DM für ein kontinuierlich arbeitendes System, das die Folie ununterbrochen dem Werkzeug zuführt, und bei ca. 50 000 DM für ein System, das vorgeschnittene Folienstücke in das Werkzeug einlegt. [80].

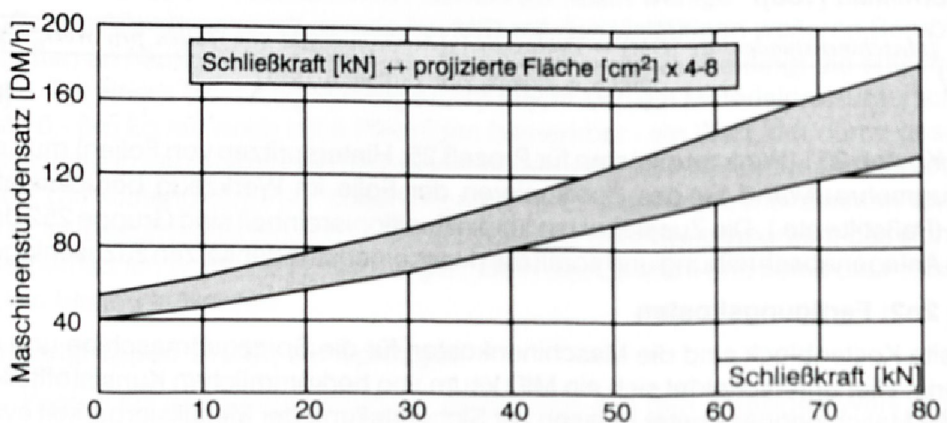


Bild 82: Abhängigkeit der Maschinenstundensätze im Spritzguß von der Maschinenschließkraft [136]

Die Kosten k_{2n2} können als Maschinenstundensatz bekannt sein. Dann kann vereinfachend dieser eingesetzt werden. Übliche Maschinenstundensätze für Spritzgußma-

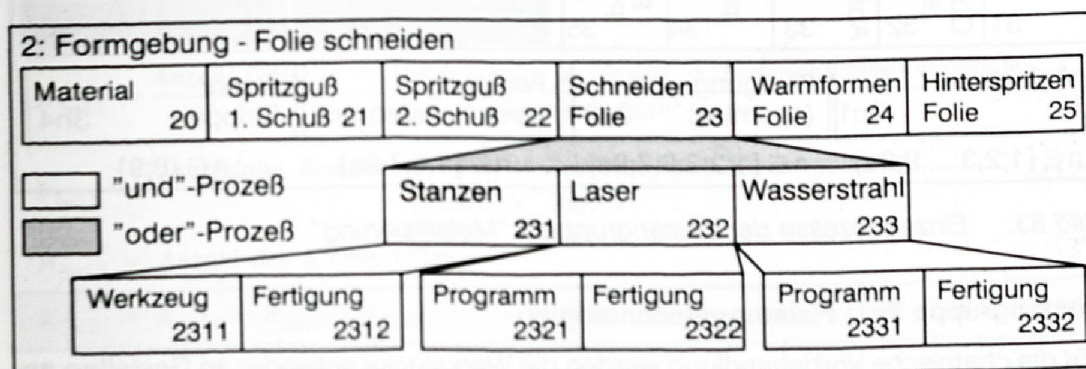
schienen liegen zwischen 40 DM und 200 DM je nach Größe des Teiles. Die erforderliche Maschinengröße kann aus der projizierten Fläche des zu spritzenden Teiles (bei Mehrfachwerkzeugen: aller gleichzeitig gespritzten Teile) ermittelt werden: pro cm² ist mit 4 bis 8 kN Schließkraft zu rechnen. Aus der Grafik in Abbildung 82 kann dann der zugehörige Maschinenstundensatz ermittelt werden.

Kostengruppe 23: Folie schneiden

Diese Kostengruppe tritt nur bei den Folienverfahren auf. Vor dem Hinterspritzen muß die Außenkontur der Folie an das Werkzeug angepaßt werden. Dies kann unter Einsatz verschiedener Verfahren geschehen:

- Stanzen (231)
- Laserschneiden (232)
- Wasserstrahlschneiden (233)

Die Kosten für das Stanzen bestehen aus Werkzeug- und Fertigungskosten, für das Laser- bzw. Wasserstrahlschneiden setzen sie sich aus Programmierungs- und Fertigungskosten zusammen. Bei einer Online-Programmierung ist dabei der Nutzungsausfall der Produktionsanlage zu berücksichtigen.:



Kostengruppe 24: Folie Thermoformen

Um die Folie beim Hinterspritzen gut an der Werkzeugwand anliegen zu lassen, muß sie unter Umständen vor dem Einlegen thermisch vorgeformt werden. Hierfür fallen wiederum Anlagen- und Werkzeugkosten an, so daß die Berechnung der Kosten analog dem Stanzprozeß (231) erfolgen kann.

Die Gesamtkosten für den Prozeß "Formgebung" erhält man, indem die Kosten aller Teilprozesse aufsummiert werden:

$$\text{Gesamtkosten Formgebung: } K_2 = K_{f_0} = \sum_{k=1}^5 k_{2k} \cdot R_{2k} \quad (9)$$

6.3.3 Metallisierung

Auch in der Metallisierung fallen fixe und variable Kosten an. Kostenverursacher sind hier vor allem der Elektrolytverbrauch und die Energiebereitstellungskosten [58]. In die Anlagenkosten ist jeweils eine Stillstandsdauer einzurechnen, die zwischen drei und sieben Prozent der verfügbaren Fertigungsmittelzeit pro Jahr beträgt [109].

Schwierig ist die Auslegung von MID-Baugruppen für eine kostengünstige Metallisierung vor allem deshalb, weil die wenigsten Mechanik- und Elektronikkonstrukteure über detaillierte Fachkenntnisse der Abläufe in der chemisch-galvanischen Metallisierung verfügen. Die Metallisierung erfordert in der Regel mindestens vier Schritte [141]:

- Vorreinigen oder Beizen (Aufrauen) der Oberfläche
- Zweistufiges Aktivieren (Bekeimen / Beschleunigen) der Oberfläche mit einem Edelmetall
- Stromloses Metallisieren der Oberfläche als Leitschicht
- Elektrolytischer Schichtaufbau

Abschließend kann eine Oberflächenveredlung stattfinden. Hinzu kommen bei allen Verfahrensschritten die Aufnahme- oder Fixierungsarbeiten.

3: Metallisierung									
Katalyse 31	Oberflächen- aktivierung 32	Abscheidung chemisch 33	Auftragen Photoresist 34	Entwickeln Photoresist 35	Abscheidung galvanisch 36	Auftrag Ätz- resist (Sn) 37	Strippen Resist 38	Ätzen Kupfer 39	Oberflächen- finish 39a
Aufnahme 3n1		Fertigung (stromlos) 3n2		Fertigung (strombehaftet) 3n3		Ätzen/ Strippen 3n4			
$n \in \{1;2;3;...;9;9a\}$		$n \in \{1;2;3;5;7;9a\}$		$n \in \{4;6;7;9a\}$		$n \in \{8;9\}$			

Bild 83: Einzelprozesse der Kostengruppe 3 "Metallisierung"

Kostengruppe 3n1: Fixierungstechnologien

Für die chemische Vorbehandlung werden die Werkstücke entweder an Gestellen angebracht oder lose in eine Trommel gegeben. Falls die Geometrie der Teile in einem Trommelprozeß zu Verhaken neigen würde, kann die arbeitsaufwendige Gestellanordnung häufig nicht umgangen werden.

In der Regel bleiben die Teile für mehrere der im Verlauf der chemisch-galvanischen Behandlung anfallenden Prozesse an einem einzelnen Gestell. Es muß genau geprüft werden, ob ein Umstecken erforderlich ist oder das galvanogerechte Stecken bereits bei der chemischen Behandlung möglich und dann günstiger ist. Dies hängt auch von der Zahl der vorhandenen Gestelle und der Belegungszeit in den einzelnen Prozessen ab.

Die Kosten für die Vorbereitung setzen sich zusammen aus den Kosten für Gestell oder Trommel und im Fall von Gestellen aus den Kosten für das Aufstecken der Kunststoffteile. Bei Trommelbehandlung wurde auf das Erfassen der zur Beschickung erforderlichen Zeit und Kosten verzichtet, da sie kaum Einfluß auf die Gesamtkosten hat. Die Kosten für das Klemmen der Teile hängen von der Anzahl der Klemmstellen pro Teil ab. Bei der chemischen Metallisierung genügt eine Aufhängestelle pro Teil, da nur eine mechanische Fixierung gewährleistet sein muß. Zur Vorbereitung auf die galvanische Beschichtung muß jeder isolierte Oberflächenbereich einzeln kontaktiert werden. Dies erfordert eine aufwendige Handhabung, insbesondere, da auch der eigentliche Klemmvorgang präziser ablaufen muß und dadurch länger dauert.

Bei größeren Serien sind mehrere Gestelle erforderlich. Die Mindestanzahl von Gestellen errechnet sich aus der Jahresstückzahl und der Verweildauer in den Bädern wie folgt:

$$N_{\min} = \frac{\text{Volumen eines Teils [cm}^3\text{]} \times \sum \text{Verweildauer [h]} \times \text{Jahresstückzahl}}{1000 \times \text{Volumen des kleinsten Bades [l]} \times 0,9 \times \text{Jahresnutzungszeit [h]}} \quad (10)$$

3: Metallisierung - Fixierungskosten

Katalyse	Oberflächen- aktivierung	Abscheidung chemisch	Auftragen Photoresist	Entwickeln Photoresist	Abscheidung galvanisch	Auftrag Ätz- resist (Sn)	Strippen Resist	Ätzen Kupfer	Oberflächen- finish
31	32	33	34	35	36	37	38	39	39a

Aufnahme	Fertigung (stromlos)	Fertigung (strombehaftet)	Ätzen/ Strippen
3n1	3n2	3n3	3n4

Gestellkosten	Klemmkosten
3n11	3n12

$$K_{3n11} = \frac{\text{Anzahl Gestelle} \times \text{Abschreibung je Gestell} + \text{Instandhaltungspauschale}}{\text{Jahresstückzahl}} \quad (11)$$

$$k_{3n21} = \frac{(\text{Jahreslohn Bediener} + 30\%) \times \text{Zeitbedarf pro Klemmstelle [s]}}{1600 \times 3600 \text{ s}} \quad (12)$$

$$R_{3n12} = \text{Anzahl der Klemmstellen} \quad (13)$$

$$K_{3n1} = K_{3n11} + R_{3n12} \times k_{3n12} \quad (14)$$

R_{3n12} ist für chemische Beschichtungsprozesse immer 1, während bei galvanischer Beschichtung die tatsächliche Anzahl von voneinander isolierten, zu metallisierenden Bereichen anzugeben ist. Bei der semiadditiven Metallisierung (Maskentechnik) ist zu beachten, daß alle Leiterzüge über das darunterliegende chemische Kupfer miteinander verbunden sind. Auch hier ist also die erforderliche Klemmstellenanzahl 1.

Kostengruppe 3n2: chemische Beschichtungsprozesse

Die wenige Mikrometer dicke Grundmetallisierung muß bei Kunststoffen anfangs stets chemisch erfolgen. In der Regel wird Kupfer abgeschieden, einige Verfahren arbeiten auch mit einer Grundmetallisierung aus Nickel.

Die Kosten setzen sich im wesentlichen zusammen aus den Abschreibungskosten für die verwendeten Anlagen und den Verbrauchskosten hinsichtlich der Vorbehandlungs- bzw. Metallisierungschemikalien.

Die Kosten der Chemikalien hängen direkt vom abgeschiedenen Metallvolumen ab, also von Schichtdicke und metallisierter Oberfläche. Die Abschreibungsanteile der Anlagen pro hergestelltem Teil hängen von der Anlagenauslastung ab, also davon, wieviele Teile in einem Durchlauf gefertigt werden können und wie lange die Durchlaufzeiten sind. In der Regel überwiegen die Anlagenkosten die Chemikalienkosten bei weitem. Daraus ergibt sich, daß vollflächig metallisierte Teile im Verhältnis wesentlich günstiger

(pro abgeschiedener Volumeneinheit Metall) zu metallisieren sind als solche mit wenig Leiterbahnen auf einem großvolumigen Teil, da bei diesen pro abgeschiedener Volumeneinheit Metall ein großer Anteil nicht zu metallisierenden Kunststoffs die Galvanikanlage mitauslastet. Als Kosten ergeben sich:

3: Metallisierung - Kosten der stromlosen Metallabscheidung

Katalyse 31	Oberflächen- aktivierung 32	Abscheidung chemisch 33	Auftragen Photoresist 34	Entwickeln Photoresist 35	Abscheidung galvanisch 36	Auftrag Ätz- resist (Sn) 37	Strippen Resist 38	Ätzen Kupfer 39	Oberflächen- finish 39a
----------------	-----------------------------------	-------------------------------	--------------------------------	---------------------------------	---------------------------------	-----------------------------------	--------------------------	-----------------------	-------------------------------

Aufnahme
3n1

Fertigung
(stromlos)
3n2

Fertigung
(strombehaftet)
3n3

Ätzen/
Strippen
3n4

Materialkosten
3n21

Anlagenkosten
3n22

$$k_{3n21} = \frac{\text{Chemikalienverbrauch [l/cm}^3] \times \text{Kosten Chemikalie [DM/l]}}{100 [\mu\text{m/cm}]}$$

$$R_{3n21} = \text{metallisierte Fläche [cm}^2] \times \text{Schichtdicke [\mu m]}$$

$$k_{3n22} = \frac{\left(\frac{\text{Jahreslohn Bediener} + 30\%}{1600 \text{ h}} + \frac{\text{Jahres-Raummierte} + \text{Abchreibung Anlage}}{\text{nutzbare Stunden pro Jahr}} + \text{Energiekosten/h} \right)}{\text{Abscheiderate [\mu m/h]}}$$

$$R_{3n22} = \frac{\text{Schichtdicke [\mu m]}}{\text{Teile pro Charge}}$$

n ∈ {1;2;3;5;7;9a}

$$K_{3n2} = \sum_{i=1}^2 R_{3n2i} \times k_{3n2i}$$

Kostengruppe 3n3: galvanische Beschichtungsprozesse

Der weitere Aufbau der Metallschicht bis zur gewünschten Endschichtstärke (meist etwa 20-40 μm) kann auf chemischem oder elektrolytisch-galvanischem Wege erfolgen. Die galvanische Abscheidung von Metall erfolgt wesentlich schneller als die chemische und führt daher bei gleichen Schichtstärken zu geringeren Verweildauern im Galvanikbad. Zusätzlich sind die Elektrolyten weniger teuer, was insgesamt deutlich niedrigere Kosten pro Dickeneinheit bewirkt (etwa ein Drittel der Kosten für chemische Metallisierung). Außerdem laufen einige der chemischen Beschichtungsprozesse selbstlimitierend ab, d.h. sie werden ab einer gewissen Dicke unergiebig, so daß der Übergang zum galvanischen Metallisieren technologisch erforderlich ist.

Bei der Maskenstrukturierung wird nicht nur die Metallisierung bis zur gewünschten Endstärke, sondern auch der Photoresist auf galvanischem Wege aufgetragen. Die Kalkulation für die Anlage gestaltet sich analog zu der anderer galvanischer Beschichtungsprozesse. Der elektrophoretisch abgeschiedene Resist (ED-Resist) wird verwendet, um die nötigen gleichmäßigen Schichtstärken zu erreichen.

3: Metallisierung - Kosten der strombehafteten Metallabscheidung

Katalyse	Oberflächen- aktivierung	Abscheidung chemisch	Auftragen Photoresist	Entwickeln Photoresist	Abscheidung galvanisch	Auftrag Ätz- resist (Sn)	Strippen Resist	Ätzen Kupfer	Oberflächen- finish
31	32	33	34	35	36	37	38	39	39a

Aufnahme	Fertigung (stromlos)	Fertigung (strombehaftet)	Ätzen/ Strippen
3n1	3n2	3n3	3n4

Materialkosten

3n31

Anlagenkosten

3n32

$$k_{3n31} = \frac{\text{Kosten Anode [DM/g]} \times \text{Dichte der Schicht [g/cm}^3\text{]}}{10000 [\mu\text{m}]} \quad (20)$$

$$R_{3n31} = \text{metallisierte Fläche [cm}^2\text{]} \times \text{Schichtdicke [\mu m]} \quad (21)$$

$$k_{3n32} = \frac{\left(\frac{\text{Jahreslohn Bediener} + 30\%}{1600 \text{ h}} + \frac{\text{Jahres-Raummierte} + \text{Abchreibung Anlage}}{\text{nutzbare Stunden pro Jahr}} + \text{Energiekosten/h} \right)}{\text{Abscheiderate [\mu m/h]}} \quad (22)$$

$$R_{3n32} = \frac{\text{Schichtdicke [\mu m]}}{\text{Teile pro Charge}} \quad n \in \{4; 6; 7; 9a\} \quad (23)$$

$$K_{3n3} = \sum_{i=1}^2 R_{3n3i} \times k_{3n3i} \quad (24)$$

Kostengruppe 3n4: Ätz- und Stripprozesse

Bei den semiadditiven und subtraktiven Prozeßgruppen (Maskenstrukturierung, Laserstrukturierung, evtl. Folientechnologie) ist nach dem Auftrag des Metalls auf chemischem oder galvanischem Weg ein selektives Entfernen der Metallschicht an den Stellen erforderlich, die auf dem Schaltungsträger die Isolierbereiche darstellen. Beim Photomaskenverfahren ist zwischen dem Aufbringen des Ätzresistes und dem Ätzen noch das Entfernen des Photoresists erforderlich. Auch dies ist ein Ätzprozeß.

Hierzu werden Ätzprozesse eingesetzt. Die Berechnung der Kosten ergibt sich analog zu den chemischen Beschichtungsprozessen (Kostengruppe 3n2), nur daß die Abscheiderate durch die Abtragsrate ersetzt und einige andere Parameter entsprechend angepaßt werden. Ätz- und/oder Stripprozesse treten bei den Verfahrensschritten "Strippen Resist" (38) und "Ätzen Kupfer" auf.

Die Gesamtkosten der Metallisierung ergeben sich durch Addition der einzelnen Kostengruppen 3n:

$$\text{Gesamtkosten Metallisierung: } K_3 = K_{me} = \sum_{k=1}^{9a} \sum_{i=1}^4 K_{3ki} \quad (25)$$

In Kapitel 7 "Gestaltungsrichtlinien" ist an einem Beispiel die Bestimmung der Grenzschichtstärke hergeleitet, ab der sich ein Übergang zur gemischt chemisch/galvanischen Beschichtung gegenüber einer rein chemischen Beschichtung lohnt.

6.3.4 Strukturierung

Die Strukturierungskosten hängen sehr stark von dem gewählten Verfahren ab. Die Kosten der Verfahrensgruppen werden nachstehend einzeln hergeleitet, da in den Strukturierungsverfahren selbst - anders als bei der Metallisierung - kaum identische Verfahrensschritte vorliegen. Auch Maschinenkosten sind nur teilweise mit hinreichender Genauigkeit bekannt. Die verfügbaren Verfahrensvarianten zur Strukturierung und ihre Unterprozesse sind in Abbildung 84 dargestellt. Die Strukturierungsvariante "Zweikomponentenspritzguß" taucht hier nicht mehr auf, da dort die Strukturierung bereits beim Spritzguß selbst erfolgt (Kostengruppen 21, 22).

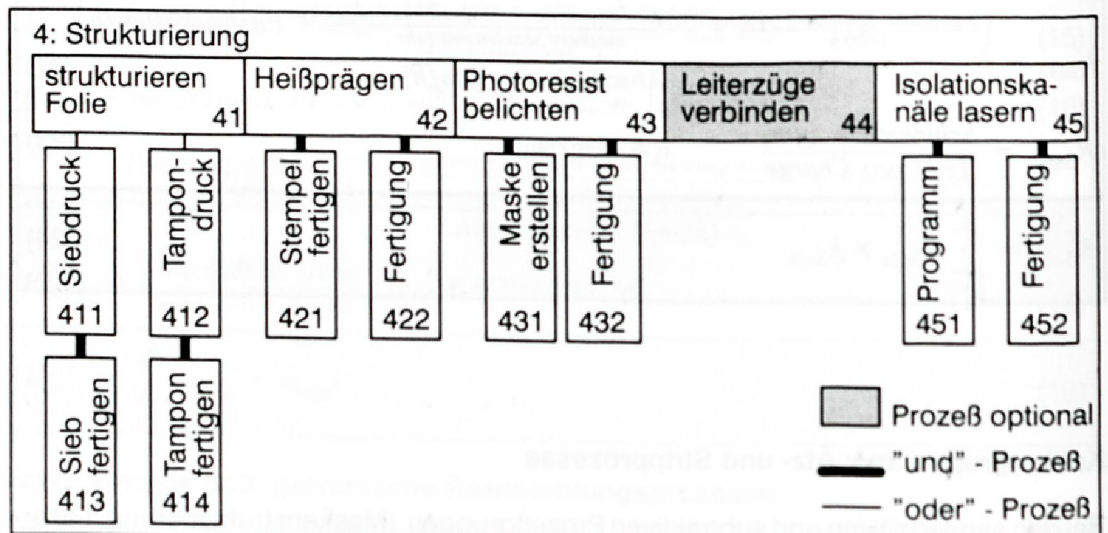


Bild 84: Einzelprozesse der Kostengruppe 4n "Strukturierung"

Kostengruppe 41: Folie strukturieren

Auch beim Folienhinterspritzen erfolgt das Festlegen des Leiterbildes auf dem Substrat bereits während des Spritzgußvorganges. Die in das Werkzeug eingelegte Thermo-plastfolie ist jedoch bereits vorher strukturiert, was einen zusätzlichen, vorgeschalteten Prozeßschritt erfordert. Bisher sind chemisch-galvanische Systeme gebräuchlich, deren Kosten sich analog der Photobelichtung und den vor- und nachgeschalteten Prozessen des Maskenbelichtungsverfahrens für MID ermitteln lassen. Die entsprechenden Kosten sind den Abschnitten zu den Kostengruppen 3x2 und 43 zu entnehmen.

