

Gunter Beitinger

*Herstellungs- und Prüfverfahren für  
thermoplastische Schaltungsträger*



Gunter Beitinger

*Herstellungs- und Prüfverfahren für  
thermoplastische Schaltungsträger*

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: 5. Juli 1999  
Tag der Promotion: 29. Oktober 1999  
Dekan: Prof. Dr.-Ing. H. Meerkamm  
Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann  
Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. G. Ehrenstein

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

**Beitinger, Gunter:**

Herstellungs- und Prüfverfahren für thermoplastische  
Schaltungsträger / Gunter Beitinger. Hrsg. von  
Klaus Feldmann. - Bamberg : Meisenbach, 1999  
(Fertigungstechnik - Erlangen ; 97)

Zugl.: Erlangen, Nürnberg, Univ., Diss., 1999  
ISBN 3-87525-129-6 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 herzlichst dafür, daß er mir die Gelegenheit zur Anfertigung dieser Arbeit gegeben hat und dem damit verbundenen entgegengebrachten Vertrauen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Gottfried Ehrenstein, dem Leiter des Instituts für Kunststofftechnik gilt mein herzlichster Dank für die wohlwollende Übernahme des Koreferats und der vorausgegangenen fachlichen Unterstützung.

Für die Korrekturlesung möchte ich mich vor allem bei Herrn Dipl.-Ing. Chuong Ngo, Herrn Dipl.-Ing. Guido Renner, Herrn Dipl.-Ing. Wolfgang Schlögl und meinem Vater bedanken.

Weiterhin möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Michael Eisenbarth, Herrn Dipl.-Ing. Dipl.-Wirtsch. Ing. Harald Rottbauer und Herrn Dipl.-Ing. Stefan Slama für die Unterstützung bei der Anfertigung meines Vortrages bedanken.

Meine Verbundenheit möchte ich auch Herrn Dipl.-Ing. Gerald Gion für die jahrelange produktive und qualifizierte Zusammenarbeit entgegenbringen.

Herrn Dipl.-Ing. Stefan Krug möchte ich für die ausgesprochen schöne und auch fachlich interessante Zeit in dem gemeinsamen Büro bedanken, an die ich mich immer erinnern werde.

Dankbarkeit schulde ich überdies vor allem meinen Eltern für die jahrelange Unterstützung und Motivierung zur Erreichung meiner gesetzten Ziele.

Mein herzlichster Dank gilt schließlich meiner Frau Corina für die sowohl moralische Unterstützung als auch tatkräftige Beihilfe bei der Anfertigung des Druckbildes und das Verständnis gegenüber unzähliger Abendstunden und Wochenenden mit minimaler Kommunikation.

Regensburg, im November 1999

Gunter Beitinger



# Herstellungs- und Prüfverfahren für thermoplastische Schaltungsträger

## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Notwendigkeit neuer Herstellungsverfahren aufgrund veränderter Rahmenbedingungen</b> ....	<b>7</b>
2.1 Basismaterialien .....	7
2.1.1 <i>Ökonomisches Potential durch kostengünstige Kunststoffe</i> .....	10
2.2 Metallisierungstechnologien und Metallschicht.....	11
2.2.1 <i>Technologien zur direkten Metallisierung</i> .....	12
2.2.2 <i>Laminierung von Metallfolien und deren Eigenschaften</i> .....	25
2.3 Strukturierungs- und Herstellungsverfahren .....	32
2.3.1 <i>Strukturierungsverfahren</i> .....	32
2.3.2 <i>Herstellungsverfahren spritzgegossener Schaltungsträger</i> .....	36
2.4 Auswahl der Verfahren und Zusammenfassung .....	37
<b>3 Prüfverfahren zur Evaluierung der Metallschicht</b> .....	<b>43</b>
3.1 Oberflächenanalyse .....	43
3.2 Schichtdickenmessung .....	44
3.3 Haftfestigkeitsbestimmung dicker Schichten .....	46
3.3.1 <i>Einflußgrößenuntersuchung bei Messungen nach DIN IEC 326</i> .....	48
3.3.2 <i>Entwicklung einer computergestützten Interpretations- und Auswertehilfe</i> .....	52
3.4 Haftfestigkeitsbestimmung dünner Schichten.....	55
3.4.1 <i>Einflußgrößenuntersuchung bei Messungen nach DIN EN 582</i> .....	56
3.4.2 <i>Entwicklung und Aufbau einer Prüfvorrichtung</i> .....	59
3.4.3 <i>Beschreibung des Prüfvorgangs und Evaluierung der Prüfvorrichtung</i> .....	63
3.5 Übertragbarkeit der DIN EN 582 auf DIN IEC 326 .....	68

<b>4 Einsatz metallisierbarer Haftvermittler in Verbindung mit der Laserstrukturierung .....</b>	<b>70</b>
4.1 Lasergestütztes Additivverfahren metallisierbarer Haftvermittler .....	70
4.1.1 Voruntersuchungen zum Einsatz des Excimerlasers.....	72
4.1.2 Excimerlaser-Strukturierung metallisierbarer Haftvermittler.....	74
4.1.3 Ergebnisse der chemischen Metallisierung.....	83
4.2 Lasergestützte Subtraktivverfahren metallisierter Haftvermittler .....	87
4.2.1 Voruntersuchungen zum Einsatz des Nd:YAG-Festkörperlasers.....	89
4.2.2 Nd:YAG-Laser-Strukturierung des metallisierten Haftvermittlers.....	97
4.2.3 Steigerung der Schälfestigkeit.....	101
4.3 Zusammenfassung und Ausblick der Laserstrukturierung von Haftvermittlern.....	102
<b>5 Strukturierte physikalische Vormetallisierung und chemisch-galvanische Nachverstärkung</b>	<b>105</b>
5.1 Universelles Verfahren zur Metallisierung von Thermoplasten .....	106
5.1.1 Voruntersuchungen zur physikalischen Metallisierung .....	107
5.1.2 Prozeß zur physikalischen Metallisierung .....	112
5.1.3 Galvanische Nachverstärkung physikalisch vormetallisierter Thermoplaste .....	119
5.2 Verfahren zur Maskenstrukturierung.....	123
5.2.1 Semiadditive Maskenstrukturierung .....	123
5.2.2 Additive Maskenstrukturierung .....	125
5.3 Zusammenfassung und Ausblick der PVD-Technologie .....	131

<b>6 Laminierverfahren für Thermoplaste.....</b>	<b>133</b>
6.1 Kleberunterstützte Laminierung .....	134
6.2 Kleberlose Laminierung .....	144
6.2.1 Vollflächige kleberlose Laminierung .....	144
6.2.2 Strukturierte kleberlose Laminierung.....	150
6.3 Zusammenfassung und Ausblick des Laminierens von Thermoplasten.....	152
<b>7 Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>154</b>
<b>8 Literaturverzeichnis.....</b>	<b>156</b>



## 1 Einleitung

Mit fortschreitender technologischer Entwicklung im Bereich der Schaltungsträger- und Baugruppenttechnologie wächst der Druck auf die meist mittelständischen Produktionsunternehmen von Elektronikkomponenten in Deutschland, sich gegenüber dem globalen Wettbewerb behaupten zu können. Dies wird besonders deutlich, wenn man beachtet, daß unter den 30 weltgrößten Leiterplattenherstellern (Umsatzvolumen) lediglich drei europäische Firmen, davon zwei deutsche, am Ende dieser Liste vertreten sind. Trotz eines vorausgesagten Wachstums von vier Prozent des Leiterplattenverbrauchs in Quadratmeter steht diesem Industriezweig eine Umsatzstagnation von bis zu zehn Prozent pro Jahr bevor /193/. Wachstum ist somit nur durch gesteigertes Volumen und den damit einhergehenden Preiskämpfen verbunden.

Hinzukommen die ökologischen Randbedingungen und die Gesetzgebung, die zunehmend zu einem ökonomischen Faktor werden. In der Leiterplattenindustrie werden die Kosten der Umweltauflagen mit sieben bis acht Prozent an den Gesamtkosten geschätzt, was sehr hoch im Vergleich von ein bis zwei Prozent in anderen Industriezweigen ist.

Jedoch nicht nur globale und lokale Einflußfaktoren, sondern auch technologische Trends in der Aufbautechnologie bringen Veränderungen für Materialien und Prozesse. So hat die durchschnittliche Kabellänge in der Automobilentwicklung die vor 75 Jahren begann von 30 m auf 1800 m zugenommen. Mehr Baugruppen, mehr Kabel und mehr Stecker werden eingebaut, was somit die Schnittstellen, Fehleranfälligkeit und elektronische Baugruppenkomplexität steigen lassen /4/. Modulare Montage und Modularität sind Schlagwörter, die aus der Softwareindustrie kamen und Einzug in die Elektronikindustrie nahmen. Zusammengefaßt heißt das Ziel, schnellere Fertigung mit neueren Technologien in kürzeren Innovationszyklen, bei größerer Variantenzahl, bei geringeren Montagestandorten was zu geringeren Montagekosten und erhöhter Wettbewerbsfähigkeit führt /94/.

Herausforderungen, denen vor allem durch den Einsatz innovativer Technologien, die auch ökonomische Vorteile besitzen, zu begegnen ist. Chancen eröffnen sich für die mittelständische europäische Elektronikindustrie vor allem bei den flexiblen und spritzgegossenen Leiterplatten (3-D MID), für die zusammen trotz alledem ein Umsatzwachstum von bis zu 20 Prozent vorausgesagt wird /48/. Der MID-Markt spielt mit einem weltweiten Umsatz von circa 60 Millionen US\$ /181/ im Vergleich zu 5000 Millionen US\$ (1998) von flexiblen Leiterplatten derzeit eine untergeord-

nete Rolle. Durch neue Herstellungsverfahren für thermoplastische Schaltungsträger wird jedoch für mittelständische Unternehmen die Chance eröffnet, an beiden Märkten zu partizipieren. Dies ermöglicht einen Spin-Off-Effekt sowohl für das Unternehmen als auch für die gesamte MID-Industrie.