Interessant ist ein neuartiges Primerverfahren. Der Auftrag des Primers kann durch Sieb- oder Tampondruck erfolgen [57]. Während sich der Siebdruck nur für relativ ebe-

ne Flächen ohne Hindernisse eignet, kann das Drucken mit einem Gummiklischee eine relativ starke dreidimensionale Ausprägung der Oberfläche ausgleichen. Vor dem eigentlichen Druckvorgang muß das jeweilige Werkzeug angefertigt werden. Die Kosten für den Prozeß setzen sich somit aus Werkzeug-, Anlagen- und Materialkosten zusammen.

Zuerst muß ein Sieb, eine Schablone oder ein Klischee zum strukturierten Auftragen des Primers gefertigt werden. Diese Herstellkosten sind auf die gefertigte Stückzahl umzulegen (Kostengruppe 411n). Beim anschließenden Druckvorgang fallen Materialkosten (Gruppe 41n21) und Arbeitskosten (41n22) an.

4: Strukturierung			
strukturieren Folie	41	Heißprägen	42
Photoresist belichten	43	Leiterzüge verbinden	44
Isolationska- näle lasern	45		
Siebdruck	411	Tampon- druck	412
Sieb	4111	Fertigung	4112
Klischee	4121	Fertigung	4122

"oder" - Prozeß

"und" - Prozeß

$$K_{41n1} = \frac{\text{Werkzeugkosten} + \text{Instandhaltungspauschale}}{\text{Stückzahl pro Werkzeug}} \quad n \in \{1;2\} \quad (26)$$

$$k_{41n21} = \text{Schichtdicke des Primers } [\mu\text{m}] \times \text{Primerpreis } [\text{DM/l}] \times 10 \quad n \in \{1;2\} \quad (27)$$

$$R_{41n21} = \text{zu metallisierende Fläche } [\text{cm}^2] \quad x \in \{1;2\} \quad (28)$$

$$k_{41n22} = \frac{\text{Maschinenstundensatz}}{3600 \text{ s}} \quad n \in \{1;2\} \quad (29)$$

$$R_{41n22} = \frac{\text{Zykluszeit pro Teil } [\text{s}]}{\text{Teilezahl pro Zyklus}} \quad n \in \{1;2\} \quad (30)$$

$$K_{41} = K_{41n1} + \sum_{i=1}^2 R_{41ni} \times k_{41ni} \quad n \in \{1;2\} \quad (31)$$

Kostengruppe 42: Heißprägen

Beim Heißprägen erfolgen Metallisierung und Strukturierung in einem Arbeitsgang. Erforderlich ist eine Prägepresse, die Investitionskosten von etwa 40 000 - 70 000 DM, je nach vorgesehenem Automatisierungsgrad, verursacht. Pro Layout ist ein gravierter Prägestempel notwendig, der mit etwa 1000 DM angesetzt werden kann. An Verbrauchsmaterial fällt die Folie an, die etwa 25 DM pro Quadratmeter in Kupferausführung und 125 DM pro Quadratmeter vergoldet kostet [139].

Aufgrund der niedrigen Investitionskosten eignet sich das Heißprägen auch schon bei kleinen Auflagen, vorausgesetzt die gewünschte Leiterbahngeometrie läßt technisch

den Einsatz dieses Verfahrens zu. Die reinen Zeiten für das Prägen liegen bei 0,8 bis 1,2 Sekunden, die Zykluszeiten (einschließlich Teilepositionierung und Zu- bzw. Abfuhr) entsprechend darüber.

4: Strukturierung

strukturieren Folie	41	Heißprägen	42	Photoresist belichten	43	Leiterzüge verbinden	44	Isolationska- näle lasern	45
------------------------	----	------------	----	--------------------------	----	-------------------------	----	------------------------------	----

Klischee	Fertigung
421	422

Materialkosten	Anlagenkosten
4221	4222

Diagram description: A hierarchical tree structure showing the breakdown of costs for the 'Heißprägen' (42) process. 'Heißprägen' (42) branches into 'Klischee' (421) and 'Fertigung' (422). 'Klischee' (421) branches into 'Materialkosten' (4221). 'Fertigung' (422) branches into 'Anlagenkosten' (4222).

$$K_{421} = \frac{\text{Werkzeugkosten} + \text{Instandhaltungspauschale}}{\text{geplante Zahl Prägezyklen pro Werkzeug} \times \text{Teile pro Prägezyklus}} \quad (32)$$

$$k_{4221} = \frac{\text{Folienpreis [DM/m}^2\text{]}}{10000} \quad (33)$$

$$R_{4221} = \text{zu metallisierende Fläche [cm}^2\text{]} \quad (34)$$

$$k_{4222} = \frac{\text{Maschinenstundensatz}}{3600 \text{ s}} \quad (35)$$

$$R_{4222} = \frac{\text{Zykluszeit [s]}}{\text{Teile pro Zyklus}} \quad (36)$$

$$K_{42} = K_{421} + \sum_{i=1}^2 R_{422i} \times k_{422i} \quad (37)$$

Kostengruppe 43: Photoresist belichten

Die Kosten bei der Maskenstrukturierung setzen sich zum einen aus dem eigentlichen Belichtungsvorgang zusammen, und zum anderen aus der Erstellung der Masken. Die Haltbarkeit der Masken ist begrenzt, so daß relativ häufig neue Masken gefertigt werden müssen.

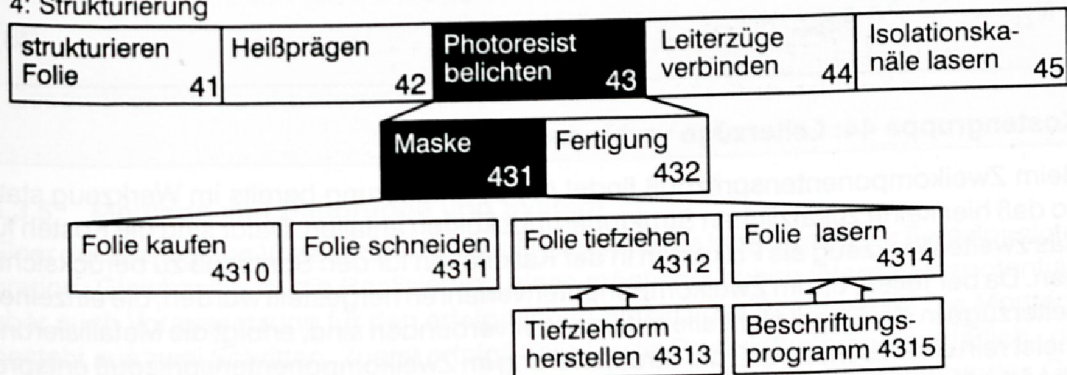
Bei der Maskenstrukturierung ist eine Anlage zum Befestigen der Masken und zum anschließenden dreidimensionalen Belichten der beschichteten Substrate nötig. Hierzu eignet sich ein Tunnel mit Quarzlampen. Um die Masken herzustellen, wird im Allgemeinen eine dotierte, tiefziehfähige Mehrschichtfolie eingesetzt, die mit einem Laser beschriftet wird. Neben der Strahlquelle samt Optik ist auch ein präzises Handhabungssystem für die zu beschriftende Maske erforderlich.

Bei MIDs, die so gestaltet sind, daß der strukturierte Bereich eben ist, erfährt die Maskentechnik einige Vereinfachungen: Es kann statt des ED-Resists auch ein Festresist aufgebracht werden, die schwierig herzustellenden dreidimensionalen Masken werden überflüssig, und die Belichtung kann in einem normalen Leiterplattenbelichter erfolgen. Somit kann das Maskenverfahren derzeit wirtschaftlich besonders dann eingesetzt wer-

den, wenn herkömmliche Leiterplattenanlagen (evtl. nach leichter Anpassung) weiterverwendet werden können.

Die Kosten der Einzelprozesse - immer bezogen auf ein einzelnes gefertigtes Teil - sind nachfolgend zusammengestellt. Die Anlagen bestehen bei Prozeß 4312 (Tiefziehen) aus einer Vakuumpresse, bei 4314 (Lasern) aus einer Laseranlage mit einem mehrachsigen Handlingsystem für die Masken. Die Kosten können hier nur theoretisch hergeleitet werden, Anhaltspunkte für die realen Kosten einer solchen Anlage sind nicht zugänglich, da derzeit weltweit nur zwei funktionsfähige Anlagen bekannt sind. Hinzuzurechnen sind die Materialkosten für die Folie, aus der die Masken hergestellt werden.

4: Strukturierung



$$k_{4310} = \frac{\text{Preis Maskenfolie [DM/kg]}}{\text{Dichte Folie [kg/cm}^3\text{]}} \times \text{Dicke Folie [\mu m]} \times 1000 \quad (38)$$

$$R_{4310} = \text{projizierte Maskenfläche [cm}^2\text{]} \quad (39)$$

$$K_{4311} = \frac{\text{Zuschnittkosten (Personal + Maschine)}}{\text{Maskenzahl pro Werkzeug} \times \text{Teile pro Maske}} \quad (40)$$

$$R_{431n} = \text{Zykluszeit pro Maske [s]} \quad n \in \{2;4\} \quad (41)$$

$$k_{431n} = \frac{\text{Maschinenstundensatz Fertigungsanlage}}{3600 \text{ s} \times \text{Teile pro Maske}} \quad n \in \{2;4\} \quad (42)$$

$$K_{4313} = \frac{\text{Herstellkosten (Personal + Maschine) + Materialkosten (Stahl)}}{\text{Maskenzahl pro Werkzeug} \times \text{Teile pro Maske}} \quad (43)$$

$$k_{4315} = \text{Platzstundenkosten Programmierplatz} \quad (44)$$

$$R_{4315} = \frac{\text{Programmierzeit [h]}}{\text{Maskenzahl pro Programm} \times \text{Teile pro Maske}} \quad (45)$$

Nach dem Erstellen der Masken folgt die eigentliche Belichtung. Die Kosten hierfür setzen sich zusammen aus den Anlagen- und Personalkosten für die Belichtungseinheit. Die Kosten für das Aufspannen der Masken sind in der Zykluszeit enthalten, die sich aus der eigentlichen Belichtungszeit und der Vorbereitungszeit zusammensetzt.

4: Strukturierung									
strukturieren Folie	41	Heißprägen	42	Photoresist belichten	43	Leiterzüge verbinden	44	Isolationska- näle lasern	45
		Maske		Fertigung					
		431		432					

$$k_{432} = \frac{\text{Maschinenstundensatz Belichtungsanlage}}{3600 \text{ [s]}} \quad (46)$$

$$R_{432} = \text{Belichtungszeit pro Teil [s]} + \text{Zeit zum Aufspannen der Maske [s]} \quad (47)$$

$$K_{43} = \sum_{m=1}^2 \sum_{n=1}^5 R_{43mn} \times k_{43mn} \quad (48)$$

Kostengruppe 44: Leiterzüge verbinden

Beim Zweikomponentenspritzguß findet die Strukturierung bereits im Werkzeug statt, so daß hier keine zusätzlichen Strukturierungskosten anfallen. Dafür sind die Kosten für das zweite Werkzeug als Fixkosten in der Kalkulation für den Spritzguß zu berücksichtigen. Da bei Teilen, die im Zweikomponentenverfahren hergestellt wurden, die einzelnen Leiterzüge in der Regel nicht alle miteinander verbunden sind, erfolgt die Metallisierung meist rein chemisch, so daß die Strukturierung im Zweikomponentenspritzguß entsprechend höhere variable Kosten beim Metallisieren erfordert. Die für das Verbinden entstehenden Kosten sind in Kostengruppe 331 "Fixierungstechnologien für galvanische Prozesse" enthalten.

Kostengruppe 45: Isolationskanäle lasern

Beim Laserdirektstrukturieren wird nicht eine Maske, sondern das zu strukturierende Teil direkt mit einem Laserstrahl abgefahren.

4: Strukturierung									
strukturieren Folie	41	Heißprägen	42	Photoresist belichten	43	Leiterzüge verbinden	44	Isolationska- näle lasern	45
				Programm		Fertigung			
				451		452			

$$k_{451} = \text{Platzstundenkosten Programmierplatz} \quad (49)$$

$$R_{451} = \frac{\text{Programmierzeit [h]}}{\text{Teilezahl pro Programm}} \quad (50)$$

$$k_{452} = \frac{\text{Maschinenstundensatz Laseranlage}}{3600 \text{ [s/h]} \times \text{Strukturierungsgeschwindigkeit [cm/s]}} \quad (51)$$

$$R_{452} = \text{zu strukturierende Leiterbahnlänge [cm]} \times 2 \quad (52)$$

$$K_{45} = \sum_{n=1}^2 R_{45n} \times k_{45n} \quad (53)$$

Es fallen Kosten für die Investition in den Laser an, so daß die Wirtschaftlichkeit in der Regel erst bei größeren Gesamtstückzahlen der MID-Produktion gegeben ist. Diese können sich aber kleine Lose verteilen, da jeweils nur ein neues Programm zu erstellen ist und keine Anlagen mehr anzuschaffen sind. In der industriellen Praxis ist die Laserdirektstrukturierung derzeit im wesentlichen auf planare Strukturen beschränkt, eine Anlage zum dreidimensionalen Strukturieren wird gerade entwickelt [30].

In Gleichung (51) bestimmt sich die Zykluszeit aus der Länge der Leiterzüge (wird verdoppelt, da jede Bahn umfahren werden muß) und der möglichen Strukturierungsgeschwindigkeit, die in der Regel von dem eingesetzten Ätzresist und nicht den technischen Grenzen der Laseranlage bestimmt wird. Wenn z.B. mit 1 m/s strukturiert werden kann und 50 parallele Leitungen zu je 50 mm Länge zu strukturieren sind, dann ergibt sich eine Zykluszeit von $(50 \times 2 \times 0,05 \text{ s}) = 5 \text{ s}$.

Gesamtkosten Strukturierung: $K_4 = K_{st} = \sum_{k=1}^5 K_{4k} \quad (54)$

6.3.5 Montage von Baugruppe und System

Einer der wichtigsten Vorteile der MID-Technologie ist die Möglichkeit zur Funktionsintegration. Gleichzeitig ist die Realisierung eines möglichst hohen Integrationspotentials aber auch Voraussetzung für den erfolgreichen Einsatz der Technologie. Die Montage besteht aus zwei Schritten. Zuerst erfolgt - falls für die Produktfunktion erforderlich - die Bestückung des MIDs mit Bauelementen. Anschließend erfolgt die Montage des Gesamtsystems analog dem Zusammenbau herkömmlicher elektronischer Geräte, wobei der Einsatz der MID-Technologie in der Regel Einzelteile und Verbindungselemente auf Systemebene einspart und dadurch Rationalisierungsreserven freisetzt.

Kostengruppe 51: Bestücken

Dieser Schritt gliedert sich in drei Teilschritte auf: Nach dem Vorbereiten der Substrate durch Auftragen eines Verbindungsmediums (Lot oder Leitklebstoff) folgt das Plazieren der Bauelemente und das Löten bzw. Aushärten des Leitklebers. Andere Verbindungstechniken für Bauelemente spielen derzeit keine nennenswerte Rolle.

Das Beschichten des Substrates mit einem Verbindungsmedium kann durch Sieb- bzw. Schablonendruck oder eine Dispensanlage erfolgen. Für das Dispensieren lassen sich die Zykluszeiten auf Maschinenebene ermitteln. Das Drucken, ein paralleler und dadurch sehr wirtschaftlicher Prozeß, kann nur bei ebenen Prozeßflächen ohne Hindernisse zuverlässig durchgeführt werden. Die Zykluszeit pro Fügestelle beim Drucken und Löten/Aushärten berechnet sich nach folgender Gleichung:

$$\text{Zykluszeit} = \frac{\text{Zykluszeit Rakel bzw. Durchlaufzeit [s]}}{\text{Anzahl Fügestellen pro Sieb od. Schablone bzw. pro Bauteil}} \quad (55)$$

Zusätzlich zu den allen Bestücksschritten gemeinsamen Anlagenkosten fallen beim Vorbereiten Kosten für das Verbindungsmedium, beim Plazieren für die Bauelemente und beim Löten bzw. dem Aushärten des Leitklebers im wesentlichen für Energie sowie ein evtl. beim Löten nötiges Schutzgas (Stickstoff) oder Wirkmedium (Dampfphase) an.

Das Plazieren elektronischer Bauelemente auf dreidimensionalen MID-Substraten ist langsamer und damit teurer als auf planaren Leiterplatten. Die Bestück- und Montage-

systeme erfordern einen größeren Z-Hub. Außerdem müssen mehr Achsen koordiniert werden, was auch Genauigkeitsverluste mit sich bringt [13]. Diese systembedingten Nachteile treten besonders stark in Erscheinung, wenn der Anteil der Hauptzeiten an der gesamten Fertigungszeit sehr hoch ist, also insbesondere bei Baugruppen mit einer großen Anzahl von Bauteilen. Der Zeitrückstand kann relativ klein werden, wenn im Fertigungsprozeß Rüst- u. Transportzeiten überwiegen, also bei kleinen Losgrößen oder bei Baugruppen, die mit nur wenigen Bauelementen bestückt werden. Die Maschinenstundensätze so modifizierter Anlagen liegen deutlich über denen herkömmlicher Anlagen (ca. 120 DM [77]). Derzeit erreichen MID-taugliche Bestückssysteme eine Leistung von höchstens 1800-2400 Bauelementen je Stunde, gegenüber etwa 5000 bei modernen, konventionellen Bestückern. Das Setzen eines Bauelementes auf räumlich angeordnete Prozeßflächen ist etwa dreimal so teuer wie auf einer ebenen Leiterplatte. Es ist jedoch nicht möglich, eine definierte Grenzzahl von Bauelementen anzugeben, bis zu der ein Einsatz der MID-Technologie sinnvoll ist, da die Effizienz der Bestückung stark von der Gestaltung des Schaltungsträgers und den eingesetzten Anlagen abhängt. Als grober Richtwert können etwa 30-50 Bauelemente angesehen werden.

Maßgebliche Kosten bei der Komplettierung einer MID-Baugruppe werden von den Bauelementen verursacht. Diese sind bei herkömmlichen und MID-Substraten häufig gleich. Wesentliche Unterschiede sind aber bei Steckverbindern zu beachten, die in einen spritzgegossenen Schaltungsträger integriert sein und damit als Zukaufteile entfallen können. Bild 85 zeigt dies am Ersatz eines SMD-Steckers durch eine gespritzte Steckerkulisserie mit eingepreßten Pins. Die Materialkosten für den Stecker sinken hierdurch um 70%. Die SMD-Bestückung wird trotz des zusätzlichen Einpreßvorgangs um 37% günstiger. Obwohl das MID-Substrat (mit integrierter Kulisserie und Fügehilfe) mehr als das Dreifache einer Leiterplatte kostet, konnten die beeinflussbaren Kosten um 27% reduziert werden. Daß bei der Gesamtbaugruppe lediglich 10% eingespart wurden, liegt an einem extrem hohen Anteil von über 62% nicht beeinflussbarer Kosten.

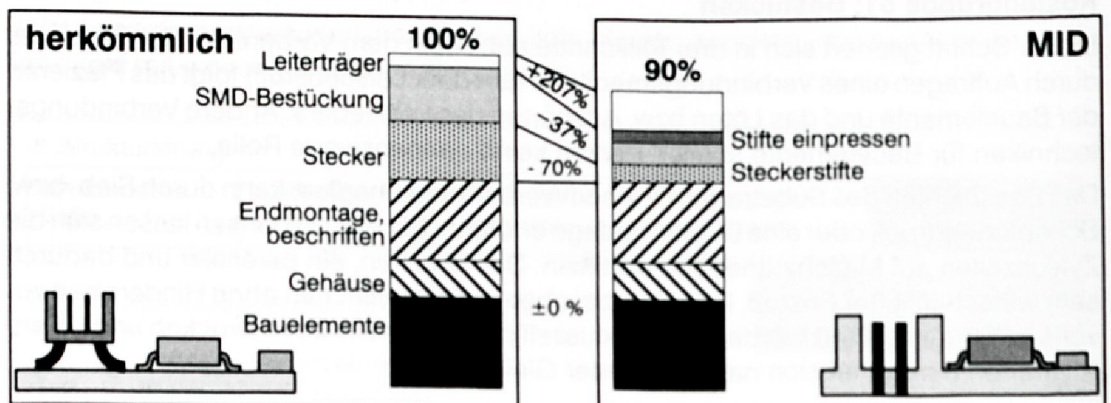


Bild 85: Montagedominierte Kostenveränderung durch den Einsatz der MID-Technologie bei einer elektronischen Kleinbaugruppe

Kostengruppe 52: Systemmontage

Nach dem Bestücken und der Verbindungstechnik, die je nach eingesetztem Verfahren unterschiedliche Kosten verursacht, folgt die Systemmontage. Kostenvorteile können und müssen aufgrund der oben dargestellten hohen Bestückkosten vor allem durch die Integration von Baugruppen realisiert werden.

Die Kosten der Systemmontage werden von zwei Faktoren bestimmt: der Anzahl der Fügestellen und dem Aufwand, der zum Bearbeiten jeder Fügestelle erforderlich ist. Somit läßt sich hier - je nach Automatisierungsgrad der Montage - die klassische Platzkostenrechnung anwenden. Diese Ermittlung der Kosten für die einzelnen Schritte in der Systemmontage von Baugruppen mit MID-Elementen unterscheidet sich nicht von der Kostenbestimmung für andere Systeme. Diese ist in zahlreichen Publikationen beschrieben (z.B. [86,114]) und soll daher hier nicht weiter hergeleitet werden.

Gesamtkosten Montage:

$$K_S = K_{mo} = \sum_{k=1}^2 K_{Sk} \quad (56)$$

Um eine frühzeitige Einschätzung des Einsparpotentials der MID-Technologie zu ermöglichen, ist eine möglichst genaue, prozeßorientierte Aufschlüsselung der im Montageablauf entstehenden Kosten erforderlich. Kritisch zu betrachten ist der Einsatz der MID-Technik immer dann, wenn sie zur Erzielung merklicher Einsparungen weit überdurchschnittliche Kostensenkungen als Substrat erbringen soll, um hohe Kosten in großen, nicht beeinflussbaren Blöcken zu kompensieren. Eine Kopplung dieser Forderung mit der Vorgabe, die Funktionsgliederung und die geometrische Form der Baugruppen möglichst nicht zu verändern, macht eine erfolgreiche Problemlösung mit Hilfe der MID-Technologie noch schwieriger.