Betrachtet man die globalen Zielsetzungen der Technologien 3-D MID und flexible Leiterplatten, kann man feststellen, daß diese in vielen Bereichen deckungsgleich sind. Sie ermöglichen neue konstruktive Lösungen durch beliebig formbare Spritzgußteile oder Folien, reduzieren Fertigungs- und Montageschritte und sparen Kosten und Gewicht, um einige Beispiele zu nennen (Abbildung 1. 1).

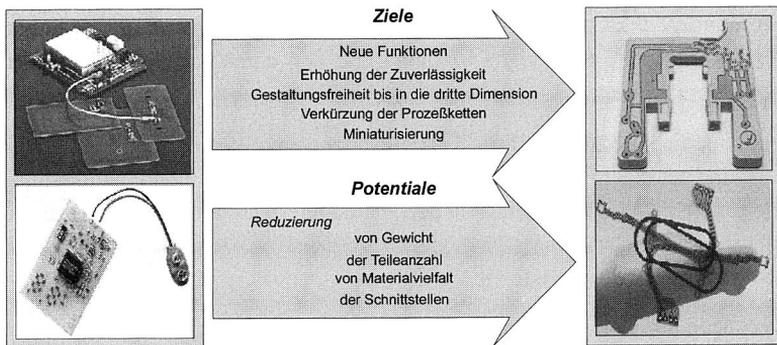


Abbildung 1. 1: Globale Ziele und Potentiale der Technologie spritzgezogener und flexibler Schaltungsträger

Beide Technologien sind aus dem Druck heraus entstanden, auf die weitergehende Miniaturisierung durch die Vorgaben des Konsums als auch der Halbleitertechnologie, die mit immer mehr Restriktionen einwirkt, zu reagieren. Denn die Miniaturisierung bezieht sich nicht nur auf Strukturdimensionen, sondern auch die Leiterplatte selbst nimmt in ihren Dimensionen ab /18/. Das begründet zum einen den zunehmenden Einsatz von flexiblen Leiterplatten, die darüber hinaus auch noch die Möglichkeit der Integration von Kabelverbindungen bieten. Zum anderen führte es zur 3-D MID Technologie, die ganz auf den klassischen Träger der elektronischen Funktionen verzichtet, damit aber auch auf die hochwirtschaftlichen Prozesse der kontinuierlichen Fertigung beziehungsweise der Fertigung in der Ebene, die in bezug auf Anlagen und Technologie voll ausgereift ist. Die Integration der Mechanik und Elektronik fordert ihren Tribut in allen Prozeßschritten der Verarbeitung wie Dispensen, Bestücken, Löten, Siebdrucken, Lackieren, Prüfen etc. , da hierfür noch keine Standardanlagen auf dem Markt verfügbar sind.

Für die Leiterplattenindustrie bedeuten die angesprochenen strukturellen Änderungen, daß es zukünftig nur zwei Konzepte geben wird, um sich gegenüber der Konkurrenz durchzusetzen und den Wettbewerbsanforderungen widerstehen zu können. Zum einen wird man sich zu Technologieanbietern wandeln müssen, die nicht nur die Verantwortung bezüglich Leiterplatte, sondern für gesamte Module, die Mechanik und Elektronik vereinen, übernehmen müssen und somit durch Integrationserhöhung die Wertschöpfung des einzelnen Produkts steigern. Zum anderen muß man die Produktivität steigern, um den Preisverfall aufzufangen. Dies wiederum gelingt nur wenn man weg vom Batch-Prozeß und hin zur kontinuierlichen Fertigung gelangt /131/. Spezifische Vorteile und Defizite bestimmen somit die Wahl zwischen der MID- und Flex-Technologie (Abbildung 1. 2).

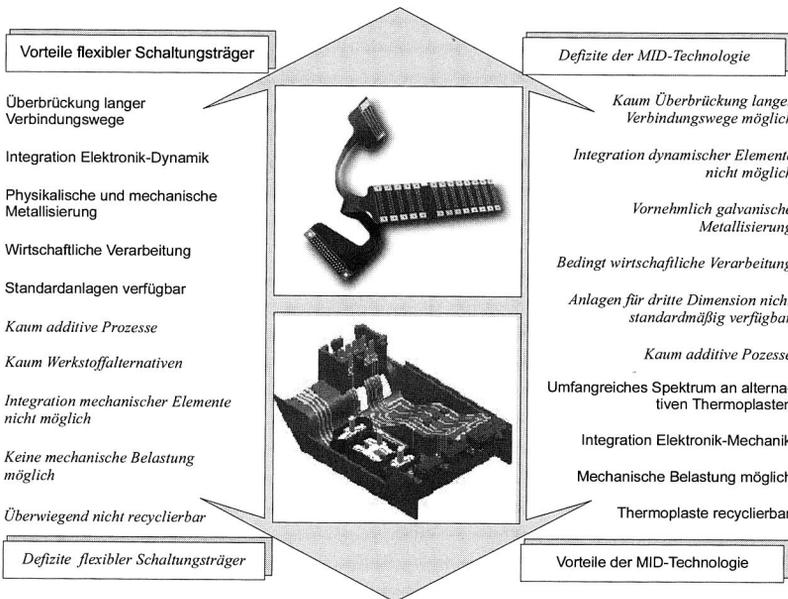


Abbildung 1. 2: Spezifische Vorteile und Defizite der MID-Technologie und der Technologie flexibler Leiterplatten

Durch diese Anforderungen getrieben, kamen vermehrt Konzepte auf, die an Komplexität sehr stark zunahmten und diese durch eine Kombination von MID-Baugruppen und flexiblen Leiterplatten zu überbrücken versuchten /60; 192/.

Als Schnittstelle zwischen diesen beiden Technologien wird das Hinterspritzen von Folien angesehen (Kapitel 2.3.2). Die Kombination bietet durch die Verwendung planarer flexibler Folien die Zugänglichkeit für kontinuierliche Verarbeitungsprozesse („Rolle-zu-Rolle“) und damit eine hohe Wirtschaftlichkeit an. Anlagen zur Weiterverarbeitung sind bereits auf dem Markt vorhanden. Fertigungslinien für flexible Schaltungsträger übernehmen den Belichtungs- und Strukturierungsprozeß und bei Bedarf auch das Bestücken und Testen von bis zu 60.000 Bauelemente pro Stunde in einer Aufspannung (Abbildung 1. 3) /88; 141/.

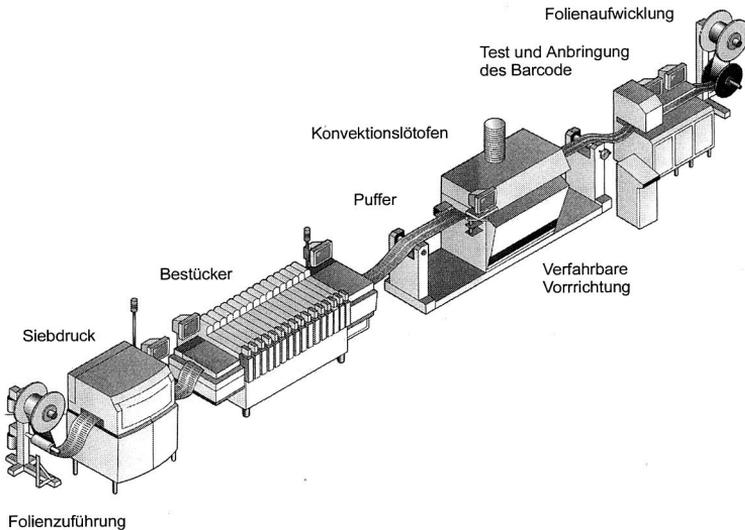


Abbildung 1. 3: Verarbeitung von "Rolle-zu-Rolle" von flexiblen Leiterplatten /149/

Weiterführende Konzepte lassen jedoch nicht die komplette Folie einspritzen, sondern hinterspritzen nur an denjenigen Stellen, an denen eine dreidimensionale Formgebung aufgrund gewünschter mechanischer Zusatzfunktionen oder Stabilität erwünscht ist, welches direkt zur Materialeinsparung beiträgt. Verbindungen zu weiter entfernten Stellen können durch die flexible Folie überbrückt werden, das somit zu einer Schnittstellenreduktion und der damit erhöhten Zuverlässigkeit und Reduktion von Bauteilen führt.

Die Versuche zur Realisierung der Kombination der MID-Technologie mit der Technologie flexibler Leiterplatten scheiterten bisher vorwiegend daran, daß die Entwicklungen weitestgehend getrennt voneinander durchgeführt wurden und dabei weder gleiche Materialien noch Metallisierungsverfahren benutzt wurden. Materialhomogenität ist jedoch sowohl zur technischen Durchführung der Hinterspritztechnologie als auch aus ökologischer Sicht notwendig.

Eine weitere Motivation zur Entwicklung neuer Herstellungsverfahren sind die immer strengeren Auflagen in bezug auf umweltbelastende Prozesse, die vor allem in Deutschland eine wesentliche Rolle für die Wettbewerbsfähigkeit auf dem internationalen Markt spielen. Auch in den Ländern, die bisher mit geringen oder keinen Umweltauflagen produzieren durften, wird in Zukunft mit mehr Reglements gerechnet. Zur Fertigung von MIDs wird vornehmlich die vollflächige galvanische Metallisierung mit anschließender subtraktiver Strukturierung eingesetzt. Hierbei ergibt sich die Notwendigkeit für die jeweils spezifizierten Werkstoffe angepaßte Galvanikprozesse einzusetzen. Dies hat zur Konsequenz, daß je Werkstoff eigene Ätzmedien und Verfahren verwendet werden. Weiterhin steht ein sicherer galvanischer Prozeß nur für einige wenige Werkstoffe zur Verfügung. Die Verfahren zur selektiven Metallisierung innerhalb der 3-D MID Technologie, wie zum Beispiel das Zweikomponentenspritzgießen oder das partielle Aufbringen von Lacken auf beliebig geometrisch geformten Oberflächen sind relativ aufwendig und in bezug auf Miniaturisierung von Leiterbahndimensionen stark eingeschränkt.