6.3.6 Einsatz

Die Grenze zwischen Montage- und Einsatzkosten ist nicht genau zu ziehen. Es kommt auf den Blickwinkel des Betrachters an. So sind z.B. durch eine eingeformte Montagehilfe gesenkte Kosten für den Zusammenbau des Systems aus Sicht des Systemlieferanten Montagekosten, für den vorgeschalteten Zulieferer gehören Sie jedoch bereits der Gebrauchsphase seines Zulieferteils beim Kunden (dem Systemhersteller) an. Auch wenn solche Kostenvorteile bei der Kalkulation eines Beschaffungsteiles nicht offensichtlich sind, müssen sie dennoch berücksichtigt werden, um dem Gesamtsystem gerecht zu werden.

Abgesehen von den am Ende der Entstehungsphase eines Produktes anfallenden Kosten, kann die MID-Technologie Vorteile bieten, die sich erst in einer späteren Phase des Produktlebenszyklus finanziell bemerkbar machen. Zum Beispiel kann durch Gewichtsersparnis der Kraftstoffverbrauch eines Fahrzeuges reduziert werden. Weniger Einzelteile ermöglichen durch höhere Zuverlässigkeit eine wartungsärmere Konstruktion. Durch das Einsparen von Kabeln (z.B. im Armaturenbereich eines Autos oder im Flugzeuginnenraum) kann Klappern vermieden und somit eine höhere Produktqualität erzielt werden.

Ein Aspekt, der in diesem Zusammenhang nicht unerwähnt bleiben darf, ist die künftig verstärkt notwendig werdende fachgerechte Entsorgung von Elektronikgeräten, in Deutschland gemäß der "Informationstechnik-Geräteverordnung" [142]). Konventionelle Baugruppen, die aus mehreren Einzelteilen bestehen, müssen aufwendig zerlegt werden. Die verbleibenden, duroplastischen Leiterplatten können praktisch nur verbrannt werden. Bei MIDs kann das Metall auf verschiedene Arten vom Thermoplast abgelöst und der Kunststoff regranuliert werden [112]. Dies ermöglicht eine Wiederverwertung des Kunststoffgranulates. In Zukunft ist damit zu rechnen, daß die Entsorgung

von elektronischen Geräten kostenpflichtig werden wird. MIDs bieten eine Möglichkeit, dieses Problem schon bei der Produktgestaltung zu umgehen.

6.3.7 Logistik

Ein Kostenblock, der oft unberücksichtigt bleibt, zu dessen Reduzierung die MID-Technologie jedoch deutlich beitragen kann, sind Logistikkosten. Durch das Integrationspotential kann ein MID zur Reduktion der Gesamtteilzahl führen. Dies bewirkt eine Verkleinerung der Stücklisten und geringeren Teileverwaltungsaufwand. Betrachtet man die gesamte Kette von der Bereitstellung des Rohmaterials bis hin zur Ersatzteilversorgung von Geräten, können erhebliche Einsparungen realisiert werden.

Die Integralbauweise von MID-Baugruppen erschwert eine Reparatur. Häufig ist aber, insbesondere im Consumer-Bereich, der Austausch der Baugruppe ohnehin kostengünstiger als Fehlersuche und Reparatur. Dies ergibt eine weitere Kosteneinparung, da statt vieler getrennter Ersatzteile nur noch Module verwaltet werden müssen.

Ein wichtiges logistisches Ziel ist es, trotz hoher Variantenvielfalt für den Kunden eine möglichst geringe Variantenzahl durch die Fertigung schleusen zu müssen. Dies wird durch eine möglichst späte Diversifizierung und ein Verschieben des "Freeze-Point", bis zu dem ein Produkt undifferenziert gefertigt werden kann, nach hinten erreicht [106].

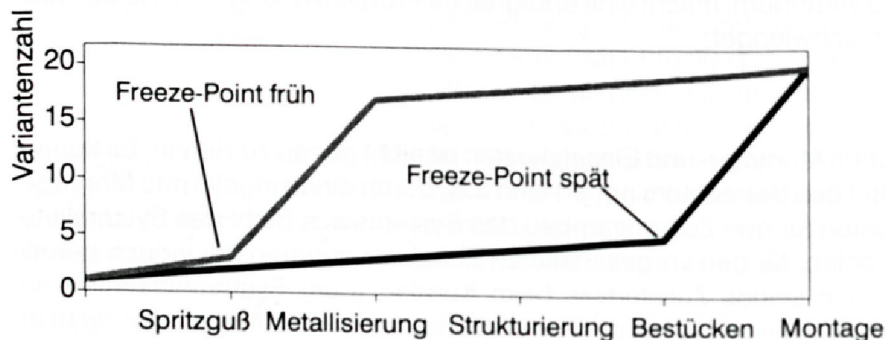


Bild 86: Verschiebung des Freeze-Point (nach [106])

Für eine Strategie mit spätem Freeze-Point bietet sich bei MID ein modularer Produktaufbau mit einheitlichen Innenkomponenten an, die durch Design- oder Bestückungsvarianten zu Marktversionen werden. Dies gilt vor allem für Konsumgeräte mit häufiger optischer Aktualisierung, während die Funktion über mehrere Gerätegenerationen ähnlich bleiben kann. Die Trennung in Einheits- und Spezifikationsteile ermöglicht es, bei ersteren Mengeneffekte auszunutzen, die bei MID besonders ausgeprägt in Erscheinung treten. Insbesondere im Spritzguß sollte versucht werden, mit einer Produktvariante oder symmetrischen (gleichzeitig gespritzten) Teilen auszukommen.

Neben den direkten logistischen Einsparungen durch reduzierte Teileverwaltung treten die indirekten Einsparungen in den Vordergrund: gleiche Teile benötigen keine unterschiedlichen Arbeitsanweisungen, Verwechslungen werden verhindert, Werkzeuge und Vorrichtungen können rationeller benutzt werden.

6.4 Einfluß unterschiedlicher Kalkulationsmodelle

Einen Einfluß auf die Preisfindung und insbesondere darauf, welche Kosten eines MIDs mit der herkömmlichen Lösung verglichen werden, üben neben Faktoren aus dem Pro-

duktlebenszyklus auch finanztechnische Modelle aus. In der Regel stehen MID-Baugruppen im Wettbewerb zu ausgereiften konventionellen Produkten, deren Produktion sich im "eingeschwungenen Zustand" auf häufig bereits abgeschriebenen Maschinen abspielt. Hier treten neben den Deckungsbeiträgen kaum mehr nennenswerte Fertigungskosten auf. Eine MID-Kalkulation basiert dagegen häufig auf der Annahme, die Maschinen extra beschaffen und abschreiben zu müssen.

Die unterschiedlichen Kalkulationsmodelle erschweren daher einen direkten Preisvergleich gegenüber herkömmlichen Technologien sowie zwischen unterschiedlichen Anbietern. Abschreibungsmodelle führten in Projekten teilweise zu kalkulatorischen Kostenunterschieden von 100%, je nach Wahl des Modells und des Betrachtungszeitpunktes. Aus Bild 87 sind die verschiedenen Modelle vergleichend dargestellt. Bei linearer Abschreibung verliert ein eingesetztes Wirtschaftsgut jedes Jahr den gleichen Teilwert. Bei der degressiven Abschreibung verliert das Gut am Anfang seiner Nutzungsdauer sehr stark, am Ende nur noch sehr wenig an Wert.

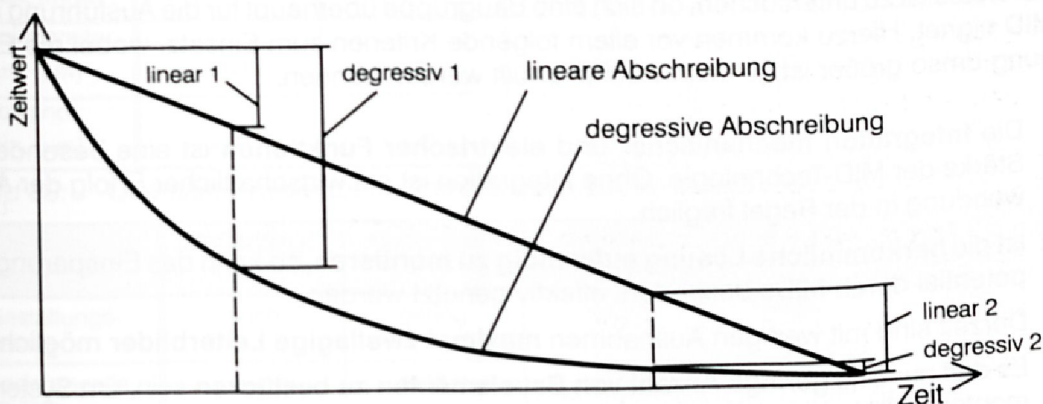


Bild 87: Unterschiedliche Abschreibungsmodelle und Ihre Auswirkungen auf die Kosten von MID-Applikationen

Bei MID-Baugruppen ist insbesondere noch die Abschreibung der Spritzgußformen von Bedeutung. Kalkulatorisch wichtig ist auch die Frage, ob die Werkzeuge getrennt abgerechnet werden oder ihre Kosten in den Teilepreis eingerechnet werden müssen.

Außer den Abschreibungen spielen auch Zuschläge für Gemeinkosten, kalkulatorische Generalunternehmerzuschläge oder unterschiedliche Gewinnaufschläge eine Rolle. Hier ist jedoch ein Trend von der klassischen Zuschlagskalkulation hin zum Target Costing, also einer Zielkostenkalkulation, zu verzeichnen [14]. Insbesondere in sehr hoch automatisierten Bereichen mit geringen Anteilen der Lohnkosten an den Fertigungskosten werden die Zuschlagsätze so hoch, daß sie sich zu stark als Ungenauigkeiten in der Kalkulation auswirken. Daher müssen die Einflußfaktoren genauer bestimmt werden.

Weiterhin ist wichtig, ob eine MID-Fertigung auf der "Grünen Wiese" geplant wird oder sich in eine bestehende Fabrikumgebung einordnen muß. Während im ersten Fall die anzuschaffenden Kapazitäten genau an den zu erwartenden Bedürfnissen orientiert werden können, sind bei Einplanung in eine bestehende Fertigung vorhandene Engpässe oder für andere Produkte optimierte Fertigungsstraßen zu berücksichtigen. Dies kann zu zusätzlichen Kosten aufgrund nicht ausgelasteter Kapazitäten u.ä. führen.

7 Auswahlkriterien und Gestaltungsregeln für MIDs

Die übersichtliche Bereitstellung der umfangreichen, für eine Entscheidungsfindung hinsichtlich des Einsatzes der MID-Technologie und der Auswahl eines Herstellverfahrens erforderlichen Information ist für potentielle Anwender und Hersteller sehr wichtig.

Es wurde daher ein Katalog zusammengestellt, der wesentliche Fragen enthält, die man sich vor und während der Konstruktion einer Baugruppe in der Technologie spritzgegossener Schaltungsträger vor Augen halten muß. Sie sind in den nachfolgenden Unterkapiteln näher dargestellt und erläutert. Die Kriterien sind jedoch nur als Anhaltspunkte zu verstehen, da sich die Technologie ständig weiterentwickelt und daher insbesondere die technologischen Grenzen der einzelnen Verfahren ständig verschoben werden.

7.1 Regeln zur allgemeinen Beurteilung der MID-Tauglichkeit

Als erstes ist zu untersuchen, ob sich eine Baugruppe überhaupt für die Ausführung als MID eignet. Hierzu kommen vor allem folgende Kriterien zum Einsatz, wobei die Eignung umso größer ist, je mehr Punkte erfüllt werden können:

- Die **Integration mechanischer und elektrischer Funktionen** ist eine besondere Stärke der MID-Technologie. Ohne Integration ist ein wirtschaftlicher Erfolg der Anwendung in der Regel fraglich.
- Ist die **herkömmliche Lösung aufwendig zu montieren**, so kann das Einsparungspotential durch MIDs besonders effektiv genutzt werden.
- Derzeit sind mit wenigen Ausnahmen **maximal zweilagige Leiterbilder** möglich.
- Es darf nur eine **geringe Anzahl von Bauelementen zu bestücken** sein, um Systemmontagezeitgewinne nicht durch Bestückzeitverluste überzukompensieren.
- Durch **hohe Stückzahlen** relativieren sich die hohen Investitionskosten.

Einige zusätzliche Kriterien begünstigen den Einsatz der MID-Technologie weiter:

- **Abschirmflächen und/oder Wärmesenken** sowie die **Reduzierung von Volumen oder Gewicht** lassen sich bei MIDs sehr einfach realisieren.
- Der **Einsatz von SMD-Bauelementen** ist im Vergleich zu Durchsteckbauelementen bei MIDs besonders zu bevorzugen.
- **Innovation als Teil der Unternehmensstrategie** begünstigt den Einsatz einer jungen, forschungsintensiven Technologie wie MID.

7.2 Technische Grenzen der Herstellungsverfahren

Erscheint die Ausführung einer Baugruppe in MID-Technologie grundsätzlich durchführbar, so muß ein geeignetes Verfahren ausgewählt werden. Als Entscheidungshilfen kommen die nachfolgend genannten Punkte zum Einsatz. Zuerst wird aufgrund der vorgegebenen Anforderungen (siehe Kapitel 5) das MID-Herstellverfahren ausgewählt. Die dabei geltenden technologischen Grenzen der einzelnen Verfahren sind nachstehend aufgeführt. Sie sind jedoch nur als Richtwerte anzusehen:

	2K-Spritzguß			Heißprägen			Maskenstrukt- turierung			Laser-Direkt- strukturierung			Folien- hinterspritzen		
Cu-Schicht															
min. [μm]	1			12			5			9			15		
max. [μm]	50			150			70			50			70		
Oberflächen- finish	Sn/ Pb	Ni	Au	Sn/ Pb	Ni	Au	Sn/ Pb	Ni	Au	Sn/ Pb	Ni	Au	Sn/ Pb	Ni	Au
min. [μm]	-	1	0.1	0.5	1	0.1	5	1	0.1	2	3	0.1	-	1	0.1
max. [μm]	-	12	0.8	10	5	2	13	12	1	15	5	0.2	-	5	1
Beschich- tungsfläche max. [cm^2]	begrenzt durch Badgröße			begrenzt durch Folie und Anlagen			2500			400			75% der Fo- lienfläche		
Z- Ausdehnung max. [mm]	200			begrenzt durch Anlage			230			200			200		
Linienbreite min. [μm]	250			200			125			80			100		
Abstand min. [μm]	250			300			125			40			100		

Bild 88: Quantitativ bewertbare Grenzen verschiedener MID-Herstellverfahren

	2K-Spritzguß	Heißprägen	Masken- strukturierung	Laser-Direkt- strukturierung	Folien hinter- spritzen
Gestaltungs- freiheit	hoch	gering	mäßig	mäßig	mäßig
Änderungsflexi- bilität	gering	mäßig	mäßig	hoch	hoch
EMV-Abschir- mung	einfach	schwierig	sehr einfach	sehr einfach	schwierig
Anlagen- investitionen	hoch	gering	mäßig	hoch	mäßig
Durchkontak- tierungen	möglich	schwierig	möglich	möglich	möglich
Sichtflächen	eingeschränkt	ja	sehr begrenzt	eingeschränkt	ja
Effizienz	hoch	hoch	niedrig	niedrig	hoch
Flexibilität der Oberflächen- metallisierung	hoch	mäßig	hoch	hoch	gering

Bild 89: Qualitative Grenzen verschiedener MID-Herstellverfahren

Neben den zahlenmäßig erfaßbaren Grenzen weist jedes Verfahren auch spezifische Charakteristika auf (siehe auch Kapitel 6), die sich nicht in Zahlen ausdrücken lassen.

Schließlich muß das einzusetzende Verfahren auch unter Umweltgesichtspunkten ausgewählt werden. Dabei gilt, daß naßchemische Prozesse in möglichst kontrollierter Umgebung ablaufen sollten. Nicht recyclebare Materialien sollten nicht eingesetzt werden. Natürlich sind auch die "roten Listen" verschiedener Branchen (siehe Kapitel 6) unbedingt zu beachten.

7.3 Regeln zur Materialauswahl

In engem Zusammenhang mit der Wahl des Herstellverfahrens steht die Auswahl des geeigneten Kunststoffes. Dabei spielt neben Spritzgußeignung und Wärmebeständigkeit vor allem der Preis eine wichtige Rolle bei den Überlegungen. Wichtiger ist jedoch - insbesondere bei kleinen Teilen, bei denen die Materialkosten weit unter den Verarbeitungskosten liegen - die unbedingte Erfüllung der technischen Randbedingungen. Auch hier gilt es wieder, eine Vielzahl von Regeln zu beachten, um das optimale Ergebnis zu erreichen. Einige dieser Regeln sind für alle Herstellverfahren gleich, da sie von den Einsatzbedingungen und nachfolgenden Fertigungsprozessen abhängen.

Beschreibung	Bemerkungen
Temperaturbeständigkeit entsprechend Gebrauchs- und Prozeßanforderungen auswählen	Löten ist der kritische Schritt
	HDT muß höher sein als Löttemperatur, bei abgestütztem Substrat Kompromiß möglich
	Prozesse siehe Abb. 93
	Automobil: kritisch in Motornähe
Material mit thermischem Ausdehnungskoeffizienten wählen, der nahe dem der größten montierten SMD liegt.	Spannungen in Lötverbindungen während Fertigung und Betrieb verringern
prüfen, ob der nötige Flammschutz erreicht werden kann	Automotive erfordert UL 94 V0 geeignete Füllstoffe suchen
geringe Feuchtigkeit anstreben	Blasenbildungsgefahr beim Löten
	teure Vortrocknungsschritte vermeiden
Material mit hoher Wärmeleitfähigkeit verwenden	thermische Spannungen weiter verringern
für HF-Applikationen Material mit geeigneten elektrischen Eigenschaften wählen	Verlustfaktor und Dielektrizitätszahl niedrig halten
ausreichende Fließfähigkeit sicherstellen	dünne Einzelheiten erfordern hohe Fließfähigkeit bei hohem Druck
Chemikalienbeständigkeit des Materials berücksichtigen	strenge Anforderungen bei Automobilanwendungen
1.: vermeiden / 2.: verwerten / 3.: entsorgen	grundlegende Umweltregel für die Materialauswahl
sowenig verschiedene Materialien verwenden wie möglich	Abfallstoffe möglichst sortenrein

Bild 90: Regeln zur Materialauswahl für MID-Baugruppen

Je nach Fertigungsverfahren kommen einige Kriterien hinzu, die die Eignung eines Werkstoffes für diesen Prozeß definieren. Grundregel für eine möglichst reibungslose und schnelle Einführung ist dabei das Festhalten an bewährten Materialien und -kombinationen, um aufwendige Versuche zu sparen.

Zweikomponentenspritzguß

Die Kriterien betreffen vor allem das Verhalten der beiden Kunststoffe zueinander beim Spritzgußvorgang. Es muß verhindert werden, daß der zweite Schuß den ersten be-

schädigt oder verformt. Dazu sollte die "Heat Deflection Temperature" (HDT) des Materials für den 1. Schuß höher sein als die des 2. Schusses. Eine geringe Erweichung kann zur Erzielung einer besseren Haftung toleriert werden. Ob der metallisierbare oder der nicht metallisierbare Schuß zuerst gespritzt wird, ist im wesentlichen eine Frage der werkzeugtechnischen Auslegung. Bei den analysierten Applikationen ist jedoch ein deutliches Übergewicht an Anwendungen festzustellen, bei denen der metallisierbare Schuß zuerst ausgebildet wird.

Im Zweikomponentenverfahren zuverlässig selektiv metallisierbare Materialien sind vor allem Polyetherimid (PEI), Polyphthalamid (PPA), Polysulfon (PSU) und ABS. Als Materialien für den nicht zu metallisierenden Schuß können u. a. Polybutylenterephthalat (PBT), Polyphenylensulfid (PPS), Polycarbonat (PC) oder ein ABS+PSU-Blend verwendet werden. Polyethersulfon (PES), Polyamid (PA), und Flüssigkristallpolymere (LCP) sind sowohl metallisierbar als auch nicht metallisierbar erhältlich.

Zur Abbildung feiner Strukturen sind hochfließfähige Werkstoffe erforderlich, z. B. LCP.

Heißprägen

Hier beziehen sich die zusätzlichen Anforderungen vor allem auf das Zusammenspiel von Folie und Substrat zum Erzielen einer möglichst guten Haftung. Besonders gute Ergebnisse wurden bisher mit ABS, PA, PBT und PC+ABS-Blend erzielt. Eine große Palette weiterer Materialien ist derzeit in Erprobung.

Vorteilhaft für die Verbesserung der Heißprägeeignung eines Werkstoffs ist ein hoher Füllstoffgehalt der Materialien und das Vermeiden schwarzer Oberflächen. Wichtig ist jedoch auch die Kompatibilität der Haftschrift auf der Folie zum jeweiligen Basismaterial und eine begrenzte Rauigkeit der Oberfläche ($R_a < 10 \mu\text{m}$).

Masken- und Laserstrukturierung

Bei der Masken- und Laserstrukturierung ist besonders die Auswahl bewährter Materialien wichtig. Dies sind beim Maskenstrukturieren PEI, PPA, PP, PET, PPO, ASA sowie Blends aus PC+PBT oder ABS+PSU.

Für die Laserstrukturierung eignen sich insbesondere PEI, PA und LCP.

Hinterspritzen von Folien

Kern der Regeln für das Folienhinterspritzen ist die Kompatibilität der verwendeten Materialien, um ein Verschmelzen sicherzustellen. Wichtig ist hier die thermische Stabilität, wobei sich gezeigt hat, daß Hochleistungswerkstoffe wie PEI oder PBT zu besten Ergebnissen führen. Für andere Anwendungen ist als Hinterspritzwerkstoff auch PPS (AIT-Verfahren, siehe Kapitel 6) oder PC geeignet. Auch hier ist eine Glasfüllung zur Senkung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten wünschenswert. Bevorzugt sollten gegen Wasseraufnahme unempfindliche Materialien eingesetzt werden, da die Blasenbildung beim Folienverfahren besonders kritisch ist.