Bei den etablierten Metallisierungsverfahren für Folien, wie die physikalische Beschichtung (Physical Vapour Deposition) und das Laminieren, war eine direkte Übertragung aufgrund der verschiedenen Kunststoffe nicht möglich. Weiterhin wurde die PVD-Beschichtung bisher nur für dünne Schichten angewendet. Eine Kombination mit der galvanischen Verstärkung war hierdurch notwendig, um sie auch für Anwendungen im Leistungsbereich zugänglich zu machen.

Idealvorstellung einer neuen Technologie war hier somit eine universelle Vorbehandlung für möglichst viele thermoplastische Materialien, die sowohl partiell als auch strukturiert eine Grundmetallisierung erzeugen kann, um anschließend galvanisch auf eine gewünschte Endschichtstärke gebracht zu werden /63/. Dies impliziert, daß bei der Strukturierung den additiven und semiadditiven Verfahren der Vorzug gegenüber dem subtraktiven Verfahren gegeben werden mußte, da im allgemeinen hierbei mehr als 95% der ursprünglich beschichteten Fläche weggeätzt wird, welches wiederum ökonomische Bedeutung hinsichtlich Ressourcenschonung hatte.

Allein beim Wasserverbrauch, der momentan bei circa  $0,5 \text{ m}^3/\text{m}^2$  Leiterplatte liegt, kann eine Einsparung von bis zu 90 Prozent beim Übergang von der Subtraktiv- auf die Additivtechnik und von circa 50 Prozent beim Übergang auf die Semiadditivtechnik erreicht werden /57/.

Das für flexible Schaltungsträger vorwiegend eingesetzte duroplastische Material Polyimid (PI) zeigt im Hinblick auf Dimensionsstabilität während der Strukturierung in schwefelsaurem Wasserstoffperoxid und bei der Recyclierbarkeit deutliche Schwächen. Ebenso wenig können die ebenfalls häufig verwendeten Fluorpolymere recycelt werden.

Die Verbesserungspotentiale durch die Entwicklung neuer Verfahren zur Metallisierung und Strukturierung für thermoplastische Schaltungsträger, die eine Integration der MID-Technologie mit der Technologie der flexiblen Schaltungsträger zuläßt, lassen sich somit in die vier Bereiche Ökologie, Technologie, Prozeß und Ökonomie unterteilen (Abbildung 1. 4).

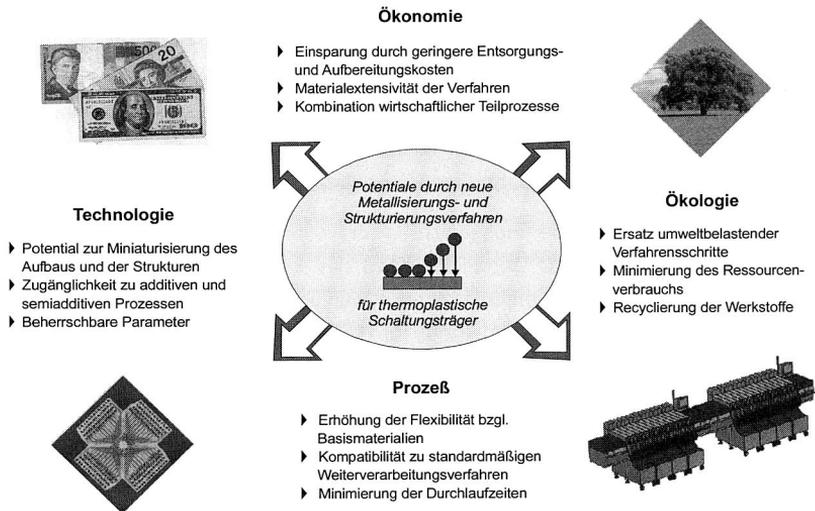


Abbildung 1. 4: Verbesserungspotentiale durch Entwicklung neuer Herstellungsverfahren für thermoplastische Schaltungsträger

Ziel dieser Arbeit war somit die Entwicklung universeller Verfahren zur Metallisierung und Strukturierung von Thermoplasten bei gleichzeitiger Substitution umweltbelastender Teilschritte der klassischen Galvanisierung und Progression der Materialflexibilität und Wirtschaftlichkeit.

## 2 Notwendigkeit neuer Herstellungsverfahren aufgrund veränderter Rahmenbedingungen

Wird innerhalb einer Technologie auf andere als bisher eingesetzte Materialien übergegangen, so verspricht man sich entweder höheres technologisches Potential oder geringere Kosten bei gleichen Eigenschaften. Innerhalb der Technologie flexibler Leiterplatten kann man jedoch feststellen, daß enorme wirtschaftliche Einsparungsmöglichkeiten durch geeignete Materialauswahl nicht ausgenutzt wird /8/. Die bisher eingesetzten Materialien für MID- und flexiblen Baugruppen, neben den zur Auswahl stehenden Metallisierungs- und Strukturierungstechnologien, sollen daher in diesem Kapitel aufgezeigt werden, um diese anschließend miteinander zu vergleichen, Defizite und Potentiale zu erkennen und geeignete Verfahren auswählen zu können.

### 2.1 Basismaterialien

Die Erforschung und Entwicklung neuer und modifizierter Materialien ist ein wesentlicher Impulsgeber bei der Erschließung neuer technischer Anwendungsfelder für Thermoplaste, die bisher nur keramischen oder duroplastischen Materialien vorbehalten waren /200/. Thermoplaste bestehen aus linearen, teilweise schwach verzweigten Makromolekülen und sind deshalb im Gegensatz zu Duroplasten schmelzbar, löslich und plastisch umformbar. Sie teilen sich in die zwei Gruppen der amorphen und teilkristallinen Thermoplasten auf, wobei der Einsatz für amorphe Thermoplaste stets unterhalb und für teilkristalline auch oberhalb der Glasübergangstemperatur erfolgen kann /91/. Duroplaste zeigen nach Überschreiten der Glasübergangstemperatur kein Schmelzen, sondern gehen sofort in eine Zersetzung über. Wie wichtig das methodische Vorgehen bei der Auswahl von Kunststoffen für MID-Anwendungen mit der Erkenntnis, daß ein werkstoffneutral gestaltetes Produkt nicht optimal auf die Eigenschaften und Verarbeitungsprozesse des später eingesetzten Kunststoffes angepaßt sein kann, ist, wurde bereits in /45/ dargelegt. Dies gilt im gleichen Maße auch für flexible Schaltungsträger /41/. Die Komplexität bei der Auswahl des geeigneten Basismaterials wird durch die Notwendigkeit der integrierten Betrachtung verschiedener chemischer, thermischer, mechanischer, elektrischer und rheologischer Eigenschaften deutlich. Unterstützung kann man durch die Verfügbarkeit unterschiedlicher Werkstoff- und Applikationsdatenbanken erhalten. Da Kunststoffe die Werkstoffgruppe mit der größten Vielfalt darstellen und laufend neue Varianten mit optimierten Eigenschaften für

einen bestimmten Anwendungsfall auf dem Markt erscheinen, ist eine vollständige Auflistung aller verfügbaren Kunststofftypen ausgeschlossen. Daher wurde die Erwähnung von Kunststoffen auf die für MID-Applikationen und flexible Schaltungsträger relevanten Typen beschränkt. Nachdem für spritzgegossene Schaltungsträger überwiegend thermoplastische Basismaterialien in Frage kommen, werden zur Herstellung flexibler Schaltungsträger auch Duroplaste eingesetzt.

Tabelle 2. 1 gibt eine Übersicht über Kunststoffe für spritzgegossene Schaltungsträger, die bisher laut MIDIS-Datenbank /145/ in einem Serienprodukt eingesetzt werden und für flexible Schaltungsträger, die am Markt als Halbzeug (verkupferte Kunststoffolie) erhältlich sind<sup>1</sup>. Eine Einteilung in Standard-, Technische und Hochleistungskunststoffe wurde vorgenommen, da hierdurch eine Darstellung bezüglich der thermischen Belastbarkeit mit einbezogen wird. Diese Eigenschaft soll aufgrund der Abhängigkeit zu bestimmten Metallisierungs- und Verarbeitungsprozessen (z.B. dem Lötvorgang) herausgehoben werden.

	<i>Kunststoffe für spritzgegossene Schaltungsträger</i>	<i>Kunststoffe für flexible Schaltungsträger</i>
<i>Standardkunststoffe</i>	ABS	PVC
<i>Technische Kunststoffe</i>	PC, PA6, PBT, PA 66	PET, PEN
<i>Hochleistungskunststoffe</i>	PPS, PES, PEI, LCP	PI, FEP, PTFE

Tabelle 2. 1: Einteilung üblicher Kunststoffe für spritzgegossene und flexible Schaltungsträger

Die Standardkunststoffe ABS (Acrylnitril, Butadien und Styrol) und PVC (Polyvinylchlorid) sind aufgrund ihrer Temperaturstabilität für Standardlötverfahren nicht geeignet, bieten hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften und niedrigen Preises jedoch interessante Aspekte. Zur Funktionserhöhung kann man auf Verfahren wie Leitpastendruck oder Leitkleben ausweichen /95/. PVC-Folien werden aufgrund ihrer Chloridanteile weitestgehend gemieden und sind in Europa so gut wie vom Markt verschwunden.

Die technischen Kunststoffe Polycarbonat (PC) und Polyethylenerephthalat (PET), sind durchwegs nicht, Polyethylenaphthalat (PEN) aufgrund seiner Dimensionsstabilität mit gewisser Restriktion, mit Standardlötverfahren verarbeitbar. Sie haben jedoch gute elektrische Eigenschaften. PET-Folien werden häufig in Verbindung mit Kohlenstoffdruck und Heißsiegelverfahren als kostengünstige Verbindung gefertigt /176/. PEN kann hingegen für einige Anwendungen die Kluft zwischen den beiden dominierenden Flex-Substraten PET und PI (Polyimid) hin-

<sup>1</sup> Siehe hierzu Literatur 41; 91; 132; 139; 149; 168; 199.

sichtlich Preis und Einsatzmöglichkeit überbrücken /41/. Polyamide (PA) stellen einen sehr großen Bereich mit vielen unterschiedlichen Typen dar, von denen einige die Brauchbarkeit von Hochtemperatur-Thermoplasten erreichen. Für MID-Anwendungen sind bisher vornehmlich PA 6 und PA 66 verwendet worden. Polybutylenterephthalat (PBT) ist für Steckverbinder und als Konstruktionskunststoff aufgrund seiner Dimensionsstabilität und elektrischer Eigenschaften weit verbreitet und hat auch Anwendungen in der MID-Technologie gefunden /91/. Mit gewissen Einschränkungen sind sie auch für Standardlötverfahren zugänglich.

Die Gruppe der Hochtemperatur- beziehungsweise Hochleistungskunststoffe ist die Werkstoffgruppe, der sowohl innerhalb der MID- als auch der flexiblen Schaltungsträgertechnologie am meisten Beachtung geschenkt wird. Dies liegt an deren hohen thermischen als auch chemischen Beständigkeit, wodurch sie für alle Standardlötverfahren und viele Anwendungsfelder zugänglich sind. Polyphenylsulfid (PPS) besitzt eine hohe Härte und Steifheit und hat gegenüber Chemikalien eine höhere Beständigkeit als Polyethersulfon (PES) und Polyetherimid (PEI). Letzgenannter Kunststoff ist aufgrund der leichten Verarbeitbarkeit und Spritzbarkeit ein beliebter MID-Kunststoff. PES und PEI sollten infolge ihrer relativ hohen Feuchtigkeitsaufnahme vor dem Löten gut getrocknet werden. Die Anwendung von LCP (Liquid Crystal Polymer) erlaubt es, sehr diffizile Formteile mit dünnen Wandstärken und langen Fließwegen zu fertigen. Es handelt sich um eigenverstärkte Polymere, da sich die Makromoleküle parallel zur Spritzgußrichtung und nicht als Kristallgitter anordnen /44/. Bemerkenswert sind die geringe thermische Längenausdehnung und Feuchtigkeitsaufnahme /164/.

Polyimide (PI) besitzen die größte technische und wirtschaftliche Bedeutung als duroplastische Folienwerkstoffe. Sie nehmen in Hinblick auf die Produktionszahlen den ersten Platz unter den hitzebeständigen Kunststoffen ein. Ein wesentlicher Vorteil von PI besteht darin, daß sie auch bei lang andauernden Gebrauch bis etwa 260 °C einsetzbar sind /199/. Da es sich bei Polyimidfolien um glatte und fusselfreie Materialien handelt, lassen sie sich gut reinigen und bieten somit das Potential für Feinstleiterprozesse. Polyimidfolien sind auch der Bearbeitung mit Laser und Plasma zugänglich, wodurch hohe Verdrahtungsdichten erzielbar sind. Probleme hinsichtlich der Dimensionsstabilität in schwefelsauren Medien sind bekannt. Vernetzte PI-Polymere sind aufgrund ihrer Zugehörigkeit zu den Duroplasten nicht schmelzbar und können damit nicht einer einfachen Wiederverwertung über thermoplastische Verarbeitungsmethoden zugeführt werden.

Weiterhin werden PI-Folien aus der Lösung hergestellt, was starke Nachteile hinsichtlich der Umweltfreundlichkeit aufgrund entweichender Lösungsmittel aufweist. In neueren Forschungsvorhaben wird die Herstellung thermoplastischer Folien aus Polyetheretherketone (PEEK) untersucht, welche die Defizite der PI-Folien überbrücken sollen /110/.

Die beiden Thermoplaste Fluorethylenpropylen (FEP) und das verwandte Polytetrafluorethylen (PTFE), weisen niedrige Dielektrizitätskonstanten und geringe Verlustfaktoren auf, wodurch sie sich vor allem für Hochfrequenzanwendungen eignen. Während FEP noch bedingt spritzgußtechnisch verarbeitet werden kann, zeigt PTFE oberhalb des Kristallitschmelzbereiches kein Fließen, sondern einen gelartigen Zustand, wodurch die Verfahren zur Fertigung denen aus der Pulvermetallurgie ähneln und daher sehr aufwendig und teuer sind /24/.

### 2.1.1 Ökonomisches Potential durch kostengünstige Kunststoffe

Ein wesentliches Einsparungspotential wird allein durch die Möglichkeit der Verwendung kostengünstigerer Thermoplaste gegeben. Die Preise von Kunststoffen hängen in erster Linie von deren relativen Produktionsmengen ab (Tabelle 2. 2).

Kunststoffklasse	Produktionsmengen		Preis p in €/kg
	Weltweit in Mio. t	Westeuropa in T. t	
Standardkunststoffe	~ 90	~ 500	0,75 bis 1,50
Übergang Standard - Technische		250 - 500	1,50 bis 3,00
Technische Kunststoffe	~ 10	10 - 250	3,00 bis 10,00
Hochleistungs-Kunststoffe	~ 0,1	~ 0,5 - 10	> 10,00

Tabelle 2. 2: Relative Produktionsmengen und zugehörige Kostenspannen von Kunststoffen /in Anlehnung an 80; 135; 153/

Jedoch auch ihre Eigenschaften spielen eine wesentliche Rolle. Setzt man die Eigenschaft „Dauergebrauchstemperatur“ in Relation zu deren mittleren Preis, erhält man eine Darstellung wie in Abbildung 2. 1. Hierdurch ist die Möglichkeit gegeben, abzuschätzen ob ein Kunststoff preisgünstig beziehungsweise teuer im Verhältnis zu seinen Eigenschaften ist.

Fast alle thermoplastischen Materialien sind als Folie auf dem Markt erhältlich, jedoch nur wenige metallisiert. Ist aufgrund der Applikation ein Lötprozess notwendig, ist man im allgemeinen gezwungen Polyimid zu verwenden, der aber einer der teuersten Kunststoffe ist. Die Eigenschaften von LCP, PEI und PES wären in den meisten Fällen vollkommen ausreichend, da die wesentliche Belastung auf den Kunststoff durch den Lötprozess vorgegeben wird.

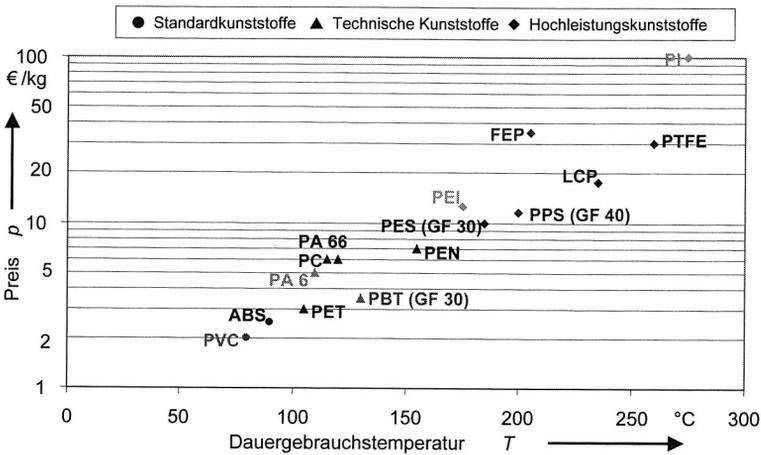


Abbildung 2. 1: Relation von Preis zur Eigenschaft „Dauergebrauchstemperatur“ T in °C

Ebenso kann man beim Übergang von PET auf PA 66 und PBT ein enormes technologisches Potential erhalten, welches durch PET nicht zu erreichen wäre, ohne jedoch den Preis von PI bezahlen zu müssen<sup>1</sup>. PEN ist hierbei eine Alternative, liegt aber dennoch über dem Preis der zuvor erwähnten Kunststoffe.

## 2.2 Metallisierungstechnologien und Metallschicht

Die Verwendung thermoplastischer Kunststoffe als Basismaterial setzt in der Regel deren Metallisier- oder Laminierbarkeit mit einer Metallfolie voraus. Die Metallisierung erfolgt entweder aus ästhetischen oder funktionellen Gründen, sie hat jedoch stets den Zweck die spezifischen Eigenschaften des Kunststoffes wie geringes Gewicht, Konstruktionsfreiheit und ökonomische Herstellung und Verarbeitung mit der Eigenschaft des Beschichtungsmetalls wie mechanische und elektrische Leitfähigkeit zu verbinden. Die Minimalanforderung, die ein beliebiges thermoplastisches Basismaterial zu einem elektronischen Schaltungsträger macht, ist somit dessen haftfeste, strukturierte Metallschicht. Die Metallisierung und Strukturierung gelten somit als Schlüsseltechnologie, die sowohl die Miniaturisierung als auch nachfolgende Prozesse wie das Aufbringen von Schutzschichten, Leitpasten etc. beeinflussen oder sogar bestimmen.

<sup>1</sup> FEP und PTFE Folienpreise stehen aufgrund des teuren Herstellungsprozesses nicht im gleichen Verhältnis wie die Kilogramm-Preise für die restlichen Kunststoffe und wurden daher nicht in die Diskussion einbezogen.

In der Leiterplattenindustrie wird ausnahmslos zwischen kleberlosen und kleberunterstützten Aufbauten unterschieden. Das Aufbringen von Metall direkt auf das Basismaterial ohne, der Notwendigkeit einer Klebstoffschicht, gewinnt besonders innerhalb der flexiblen Schaltungsträgertechnologie immer mehr an Bedeutung. Die Leiterplatten haben im allgemeinen deutlich geringere Gesamtaufbau-stärken durch fehlende Kleber- und dünnere Kupferschichten, welches nicht zuletzt verbesserte thermische und mechanische Eigenschaften bedeutet /98/.