Zu beachten ist auch die Auswahl geeigneter Metallisierungswerkstoffe für verschiedene Einsatzbereiche. Während für breite Bahnen aus Kostengründen aufgedruckte Silberleitpaste gegenüber Kupfer bevorzugt wird, ist dessen Einsatz bei feinen Strukturen unumgänglich, obwohl eine Beschichtung als Schutz gegen Oxidation zusätzliche Kosten verursacht.

7.4 Regeln für die geometrische Gestaltung

Neben der Materialauswahl ist die geeignete geometrische Gestaltung räumlicher Schaltungsträger äußerst wichtig für die kostengünstige Produktion - sowohl hinsichtlich des Spritzgusses wie auch zur Strukturierung und Montage - und die Erfüllung der Anforderungen im Betrieb. Nachfolgend daher einige Gestaltungsrichtlinien.

- möglichst viele **Funktionen integrieren**, um Stärken der MID-Technologie voll zu nutzen: Geräte klein und leicht; Teilezahl und Montage reduziert.
- **Umspritzte Teile formschlüssig sichern** (Reibschluß allein reicht nicht aus).
- große **Radien zwischen geneigten Flächen** vorsehen, alle **Kanten abrunden**: Schicht wird gleichmäßig, Rißneigung sinkt, Strukturierung einfacher.
- **Montagehilfen integrieren** und **Montage einfach halten** (Schnappverbinder, einseitige Bestückung), um Kosten zu senken und Ausschuß aufgrund von Montagefehlern zu verringern.
- Anzahl der **Prozeßflächen minimieren**, um die Verwendung herkömmlicher Bestückautomaten zu ermöglichen und den Durchsatz zu erhöhen.
- **Prozeßflächen hindernisfrei gestalten**, um parallele Prozesse zu ermöglichen.
- **Höhenunterschied zwischen Prozeßflächen minimieren**, um Prozesse zu vereinfachen (z-Hub <35mm, Bestücken auf Rampen vermeiden).
- **Lösbare Verbinder bevorzugen**, um Demontage und Recycling zu vereinfachen.
- **Durchgangsbohrungen anfasen**, um Spannungen zu verringern und die Metallisierung zu vereinfachen. Aspektverhältnis höchstens 5:1 (evtl. 10:1).
- **keine Anspritzpunkte oder Auswerfer auf Leiterbahnen** (Kristallstruktur stört Metallisierung, lieber mehrere kleine Auswerfer vorsehen).
- **Für hohe Ströme dreidimensionale Leiterzüge einsetzen**, um Platzausnutzung zu verbessern.
- **Hinterschneidungen vermeiden**, um Spritzgußwerkzeug zu vereinfachen.
- **mechanischen und Layoutentwurf gleichzeitig durchführen** (durch integratives Denken "Reibungsverluste" vermeiden).

Ähnlich wie bei der Materialauswahl treten auch bei der geometrischen Gestaltung für die verschiedenen Verfahren zusätzliche Restriktionen auf. Für den **Zweikomponentenspritzguß** betrifft dies vor allem die Verbindung und bestimmte Eigenschaften der beiden Schüsse. Zwischen beiden Schüssen ist Formschluß vorzusehen, wobei Abdichtungen und Schwindmaße entsprechend berücksichtigt werden müssen (siehe [42] S. 60 für Skizzen). Durch eine leichte Schräge an den Bahnen (1-2°) wird der Dichteffekt verbessert. Auch müssen die Metallisierungsschemikalien durch geeignete Barrieren am Eindringen zwischen die beiden Schüsse gehindert werden.

Weiche Bereiche des Spritzgußteils müssen gegen Verformung verstärkt, der Spritzdruck auf den 1. Schuß beim Spritzen des 2. Schusses durch Ausgleich der Strömung und geeignete Angußplatzierung minimiert werden. Flexible Strukturen sollten zur Bruchvermeidung vorzugsweise im nicht metallisierten Schuß vorgesehen werden.

Beim **Heißprägen** muß insbesondere die eingeschränkte Geometrie und Kinematik des Prägestempels in der geometrischen Gestaltung berücksichtigt werden. Die mini-

male Substratdicke im Prägebereich muß 0,5x die Bahnbreite, mindestens aber 1 mm sein. Die Foliengröße sollte 100x100 mm nicht übersteigen, um Koplanaritätsprobleme und eine ungleichmäßige Temperaturverteilung bei größeren Prägestempeln zu vermeiden. Eine einwandfreie Abstützung des Substrats ist erforderlich.

Auch die Oberflächen selbst sollten so eben wie möglich sein, wobei gewölbte Flächen möglich sind. Rippen oder ähnliche Strukturen im Prägebereich sind unzulässig. Kanten sollten mit mindestens 2 mm ausgerundet werden, um ein spannungsbedingtes Reißen der Folie zu verhindern. An stark geneigten Flächen sollten Bahnen entlang der Falllinie geführt werden. Sollen Löcher für die Montage von Durchsteckbauelementen geprägt werden, so muß ihr Durchmesser 0,2 mm größer sein als normalerweise.

Bei der **Maskenstrukturierung** sind einige Regeln zu beachten, um ein sauberes Anliegen der Maske und ein scharfes Abbilden des Leiterzugmusters auf die Oberfläche des Kunststoffteiles zu gewährleisten.

Zur exakten Ausrichtung von Maske und Substrat sind Registriermarken oder -zapfen vorzusehen. Alle Ecken und Kanten müssen abgerundet werden. Sollen Verbindungen zwischen zwei Seiten eines Substrats hergestellt werden, so sind Durchkontaktierungen einfacher zu realisieren als eine Beschichtung um die Kante. Das Maskenverfahren eignet sich aufgrund der Ätzschritte nur beschränkt für Sichtflächen.

Formen, die die Maske komplizieren, sind möglichst zu vermeiden. Aushebeschrägen von 3° bis 60° erleichtern das Anlegen der Maske. Tiefe innere Wände mit steilen Rampen sind aufgrund der begrenzten Tiefenschärfe bei der Abbildung zu vermeiden (Aspektverhältnis Tiefe: min (Länge, Breite) < 0,5).

Bei der **Laserstrukturierung** ist die Oberfläche so zu gestalten, daß ein einwandfreies Abtasten mit dem Laser möglich ist. So dürfen keine Bahnen über scharfe Kanten geführt werden, da eine Stromdichtenkonzentration bei der galvanischen Beschichtung zu ungleichmäßiger Schichtdicke führt und eine qualitativ hochwertige Strukturierung erschwert. Die mögliche Strukturtiefe ist durch die Gefahr einer Abschattung begrenzt.

Beim **Hinterspritzen von Folien** muß ein Verziehen der Folie und damit des Leiterbildes unbedingt vermieden werden. Dies kann wesentlich durch die Anordnung der Anspritzpunkte beeinflusst werden. Wird die Folie durch scharfe Ecken oder Kanten zu stark gedehnt, können die darauf enthaltenen Schaltungsstrukturen verzogen werden oder gar reißen.

7.5 Regeln für das Metallisieren

7.5.1 Gestaltungsregeln für den galvanisiergerechten Spritzguß

Ein weiterer Punkt zur Kostenreduzierung hinsichtlich der Galvanik ist die galvanogerechte Gestaltung der Substrate. Auch die richtige Verarbeitung des Kunststoffgranulats im Spritzguß hat wesentlichen Einfluß auf die Qualität der Beschichtung. Um Ausschuß und damit zusätzliche Kosten zu verhindern, müssen beim Spritzgießen von MID-Formkörpern unbedingt die nachfolgenden Fehler vermieden (nach [113,141]) bzw. Regeln beachtet werden.

- **Keine Sacklöcher** und **ausreichende Auslaufmöglichkeiten** bei Hohlteilen vorsehen (Schöpfeffekt verschleppt Elektrolyt, erhöht Gefahr von Qualitätsproblemen).
- **Metallisierungspfade weich ausrunden** (guter Elektrolytzu- und -abfluß).

- mehrere Leiterbahnen über **externe Brücken** verbinden (ermöglicht elektrolyt. Metallisierung mit *einer* Klemmung). Spanendes Abtrennen (statt Brechen) verhindert Beschädigen der Metallschicht.
- Zu dünne **Wandstärken** des Formkörpers führen zu Verzug beim Galvanisieren.
- Durch **genügende Leistung der Spritzmaschine** Fließlinien im Spritzling vermeiden, die beim Galvanisieren die Haftfestigkeit verringern.
- Kontur möglichst **unanfällig gegen Verhaken** gestalten (ermöglicht evtl. Verarbeitung in der Trommel und erspart das Aufstecken auf Gestelle).
- **Spritzwerkzeug gleichmäßig temperieren**, da der Kunststoff sonst im Galvanisierungsprozeß unterschiedlich stark chemisch aufgeschlossen wird.
- **Einspritzen von Metallteilen** führt wegen unterschiedlicher Ausdehnungskoeffizienten zu Schwierigkeiten und höherem Ausschuß in der Galvanik.
- **genügende Vortrocknung** des Granulates vor dem Spritzen verhindert Feuchtigkeitseinschlüsse unter der Spritzhaut und Blasenbildung.
- **Niemals silikonhaltige Trennmittel** für Bauteile verwenden, die nachträglich galvanisiert werden.
- **Spitzen und scharfe Kanten vermeiden** (führt zu wulstig verdicktem Metallüberzug). Temperaturwechselfestigkeit fordert gleichmäßige Schicht.

7.5.2 Zusammensetzung der Metallisierung

Wichtig für gute Ergebnisse ist die richtige Zusammensetzung der Metallisierung. Hier sind ebenfalls einige Regeln zu beachten, die jedoch im wesentlichen gleich denen für herkömmliche Leiterplattenoberflächen sind.

Als Grundschicht wird immer eine chemische Verkupferung vorgesehen, lediglich auf Polyamid kommt auch Nickel als Anschlagmetall zum Einsatz. Verstärkt wird entweder chemisch oder galvanisch.

Die Ausgestaltung der Oberfläche hängt vom Einsatzbereich ab. Während zum Reflowlöten eine Zinn-Blei-Oberfläche sinnvoll ist, ist für Kontakte und andere harte Oberflächen eine Vernickelung vorzusehen. Für Kontaktoberflächen höchster Qualität und Bondverbindungen ist Gold das geeignetste Material.

7.6 Wirtschaftliche Grenze zwischen rein chemischer und chemisch/galvanischer Metallabscheidung

Eine wesentliche Entscheidung bei der Metallisierung ist das Aufbringen der Metallschicht auf chemischem oder chemisch-galvanischem Weg.

Da bei galvanischem Niederschlag das externe Zuführen von Strom unabdingbare Voraussetzung ist, muß bei elektrolytisch zu metallisierenden Baugruppen jede später metallisierte Fläche mit einer Zuleitung verbunden werden. Bei volladditiven Prozessen, bei denen die Leiterzüge auf das MID bereits strukturiert aufgetragen werden (in der Regel bei Zweikomponenten-Spritzgußteilen), erfordert dies umfangreiche Kontaktierungsmaßnahmen. Aufgrund der häufig komplexen äußeren Geometrie von MIDs erfolgt die Kontaktierung meist mittels gesonderter, aufwendiger Gestelle mit Klemmeinrichtungen zum sicheren Kontaktieren. Da diese Klemmung präziser erfolgen muß als das Auf-

stecken für die chemische Beschichtung, treten hier wesentlich höhere Kosten auf. Für geringe Schichtstärken kann daher ein durchgehender Einsatz des eigentlich teureren chemischen Prozesses günstiger sein als das Klemmen und galvanische Abscheiden. Nachfolgend wird versucht, einen Grenzwert für die Schichtdicke anzugeben, ab dem der Übergang auf eine gemischte chemisch-galvanische Beschichtung zu geringeren Gesamtkosten führt als eine rein chemische Metallisierung.

7.6.1 Grundlegende Einflußfaktoren und Randbedingungsszenario

Eine maßgebliche Einflußgröße für die Kosten der eigentlichen Beschichtungsprozesse ist die Auslastung der Bäder. Sie hängt im wesentlichen von der Badbelastbarkeit und der geometrischen Gestalt der Teile ab.

Die Badbelastbarkeit wird in dm^2/l angegeben. In einer chemischen oder galvanischen Metallisierungslösung darf, um die chemische Reaktion einwandfrei ablaufen zu lassen, nur eine bestimmte Abscheidefläche vorhanden sein, typischerweise z.B. bei chemisch-Nickel-Bädern, einer Basismetallisierung für Polyamide, $0,4 \text{ dm}^2/\text{l}$, also 40000 cm^2 zu beschichtender Oberfläche bei einem 1000 l -Badinhalt. Bei chemisch Kupfer beträgt sie ca. $1 \text{ dm}^2/\text{l}$.

Die geometrische Gestalt der Substrate ist entscheidend für die Auslastung des Bades, da zu metallisierende Teile in chemischen Bädern (unter Berücksichtigung der Badbelastbarkeit) beliebig angeordnet werden können, in galvanischen Bädern jedoch auf Abschirmeffekte geachtet werden muß und daher nur eine "Lage" Teile zwischen zwei Anoden eingebracht werden darf. Zusätzlich können Abschirmanoden erforderlich sein. Auch kann nicht die gesamte Gestellfläche genutzt werden, da außer elektrischen Gründen (Feldverteilung) auch Platz für das Klemmen vorgesehen werden muß.

Die Anlagenteile für die chemische Beschichtung sind aufgrund der Regelungstechnik für Temperatur und Volumenstrom der Elektrolyte wesentlich aufwendiger als jene für die Galvanik. Da die galvanische Metallisierung jedoch der Engpaß ist, ist ihr Abschreibungsanteil höher. Somit gleichen sich die Kosten ungefähr aus und es kann mit gleichen Abschreibungssätzen für beide Anlagen gerechnet werden.

Die Grenzsichtstärke läßt sich aus den folgenden Gleichungen ermitteln:

$$K_{m, \text{misch}} = 2K_{g, k} + K_{c, d} \times d_{\text{grund}} + K_{g, d} \times (d - d_{\text{grund}}) \quad (57)$$

$$K_{m, \text{chem}} = 2K_{c, k} + K_{c, d} \times d \quad (58)$$

$$\text{Grenzpunkt: } K_{m, \text{chem}} = K_{m, \text{misch}} \quad (59)$$

wobei:

$K_{m, \text{misch}}$:	Kosten für die gemischt chemisch/elektrolytische Metallisierung
$K_{m, \text{chem}}$:	Kosten für die rein chemische Metallisierung
$K_{c, k}$:	Kosten für das Klemmen der Werkstücke auf Gestelle ("chemisch")
$K_{g, k}$:	Kosten für das Klemmen der Werkstücke auf Gestelle ("galvanisch")
$K_{c, d}$:	Kosten pro chemisch aufgetragener Schichtdickeneinheit
$K_{g, d}$:	Kosten pro galvanisch aufgetragener Schichtdickeneinheit
d :	Schichtdicke (gesamt)
d_{grund} :	Schichtdicke der chemisch aufgetragenen Grundmetallisierung

Grenzpunkt für den Übergang der Schichtart:

Gleiche Kosten ergeben sich bei einer Schichtstärke, bei der die Kosten für die rein chemische und die Summe aus den (Auf- und Ab-)Klemmkosten, den Kosten für eine chemische Grundmetallisierung und den Kosten für das elektrolytische Verstärken den selben Wert einnehmen. Da die Klemmkosten für den chemischen Vorgang in beiden Fällen auftreten, entfallen sie, und man kann folgende Gleichungen ableiten und daraus die entsprechende Grenz-Schichtstärke ermitteln:

$$2K_{c,k} + K_{c,d} \times d = 2K_{g,k} + K_{c,d} \times d_{\text{grund}} + K_{g,d} \times (d - d_{\text{grund}}) \quad (60)$$

$$d = \frac{2K_{g,k} - 2K_{c,k}}{K_{c,d} - K_{g,d}} + d_{\text{grund}} \quad (61)$$

Der resultierende Kostenverlauf läßt sich graphisch wie folgt darstellen:

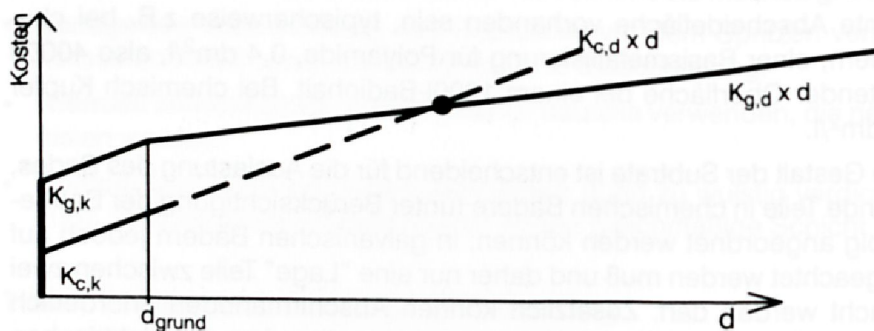


Bild 91: Kostenvergleichsrechnung für chemische und galvanische Metallisierung

Die Angabe eines allgemeingültigen Gleichungssystems ist aufgrund der zahlreichen Einflußfaktoren nicht möglich. Nachfolgend soll basierend auf einem Standardszenario ein Vergleich ermittelt werden, der für verschiedene ähnliche Teile Gültigkeit hat. Folgende Annahmen werden daher getroffen:

- Aufbringen einer Kupferschicht nach abgeschlossener Vorbehandlung
- Badinhalt 1000 l (z.B. 140x100x72 cm³)
- nutzbare Gestellfläche 40% des Behälterquerschnitts (5600 cm²)
- Teilegröße 5x10x3 cm, annähernd quaderförmig
- Metallisierung 20% der Oberfläche
- 4 Klemmstellen pro Teil für galvanische Metallisierung
- Zeitbedarf pro Klemmung (egal ob chemisch od. galvanisch): 0,5s
- Klemmen mit "kleinem" Querschnitt parallel zur Anode
- erforderliche chemische Grundmetallisierung 3µm
- Materialkosten "chemisch Kupfer" = 4x Materialkosten "galvanisch Kupfer"
- Preis für Elektrolytkupfer = 3 DM/kg [137]
- Abscheiderate "galvanisch" = 13,23 µm/h x kath. Stromdichte (5A/dm²) = 66 µm/h
- Abscheiderate "chemisch Cu" = 4 µm/h,
- Badbelastbarkeit chemisch Kupfer 100000 cm²
- Stromausbeute η_k = 100%
- Prozeßtemperatur "chemisch" = 90 °C (beheizt)
- Prozeßtemperatur "galvanisch" = 35 °C (energieneutral)
- Umgebungstemperatur = 20°C

- Wärmeverlust der Bäder 5% pro h
- Lohnkosten für Gestellbeschickung: 54 DM/h = 0,015 DM/s
- Anlagenabschreibung DM 25 pro h (500 TDM Invest auf vier Jahre)
- Volllastung der Anlage mit den betrachteten Teilen
- Abschreibungskosten sind für chemische und galvanische Beschichtung gleich
- Materialkosten für chemisch Nickel und chemisch Kupfer sind annähernd gleich
- Kosten für Zusätze (Netzmittel, Glanzzusätze bleiben unberücksichtigt)
- Gestellkosten und kalkulatorische Zinsen bleiben unberücksichtigt

Aus diesen Vorgaben lassen sich folgende relevante Werte ermitteln:

- Teileoberfläche 190 cm², Metalloberfläche 38 cm² pro Teil (20% von 190cm²)
- Maximalzahl Teile pro Gestell: 373
- Maximalzahl Teile für chemische Verkupferung 2631 (7 x Anzahl "galvanisch")
- Gestelle bei chemischer Verkupferung: 6 à 373 Teile => 2238 Teile nutzbar
- Lohnkosten für Klemmen "galvanisch" pro Teil: 4x0,0075 DM = 0,03 DM
- Lohnkosten für Klemmen "chemisch" pro Teil: 0,0075 DM

7.6.2 Kosten der Metallisierung und Ermittlung des Grenzpunktes

Zuerst müssen die Kosten für die beiden Metallisierungsarten errechnet werden. Bei der chemischen Metallisierung gilt pro Charge folgende Gleichung:

$$\text{Teilezahl}_c \times K_{c,d} = \frac{1}{\text{Abscheiderate}_c} \times (\text{Heizenergie} + \text{Abschreibung}) + \text{Fläche} \times \text{Elektrolyt} \quad (62)$$

mit:

$$\text{Heizenergie} = (T_{\text{Bad}} - T_{\text{Raum}}) \times m_{\text{Bad}} \times c_{\text{Bad}} \times \text{Verlustleistung (5\%/h)} \times \text{Strompreis [DM/kWh]} \quad (63)$$

$$\text{Elektrolyt} = \text{Elektrolytpreis} \left[\frac{\text{DM}}{\text{mm}^3} \right] \quad (64)$$

Dabei ist c die spezifische Wärmekapazität des Metallisierungsbades ist und wird dem c von Wasser gleichgesetzt. Die Badmasse ist m (Volumen x Dichte). Die Dichte der Elektrolyten ist ungefähr 1, so daß für die Badmasse etwa 1kg/l gilt.

Bei der galvanischen Beschichtung gilt, ebenfalls pro Charge:

$$\text{Teilezahl}_g \times K_{g,d} = \frac{1}{\text{Abscheiderate}_g} \times (\text{elektr. Energie} + \text{Abschreibung}) + \text{Fläche} \times \text{Anode} \quad (65)$$

mit:

$$\text{elektr. Energie} = \text{Stromdichte} \left[\frac{\text{A}}{\text{cm}^2} \right] \times \text{Fläche [cm}^2] \times \text{Spannung [V]} \times \text{Strompreis [DM/kWh]} \quad (66)$$

$$\text{Anode} = \text{Anodenpreis} \left[\frac{\text{DM}}{\text{mm}^3} \right] \quad (67)$$

Um die Grenzschriftstärke zu ermitteln, setzt man die beiden Gleichungen gleich. Da die Teilezahl bei der chemischen Metallisierung sechsmal der Teilezahl bei der galvanischen Metallisierung entspricht und die Elektrolytkosten bei der chemischen Metallisierung etwa viermal so hoch sind wie die Anodenkosten bei der galvanischen Beschichtung, kann man Gleichungen entsprechen vereinfachen und angleichen.