Die Möglichkeiten Metallschichten für elektrisch funktionelle Anwendungen<sup>1</sup> direkt auf den Thermoplasten aufzubringen sind vielfältig. Hierunter fallen Verfahren, bei welchen das Metall aus der ionisierten oder dampfförmigen Phase auf das Basis-material aufgebracht wird, sie werden in Kapitel 2.2.1 beschrieben. Liegt das Kupfer jedoch bereits in fester Form vor, um es mit den Schaltungsträger zu laminieren oder zu verpressen, spricht man von Laminierung (Kapitel 2.2.2).

Es ist gemeinhin die geometrische Form des Schaltungsträger und das Basisma-terial, daß das anzuwendende Verfahren zur Metallisierung bestimmt. So dominieren bei flexiblen Schaltungsträger die Laminierung, physikalische Verfahren und bei 3-D MID Baugruppen galvanische Metallisierungsverfahren.

### 2.2.1 *Technologien zur direkten Metallisierung*

Unter Metallisierung aus der ionisierten Form ist das Galvanisieren gemeint. Hierbei wird nach einer Vorbehandlung, die meist chemisch ist, stromlos und elektrolytisch die Metallschicht aufgebracht. Um Vorbehandlungsschritte zu ersetzen, existieren sowohl spezielle Verfahren als auch solche die hierzu diskret auftragbare metallisierbare Zwischenschichten nutzen. Sie werden als eigenständige Verfahren beschrieben. Zu den Beschichtungsverfahren aus der Gasphase gehören das PVD- (Physical Vapour Deposition) und das CVD-Verfahren (Chemical Vapour Deposition).

#### Standard-Galvanisierverfahren

Betrachtet man die MID-Herstellungsverfahren /45; 91/ unter beschichtungstechnischen Aspekten, so dominieren hier eindeutig galvanische Verfahren. Unter dem Galvanisieren versteht man Verfahren zum Abscheiden von Metallen aus Elektrolytlösungen und Salzschnmelzen unter Ausnutzung eines Transportes von Ionen

---

<sup>1</sup> Die Einschränkung bezieht sich auf elektrisch funktionelle Anwendungen, da für Dekorationszwecke auch ein Beschichten aus dem breiig, flüssigen Zustand (Lackieren mit vermengten Metallpartikeln) möglich ist.

und Elektronen. Galvanisierverfahren können infolgedessen mit äußerer Gleichstromquelle (elektrolytisch) oder außenstromlos (chemisch) arbeiten. Die dekorative Oberflächenveredelung und Überzüge zur elektromagnetischen Abschirmung haben lange Jahre die typischen Aufgabenfelder der Galvanotechnik dargestellt. Durch die Erschließung thermoplastischer, dreidimensionaler Schaltungsträger war es naheliegend das Wissen um die Metallisierung von Thermoplasten aus diesen Bereichen zu nutzen.

Man kann sagen, daß die Kunststoffgalvanisierung sich momentan auf einem Stand der Technik befindet, die es erlaubt, einige zur Galvanisierung optimierte Kunststoffe so zu metallisieren, daß eine haftfeste Schicht aufgebracht werden kann. Es ist hierbei jedoch zu beachten, daß jede Kunststoffart ihre eigene spezielle Vorbehandlung benötigt, für die eine lange Kette sequentieller Einzelprozesse notwendig ist. Diese müssen zudem spezifisch an die Eigenschaften des zu beschichtenden Thermoplasttyps angepaßt werden /26; 64/. Prinzipiell kann man die klassische Galvanisierung in vier Hauptschritte unterteilen, der Vorbehandlung, der Aktivierung, der chemischen und der elektrolytischen Metallisierung.

Das Ziel der Vorbehandlung, die vorwiegend mit Säuren und Laugen durchgeführt wird, ist die Oberfläche zu reinigen, anzuquellen und aufzurauen, um der nachfolgenden Metallschicht den erforderlichen Halt zu bieten. Das kann auf unterschiedliche Weise erfolgen. Ist der Kunststoff zum Beispiel sensitiv gegen Oxidation, kann ein starkes Oxidationsmittel wie zum Beispiel Chromschwefelsäure oder Permanganatlösung verwendet werden. Das bekannteste Beispiel hierfür sind die kautschukelastischen Butadienpolymere des ABS-Pfropfpolymerisats (Acrylnitril, Btadien und Styrol), deren Doppelverbindungen bei Arbeitstemperaturen von circa 60 °C oxidativ angegriffen und selektiv aufgelöst werden, ohne die Styrol-Acrylnitril-Hartphase wesentlich anzugreifen (Abbildung 2. 2) /49/. Gleichzeitig wird die Oberfläche während des Ätzens gereinigt und hydrophil /35/. Die entstehenden Hohlräume und Kavernen bilden somit die Grundlage für die Haftung der galvanischen Metallschicht.

Für spritzgeossene Leiterplatten werden aus Gründen der Temperaturbelastung durch nachfolgende Lötprozesse oder Einsatzgebiete auch Technische- und Hochleistungs-Kunststoffe eingesetzt. Diese sind zum einen robuster gegenüber Chemikalien und zum anderen enthalten sie keine Copolymere, die selektiv chemisch herausgelöst werden könnten. Möglichkeiten um einen ähnlichen Effekt zu erzielen wurden ausführlich untersucht /15; 49/. Es wurde hierbei prinzipiell festgestellt, daß jeder Kunststoff und jede Füllstoffmodifikation einer speziellen Vor-

behandlung bedarf /14/. Neben dem mechanischen Aufräumen über Druckstrahlverfahren oder dem gezielten Einbringen von Füllungen wie Mineral<sup>1</sup>, Glaskugeln<sup>2</sup>, Glasfasern etc. die anschließend freigelegt oder herausgelöst werden, kann man bei Mehrphasenkunststoffen (teilkristallin) auch gezielt die amorphen Bereiche einem Angriff alkalischer Beize aussetzen<sup>3</sup> (Abbildung 2. 2).

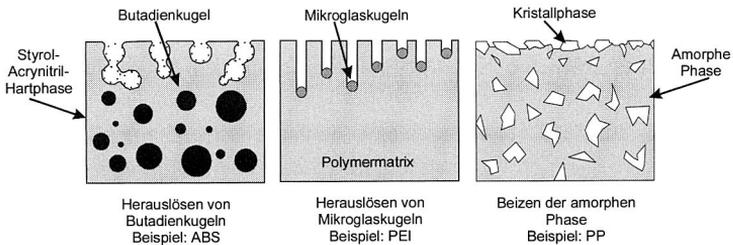


Abbildung 2. 2: Beispiele alternativer Mikroaufrauungen von Polymerwerkstoffen

Meist genügt ein einfacher Beiz- oder Ätzschritt nicht und es müssen organische Lösungsmittel im Gemisch mit Wasser vorgeschaltet werden. Ist dies auch nicht möglich, wird die Oberfläche durch Säuren und Laugen lediglich aufgerauht. Normalerweise ist die Haftung bei dieser Art der Ätzung oder Beizung geringer als beim Vorhandensein von Mikrokavitäten. Die mechanische Adhäsion stellt jedoch nur einen Teil der Gesamthaftung des Metallfilms auf den Thermoplasten dar. Nach einem Alterungsprozeß können durchaus auch Wasserstoffbrückenbildungen oder andere Effekte zur Gesamtheadhäsion beitragen /143/.

Die so für eine haффeste Verbindung des Metalls vorbereitete Oberfläche muß nun in einen elektrisch leitfähigen Zustand überführt werden. Hierzu wird zuerst die Oberfläche mit Spuren von Edelmetallen wie Palladium oder Silber bekeimt. Dies erfolgt mit Hilfe von Palladiumchlorid- oder Silbernitratlösungen. Vor und nach der Bekeimung folgen noch spezifische Sensibilisierungs- und Reduzierungsschritte auf die hier nicht näher eingegangen wird /49/.

Die Palladium- beziehungsweise Silbermetallkeime werden für den sich anschließenden chemischen Metallisierungsprozeß benötigt. In der Regel werden hierzu außenstromlos arbeitende Nickel- oder Kupferbäder verwendet, die einen großen

<sup>1</sup> Beispiele: LCP, PES, PA / 91; 164/.

<sup>2</sup> Beispiel: PEI /15/.

<sup>3</sup> Beispiele: PA, PP /75; 96/.

Anteil an Komplexchemikalien beinhalten und einer gesonderten Abwasserbehandlung zugeführt werden müssen. Je höher Metall- und Reduktionsmittelkonzentration sowie pH-Wert und Badtemperatur sind, desto höher ist die Abscheidengeschwindigkeit. Chemisch abgeschiedene Kupferschichten weisen eine extrem gleichmäßige Schichtdickenverteilung auf, jedoch werden die hieraus abgeschiedenen Schichtdicken aufgrund des geringen Schichtwachstums von  $0,1 \mu\text{m/h}$  bis  $0,5 \mu\text{m/h}$  aus Kostengründen auf maximal  $1 \mu\text{m}$  beschränkt. Neue schnell abscheidende chemische Bäder mit Abscheideraten zwischen  $5 \mu\text{m/h}$  bis  $8 \mu\text{m/h}$  machen diese Technologie auch für dickere Schichten in Verbindung mit der Additivtechnik attraktiver (Kapitel 2.3.1) /38/.

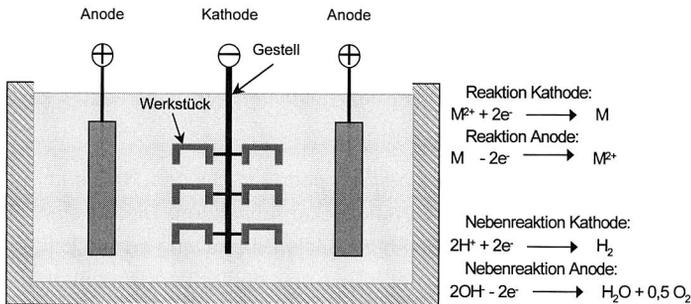


Abbildung 2. 3: Schematische Darstellung eines Bades zum elektrolytischen Metallabscheiden mit elektrochemischer Reaktion (M: Metall; e: Elektron;  $H_2$ : Wasserstoff;  $O_2$ : Sauerstoff;  $H_2O$ : Wasser;  $OH$ : Hydroxid)

Nachdem nun eine leitende Schicht auf dem Kunststoffkörper vorhanden ist, erfolgt die elektrolytische Nachverstärkung. Hierzu taucht man den Thermoplasten in den Elektrolyten und schaltet ihn als Kathode (Negativer Pol). Als Gegenelektrode wird das abzuscheidende Metall (zum Beispiel Kupfer) als Anode ebenfalls in den Elektrolyten gehängt. Gängige Anodenformen sind Platten oder in Körben gehaltenes Stückmaterial. Bei Anlegen einer Gleichstromquelle löst sich das Anodenmetall in Form von Metall-Ionen auf, welche durch den Elektrolyten zur Kathode transportiert und dort als Metall abgeschieden (Abbildung 2. 3) /133/ werden, so daß die Ionen-Konzentration im wesentlichen konstant bleibt. Die Menge des abgeschiedenen Metalls ist nach dem 1. Faraday'schen Gesetz direkt proportional zur Elektrizitätsmenge und damit dem Produkt aus Galvanisierungsdauer und Stromstärke. So werden zum Beispiel bei einer Kathodenstromdichte von  $2,0 \text{ A/dm}^2$  circa  $25 \mu\text{m/h}$  Kupfer abgeschieden /58/. In der Praxis werden fast ausschließlich cyanidische und schwefelsaure Kupferelektrolyte eingesetzt deren Eigenschaften

in /49/ beschrieben sind. Da die örtliche Kathodenstromdichte wesentlich von der geometrischen Gestalt des Bauteils abhängt kommt es verfahrensbedingt zu Schichtdickenunterschiede, denen durch konstruktive Maßnahmen und geschickter Anodenanordnung entgegengewirkt werden kann /58; 133/. Das Kupfer galvanischer Schichten weist bevorzugt eine sehr feinkörnige Struktur auf /41/. Von den in Tabelle 2. 1 aufgelisteten Kunststoffen lassen sich momentan ABS, PA, PES, PEI und LCP galvanisch metallisieren, für PC, PEN und PBT sind hierzu Entwicklungen im Gange /37/.

Neue Verfahren zur Galvanisierung für ABS-Propfpolymerisate verzichten auf den chemischen Metallisierungsschritt und erlauben direkt nach der Aktivierung den Einsatz elektrolytischer Bäder. Dies wird durch die Anwendung eines speziellen Pd/Sn-Aktivators mit nachfolgendem Behandlungsschritt, in welchem die Zinn- mit Kupfer-Partikel ausgetauscht werden, erreicht. Das Kupfer bildet eine Brücke zwischen den Palladiumclustern auf der Kunststoffoberfläche, wodurch die elektrische Leitfähigkeit erreicht wird /62/.

Galvanische Anlagen sind vom Aufbau her sehr verschieden, da sie im wesentlichen von den zu beschichtenden Werkstücken abhängen. Die meisten Anlagen für Leiterplatten sind jedoch auf eine horizontale Bearbeitung ausgerichtet. Das zu bearbeitende Werkstück wird hierbei in ein und demselben Warenträger in den oben beschriebenen Stufen horizontal transportiert und in die entsprechenden Bäder getaucht. Bei der Beschichtung von einzelnen Bauteilen sind spezielle Gestelle notwendig, die auf die Geometrie der Applikation abgestimmt werden müssen. Bei kleineren Teilen sind sogenannte Galvanisiertrommeln üblich /49/.

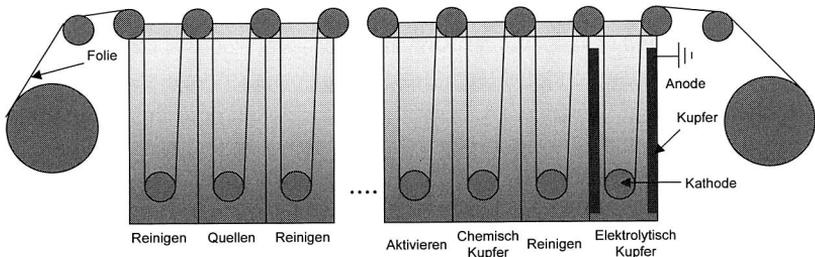


Abbildung 2. 4: Schema einer Durchlaufgalvanisierung für Folienmaterial

Aber auch eine kontinuierliche Galvanisierung von Folienmaterial ist denkbar. Spezielle Gestelle und eine horizontale Transporteinrichtung sind hierbei nicht

notwendig. Die Folie kann über entsprechende Umlenkrollen durch die einzelnen Bäder geführt werden, was zwangsläufig zu einer starren Verkettung führt. Das Schema einer solchen Anlage ist in Abbildung 2. 4 skizziert.

Über die Geschwindigkeit der Rolle, unter Einbeziehung von Puffern bei unterschiedlich langen Behandlungszeiten, können die einzelnen Teilschritte aufeinander abgestimmt werden.

### Diskret auftragbare metallisierbare Schichten

Diskret auftragbare metallisierbare Schichten, im folgenden als Bekeimer bezeichnet, können in Primer, Prekursor und Polymerschichten eingeteilt werden. Primer benötigen im Gegensatz zu Prekursor und Polymerschichten keinen zusätzlichen Aktivierungsschritt. Eine Einteilung ergibt sich somit entsprechend Abbildung 2. 5.

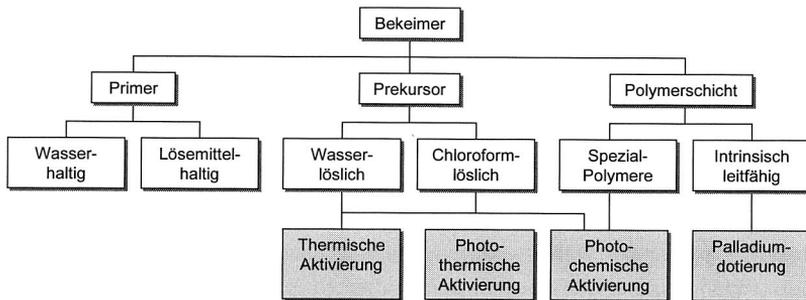


Abbildung 2. 5: Einteilung diskret auftragbarer metallisierbarer Schichten

Mit Hilfe von Primern, in der Literatur oft auch als metallisierbare Haftvermittler bezeichnet /35/, lassen sich mehrere Kunststoffe<sup>1</sup> ohne chemische oder physikalische Vorbehandlung der Oberflächen hauffest metallisieren. Die Grundlage dieser Verfahren bildet eine metallisierbare polymere Beschichtung, die auf die Oberfläche des Kunststoffes aufgebracht und getrocknet und anschließend in chemischen Nickel- oder Kupferbädern hauffest metallisiert werden kann. Die Vorbehandlung wird hierdurch mit dem Aktivierungsschritt der Thermoplasten kombiniert. Der Haftungsmechanismus zwischen Primer und Kunststoffsubstrat ist weitestgehend dem Gebiet der Lackchemie zuzuordnen.

<sup>1</sup> Zur Zeit der Drucklegung waren dies: PET, PC, PI, PA.

Empirische Erkenntnisse zeigten, daß die Haftung durch Verwendung ausgewählter Bindemittel, vorzugsweise in Kombination mit bestimmten Füllstoffen, eingestellt werden kann. Diese polymere Beschichtungen lassen sich mit unterschiedlichen Applikationstechniken wie Siebdruck, Tampondruck oder durch Aufsprühen auf die Oberfläche der thermoplastischen Substratmaterialien aufbringen /78; 105/ und besitzen dementsprechend unterschiedliche rheologische Eigenschaften. Die Metallisierbarkeit ergibt sich durch organometallische Silber- oder Palladiumaktivatoren, die in der Polymerschicht fein verteilt sind. Im wesentlichen bestehen Primer aus folgenden Komponenten /195/:

- Bindemittel, z.B. Polyurethan, Polyacrylat etc. .
- Füllstoffe, z.B. TiO<sub>2</sub>, Talkum, Ruß, Aerosil, Bariumsulfat etc. .
- Aktivator, z.B. organometallischer Aktivator (O.M.A.).
- Hilfsmitteln, z.B. Verlaufs-, Entlüftungs-, Verdickungsmittel etc. .
- Lösemittelgemisch oder wäßrige Bindemitteldispersion.

An die Primer werden je nach Applikation unterschiedliche Anforderungen gestellt, wobei die Zusammensetzung des Primers für die Erfüllung dieser Kriterien von großer Bedeutung ist. Dies impliziert, daß für unterschiedliche Kunststoffe zum Teil unterschiedliche Primerformulierungen verwendet werden müssen. Lösemittelhaltige Formulierungen bieten aufgrund ihrer niedrigeren Viskosität, eine bessere Applizierbarkeit als wäßrige Formulierungen. Bergen jedoch die Gefahr, daß innere Spannungen in Kunststoff-Spritzgußteilen entstehen, wodurch wäßrige Formulierungen für 3-D MID Applikationen vorzuziehen sind, wenn sich auch wiederum die Metallisierung, aufgrund schmälerer Arbeitsfenster für die Badführungsparameter, etwas schwieriger gestaltet<sup>1</sup>.

Um eine gute Haftfestigkeit des Metalls auf dem Primer zu erreichen, muß gewährleistet sein, daß zu Beginn des Metallisierungsprozesses die abgeschiedene Metallschicht zunächst in den oberen Bereich der Primerschicht (circa 1 µm) eindringt und sich verankert. Dieser Verwurzelungsmechanismus ergibt eine gute Haftung des Metalls auf dem Primer /195/. Abgeschiedenes Kupfer entspricht in den Eigenschaften im wesentlichen dem der Standard-Galvanisierung. Der Primer kann je nach Kunststoff in Dicken bis minimal einem Mikrometer aufgetragen werden und beeinflusst die Flexibilität bei flexiblen Schaltungsträgern nicht.