Setzt man die üblichen Stromdichten Spannungen ($U=8V$) und Stromausbeutewerte für Kupferelektrolyte ein [141] und ermittelt die benötigte Heizenergie, so lassen sich folgende Gleichungen aufstellen. Als Strompreis werden 19 Pf. pro kWh angesetzt.

$$\begin{aligned}
 K_{c,d,charge} &= \frac{1}{4 \frac{\mu m}{h}} \times \left(1000 kg \times \frac{4,19}{3600} \frac{Ws}{gK} \times 70 K \times \frac{0,05}{h} \times 0,19 \frac{DM}{h} + 25 \frac{DM}{h} \right) + \\
 &\quad + 5600 \text{ cm}^2 \times 4 \times 3 \frac{DM}{1000g} \times 8,96 \frac{g}{\text{cm}^3} \times 10^{-4} \frac{\text{cm}}{\mu m} = \\
 &= \frac{h}{4 \mu m} \left(4,07 \times 0,19 \frac{DM}{h} + 25 \frac{DM}{h} \right) + \frac{6,02}{10^2} \frac{DM}{\mu m} = \\
 &= \left(1,02 \times 0,19 \frac{DM}{\mu m} + 6,25 \frac{DM}{\mu m} \right) + \frac{6,02}{10^2} \frac{DM}{\mu m}, \quad (68)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 K_{g,d,charge} &= \frac{1}{66 \frac{\mu m}{h}} \times \left(0,05 \frac{A}{\text{cm}^2} \times 5600 \text{ cm}^2 \times 8V \times 0,19 \frac{DM}{1000Wh} + 25 \frac{DM}{h} \right) + \\
 &\quad + 5600 \text{ cm}^2 \times 3 \frac{DM}{1000g} \times 8,96 \frac{g}{\text{cm}^3} \times 10^{-4} \frac{\text{cm}}{\mu m} = \\
 &= \frac{h}{66 \mu m} \left(2,24 \times 0,19 \frac{DM}{h} + 25 \frac{DM}{h} \right) + \frac{1,505}{10^2} \frac{DM}{\mu m} = \\
 &= \left(\frac{3,39}{10^2} \times 0,19 \frac{DM}{\mu m} + 0,378 \frac{DM}{\mu m} \right) + \frac{1,505}{10^2} \frac{DM}{\mu m}, \quad (69)
 \end{aligned}$$

Aus (68) und (69) lassen sich die Metallisierungskosten pro Dickeneinheit und Teil ermitteln:

$$K_{c,d} = \frac{2,0233 \frac{DM}{\mu m} + \frac{6,02}{10^2} \frac{DM}{\mu m}}{6 n_{galv}} = \frac{1,084}{n_{galv}} \frac{DM}{\mu m}, \quad (70)$$

$$K_{g,d} = \frac{\frac{2,1491}{10^2} \frac{DM}{\mu m} + 0,378 \frac{DM}{\mu m}}{n_{galv}} = \frac{0,399}{n_{galv}} \frac{DM}{\mu m} \quad (71)$$

Das heißt, pro Dickeneinheit ist in diesem Fall die chemische Verkupferung etwa 6,5 mal so teuer wie die galvanische. Für die Grenz-Schichtstärke gilt wie oben errechnet:

$$d = \frac{2K_{g,k} - 2K_{c,k}}{K_{c,d} - K_{g,d}} + d_{grund} \quad (61)$$

Setzt man (70) und (71) sowie die Randbedingungen in (61) ein, so erhält man:

$$d = \frac{2 \times (0,0225) \mu m \times n_{galv}}{1,084 - 0,399} + d_{grund} \quad (72)$$

Bei einer Stärke der Grundmetallisierung von $3 \mu m$ und der in unserem Beispiel angenommenen Zahl von 373 Teilen für die galvanische Verkupferung ergibt sich:

$$d = \frac{16,785 \mu m}{0,685} + 3 \mu m \quad (73)$$

Es ermittelt sich für diesen Fall eine Grenzschichtstärke von $27,5 \mu m$, ab der die gemischte Metallisierung kostengünstiger ist als die rein chemische.

Tendenziell sinkt die Grenzschichtstärke bei Teilen, je geringer die Klemmkosten sind. Ein weiterer Einflußfaktor ist die Badauslastung: je weniger Fläche pro Teil tatsächlich

metallisiert wird, desto teurer wird die Beschichtung pro Teil, insbesondere im chemischen Bereich. Somit können bei Teilen mit nur wenig metallisierten Bereichen höhere Klemmkosten in Kauf genommen werden als bei vollflächig metallisierten.

Generell ist noch zu beachten, daß es aufgrund der chemischen Vorgänge eine technologische Grenzschriftstärke für das Aufbringen von chemisch abgeschiedenen Metallschichten gibt. Diese liegt für Kupfer ungefähr bei 20 bis 25 μm . Wird die Schicht dicker, so wachsen die internen Spannungen so stark an, daß es zu Rissen kommen kann. Insgesamt ist die chemische Verkupferung verfahrenstechnisch schwieriger zu beherrschen als die galvanische Kupferabscheidung, so daß nicht nur eine reine Kostenbetrachtung, sondern auch Qualitätsaspekte den Ausschlag geben müssen.

7.7 Regeln für die Layout-Gestaltung

Bei der Gestaltung des Schaltungslayouts sind einige MID-spezifische Regeln zu beachten. Im Gegensatz zu den verfahrensspezifischen Grenzen hinsichtlich z.B. Strukturfeinheit sind diese für alle Verfahren gleich, da mit der Layoutgestaltung die elektrischen Eigenschaften der Baugruppe und Montagevorgänge festgelegt werden, die vom Herstellungsverfahren des Substrates unabhängig sein müssen.

- Der **seitliche Abstand** zwischen Leiterbahnen und 3-D-Geometrie auf der Prozeßfläche muß mindestens so groß sein wie die Hindernishöhe.
- **keine SMDs in flexible Bereiche** setzen, da Löt- oder Klebestellen unter Biegung brechen können.

Das **Heißprägen** verlangt einige zusätzliche Regeln, da das Layout beim Metallisieren aus der Folie ausgestanzt wird.

- **Prägewülste für Lötstopmaske glätten**, da Stoplack an Oberfläche anliegen muß.
- **Ringbreite um Löcher mindestens 0,6 mm**, um Reißen der Folie zu vermeiden.
- **Alle Ecken des Layouts abrunden oder anfasen**, um Spannungen in der Folie zu verringern.
- **Für gesamtes Layout eine Leiterbahnbreite wählen**, um Spannungen in der Folie zu verringern und die Stempelherstellung zu vereinfachen.

Neben den eigentlichen (hauptsächlich elektrisch bedingten) Layoutregeln müssen in der Gestaltung der Teile auch **nachfolgende Prozeßschritte** bei der Verarbeitung in der Gestaltung des Layouts berücksichtigt werden. Insbesondere hier kommen gewisse Einschränkungen zum Tragen, wenn bei der Entwicklung eines MIDs nicht nur der technische Vorteil, sondern auch eine kostengünstige Fertigung erzielt werden soll.

Ziel ist es daher vorrangig, die Gestaltung der Prozeßflächen an einem MID möglichst an herkömmlichen, planaren Leiterplatten zu orientieren, also möglichst keine Hindernisse auf der Bestückseite vorzusehen. Dies ermöglicht zuerst den Einsatz des Sieb- oder Schablonendrucks für den Auftrag des Verbindungsmediums (SMD-Kleber oder Lotpaste) und damit das Verwenden eines parallelen Prozesses anstelle des sequentiellen Dispensens. Auch bleibt der Einsatz herkömmlicher Hochleistungs-Bestückautomaten möglich, die lediglich unter Umständen mit einem Werkstückträgersystem nachgerüstet werden müssen.

Ist die Beibehaltung einer ebenen Prozeßfläche nicht möglich, müssen maschinenbauliche Sonderlösungen für die Bestückssysteme konzipiert bzw. beschafft werden. Um alle Anforderungen an das Bestücken in drei Dimensionen zu erfüllen, ist eine Vielzahl von Modifikationen erforderlich.

- **Prozeßflächen möglichst hoch anordnen**, um das Kollisionsrisiko zu minimieren und die verfügbare Fläche effizient zu nutzen
- **Ausreichend Raum um Bauelemente vorsehen**: Mindestabstände einhalten (erhöht sich mit zunehmendem Z-Hub)
- **Bestücken auf geneigten Flächen vermeiden**: herkömmliche Automaten unterstützen Neigung nicht.
- **Doppelseitige Bestückung vermeiden**: erfordert zweiseitiges Bestücken und zweifaches Löten

Darüberhinaus gelten natürlich auch für MIDs die **allgemeinen Regeln** zur Gestaltung von elektronischen Schaltungen, die insbesondere die gegenseitige Anordnung von Leiterbahnen, Bauelementen und Kontaktflächen vorschreiben. Sie können der Literatur entnommen werden, weshalb hier nicht näher darauf eingegangen werden soll.

7.8 Auswahl der Weiterverarbeitungsverfahren und entsprechende Gestaltungsregeln

Nach der Auswahl des Strukturierungsverfahrens muß die Entscheidung über die und die eingesetzten Prozesse bei der Weiterverarbeitung getroffen werden. Hier gelten teilweise ähnliche Regeln wie bei herkömmlichen Leiterplatten, teilweise müssen sie jedoch für MID speziell modifiziert werden.

Beschreibung	Bemerkungen
• Überprüfen, ob Produktanforderungen mit technischen Verfahrensgrenzen kollidieren	Prozeßgrenzen: Abb. 93
• wenn möglich, simultane Prozesse gegenüber sequentiellen vorziehen	höherer Durchsatz bei geringeren Kosten und Risiko
• untersuchen, ob Leitkleber eingesetzt werden können	Kleber halten Prozeßtemperaturen niedrig
• Lötmasken vermeiden wenn immer möglich	kein zusätzlicher Prozeß, weniger Geometrieinschränkungen
• Bestückanlagen entsprechend nötigen Toleranzen und Durchsatz auswählen	geringere Genauigkeit bei erhöhter Geschwindigkeit

Bild 92: Regeln für Anlagen und Prozesse zur Weiterverarbeitung von MIDs

Die technischen Grenzen der gebräuchlichsten Verfahren können der nachfolgenden Tabelle entnommen werden.

	Prozeß- temperatur	Exposi- tions- dauer	3D- Fähigkeit	Prozeß- flexibilität	Bemer- kungen
Pastenauftrag					
Siebdruck	Raum- temperatur		nx2D, keine Hindernisse	mäßig	Mindest- Randabstand
Schablonen- druck			2.5D, keine Hindernisse	mäßig	
Pin Transfer			nx2D	gering	
Dispensen			3D mit Hindernissen	mäßig	
Bestücken					
pick and place	Raum- temperatur		3D mit Hindernissen	mäßig	Mindest- Randabstand großer Kopf
Hochgeschwin- digkeitsbestük- ker			2D, keine Hindernisse	mäßig	
Löten					
Welle	240-260 °C	10s	2D, keine Hin- dernisse	sehr hoch	Winkelgren- zen
Infrarot (Reflow)	210-260 °C	25-50s	3D, niedrige Hindernisse	sehr hoch	Abschattung
Konvektion (Reflow)	225-240 °C	15-25s	3D, niedrige Hindernisse	sehr hoch	Abschattung
Dampfphase (Reflow)	220 °C	20-40s	nx2D, kaum Hindernisse	sehr hoch	Abschattung
Laserstrahl	300 °C	3s	3D, keine Hin- terschneidun- gen	gering	beste 3-D-Eig- nung
Bügel	210-240 °C	9-13s	nx2D	hoch	halbautoma- tisch
Lötkolben			nx2D	hoch	halbautoma- tisch
Fontäne	240-260 °C	10s	nx2D	gering	

Bild 93: Grenzen von Prozessen zur SMD-Verarbeitung auf MIDs

Beim **Aufbringen der Lotpaste oder des Leitklebers** ist zu beachten, daß derzeit ein Dispensen nur bis zu Anschlußbeinrastern von 0,5 mm möglich ist. Feinere Raster müssen gedruckt werden. Die Art des Verbindungsmediums bestimmt weitgehend die Oberfläche der Pads. So darf z.B. niemals Leitkleber auf vorbelotete Pads aufgebracht werden, da es zu elektrochemischen Korrosionsreaktionen kommt.

Das Einhalten einiger zusätzlicher Regeln ist auch Voraussetzung für das effiziente **Bestücken**. Die Längsseite von Bauelementen sollte beim Bestücken auf einer geneigten Fläche entlang der Falllinie angeordnet sein, um die Zentrierung zu vereinfachen. Beim

Bestücken auf geneigten Flächen dürfen bestimmte Grenzneigungswinkel nicht überschritten werden, um ein Abrutschen während des Lötvorgangs zu vermeiden. Z.B. sind Chip-Bauelemente gegenüber MELFs günstiger, da sie stabiler liegen. Die für unterschiedliche Bauelemente maximale Neigung beim Bestücken ist in Abbildung 94 dargestellt. Zur Verbesserung des Winkelverhaltens kann eine Erhöhung des Lotvolumens hilfreich sein.

10°	35°	50°	60°	65°	90°
QFP80, 100 PLCC68	SO20	MELF	SO14	SO8	Chips: 0805, 1206, 1210, 1812, 2220 SOT23, 89, MMLF

Bild 94: maximale Neigungswinkel für das Bestücken und Löten von SMD-Bauelementen [45]

Auch für das **Löten und Leitleben** gelten noch einige Regeln, die für MIDs modifiziert werden müssen (siehe auch [45,74]):

Alle Bauelemente sollten auf der gleichen Oberfläche liegen, da auf verschiedenen Niveaus unterschiedliche Temperaturprofile herrschen, was zu Überhitzungsgefahr für erhöht liegende Bauelemente führt. Große und kleine Bauelemente sollten räumlich so weit wie möglich getrennt werden, um das Abschattungsrisiko zu minimieren. Zwischen großen Komponenten müssen dabei größere Abstände vorgesehen werden.

Der Übergang zum Leitleben erschließt aufgrund niedrigerer Prozeßtemperaturen eine größere Auswahl von Materialien, die als Substratwerkstoff geeignet sind.

Die vorstehend dargestellten Gestaltungsregeln und Auswahlkriterien repräsentieren den grundlegenden Teil der bekannten Entscheidungsgrundlagen für die Auswahl einer MID-Technologie und die entsprechend fertigungsgerechte Gestaltung der Baugruppen. Sie sollen dazu beitragen, die Beurteilung und erfolgreiche Einführung dieser Technologie zu vereinfachen.

8 Informationsbereitstellung

Die übersichtliche Bereitstellung der umfangreichen, für eine Entscheidungsfindung hinsichtlich des Einsatzes der MID-Technologie und der Auswahl eines Herstellverfahrens ist für potentielle Anwender und Hersteller eminent wichtig. Daher werden nachstehend einige Konzepte vorgestellt, um die erarbeiteten Entscheidungsgrundlagen an Interessierte zu vermitteln.

Grundsätzlich gilt, daß das Leistungsprofil von Unternehmen und Produkt immer durch die geeignete Kommunikation zu ergänzen ist. Alle Bereiche sind voneinander abhängig. Ein gutes Produkt kann nicht ohne leistungsfähiges Unternehmen auf dem Markt gebracht werden, ein Unternehmen kann nicht ohne hervorragende Erzeugnisse leben. Um den Erfolg sicherzustellen, ist die Kommunikation mit der Umwelt unabdingbar. In allen drei Ebenen ist auch die Ergänzung durch entsprechende Dienstleistungen erforderlich, insbesondere da Anbieter, deren Produkte und Firmenstruktur nicht leistungsfähig genug ist, vom Markt verschwinden. Eine Angebotsdifferenzierung findet mehr und mehr über die mit den Produkten angebotenen Dienstleistungen statt. Im Fall der MID-Technologie hat sich als wirkungsvolle Kommunikationsstrategie erwiesen, die Informationsbereitstellung auf drei Säulen aufzubauen, um die optimale Wirksamkeit zu entfalten:

Unter Berücksichtigung der Zielgruppe sind als Basis allgemein zugängliche und leicht verständliche Schriftstücke mit möglichst hohem Informationsgehalt erforderlich, um einen Einstieg in die Technologie zu finden und um unnötige Rückfragen bei Projektpartnern zu vermeiden. Darüber hinaus muß dieser Informationsweg geeignet aufgebaut sein, um Vorbehalte gegenüber der Technologie abzubauen und weiteres Interesse zu wecken. Einige deraartige Schriften sind mittlerweile erhältlich.

Ein zweites für die Zielgruppe nicht zu unterschätzendes Informationselement stellen Seminare und Kongresse zum Thema MID dar, in denen einzelne Themen vertieft und kritisch betrachtet werden können. Die dabei entstehenden Tagungsbände eignen sich als Informationsquelle für spezifische Fachfragestellungen. Dieses Angebot muß ergänzt werden durch firmenspezifische Schulungen, die eine möglichst reibungslose Adaption der behandelten Themen an die Probleme, Kompetenzen und die Produktpalette des jeweiligen Unternehmens ermöglichen.

Unabdingbar ist darüberhinaus eine persönliche, fallbezogene Beratung durch qualifiziertes Personal, um die übergreifend gesammelten Erfahrungen am konkreten Beispiel nutzen zu können.

Nachfolgend werden einige mögliche schriftliche Instrumente beschrieben. Dies umfaßt insbesondere ein Angebot an leicht verständlichen Grundinformationen zum Thema MID, ein Handbuch für Hersteller und MID-Anwender, eine Patentrecherche und eine Erweiterung eines bestehenden, computergestützten MID-Informationssystems um Patentdaten.

8.1 Übersichtliche Grundinformationen

Die allgemein gehaltenen Informationen, die im Rahmen der Arbeit entwickelt wurden, sind zum einen eine Technologiebroschüre, zum anderen ein "Technologielehrpfad" für den Einsatz bei Messen und größeren Präsentationen.

Für den ersten Einstieg in die MID-Technik wurde für die Forschungsvereinigung räumliche elektronische Baugruppen 3-D MID e.V. eine Broschüre in Form eines zweisprachi-

gen Technologieführers entwickelt. Das Heft enthält alle notwendigen Grundinformationen zu den Vorteilen der MID-Technologie, den Integrationspotentialen und über einsetzbare Materialien. Beherrschendes Element der Technologiebroschüre sind Erläuterungen der Grundlagen der MID-Technologie und detaillierte, graphisch unterstützte Beschreibungen der wichtigsten MID-Herstellverfahren - jeweils in Deutsch und Englisch.

Der Broschürensatz ist zweiteilig konzipiert, wobei ein Teil als reine Technologieinformation aufgebaut ist, während ein zweites Heft Informationen zu MID-Herstellern und -zulieferern sowie den Serviceleistungen der Forschungsvereinigung bietet. Für die Richtigkeit der Konzeptwahl und den Bedarf an einem solchen Informationsmedium spricht die Tatsache, daß die Broschüre in zwei Jahren in über 10 000 Exemplaren von Firmen angefordert wurde, die sich einen ersten Überblick über die Technik verschaffen wollten. Eine der Broschüre beigelegte Bestellkarte für Fachliteratur hilft Interessenten, den nächsten Schritt in Richtung der Einführung der MID-Technologie zu tun und senkt die Hemmschwelle durch gezielte Informationsbereitstellung.

Die zweite Informationsmöglichkeit bei einem ersten Kontakt mit der Technologie ist der "Technologielehrpfad", der in einer noch nicht endgültig entwickelten Version erstmals im November 1997 auf der Fachmesse "Productronica" in München und überarbeitet zum MID-Kongreß 1998 zum Einsatz kam. Er umfaßt im wesentlichen die wichtigsten Grafiken der Broschüre in Form von sechs übersichtlichen, zweisprachigen Postern. Ergänzt wird die grafische Information durch Musterteile, die in der jeweils beschriebenen Technologie hergestellt wurden und in Vitrinen ausgestellt sind, die dem Poster mit dem zugehörigen Herstellverfahren zugeordnet sind. Wenn von der Art der Veranstaltung her möglich, werden auch Musterteile offen bereitgelegt, damit ein unerfahrener Interessent jederzeit auch die praktische Anwendung des dargestellten Verfahrens "begreifen" kann.

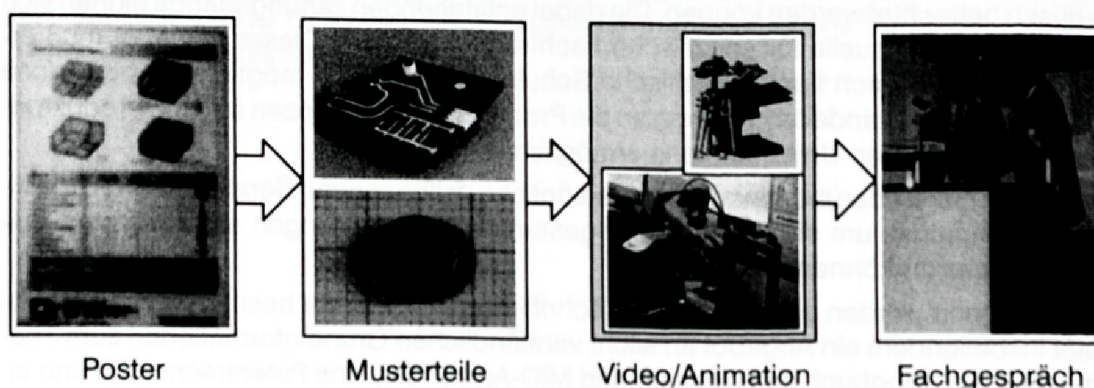


Bild 95: Wesentliche Elemente und didaktischer Aufbau des "MID-Lehrpfades"

Der Lehrpfad wird abgerundet durch ein Video, das wesentliche Schritte der MID-Fertigungskette zeigt. Das Video hat sich insbesondere zur Darstellung der Montageschritte eines MIDs bewährt. Die erforderlichen Sondermaschinen können so einfach erläutert werden. Mit der Information, daß geeignete Systeme verfügbar und nicht nur theoretisch entwickelt sind, kann dem Besucher weiter Sicherheit hinsichtlich der Einführung von MIDs gegeben werden. Zur Beantwortung weiterer Fragen stehen abschließend geschulte Mitarbeiter zur Verfügung.