---

<sup>1</sup> Diese Erkenntnisse konnten aufgrund der konstruktiven und engen Zusammenarbeit mit Herrn Dr. G.D. Wolf, Fa. Bayer AG gewonnen (vgl. Kapitel 4).

Prekursor können analog zu den bereits erwähnten Applikationstechniken aufgetragen werden. Benötigen jedoch im Anschluß an den Trocknungsschritt zusätzlich eine Aktivierung, die meist über UV-Licht realisiert wird, wodurch diese Technologie auch als Photolyse bezeichnet wird. Prekursoren basieren im allgemeinen auf metallorganische Palladiumverbindungen (z.B. Palladiumacetat), die sich durch Bestrahlung mit ultravioletem Licht einer bestimmten Wellenlänge spalten. Hierbei handelt es sich um einen photothermischen Prozeß, bei dem durch Absorption der Strahlung im Substrat eine Aufheizung stattfindet, die beim Erreichen der Zersetzungstemperatur des Prekursors eine exotherme Reaktion in Gang setzt /51/. Die so gebildeten Palladium-Atome dienen als Keime für die anschließend chemische Metallisierung. Das Palladiumacetat muß hierzu in Chloroform gelöst werden /187/, im Labormaßstab wurden jedoch auch wasserlösliche Systeme realisiert.

Prekursor bieten sich vor allem für eine selektive Laseraktivierung an, wie es auch in /51; 54; 187/ beschrieben ist. Zur direkten Laseraktivierung kommen sowohl Argon-Ionen- (z.B. bei  $\lambda = 514 \text{ nm}$ ) als auch Excimerlaser (z.B. bei  $\lambda = 248 \text{ nm}$ ) zum Einsatz. Wird ein Excimerlaser zur Zersetzung der Prekursormoleküle verwendet, ist aufgrund des relativ großen Strahlquerschnittes eine Maske (Chrom auf Quarzglas) notwendig, worüber die gewünschten Strukturen belichtet werden /51/. Nicht aktiviertes Material muß mechanisch oder mit Hilfe von Lösungsmitteln wieder entfernt werden. Neuere Entwicklungen die bisher im Labormaßstab realisiert wurden, verwenden eine Excimer-UV-Lampe der Wellenlänge 172 nm die niedrigere Anlagenkosten als Laser bieten. Licht dieser Wellenlänge hat eine Photonenenergie von ungefähr sieben Elektronenvolt und kann somit spezielle Palladiumacetatlösungen spalten /165/, wobei die Oberfläche nahezu kalt bleibt und die Reaktionsabläufe eher der Photochemie zugerechnet werden. Andere Prekursor werden wiederum durch rein thermische Energiezufuhr aktiviert /74/. Lange Prozeßzeiten, hohe Investitionskosten und Einschränkungen hinsichtlich der Oberflächenqualität der Metallschichten haben bisher eine breite kommerzielle Anwendung von Prekursoren verhindert.

Spezielle Polymermaterialien erlauben es durch laserinduzierte Polymermodifizierung diese für die galvanische Metallisierung zugänglich zu machen. Applizierte organische Leiterstrukturen werden somit auf photochemischen Wege durch Konvertierung von zunächst isolierenden zu leitfähigen Polymeren (z.B. Polybisalkylthioacetylen) umgewandelt. Die leitfähige Schicht kann anschließend sowohl chemisch als auch elektrolytisch metallisiert werden /5; 166/. Bisher konnten Strukturen vor allem auf Polyimid appliziert werden, technologische Probleme wel-

che in laufenden Forschungsprojekten behandelt werden, haben ebenso bisher eine kommerzielle Nutzung verhindert /167/.

Untersuchungen werden auch dahingehend unternommen, intrinsisch leitfähige Polymere zur Direktmetallisierung zu verwenden. Derartige Polymere sind aufgrund ihrer langen ununterbrochenen Kette konjugierter Doppelbindungen in der Lage, elektrischen Strom begrenzt zu leiten. Die bekanntesten Vertreter sind Polypyrrole, Polythiopene und Polyacetylene. Deren Leitfähigkeit liegt allerdings maximal bei  $10^3$  S/cm. Bei zusätzlicher Aktivierung durch eine Palladiumdotierung ist jedoch eine kathodische Kontaktierung möglich, wodurch es sich elektrolytisch mit Kupfer metallisieren läßt. Zur Vorbehandlung sind dennoch Lösungen wie Kaliumpermanganat und Säuren notwendig, die zum einen die Oberfläche für das Polymer vorbereiten und zum anderen die Polymerisation zum leitfähigen Polymer initiieren. Die Untersuchungen zur Verwendung intrinsisch leitfähiger Polymere als Ersatz der chemischen Vorbehandlung sind jedoch noch nicht abgeschlossen /69/.

#### Beschichtungsverfahren aus der Gasphase

Die Gemeinsamkeit zwischen PVD- und CVD-Verfahren besteht darin, daß in beiden Fällen die Beschichtung aus der Gasphase erfolgt, wodurch eine Kammer (Rezipient) notwendig ist, in der das Vakuum hergestellt wird beziehungsweise die notwendigen reaktiven Gase eingelassen werden können. Die Vorteile dieser Technologien bestehen darin, daß fast jedes beliebige Material in beliebiger Stärke beschichtet werden kann. Besonders wirtschaftlich sind Schichten im Nanometerbereich.

Eine Übersicht alternativer PVD-Verfahren, auch physikalische Verfahren genannt, ist in /40/ dargestellt. Sie unterscheiden sich im wesentlichen nur durch ihre Art und Weise wie das Beschichtungsmaterial in den dampfförmigen Zustand übergeführt wird. Man teilt physikalische Verfahren aus diesem Grund auch in das Aufdampfen und das Aufstäuben von Metallen (Kathodenzerstäubung) auf. Beide Methoden sind üblich und grenzen sich lediglich in ihren Abscheideraten und den erreichbaren Haftfestigkeiten gegeneinander ab.

Beim Aufdampfen wird nach dem Evakuieren des Rezipienten auf  $10^{-4}$  mbar bis  $10^{-8}$  mbar das Beschichtungsmaterial durch eine elektrische Widerstandsheizung, einen Elektronenstrahl, Lichtbogen oder Laserstrahl erhitzt und somit verdampft. Der Metalldampf verteilt sich in dem Rezipienten und kondensiert auf den relativ kalten Oberflächen des Bauteils (Abbildung 2. 6 links). Der technische Aufwand ergibt sich durch den möglichst niedrigen Druck, der notwendig ist um während

des Aufdampfprozesses chemische Reaktion zu vermeiden und damit möglichst homogene Schichten zu erhalten /47; 142/. Der Nachteil der Verdampfungstechniken gegenüber dem Aufstäuben liegt in der relativ niedrigen Austrittsenergie der Teilchen von circa 0,5 eV /99/, was jedoch wiederum eine geringere Wärmebelastung des Substrates zur Folge hat, wodurch sehr hohe Beschichtungsraten (bis 1500 nm/s) erreicht werden können.

Eine Ausnahme stellt hier das Lichtbogenverdampfen dar, welches sowohl hohe Beschichtungsraten als auch relativ hohe Teilchenenergien (> 50 eV) aufweist, andererseits vom Aufbau her verhältnismäßig kompliziert ist.

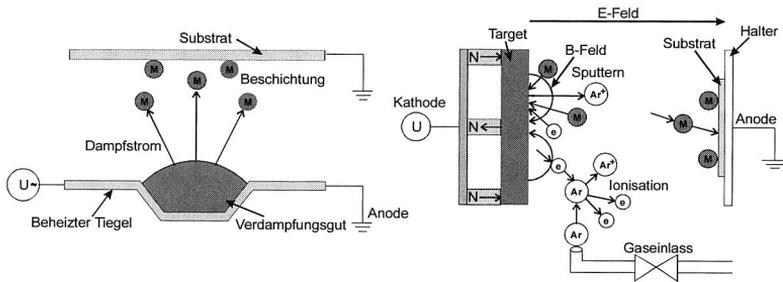


Abbildung 2. 6: Prinzip und Elemente des thermischen Verdampfens (links) und Kathodenzerstäubens (Sputtern) (rechts) (M: Metall; Ar: Argon; e: Elektron)

Bei der Variante des Kathodenzerstäubens, auch als Sputtern bezeichnet, wird der Beschichtungswerkstoff (Target) fest mit der Kathode verbunden. Während des Beschichtungsprozesses treten anschließend im wesentlichen drei physikalische Prozesse auf. In einer Inertgas-Atmosphäre (z.B. Argon) wird idealerweise bei einem Druck von circa  $10^{-2}$  mbar eine Gasentladung gezündet, wodurch die Ionisation der Gasatome eingeleitet wird und ein Plasma entsteht. Der erreichbare Ionisationsgrad hängt vom vorherrschenden Druck und von der Kathodenleistung ab /34/. Die positiv geladenen Gasionen (in Abbildung 2. 6 rechts mit  $Ar^+$  dargestellt) werden in diesem elektrischen Feld (E-Feld) zur Kathode hin beschleunigt und schlagen so mit hoher kinetischer Energie (bis 5000 eV) Metallatome ( $M$ ) aus dem Target /58/, die anschließend auf dem Substrat kondensieren.

Durch Zusatzeinrichtungen (Hochfrequenz-Generatoren, Bias-Generatoren) kann der Ionisationsgrad des Inertgases und damit die Zerstäubungsleistung weiterhin gesteigert werden.