8.2 Regelwerk zur Technologieeinführung

Detailliertere Verfahrens- und Materialinformationen, die über den Erstinformationsbedarf hinausgehen, waren bisher nur sehr verstreut zu bekommen. Eine wichtige Maßnahme zur Informationsbereitstellung für potentielle Anwender der MID-Technologie war daher die Erarbeitung eines Regelwerkes im Stil eines Handbuches [66], das in kompakter Form das nötige Wissen vermittelt, um eine Vorselektion für oder gegen die MID-Technologie treffen und ggf. mit qualifizierten Fragen in das Angebotsgespräch bei MID-Herstellern gehen zu können.

In einer zeitweise vom Autor geleiteten Arbeitsgruppe wurde die Struktur des Buches festgelegt. Sie umfaßt derzeit folgende Hauptblöcke:

- Einführung
- Technologiedaten der MID-Herstellungsverfahren
- Materialkennwerte
- Allgemeine Anforderungen an MID
- Branchenspezifische Anforderungen
- Quellen, Normen, Adressen, Literatur

Neben einer ausführlichen Beschreibung aller derzeit bekannten Herstellverfahren für MID-Substrate umfaßt die Publikation umfangreiche Tabellen zu Kennwerten von Materialien, die sich gut für den Einsatz bei räumlichen Schaltungsträgern eignen. Neben den üblichen mechanischen und thermischen Kennwerten sind insbesondere auch chemische Beständigkeiten und die Metallisierbarkeit angegeben. Ein ausführliches Kapitel behandelt die Lötbeständigkeit von Thermoplasten [95]. Die wichtigsten Ergebnisse sollen hier wiedergegeben werden:

Untersucht wurden die gebräuchlichsten Lötverfahren Wellenlöten, Infrarot(IR)-Reflowlöten sowie das Löten auf der Miniwelle. Die Loteignung der verschiedenen Kunststoffe wurde bei Standard-Löteinstellungen anhand der aufgetretenen Schädigungen beurteilt. Es zeigte sich, daß bei den verwendeten Probestplatten kein einziger Kunststoff für das Wellenlöten geeignet war. Alle Platten wiesen einen starken Verzug auf, selbst wenn die übrigen Eigenschaften weitgehend unverändert blieben. Geeignet versteifte Bauteile aus Kunststoffen, die miniwellen-geeignet sind, können aber trotzdem unter bestimmten Einschränkungen auch über der Welle gelötet werden. Für das IR-Löten erwiesen sich folgende Kunststoffe als geeignet:

- Flüssigkristallpolymer LCP (versch. Typen)
- Polyethersulfon PES, 20 % Mineralfaserfüllung, wärmostabilisiert
- teilaromatisches Polyamid PA-T, 25% Glasfaserfüllung, wärmostabilisiert
- Polyamid PA 66, 25% Glasfaserfüllung, wärmostabilisiert, Flammschutz
- Polyamid PA 6, 20% Glasfaserfüllung, wärmostabilisiert (30% GF oder elastomermodifiziert ungeeignet!)
- Polybutylenterephthalat PBT, 20% Glasfaserfüllung, wärmostabilisiert, Flammschutz

Für das Löten auf der Miniwelle eigneten sich in den Versuchen bis auf ABS und einen flammgeschützten Blend aus ABS und Polycarbonat (PC) alle untersuchten Materialien (einschließlich preisgünstiger Werkstoffe wie PC).

Das Handbuch enthält auch eine umfangreiche Sammlung von für die MID-Entwicklung relevanten Normen und Adressen wichtiger Ansprechpartner. Es ist somit ein Kompen-

dium für Entwickler, die mit einem Blick die wichtigsten Informationen über die Technologie verfügbar haben wollen. Natürlich kann es den Kontakt mit Experten nicht ersetzen, wenn konkrete Fragestellungen behandelt werden sollen.

Im Rahmen eines vom BMBF geförderten Verbundprojektes [63] entstehen derzeit wichtige technologische MID-Erkenntnisse. Die Struktur des Handbuches wurde so angelegt, daß die Ergebnisse reibungslos einfließen können.

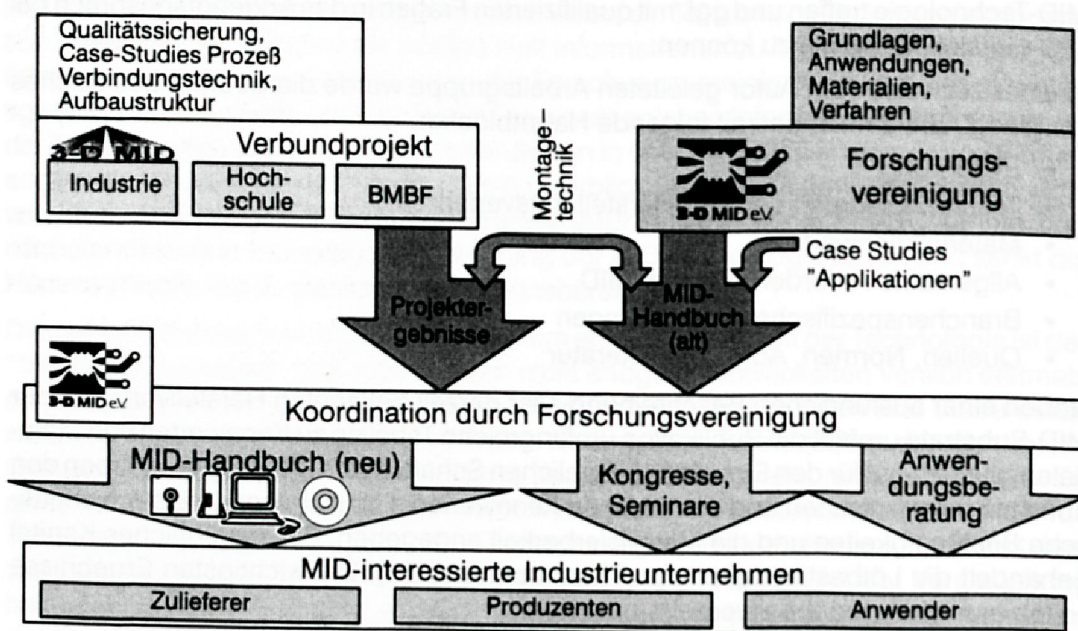


Bild 96: Strukturanpassung des MID-Handbuchs für Anwender

Dazu wird in enger Zusammenarbeit mit der Industrie die Reihenfolge einiger der Blöcke umgestellt, so daß nach Auswahl des Anwendungsgebietes über die Materialauswahl geeignete Fertigungsverfahren gesucht werden können. Zusätzlich zu den entscheidungsunterstützenden Informationen werden in das Handbuch Kapitel zur Montagetechnik und vor allem Case Studies zu realisierten Applikationen und beispielhaften Prozeßketten einfließen, was ein einfach handhabbares Nachschlagewerk für den Anwender ergibt.

8.3 Patentrecherche

Befaßt sich ein Unternehmen mit der Einführung einer neuen Technologie, so sind detaillierte Informationen über deren Entwicklungsstand unerlässlich. Daher wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine umfangreiche Patentrecherche durchgeführt.

Patente können wesentliche Informationen zu drei Fragestellungen geben:

- Was ist der Stand der Technik, worauf können wir aufbauen ?
- Woran arbeiten unsere Mitbewerber ?
- Welche Verfahren und Produkte sind in welchen Märkten geschützt ?

Die Reihenfolge dieser Aufzählung ist bewußt gewählt. In erster Linie kann eine Patentrecherche so genau wie kein anderes Informationsmedium darüber Auskunft geben,

welche Verfahren und Methoden Stand der Technik sind. Die Recherche wird dadurch erleichtert und auf den Punkt gebracht, daß die Internationale Patentklassifikation Erfindungen und Patentanmeldungen in etwa 60.000 Unterklassen einteilt [18]. Keine andere Literaturart ist so fein gegliedert. Da eine Patentschrift auch nach sehr klaren Regeln aufgebaut ist und in Einzelheiten dargestellt wird, wodurch sich die Entwicklung von anderen technischen Lösungen abhebt, ermöglicht eine Recherche auch weitere Rückschlüsse auf ähnliche Verfahren. Dies wird dadurch unterstützt, daß in den Offenlegungs- und Patentschriften Literatur angegeben sein muß, auf denen die Erfindung aufbaut.

Ein Patent gewährt dem Anmelder ein Schutzrecht, verpflichtet ihn aber gleichzeitig, die wesentlichen Inhalte seiner Erfindung spätestens 18 Monate nach der Anmeldung offenzulegen [119]. Dies ermöglicht Wettbewerbern, nach Ablauf dieser Zeit das entwickelte Verfahren sehr genau beschrieben nachzulesen und Strategien zur Umgehung des Schutzrechtes zu entwickeln. Die Problematik der Veröffentlichung ist der Grund, warum manche Erfindungen von Firmen nicht angemeldet, sondern als nicht-öffentliches Know-How geheimgehalten werden. In verschiedenen Fällen, vor allem in Branchen mit relativ langen Innovationszyklen, kann dies vorteilhaft sein.

Über die regionale Zuordnung der Schutzrechtsanmeldungen und ihrer zugehörigen Veröffentlichungen läßt sich ermitteln, welche Verfahren und Produkte in welchen Ländern unter Schutz stehen, also vom Wettbewerb nicht benutzt werden dürfen, bzw. wer für die Vergabe von Lizenzen zuständig ist. Dies ist eine wichtige Information im Zuge der Neueinführung einer Technologie.

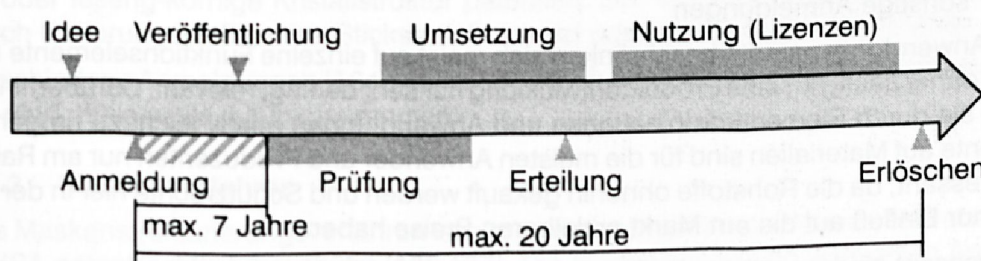


Bild 97: Abfolge der Verfahrensschritte bei einer Patentanmeldung
(oben: Vermarktungshandlungen, unten: Schutzrechtshandlungen)

Abbildung 97 zeigt den "Lebenszyklus" eines Patentes. Nach der Idee folgt als erstes die Anmeldung. Erst danach darf die Erfindung in irgendeiner Weise veröffentlicht werden, d. h. Kunden vorgestellt oder in einem Vortrag präsentiert werden. In dieser Phase kann die Umsetzung der Patentidee verfolgt werden. Sofort mit Anmeldung oder innerhalb von bis zu sieben Jahren kann dann der Prüfungsantrag gestellt werden, der zu Erteilung eines Patentes oder der Zurückweisung der Anmeldung führt. Nach der Erteilung des Patentes ist das Schutzrecht wirksam, und es können bis zum Erlöschen nach spätestens 20 Jahren Lizenzabkommen getroffen werden.

Im Bereich MID ist in den letzten Jahren eine stark zunehmende Tendenz an Anmeldungen, insbesondere aber an rechtskräftig gewordenen Patentanmeldungen zu verzeichnen. Die zeitliche Verzögerung der beiden Kurven zueinander resultiert aus dem Verlauf und Zeitbedarf der Prüfung.

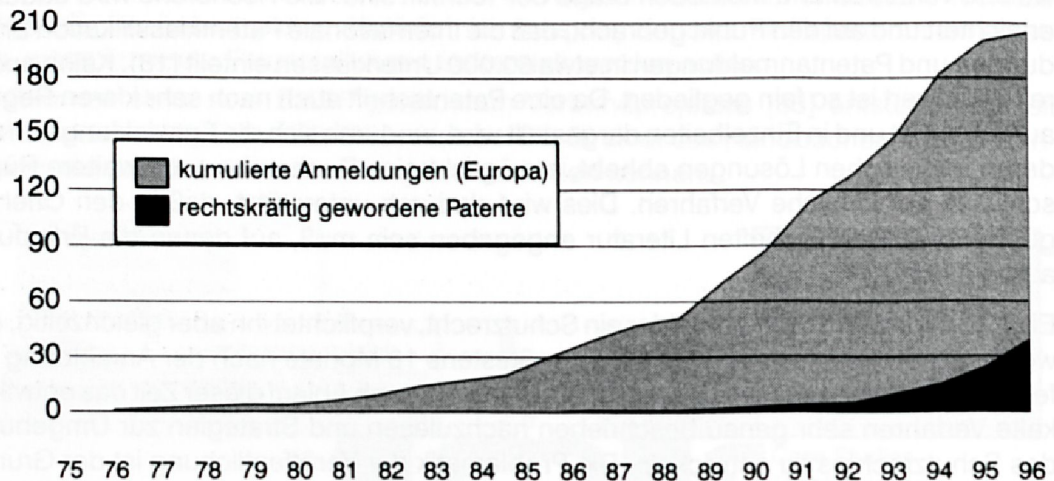


Bild 98: kumulierte Anzahl der in Deutschland rechtskräftig gewordenen MID-Patente

Im wesentlichen lassen sich die MID-relevanten Patentanmeldungen in vier Gruppen aufteilen:

- Anwendungen
- Verfahren
- Materialien
- sonstige Anmeldungen

Die Anwendungspatente beschränken sich meist auf einzelne Funktionselemente und sind daher häufig für eine Produktentwicklung nur sehr bedingt relevant. Darüberhinaus sind sie durch Elementkombinationen und Abwandlungen relativ leicht zu umgehen. Patente auf Materialien sind für die meisten Anwender und Produzenten nur am Rande interessant, da die Rohstoffe ohnehin gekauft werden und Schutzrechte hier in der Regel nur Einfluß auf die am Markt erzielbaren Preise haben.

Interessant sind vor allem die Patente auf Herstellverfahren. Über eine umfangreiche Recherche wurden in Europa, Japan und den USA etwa 550 Patentveröffentlichungen ermittelt, die als MID-relevant gelten können. Die bibliographischen Daten und die Angaben zum rechtlichen Status sind dabei auf dem Stand von März 1998. Aus den Schriften wurden zu den Herstellverfahren jeweils ein bis drei Patente ausgewählt, die als wichtigste Kernpatente angesehen werden können. Diese sollen nachfolgend kurz dargestellt werden.

8.3.1 Zweikomponentenspritzguß

Die Urform der Zweikomponentenverfahren ist in einer britischen Offenlegungsschrift beschrieben, die am 19.12.1968 angemeldet wurde [181]. Dort ist die Kombination von ABS und Styrol-Acryl-Nitril (SAN), Polyethylen (PE), Polymetamethacrylat (PMMA) oder PC beschrieben.

Die Zweikomponentenverfahren unterscheiden sich nach PCK ("Printed Circuit Board Kollmorgen") und SKW ("Sankyo Kasei Wiring Board"). Die Verfahren sind in Kapitel 6 ausführlich beschrieben.

Als Kernpatent des PCK-Verfahrens kann in Europa (außer Deutschland) ein Patent gelten, das von Kollmorgen Technologies angemeldet wurde [175]. Es schützt Zweischuß-MIDs, deren Schüsse ohne Zwischenbehandlung gespritzt werden und die aus Hochtemperatur-Thermoplasten, deren Blends oder Keramik bestehen. Eine Komponente enthält Palladium als Katalysator, das in einem Füllstoff verteilt ist. Wahlweise kann der 1. oder 2. Schuß metallisierbar sein. Dieses Patent gilt in Deutschland nur in eingeschränkter Form [167], wobei der metallisierbare Schuß amorph, z.B. aus PSU, PES, PEI, ABS und Blends) und der nicht metallisierbare Schuß (teil-)kristallin sein muß.

Im Gegensatz zum PCK-Verfahren wird bei SKW der erste Schuß nach dem Spritzen chemisch aufgerauht, dann katalysiert und erst anschließend umspritzt. Dieses Verfahren ist sowohl in den USA [184] wie auch in Europa [177] geschützt. Im Gegensatz zum US-Patent werden in Europa keine Angaben zu der Zusammensetzung der verwendeten Kunststoffe oder Hilfsstoffe gemacht.

8.3.2 Heißprägen

Beim Heißprägen umfaßt das Kernpatent für Europa [174] sowohl Prägefolien zur Herstellung von Schaltungsstrukturen, die mit einer Trägerschicht versehen sind, als auch solche, die nur aus Metall- und Kleberschicht bestehen.

Bei der - in der Praxis nicht eingesetzten - Folie mit Trägerfilm ist vorgesehen, zwischen die Metall- und die Trägerschicht einen Film aus Flußmittel einzubringen, um das Lötten zu erleichtern.

Bei Folien ohne Trägerschicht ist eine spezielle, senkrecht zur Schaltungsebene faserige oder faserig-körnige Kristallstruktur patentiert. Die Scherfestigkeit der Schicht ist durch Dotierungsstoffe, etwa Stickstoff, Schwefel oder Kohlenstoff, einflußbar.

Verschiedene Anmeldungen [164,165] zur Anwendung der Folie auf Kunststoffsubstraten sind mittlerweile zurückgenommen.

8.3.3 Maskenverfahren

Das Maskenstrukturierungsverfahren ist nach der durchgeführten Patentrecherche nur in USA patentrechtlich geschützt [185,187]. Die europäischen und weltweiten Anmeldungen [179,189] wurden jeweils beim Europäischen Patentamt ohne Erteilung eines Patents erledigt.

Geschützt ist zum einen das Verfahren, mittels einer dreidimensionalen Maske ein Leiterbild auf einer nicht ebenen Oberfläche eines Kunststoffteiles zu strukturieren [185], wobei verschiedene Varianten angegeben sind. Zum anderen ist das Verfahren zum Herstellen der Maske an sich beschrieben und geschützt [187]. Die Patente, über die das beschriftbare Material für die Masken geschützt war (u.a. [166]), sind mittlerweile zurückgenommen.

8.3.4 Laserstrukturierung

Zu dieser Technologie existieren über 50 Patentveröffentlichungen. Von den unterschiedlichen darin beschriebenen Verfahren ist das sogenannte SIL-Verfahren im industriellen Einsatz am verbreitetsten. Die ursprünglichen Patentanmeldungen [163,173,168], die exakt den in Kapitel 6 dargestellten Verlauf der subtraktiven Strukturierung beschreiben, wurden 1984 bzw. 1985 zurückgenommen. Rechtsgültig sind der-

zeit zwei Europäische Patente der Firma Siemens, in denen ein semiadditiver Prozeß [180] bzw. ein Verfahren zum selektiven Ätzen der nicht als Leiterbahnen dienenden Bereiche [178] geschützt sind, sowie ein deutsches Patent [170] zum Ätzen der Isolationskanäle. Seit 1996 läuft das Prüfungsverfahren zu einer weiteren Anmeldung [171], in der die Verwendung eines organischen Resists beschrieben ist.

Ein weiteres deutsches Patent [169] besteht zu einem Verfahren, bei dem metallorganische Verbindungen durch Einwirkung von Laserlicht in elementares Metall umgewandelt werden.

8.3.5 Hinterspritzen von Folien

Das Hinterspritzen von Folien ist die Technologie, zu der die meisten Anmeldungen vorliegen, die überwältigende Mehrzahl davon aus Japan. Als Kernpatente können jedoch einige Schutzrechte amerikanischer Firmen bezeichnet werden.

Das früheste ermittelte Patent zum Hinterspritzen von Folien ist aus dem Jahr 1982 [183]. Es bezieht sich auf das Transferieren eines Leitermusters von einem temporären Träger aus Papier (Transfer-Decal-Verfahren).

Das europäische Kernpatent für die Verfahrensvariante, bei der die hinterspritzte Folie mit dem Kunststoffmaterial verschmilzt und Bestandteil des Formkörpers wird (Capture-Decal-Verfahren) ist der Firma ufe im Jahr 1993 erteilt worden [176]. In Nebenansprüchen wird PEI als Material und ein Aufbringen des Leiterbildes in Form einer leitfähigen Tinte beschrieben. In einem weiteren Patent zu diesem Verfahren [186] wird die Mehrlagenfähigkeit dieser Technologie dargelegt. Ein weiteres Patent des gleichen Herstellers umfaßt starr-flexible MIDs [188].

Eine interessante Abwandlung der Folientechnologie ist in einer japanischen Anmeldung [182] offenbart: Ein nur teilweise ausgehärtetes Formteil aus Phenolharz wird zusammen mit einer Leiterfolie in eine Druckgußform aus Metall eingelegt und unter Hitze und Druck mit dieser verbunden und in der gewünschten Form ausgehärtet.

Zur Montage- und Verbindungstechnik von räumlichen Schaltungsträgern finden sich bisher nur sehr wenige Schutzrechtsanmeldungen (z.B. [172]). Eine Vielzahl weiterer Patente und Anmeldungen ist für die MID-Technologie interessant und in einer Datenbank der Forschungsvereinigung 3-D MID e.V. verfügbar.

8.4 Multimedia-Informationssystem

Als wesentliches Informationsinstrument für an der Einführung der MID-Technologie interessierte Firmen wurde das MID-Informationssystem "MIDIS" [42] weiterentwickelt, um eine englische Sprachversion ergänzt und zur Einsatzreife gebracht. MIDIS besteht aus sechs Modulen:

- Applikationen
- Verfahren
- Prozeßketten
- Materialien
- Patente
- Adressen

Das bestehende System wies einige Schwachpunkte auf. Zum einen waren die enthaltenen Applikations- und Adressdaten nicht mehr aktuell. Weiter baut die Datenbank auf

einem Ingres-Kern unter Unix auf. Für PC-Systeme unter Windows existierte nur eine Laufzeitversion, die nicht aktiv gepflegt werden konnte. Der internationale Einsatz war durch das Fehlen einer englischsprachigen Version nur sehr eingeschränkt möglich. Eine deutliche Schwäche war auch das Patentmodul: im Verhältnis zu dem gesammelten und im Hintergrund vorhandenen Wissen war der Informationsgehalt sehr gering und beschränkte sich auf einen Teil der bibliographischen Daten. Informationen zu den Inhalten der einzelnen Patentschriften oder zum aktuellen Status der jeweiligen Fälle waren nicht vorhanden, ebenso wenig eine Möglichkeit zum Einsehen der oft sehr informativen Patentzeichnungen.

Ein zeitgemäßes Multimedia-Informationssystem muß diese Schwachstellen eliminieren. Um die hinsichtlich einer Überarbeitung gesetzten Ziele zu erreichen, waren daher mehrere Schritte erforderlich.

- Aktualisierung der enthaltenen Applikationsdaten und Aufnahme neuer Anwendungen
- Portierung der Datenbank von Unix auf Visual Basic 5.0, Umstellung für 32-bit-Betriebssysteme
- Erstellen einer englischen Sprachversion des Informationssystems
- Erweiterung des Patentmoduls um aktuelle, vollständige Statusinformationen und um Zusammenfassungen der wichtigsten Patente (Vorstufe zur Volltextrecherche) mit zugehörigen Zeichnungen

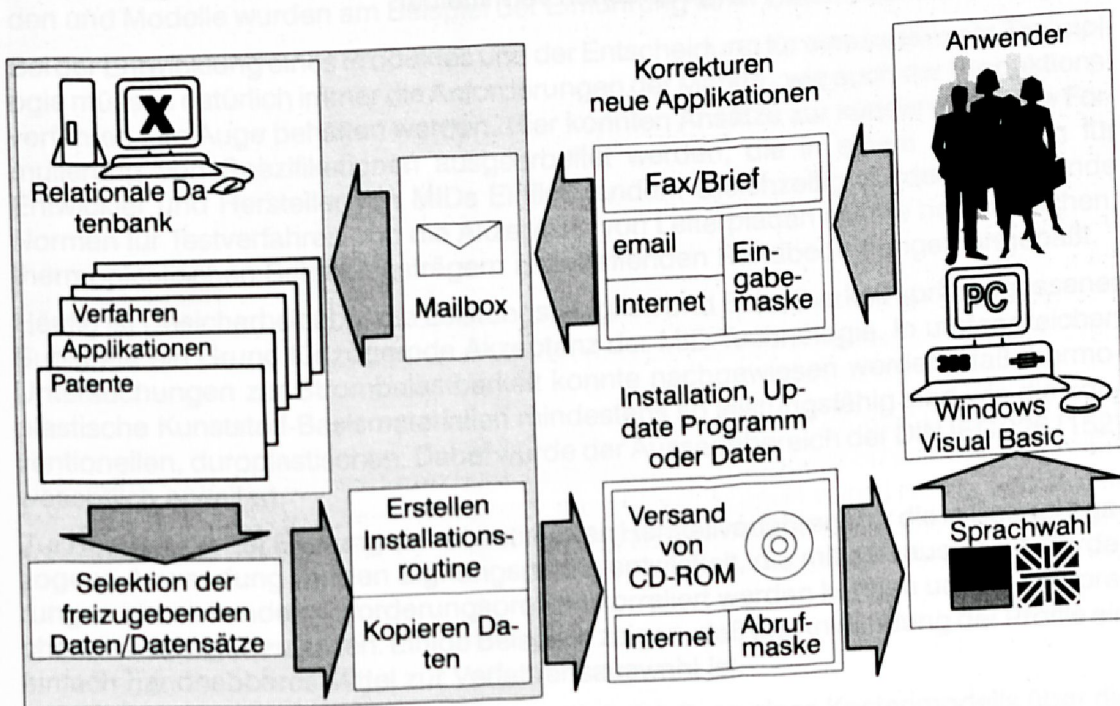


Bild 99: Struktur des Multimedia - MID-Informationssystems

Die überarbeitete Struktur ist in Bild 99 dargestellt. Aus der relationalen Datenbank, die zentral alle verfügbaren Daten vorhält, werden diejenigen Datensätze und Inhalte ausgewählt, die für die Veröffentlichung geeignet sind. Nach dem Erstellen einer Installa-

tionsroutine können die Daten zusammen mit dieser auf eine CD gebrannt und versandt werden.

Alternativ ist der Abruf aktueller Systemversionen über eine Internet-Seite möglich. Der Anwender wählt die Sprache aus und installiert MIDIS auf seinem PC. Anregungen und neue Anwendungen können von Anwenderseite auf herkömmlichem Weg oder über eine Internet-Eingabemaske in die Datenbank eingespeist werden. Dies geschieht über eine zwischengeschaltete Mailbox. Auf einen direkten Eingriff in das System wurde verzichtet, da die Eingabe durch eine Fachkraft erfolgen muß, um Fehlinterpretationen u. ä. zu verhindern.

In einem weiteren Schritt kann das MID-Handbuch in das multimediale Informationssystem integriert werden, was dessen Informationsgehalt insbesondere im Bereich Materialien, Montage- und Verbindungstechnik weiter erhöht. Eine weitere Ergänzung um Kalkulationsmodelle o. ä. ist erst nach Vorliegen ausreichenden Fertigungswissens zum Aufbau einer Expertendatenbank sinnvoll.

Neben der durch das Handbuch in gedruckter Form, auf Datenträger oder auch über das Internet zur Verfügung gestellte Information muß durch an die Öffentlichkeit gerichtete Seminare und Kongresse sowie durch firmenspezifische Beratung ein ergänzendes Informationsangebot bereitgehalten werden. Das Angebot ist auf Zulieferer ebenso abgestimmt wie auf potentielle Anwender und Produzenten. Fallspezifische Informationen, die über allgemeine Grundlagen hinausgehen, sind jedoch nur in einem persönlichen Ansatz und in Beratungsgesprächen vermittelbar.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war es, die zur Einführung der MID-Technologie relevanten Entscheidungskriterien durch systematische Analyse möglichst umfassend zu erarbeiten und transparent zu machen. Hierzu wurden verschiedene Konzepte entwickelt und Maßnahmen umgesetzt, die potentielle Anwender bei der Entscheidungsfindung unterstützen.

Ein Schwerpunkt der Arbeit lag auf der Entwicklung und Anpassung organisatorischer Konzepte hinsichtlich des Unternehmensaufbaus. Aufgrund der stark vernetzten Produktstruktur bietet sich für MID-Entwicklungen die enge Kooperation von kompetenten Partnern aus verschiedenen Disziplinen geradezu an. Das "Simultaneous Engineering", das Entwicklungsabläufe parallelisiert, muß zum "Holonomic Engineering" mit integrativen Entwicklungskonzepten weitergeführt werden. Ist dies in einem Unternehmen nicht möglich, so bietet sich besonders die Zusammenarbeit in virtuellen Unternehmen an. Im Rahmen von verschiedenen Projekten wurden Aspekte der praktischen Umsetzung eines solchen Netzwerkes erforscht, wobei meist ein Mischtyp Verwendung fand.

Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeit war die Adaption von systematischen Strukturen der Ablauforganisation an die Spezifika der MID-Technologie. Besonders bei komplexen Baugruppen mit starken Interdependenzen von Funktion und Herstellprozeß und zahlreichen Variationsmöglichkeiten ist die Anwendung der technisch-wirtschaftlichen Produktkonstruktion mit entsprechenden Bewertungsmechanismen eine wichtige Voraussetzung für eine zielführende Entwicklung der Baugruppe. Die entwickelten Methoden und Modelle wurden am Beispiel der Einführung einer Datenträgerkarte verifiziert.

Bei der Entwicklung eines Produktes und der Entscheidung für eine bestimmte Technologie müssen natürlich immer die Anforderungen der Märkte - wie auch der Produktionsverfahren - im Auge behalten werden. Hier konnten Ansätze zur kundenneutralen Formulierung von Spezifikationen ausgearbeitet werden, die in einem Handbuch für Entwickler und Hersteller von MIDs Einfluß fanden. Gleichzeitig wurden bestehende Normen für Testverfahren und die Akzeptanz von Leiterplatten auf die bei räumlichen, thermoplastischen Schaltungsträgern anzutreffenden Randbedingungen angepaßt.

Häufig ist Unsicherheit über die Leistungsfähigkeit und Belastbarkeit spritzgegossener Substrate ein Grund für zögernde Akzeptanz der MID-Technologie. In umfangreichen Untersuchungen zur Strombelastbarkeit konnte nachgewiesen werden, daß thermoplastische Kunststoff-Basismaterialien mindestens so leistungsfähig sind wie die konventionellen, duroplastischen. Dabei wurde der Aussagebereich der DIN IEC 326 [152] wesentlich erweitert.

Zur Beurteilung der Eignung eines bestimmten Herstellverfahrens für die in Betracht gezogene Anwendung wurden Eignungsprofile entwickelt, die mit den aus den Anforderungen abzuleitenden Anforderungsprofilen korreliert werden können und so entsprechende Aussagen zulassen. Einige Beispiele zeigen, daß die Anwendung der Profile ein einfach handhabbares Mittel zur Verfahrensauswahl ist.

Ein weiterer zentraler Punkt der Arbeit ist die Aufstellung eines Kostenmodells über die gesamte MID-Herstellkette und die Darstellung der Kostenfaktoren. Hierzu wurde zuerst die Prozeßkostenrechnung als geeignetes Rechenmodell ausgewählt. Anschließend wurden die relevanten Einflußfaktoren für alle Schritte der Prozeßkette erarbeitet und verknüpft. Gleichzeitig wurden anhand eines Beispiels die Grenzkosten für den Übergang von chemischer auf chemisch-galvanische Beschichtung berechnet.

Die Ausarbeitung von Gestaltungsrichtlinien für die fertigungsgerechte MID-Konstruktion unter Berücksichtigung der besonderen, durch die Technologie gegebenen Randbedingungen und verschiedener Wege zur Vermittlung der bereitzustellenden Information runden die Unterstützung der Entscheidungsfindung hinsichtlich der Einführung der MID-Technologie ab. Eine wichtige Rolle spielt dabei auch eine durchgeführte Patentrecherche, die Aufschluß über die rechtliche Situation bei der Wahl bestimmter Fertigungsverfahren bietet.

Während der Analyse der industriellen Strukturen und der derzeitigen Grenzen zeigten sich auch einige Punkte, die Gegenstand weiterführender Arbeiten sein könnten:

Eine durch Datenverarbeitungssysteme gestützte Vorkalkulation von MID-Bauteilen, die nach Eingabe einiger weniger Grundparameter eine möglichst genaue Abschätzung der zu erwartenden Teilekosten ergibt und eine automatisierte Auswahl des für eine Applikation am besten geeigneten Fertigungsverfahrens ermöglicht, wäre wünschenswert, erfordert aber den Aufbau eines Wissenspools aus Fertigungsdaten und eine genauere Untersuchung der Kostenstrukturen. Die für statistisch gesicherte Aussagen und die anbieterneutrale Abstraktion erforderliche breite Datenbasis steht jedoch aufgrund der noch geringen Verbreitung der Technologie nicht zur Verfügung.

Simulationsbasierte Methoden des Virtual Product Development können z.B. durch Bestimmung der Oberflächenausbildung und der daraus resultierenden Metallisierbarkeit einen Beitrag zur wichtigen Verkürzung der Entwicklungszeiten leisten. Dies kann zukünftig weiter gestützt werden durch Verfahren des Rapid Prototyping und Rapid Tooling, wobei die Herausforderung vor allem in der selektiven Metallisierbarkeit der entstehenden Körper liegt.

Hinsichtlich der Informationsvermittlung wäre eine gute Möglichkeit, interessierten Firmen und ihren Mitarbeitern den entwickelten "Technologie-Lehrpfad" vor Ort vorzustellen. Dies könnte z.B. durch ein auch für Veranstaltungen geeignetes mobiles Informationszentrum geschehen, was jedoch nicht zuletzt eine Frage der Finanzierung ist. Die erarbeiteten Erweiterungen der bestehenden Testnormen sollten nicht nur, wie geschehen, durch Fachpublikationen bekanntgemacht, sondern über die entsprechenden Gremien zum festen Bestandteil internationaler Normen ausgebaut werden. Hierbei muß langfristig auch der Zusammenhang mit anderen für dreidimensionale Schaltungen geeigneten Technologien in Betracht gezogen und Synergien genutzt werden.

Die Anwendung der im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Konzepte und Methoden wird es zusammen mit möglichen zukünftigen Erweiterungen der MID-Technologie ermöglichen, einen festen Platz im Reigen der für die Elektronikproduktion verfügbaren Technologien einzunehmen und die Entscheidung der Entwickler durch das Bereitstellen fundierter Informationen zu erleichtern.

10 Literaturverzeichnis

1. Adams, M.:
Produktorientierte Bewertung der Einsatzmöglichkeiten innovativer Technologien
Diss., TH Aachen, 1995
2. Adams, S.:
The Dilbert Principle
New York (Harper business, HarperCollins Publishers) 1996
3. Ahearn, F.:
A new Family of Low Cost 3-Dimensional Semiconductor Packages for Single and Multiple Chip Modules
Proceedings IEM Europe International Electronic Manufacturing Technology Symposium, Berlin, 27.-29.4. 1998
4. Arentzen, U.:
Gabler-Wirtschaftslexikon
Wiesbaden (Gabler) 1997, 14. Aufl.
5. Balck, H.:
Networking und Projektorientierung
Berlin u.a. (Springer) 1996
6. Battenfeld, D.:
Kostenmanagement und prozeßorientierte Kostenrechnung
Frankfurt/Main u.a. (Lang) 1997
7. Bauder, U. (Hrsg.):
Praxishandbuch Betriebsleiter: Entscheidungs- und Arbeitshilfen, Mustervorlagen, Praxisbeispiele
Augsburg (WEKA Fachverlag für technische Führungskräfte) Mai 1998,
Grundwerk, Loseblatt-Ausgabe
8. Beitinger, G.; Feldmann, K.:
Flex Circuitries on Silicones - A Material with high Potentialities
Surface Mount International Proceedings of the Technical Program,
San Jose, CA, S. 217 ff, Sept. 1997
9. Binder, M.:
Mit target costing und Prozeßkostenrechnung zu kundengerechten Produkten und wettbewerbsfähigen Kosten
Eschborn (RKW) 1995
10. Bläsing, J. P.:
Werkzeuge für simultaneous engineering
Ulm (TQU Steinbeis-Transferzentrum Qualität) 1993
11. Boone, L.:
Metallisieren und Strukturieren von Spritzteilen mit integrierten Leiterbahnen
Galvanotechnik 85 (1994), S. 1307-1319, Saulgau (Eugen G. Leuze Verlag) 1994
12. Boy, J.; Dudek, C.; Kuschel, S.:
Projektmanagement
Offenbach (Gabal) 1996

13. Brand, A.:
Prozesse und Systeme zur Bestückung räumlicher elektronischer Baugruppen (3D-MID)
Bamberg (Meisenbach Verlag) 1997, Diss. Univ. Erlangen 1997
14. Bullinger, H.-J.; Lott, C.-U.:
Target Management:
Unternehmen zielorientiert gestalten und ergebnisorientiert führen
Frankfurt/Main, New York (Campus) 1997
15. Burghardt, M.:
Projektmanagement
Erlangen (Publicis MCD) 1997, 4. Aufl.
16. Byrne, J. A.; Brand, R.; Port, O.:
The Virtual Corporation
Business Week Vol. 2, 1993
17. Call, G.:
Entstehung und Markteinführung von Produktneuheiten
Wiesbaden (Gabler) 1997
18. Cohausz, H. B.:
Patente & Muster - Patente, Gebrauchsmuster, Geschmacksmuster
München (Wila) 1993
19. Corsten, H.:
Simultaneous Engineering als Managementkonzept für Anlauf- und Änderungsprozesse
Ingolstadt, 1993
20. Cusack, T.:
Hot Embossing in the 3D MID Technology
Proceedings MIDIA-Symposium, Chicago, 12.3.1997
21. Diesing, J.:
Metallisiertes Polyamid als Basis für MID
Metalloberfläche 5(1996), München, Wien (Carl Hanser Verlag) 1996
22. Domininghaus, H.:
Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften
Düsseldorf (VDI-Verlag) 1992
23. Ehrenstein, G.W.:
Mit Kunststoffen konstruieren
München (Hanser Verlag) 1995
24. Ehrenstein, G.W.:
Kunststoffschadensanalyse - Methoden und Verfahren
München, Wien (Hanser Verlag) 1992
25. Ehrenstein, G. W.; Pongratz, S. (Hrsg.):
Thermische Einsatzgrenzen von Technischen Kunststoffbauteilen
Düsseldorf (Springer-VDI) 1998
26. Ehrlenspiel, K.:
Integrierte Produktentwicklung
München, Wien (Carl Hanser Verlag) 1994

27. Ehrlenspiel, K.; Kiewert, A.; Lindemann, U.:
Produktionskosten senken - eine Aufgabe der Konstruktion
Konstruktion 30.1978, Heft 4, S. 149 bis 154
28. Eichinger, P. H.:
Servicegerechte Konstruktion
In: Konstruktion, 46(1994)9, S. 292-294
29. Eitrich, O.:
Prozeßorientiertes Kostenmodell für die entwicklungsbegleitende Vorkalkulation
Dissertation Technische Hochschule Karlsruhe 1996
30. Eßer, G.; Dietel, C.; Roth, S.; Glasmacher, M.; Kickelhain, J.; Renner, G.:
Laser Assisted Techniques for Patterning of Conductive Tracks on Molded Interconnect Devices
Proceedings Pan Pacific Microelectronics Symposium, Feb. 1998, Maui, Hawaii
31. Eßer, G.; Roth, S.:
Laser Exposure of Photoresists and their Application in the Manufacturing of MIDs
Proceedings 3. Internationale Konferenz Molded Interconnect Devices, Bamberg (Meisenbach) 1998
32. Eversheim, W.; Bochtler, W.:
Simultaneous Engineering
Berlin u.a. (Springer) 1995
33. Feldmann, K.:
Berücksichtigung neuer Schaltungsträger und Packungsformen in der Produktion elektronischer Systeme
Leiterplattenhersteller, Bestücker und Anwender im Dialog, Düsseldorf (Euroforum) 1998
34. Feldmann, K.; Brand, A.:
Analytical and Experimental Research on Assembly Systems for Molded Interconnection Devices (3D-MID)
Annals of the CIRP, Vol. 43/1/1994, Singapore
35. Feldmann, K.; Brand, A.:
Molded interconnection Device: a new challenge for industrial robots
Electronics Manufacturing Engineering, 5th SME World Conference on Robotics Research, Boston, 1994
36. Feldmann, K.; Gerhard, M.:
Direct Soldering of Electronic Components on Molded Devices
Enschede, Annals of the CIRP Vol. 44/1/1995, S. 19-22
37. Feldmann, K.; Gerhard, M.:
Suitability of Thermoplastic Base Materials for PCBs
Proceedings Printed Circuit World Convention VII, Basel 1996
Annals of the CIRP Vol. 44/1/1995, S. 19-22
38. Feldmann, K.; Gerhard, M.; Krauthaim, T.; Luchs, R.:
Potentiale der MID-Technologie im Bereich der Mikrosystemtechnik: Kurzstudie.
Reihe: Innovationen in der Mikrosystemtechnik, 47
Düsseldorf (VDI-Verlag) 1997

39. Feldmann, K.; Krimi, S.:
Alternative Placement Systems for Three Dimensional Circuit Boards
Annals of the CIRP, Athen, 1998
40. Feldmann, K.; Pöhlau, F.:
*Eine neue Studienrichtung als Reaktion auf gewandelte Anforderungen:
Produktionstechnik in der Elektrotechnik.*
Proceedings Feinwerktechnik-Kolloquium, Mainz, 25./26.9.1995
41. Feldmann, K.; Roth, N.; Rottbauer, H.:
Relevance of Assembly in Global Manufacturing
Annals of the CIRP Vol. 45, Feb. 1996
42. Franke, J.:
Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3-D MID)
München, Wien (Carl Hanser Verlag) 1995, Diss. Univ. Erlangen 1995
43. Fricke, J.; Pöhlau, F.:
Integrated Automotive Module in MID Technology
Proceedings 31st ISATA, Düsseldorf, 2.-5.6.1998
44. Gerhard, A.; Schmied, H.:
Externes Simultaneous Engineering
Berlin u.a. (Springer) 1996
45. Gerhard, M.:
Qualitätssteigerung in der Elektronikproduktion durch Optimierung der Prozeßführung beim Löten komplexer Baugruppen
Bamberg (Meisenbach Verlag) 1998, Diss. Univ. Erlangen, 1998
46. Graham, A. K.:
Electroplating Engineering Handbook
New York (Reinhold Publishing Corp.) 1971, 3. Aufl.
47. Hainy, F.; Kriebitzsch, I.:
3-D MID in Automotive Technology
Tagungsband 2. Internationaler Kongreß Molded Interconnect Devices, S. 51-64,
Bamberg (Meisenbach Verlag) 1996
48. Hanke, H.-J. (Hrsg.):
Baugruppenttechnologie der Elektronik: Leiterplatten
Berlin (Verlag Technik) 1994
49. Hartmann, M.:
Entwicklung eines Kostenmodells für die Montage.
Aachen (Shaker) 1993; Diss., TH Aachen, 1993
50. Heerman, M.:
*Integration Construction for Electronic Equipment and Components
with the SIL -Technique*
Tagungsband 1. Internationaler Kongreß Molded Interconnect Devices 1994,
Bamberg (Meisenbach) 1994
51. Herrmann, G.; Egerer, K.:
Handbuch der Leiterplattentechnik (Band 2) - Neue Verfahren, neue Technologien
Saulgau (Eugen G. Leuze Verlag) 1991

52. Heeg, F.J.:
Moderne Arbeitsorganisation
München, Wien (Hanser) 1988
53. Heeg, F.J.; Kaschewski, K.:
Mitarbeiter bei der Einführung von Bürotechnologien beteiligen
in: TIBB Technische Information und Berufliche Bildung, Bonn 2(1986)1, S. 35-37
54. Holden, H.:
Advanced Substrate Technologies
SMTA (Hsg), SMTA Newsletter, Nov. 1996, S. 1+3
55. Holst, J.:
Lean Development
Berlin u.a. (Springer) 1996
56. Höpf, M.:
*Holonic Manufacturing Systems:
The basic Concept and a report of the IMD Test Case 5*
Proceedings of the 10. CIM-Europe Annual Conference, Kopenhagen 5.-7.10.94
57. John, W.:
Primer Technology - a new Approach for Selective Metallisation
Tagungsband 3. Internationaler Kongreß Molded Interconnect Devices 1998,
Bamberg (Meisenbach) 1998
58. Jülicher, P.:
Kostenrechnung und Kalkulation in der Galvanik
Saulgau (Leuze Verlag), 1994
59. Keller, G.:
"Oberflächenmontagetechnik"
Leuze Verlag, Saulgau, 1995
60. Kharbanda, O. P., Stallworthy, E. A.:
Management disasters and how to prevent them
Aldershot u.a. (Gower) 1986
61. Kilger, W.:
Einführung in die Kostenrechnung
Wiesbaden (Gabler) 1987, 3. Aufl.
62. Kleinedam, G.:
Record on Silicon - A New Medium Requires New Packaging
Proceedings ITAP'96 International Conference, Sunnyvale, USA, Feb. 1996
63. Kleinert, R.; Albrecht, H.-J.; Kickelhain, J.; Ehrenstein, G.W.; Stampfer, S.:
Übersicht zum BMBF-Verbundprojekt "Neue Material- und Fertigungstechnologien zur Integration mechanischer und elektronischer Funktionen in räumlichen Spritzgußteilen"
Tagungsband 3. Internationaler Kongreß Molded Interconnect Devices 1998,
Bamberg (Meisenbach) 1998
64. Klein-Wassink, R. J.:
Weichlöten in der Elektronik
Saulgau (Eugen G. Leuze Verlag) 1991

65. Koller, R.:
Konstruktionsmethodik für den Maschinenbau
Berlin u.a. (Springer Verlag) 1994, 3. Aufl.
66. Krautheim, Th.; Pöhlau, F.; Stampfer, S.; Lorenz, W.:
Handbuch für Anwender und Hersteller: Herstellungsverfahren, Gebrauchsanforderungen und Materialkennwerte Räumlicher elektronischer Baugruppen 3D-MID
Erlangen (Forschungsvereinigung 3-D MID e.V.), 1997
67. Kummer, W. A.; Spühler, R. W.; Wyssen, R.:
Projekt-Management
Zürich (Verl. Industrielle Organisation) 1989
68. Kümper, R.:
Ein Kostenmodell zur verursachungsgerechten Vorkalkulation.
Aachen (Shaker) 1996; Diss. TH Aachen, 1996
69. Küting, K.; Lorson, P.:
Grenzplankostenrechnung versus Prozeßkostenrechnung
in: Betriebs-Berater 46(1991)21, S. 1421-1433
70. Lange, D.:
Aufbruch zu neuen Ufern - innovative Konzepte erfolgreicher Projektteams
München (Dt. Gesellschaft für Projektmanagement e.V.) 1997
71. Laufenberg, L.:
Methodik zur integrierten Projektgestaltung für die situative Umsetzung des Simultaneous Engineering
Aachen (Shaker Verlag), 1996
72. Little, A.D.:
Management in vernetzten Unternehmen
Wiesbaden (Gabler) 1996
73. Lorson, P.:
Straffes Kostenmanagement und neue Technologien
Herne u.a. (Verlag Neue Wirtschafts-Briefe) 1993
74. Luchs, R.:
Verbindungstechnologien zur Montage hochpoliger Bauelemente auf thermoplastische Schaltungsträger
Proceedings Deutsches ISHM-Seminar 1995
"Multichip Module and Chip on Board, Göppingen 1995
75. Männel, W.:
Prozeßkostenrechnung
Wiesbaden (Gabler) 1995
76. Mehler, B. H.; Reinhart, G.:
Building the Virtual Enterprise - Manufacturing in Decentralized Networks
Proceedings 31. CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, Berkeley, USA, 26.-28.5.1998
77. Menzel, E.:
Entwicklung einer flexiblen und effektiven Montagetechnik für elektronische Baugruppen
Düsseldorf (VDI-Verlag) 1995, Diss. Univ. Hannover 1994

78. Mertens, P.; Faisst, W.:
Virtuelle Unternehmen: Idee, Informationsverarbeitung, Illusion
in: 18. Saarbrücker Arbeitstagung für Industrie, Dienstleistung und Verwaltung,
Universität des Saarlandes, Saarbrücken, 1997
79. Metzger, H.:
Planung und Bewertung von Arbeitssystemen in der Montage
Schriftenreihe aus dem Institut für Produktionstechnik und Automatisierung
Stuttgart, Mainz 1977
80. Meyer, D.:
Kunststoffverarbeitung automatisieren
München, Wien (Hanser Verlag), 1995
81. Mayer, H.:
Tätigkeitsanalyse zum Projektmanagement
Diss. Uni Bremen 1992
82. Moll, M.:
*Ein Beitrag zur Abschätzung der langfristigen Arbeitskosten und projektwirksamen
Arbeitszeiten aus der Perspektive des Projektmanagements*
Diss. TU Berlin, 1986
83. Müller, A.:
Gemeinkosten-Management
Wiesbaden (Gabler) 1992
84. Neumann, K.-Th.:
Trends in Automotive Microelectronics
Proceedings IEM Europe International Electronic Manufacturing Technology
Symposium, Berlin, 27.-29.4. 1998
85. Nippa, M.; Picot, A. (Hrsg.):
Prozeßmanagement und Reengineering: Die Praxis im deutschsprachigen Raum
Frankfurt, New York (Campus) 1996
86. Nolting, F.-W.:
Projektierung von Montagesystemen
München, Wien (Carl Hanser Verlag) 1989, Diss. Univ. Erlangen, 1988
87. Oberbach, K.:
Kunststoff-Kennwerte für Konstrukteure
München, Wien (Carl Hanser Verlag) 1980
88. Ohlshagen, C.:
Prozeßkostenrechnung - Aufbau und Einsatz
Wiesbaden (Gabler) 1991
89. Pahl, G.; Beitz, W.:
Konstruktionslehre
Berlin u.a. (Springer Verlag) 1997, 4. Aufl.
90. Patterson, T.:
Looking for a Commercially Viable Successor to Chip-on-Flex
Electronic Packaging & Production, Jan. 1997, S. 49ff

91. Patzak, G.; Ratty, G.:
Projektmanagement
Wien (Linde) 1997
92. Pfeifer, T.; Zenner, T.:
Rechnergestützte, wissensbasierte Durchführung von Fehler-Möglichkeits- und Einflußanalysen (FMEA)
Qualität und Zuverlässigkeit QZ 38(1993)2, München (Carl Hanser Verlag) 1993
93. Pfohl, H. C.; Wübbenhorst, K. L.:
Lebenszykluskosten, Ursprung, Begriff und Gestaltungsvariablen
In: Journal für Betriebswirtschaft 33(1983)3, S. 142-155
94. Picot, A.; Reichwald, R.; Wigand, R.T.:
Die grenzenlose Unternehmung: Information, Organisation und Management
Wiesbaden (Gabler) 1996
95. Pongratz, S.:
Lötbeständigkeit von Kunststoffen
Vortrag auf der Mitgliederversammlung der Forschungsvereinigung Räumliche Elektronische Baugruppen (3-D MID) e.V. am 19.3.1998, Lich
96. Pöhlau, F.:
Decision Fundamentals for the Introduction of MID Technology
Productronica 1995, Proceedings VDI-ADB, München 7.-10.11.1995, S. 45-52
97. Pöhlau, F.:
Räumliche Schaltungsträger - Rationalisierung durch Integration
Forschung und Innovation -
Die Siemens-Zeitschrift für Wissenschaft und Technik, 1/97, S. 49-52.
98. Pöhlau, F.; Feldmann, K.:
MID in the Automotive Industry: potentials, benefits and applications
Tagungsband IEMT Europe - Electronic Manufacturing Technology Symposium
"Electronics Manufacturing and Developments for Automotives", Berlin 1998
99. Raubach, C. J.:
Steigerung der Kosten-Leistungs-Transparenz durch Prozeßkostenmanagement
Diss. Univ. St. Gallen, 1995
100. Reichenberger, M.:
Potential of Low Melting Point Solders for low-cost MID-Applications
Tagungsband 3. Internationaler Kongreß Molded Interconnect Devices 1998,
Bamberg (Meisenbach Verlag), 1998
101. Reinhart, G.; Feldmann, K.:
Simulation - Schlüsseltechnologie der Zukunft?
München (Herbert Utz Verlag Wissenschaft) 1997
102. Reinhart, G.; Milberg, J. (Hrsg.):
Mit Schwung zum Aufschwung: Information - Inspiration - Innovation
Münchener Kolloquium ' 97, 27./28. Februar 1997
Landsberg/Lech (Verlag moderne industrie) 1997

103. Reinhart, G.; Schnauber, H. (Hrsg.)
*Qualität durch Kooperation:
Interne und externe Kunden-Lieferanten-Beziehungen*
Berlin u.a. (Springer) 1997
104. Rieg, F.-P.:
Kostenwachstumsgesetze für Baureihen
Diss. TH Darmstadt, 1982
105. Rinza, P.:
Projektmanagement
Düsseldorf (VDI-Verlag), 1994
106. Rommel, G.; Brück, F.; Diederichs, R.; Kempis, R.-D.; Kluge, J.:
*Einfach überlegen: Das Unternehmenskonzept, das die Schlanken schlank und
die Schnellen schnell macht*
Stuttgart (Schäffer-Poeschel) 1993
107. Roth, K.:
Konstruieren mit Konstruktionskatalogen
Berlin u.a. (Springer) 1994
108. Runge, W.:
Development Trends in the Electronic of Automotives
Proceedings IEM Europe International Electronic Manufacturing Technology
Symposium, Berlin, 27.-29.4. 1998
109. Rutschmann, P.:
*Die Planung und Kontrolle der Kosten galvanotechnischer Verfahren im System
der flexiblen Standardkostenrechnung*
Zürich (Forster Verlag) 1971
110. Scheel, W. (Hrsg.):
Baugruppenttechnologie der Elektronik: Montage
Berlin (Verlag Technik); Saulgau (Leuze Verlag) 1997
111. Scheer, A.-W., Bock, R.:
Integrierte Werkzeuge der Produktentwicklung
Köln (Dt. Wirtschaftsdienst) 1996
112. Scheller, H.:
*Automatisierte Demontagesysteme und recyclinggerechte Produktgestaltung
elektronischer Baugruppen*
Bamberg (Meisenbach Verlag) 1998, Diss., Univ Erlangen 1997
113. Schlötter, M.:
Tabellenbuch Galvanotechnik
Saulgau (Leuze Verlag) 1981, 5. Aufl.
114. Schnepf, P.:
Zielkostenorientierte Montageplanung
München, Wien (Carl Hanser Verlag) 1995, Diss. Univ. Erlangen 1995
115. Seidel, D. u.a.:
*IMS-Holonic Manufacturing Systems:
System Components of Autonomous Modules and their Distributed Control*
Hannover, 1994

116. Seng, S.:
Einstiegsplanung in neue Fertigungstechnologien
Diss., TH Aachen, 1995
117. Siegemund, J.;
Success-Oriented Program Management
Proceedings 31. ISATA-Konferenz, Düsseldorf, 2.-5.6.1998
118. Tönshoff, H. K.; Winkler, M.:
Holonische Fertigungssysteme arbeiten autonom
VDI-Nachrichten vom 4.11.1994, S. 24-25
119. Wagner, M.; Thiel, W.:
Wegweiser für den Erfinder
Berlin u.a. (Springer Verlag) 1994
120. Walter, W.:
*Erfolgversprechende Muster für betriebliche Ideenfindungsprozesse:
Ein Beitrag zur Steigerung der Innovationsfähigkeit*
Karlsruhe: (IWB) 1997; Diss., Univ. Karlsruhe, 1996
121. Wächter, Klaus:
Konstruktionslehre für Maschineningenieure
Berlin (Verlag Technik) 1987
122. Warnecke, H. J.:
The Fractal Company, A Revolution in Corporate Culture
Berlin, Heidelberg, New York (Springer Verlag), 1993
123. Weber, M.:
"FMEA-Anwendung: Masche oder Methode?",
Qualität und Zuverlässigkeit, Band 40, 1995, Heft 4
124. Weber, J.:
Logistik-Controlling
Stuttgart (Schäffer-Poeschel) 1995
125. Wiendahl, H.-P.:
Betriebsorganisation für Ingenieure
München, Wien (Hanser) 1997
126. Winkler, M.:
Holonic Manufacturing Systems
VDI-Nachrichten Nr. 44 (1994)
127. Winterott, G.:
Chips verlangen High-Tech-Boards
VDI Nachrichten Nr. 28, 12 (Juli 1996), S. 14 ff
128. Wohlrabe, H.; Keil, M.; Kaiser, C.:
Estimating Accuracy and Precision for an SMD Placement System
Proceedings NEPCON West 95, Anaheim S. 27-39, 1995
129. Wolf, G. D.; Giesecke, H.:
Neues Verfahren zur ganzflächigen und partiellen Metallisierung von Kunststoffen
Galvanotechnik 84 (1993), S. 2218-2225, Saulgau (Eugen G. Leuze Verlag)

130. Zahradnik, F.:
Blends von Hochtemperaturkunststoffen
Tagungsband 2. Internationaler Kongreß Molded Interconnect Devices 1996,
Bamberg (Meisenbach Verlag), 1996
131. Zobel, R. (Hsg.):
Proceedings of the 3rd International Conference on Concurrent Engineering and
Electronic Design Automation CEE 96, April 10-12, 1996, Cambridge, UK
Istanbul (SCS) 1996
132. N.N.:
Das Rechnen mit Maschinenstundensätzen
Frankfurt/Main (Maschinenbau-Verlag) 1983
133. N.N.:
Firmenschrift Fa. Omicron, Easton, Massachusetts, U.S.A., 1997
134. N.N.:
Firmenschrift Fa. Siemens
135. N.N.:
Lastenheft für ein elektronisches Steuergerät
Robert Bosch GmbH, 1994
136. N.N.:
Moulded Printed circuit Boards: A novel route to cost reduction
Verfahrensinformation der GE Europe
137. "Nürnberger Nachrichten" vom 10. Juni 1998, Metallnotierungen
138. N.N.:
Praktische Galvanotechnik
Saulgau (Leuze Verlag) 1984, 4. Aufl.
139. N.N.:
Preisliste für Heißprägefolien
Bolta GmbH, Juni 1998
140. N.N.: Tagungsband des Annual Meeting der MID International Association (MIDIA)
Anaheim, 28.2. - 2.3.1998
141. N.N.:
Taschenbuch für Galvanotechnik
Neuss (LPW), 1988, 13. Aufl.

Richtlinien und Normen

142. *Informationstechnikgeräteverordnung*
Stand 20.2.1996
143. *Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz*
Bundesgesetzblatt Teil I, 6.10.1994, Seite 2705 ff.
144. Richtlinien der Europäischen Union für die Ausarbeitung von Förderanträgen
Brüssel, 1996
145. DIN 4760:
Gestaltabweichungen; Begriffe, Ordnungen, 1982

146. DIN 4762:
Oberflächenrauheit; Begriffe; Oberflächen und ihre Kenngrößen, 1989
147. DIN EN 50081:
Elektromagnetische Verträglichkeit: Fachgrundnorm Störaussendung, 1997
148. DIN EN 50082:
Elektromagnetische Verträglichkeit: Fachgrundnorm Störfestigkeit, 1993
149. DIN IEC 60068:
Elektrotechnik: Grundlegende Umweltprüfverfahren, versch. Teile, 1980-1996
150. DIN IEC 60112:
Verfahren zur Bestimmung der Vergleichszahl und Prüfzahl der Kriechwegbildung auf festen, isolierenden Werkstoffen unter feuchten Bedingungen, 1984
(identisch mit DIN VDE 0303-1)
151. DIN IEC 326, Teil 2:
Leiterplatten; Teil 2: Prüfverfahren, 1992
152. DIN IEC 326, Teil 3:
Leiterplatten; Teil 3: Gestaltung und Anwendung von Leiterplatten, 1991
153. DIN IEC 60529:
Schutzarten durch Gehäuse, 1989
(identisch mit DIN 40050-9 und DIN VDE 0470-1)
154. EN 22768-1:
Allgemeintoleranzen; Toleranzen für Längen- und Winkelmaße ohne einzelne Toleranzeintragung, 1989 (identisch mit DIN ISO 2768-1)
155. IPC TM A-600
Acceptability of Printed Circuit Boards
Institute for Printed Circuit Boards, 1997
156. MIL-STD 275 C, D
157. N.N.
Richtlinie VDI 2222 Blatt 1 - Konzipieren technischer Produkte
Verein Deutscher Ingenieure, Mai 1977
158. N.N.
Richtlinie VDI 2225 Blatt 1 - Technisch-wirtschaftliches Konstruieren
Düsseldorf (Verein Deutscher Ingenieure) 1977
159. N.N.:
Richtlinie VDI 2234 - Wirtschaftliche Grundlagen für den Konstrukteur
Düsseldorf (Verein Deutscher Ingenieure) 1990
160. N.N.:
Richtlinie VDI 2235: Wirtschaftliche Entscheidungen beim Konstruieren - Methoden und Hilfsmittel
Düsseldorf (Verein Deutscher Ingenieure) 1987
161. Underwriters Laboratories Safety Standards 94, Section 2 und 3
162. N.N.:
Testspezifikationen verschiedener Automobilzulieferer

Patentveröffentlichungen

163. Offenlegungsschrift DE 3113855 A1 vom 21.10.1982
Anmelder: Fritz Wittig Herstellung gedruckter Schaltungen
Erfinder: K. Baumann
164. Offenlegungsschrift DE 3222178 A1 vom 12.06.1983
Anmelder: IVO Irion und Voessler Zählerfabrik GmbH&Co.
Erfinder: A. Haller u.a.
165. Offenlegungsschrift DE 3326968 A1 vom 14.02.1985
Anmelder: IVO Irion und Voessler Zählerfabrik GmbH&Co.
Erfinder: A. Haller
166. Patentschrift DE 3544385 C1 vom 26.03.1987
Patentinhaber zuletzt 4P Folie Forchheim GmbH
Erfinder: M. Schledorn
167. Patentschrift DE 3726744 C2 vom 10.08.1990
Patentinhaber: AMP Akzo Corporation
Erfinder: E. Cleveland, D. Frisc h
168. Offenlegungsschrift DE 37322249 A1 vom 13.04.1989
Anmelder: Siemens AG
Erfinder: A. Mattelin
169. Patentschrift DE 4034834 B1 vom 23.06.1995
Patentinhaber: Heraeus Noblelight GmbH
Erfinder: H. Esrom
170. Patentschrift DE 4103834 B1 vom 12.02.1993
Patentinhaber: LPKF Laser & Electronics GmbH
Erfinder: J. Kickelhain
171. Offenlegungsschrift DE 4131065 A1 vom 04.03.1993
Anmelder: Siemens AG
Erfinder: A. Mattelin
172. Gebrauchsmuster DE 9404443 vom 14.07.1994
Anmelder und Erfinder: K. Feldmann
173. Offenlegungsschrift EP 62300 A1 vom 13.10.1982
Anmelder: Fritz Wittig Herstellung gedruckter Schaltungen
Erfinder: K. Baumann
174. Patentschrift EP 63347 B1 vom 24.04.1986
Patentinhaber: Bolta Werke GmbH
Erfinder: H. Bauser u.a.
175. Patentschrift EP 192233 B1 vom 19.04.1995
Patentinhaber: AMP Akzo Corporation
Erfinder: E. Cleveland, D. Frisc h, W.Weber
176. Patentschrift EP 236404 B1 vom 23.09.1993
Patentinhaber: ufe Inc.
Erfinder A. Atkinson u.a.

177. Patentschrift EP 323685 B1 vom 01.04.1993
Patentinhaber: Sankyo Kasei K.K.
Erfinder: T.Yumoto
178. Patentschrift EP 361192 B1 vom 23.02.1994
Anmelder: Siemens AG
Erfinder: A. Mattelin
179. Offenlegungsschrift EP 443097 A1 vom 28.08.1991
Anmelder: Carl Baasel Lasertechnik GmbH
Erfinder: J. Mettler u.a.
180. Patentschrift EP 543045 B1 vom 20.06.1996
Patentinhaber: Siemens AG
Erfinder: H. Schumacher
181. Offenlegungsschrift GB-A 1254308
Anmelder: Barkelyte Xylonite Ltd.
Erfinder: K. White
182. Offenlegungsschrift JP 2-278792 A vom 15.11.1990
Anmelder: Shin Kobe Electric Mach. Co. Ltd.
Erfinder: Hiroshi Ueda
183. Patentschrift US 4415607 vom 15.11.1983
Patentinhaber: Allen-Bradley Corporation
Erfinder: O. Denes u.a.
184. Patentschrift US 4812275 vom 14.03.1989
Patentinhaber: Sankyo Kasei K.K.
Erfinder: T. Yumoto
185. Patentschrift US 4837129 vom 06.06.1989
Anmelder: Kollmorgen Corporation
Erfinder: D. Frisch u.a.
186. Patentschrift US 4912288 vom 27.03.1990
Patentinhaber: ufe Inc.
Erfinder: A. Atkinson u.a.
187. Patentschrift US 4985116 vom 15.01.1991
Anmelder: Mint-Pac Technologies
Erfinder: J. Mettler u.a.
188. Patentschrift US 5220488 vom 15.06.1993
Anmelder: ufe Inc.
Erfinder: O. Denes
189. Offenlegungsschrift WO 91/13384 A1 vom 05.09.1991
Anmelder: General Electric Company
Erfinder: J. Mettler u.a.

Lebenslauf

Frank Pöhlau

geboren am 26.02.1969 in Nürnberg

- 1975 - 1979 Grundschule in Nürnberg
- 1979 - 1988 Willstätter - Gymnasium Nürnberg, Abschluß: Abitur
- 1987 - 1988 Wehrdienst, Nürnberg
- 1989 - 1994 Studium der Fertigungstechnik
an der Universität Erlangen-Nürnberg
Abschluß 08/1994: Dipl.-Ing. (Univ.)
- 1994-1998 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für
Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
der Universität Erlangen-Nürnberg.
Leiter: Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann

ISSN 1431-6226
ISBN 3-87525-114-8