Zur Ausnutzung der hohen Abscheideraten des thermischen Verdampfens und der hohen Haftfestigkeiten der Kathodenzerstäubung werden diese Verfahren, sofern es die PVD-Anlage zuläßt, teilweise miteinander kombiniert /17/. Dies ist jedoch durch eine relativ junge Verfahrensvariante des Kathodenzerstäubens, dem Magnetron-Sputtern, nicht mehr notwendig. Dies spiegelt sich auch in der Entwicklung neuer Anlagentypen wieder, die in weniger als 36 Sekunden Reflektoren oder andere dreidimensionale Körper beschichten /92/. Hierbei wird dem elektrischen Feld ein statisches Magnetfeld (B-Feld) überlagert (in Bild 2.6 rechts bereits eingezeichnet). Da in einem Magnetfeld auf einen bewegten Ladungsträger (Gasionen) eine Kraft ausgeübt wird, kann durch geeignete Anordnung der Magnete bei niedrigeren Substrattemperaturen eine, im Gegensatz zum konventionellen Sputtern, bis zu 30-fache höhere Zerstäubungsrate erreicht werden. Die Feldlinien des Magnetfeldes müssen dabei senkrecht auf die Targetoberfläche treffen. Dadurch erreicht man einen ringförmigen Beschuß, der durch die Ionisierung des Inertgases freigewordenen Elektronen, auf dem Target. Diese ionisieren wiederum in verstärktem Maße andere Gasmoleküle /144/.

Physikalische Metallschichten bieten vor allem bei der Herstellung extrem dünner Leiterbahnzügen auf flexiblen Substraten aufgrund ihrer hohen Reinheit und sehr feinkörnigen Struktur Vorteile und werden daher vermehrt bei Mehrlagenschaltungsträger eingesetzt /41/.

Um eine optimale Adhäsion der PVD-Schicht zu erhalten, ist es erforderlich die Polymeroberfläche zu reinigen und Reaktionsschichten zu beseitigen. Abgesehen von den Möglichkeiten zur Reinigung, die unabhängig vom Beschichtungsverfahren durchgeführt werden können, stehen prinzipiell drei Möglichkeiten innerhalb des Rezipienten zur Verfügung, das Erwärmen, die Glimmentladung und das Sputterätzen. Das bloße Erwärmen des Substrates genügt um adsorbierte Gase von der Substratoberfläche zu entfernen /99/. Die Grenzen dieses Verfahrens werden durch die Temperaturstabilität des verwendeten Thermoplasttyps vorgegeben. Die Glimmentladung hingegen dient sowohl zur Reinigung als auch zur Aktivierung der Kunststoffoberfläche. Hierfür wird der Rezipient auf  $10^{-3}$  mbar bis  $10^{-5}$  mbar evakuiert und anschließend mit einem Gas bis zu einem bestimmten Druck geflutet. Anschließend wird zwischen der Kathode und der an Masse anliegenden Anode, die gleichzeitig als Substrathalterung dient, eine Glimmentladung (2 kV bis 5 kV; 0,1 A bis 2 A) gezündet. Die Kathode wird hierdurch mit positiv geladenen Ionen beschossen, die wiederum Sekundärelektronen auslösen. Infolgedessen gelangen Elektronen, Ionen und von der Kathode abgestäubtes Material auf das Substrat /3; 108/.



Im klassischen thermischen CVD-Prozeß finden also die Reaktionen, die zu einer Metallabscheidung auf der Substratoberfläche führen, durch Wärmeeinwirkung statt. Die auftretenden Prozeßtemperaturen liegen dabei über 500 °C, zu hoch für einen thermoplastischen Kunststoff. Mit dem PECVD-Verfahren (Plasma Enhan-  
ced CVD) lassen sich die Prozeßtemperaturen auf bis zu 100 °C reduzieren /35/. Bei dieser Temperatur zersetzt sich beispielsweise Trimethylaluminol zu reinem Aluminium. Allerdings ist die so abgeschiedene Schicht im Verhältnis zu ihrer Dicke sehr rau, da bevorzugt einzelne Aluminiumkristallite wachsen. Im allgemeinen werden beim PECVD-Verfahren Temperaturen bis 200 °C /102/ erreicht. Somit ist man in der Lage auch Hochtemperatur-Thermoplaste zu metallisieren. Während des Prozesses erzeugt man durch Anlegen eines Gleich- oder Wechselstromfeldes ein Nichtgleichgewichtsplasma, welches durch Absorption des Prekursors mit neutralen und geladenen Teilchen entsteht. Die Initiierung des Prekursors erfolgt dadurch bei wesentlich niedrigeren Temperaturen. Die bisher erreichte Beschichtungsrate liegt bei 5 µm/h im Batch-Betrieb, wobei die Schichten extrem hart und spröde und somit für flexible Schaltungsträger ungeeignet sind. Momentan wird dieses Verfahren innerhalb von Forschungsprojekten für die Kunststoffe Polyimid (PI) und Polybutylenterephthalat (PBT) untersucht /188/.

### Spezielle Vorbehandlungsverfahren

Gleichsam wie durch die Nutzung diskret auftragbarer metallisierbarer Schichten zielen spezielle Vorbehandlungsverfahren darauf ab, den naßchemischen Vorbehandlungsschritt der klassischen Galvanisierung zu ersetzen. Verstärkte Forschungsaktivitäten sind vor allem bei der Plasmavorbehandlung und der Bestrahlung mit kurzwelligem ultravioletten Licht zu beobachten.

Die Plasmavorbehandlung entspricht im wesentlichen den Reinigungsmethoden innerhalb des Rezipienten, also dem Glimmen beziehungsweise dem Plasmaätzen, wie sie oben bereits beschrieben wurden. Im Unterschied hierzu erfolgt anschließend keine physikalische Metallisierung, sondern eine weitergehende Behandlung entsprechend der Standard-Galvanisierung mit den Schritten Aktivierung, chemische Metallisierung und elektrolytische Nachverstärkung. Man verspricht sich durch diese Kombination eine einfache Prozeßhandhabung, da die Metallisierung rein galvanisch durchgeführt werden kann /23; 160/.

Bei der Bestrahlung mit kurzwelligem ultravioletten Licht (UV) lassen sich Kunststoffoberflächen chemisch so modifizieren, daß eine selektive Metallabscheidung nur auf den bestrahlten Flächen erfolgt. Dieses Verfahren kann somit auch als UV-Licht unterstützte Galvanisierung bezeichnet werden. Als UV-Strahlungsquellen

werden die bereits oben erwähnten Excimer-Lampen mit Strahler der Wellenlängen 172 nm, aber auch 222 nm und 308 nm oder der auf kleine Flächen abgebildete Strahl eines Excimerlasers mit 248 nm Wellenlänge eingesetzt. Bei der UV-Modifizierung entstehen an der Oberfläche polare funktionelle Gruppen, an die sich Palladiumkomplexe der Aktivierungsbäder ankoppeln lassen und sich somit eine herkömmliche galvanische Metallisierung anschließen läßt /37/. Auf glatten spritzgegossenen Kunststoffen werden damit jedoch meist nicht die Anforderungen an Elektronikkomponenten erreicht, wodurch ein zusätzliches Aufrauhern der Oberfläche unverzichtbar wird. Hierzu wird eine materialabtragende Bestrahlung mit dem Excimerlaser in Verbindung mit einem speziellen Maskenverfahren durchgeführt und auf Kunststoffen Oberflächentopographien mit horizontalen und vertikalen Strukturgrößen im Bereich von 10 µm bis 30 µm erzeugt /159/, was erhebliche Defizite in der Oberflächenqualität mit sich bringt. Weitere Defizite ergeben sich durch die Notwendigkeit der Partikelmaske und die sequentielle Abarbeitung der zu metallisierenden Bereiche mit dem Laser /6; 117/. Berechtigung wird dieses Verfahren vor allem in der Fertigung von Prototypen finden.

### 2.2.2 *Laminierung von Metallfolien und deren Eigenschaften*

Mit Kupferfolien laminierte Isolierstoffe stellen bevorzugt das Ausgangsmaterial für gedruckte Schaltungen dar. Standardmäßig werden hier Haftvermittler (Klebstoffe) verwendet, die das Dielektrikum (Leiterplattenmaterial) mit der Kupferfolie verbinden. Während zur Herstellung flexibler Schaltungsträger vorwiegend Polyimid- und PET-Folien (siehe Kapitel 2.1) zum Einsatz kommen, werden für starre Aufbauten fast ausschließlich Schichtpreßstoffe verwendet, die sich wohl die breiteste Anwendungsvielfalt erschlossen haben /97/. Starre, mit Kupferfolie laminierte thermoplastische Leiterplatten werden bisher nicht eingesetzt, hierüber wurde erstmals, vor dem Hintergrund einer umweltfreundlichen Leiterplatte, in /60; 192/ berichtet.

Untersuchungen zur Herstellung eines Haftverbundes zwischen Thermoplast und Kupferfolie ohne Verwendung eines Klebstoffes sind bisher lediglich in Zusammenhang mit der Heißprägetechnik bekannt. Als die Heißprägefolie und das zugehörige Verfahren der Öffentlichkeit vorgestellt wurde /31/, wurde der Haftverbund zum Thermoplasten mit einem druck- und hitzeaktivierbaren Kleber hergestellt. Das Verfahren konnte jedoch aufgrund des Klebersystems nicht uneingeschränkt auf alle thermoplastischen Kunststoffe eingesetzt werden.

Somit wurde versucht über aufwendige Vorbehandlungsverfahren, wie zum Beispiel der Plasmabehandlung Haftfestigkeiten auf schwer metallisierbaren Kunststoffen<sup>1</sup> zu erhöhen /179/. Der entscheidende Durchbruch kam jedoch erst mit Untersuchungen, den Haftverbund durch direkte mechanische Verankerung der Kupferfolie mit den zuvor erwärmten Thermoplasten herzustellen. Eine speziell vorbehandelte und extrem raue Oberfläche der Heißsprägefolie ist hierzu notwendig<sup>2</sup>.

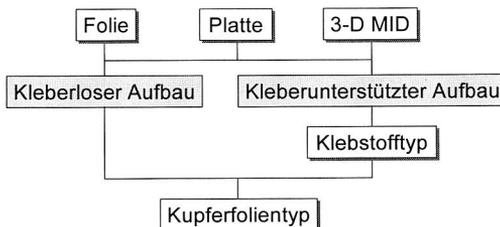


Abbildung 2. 8: Einteilung von Laminierverfahren

Laminierte thermoplastische Verbundsysteme lassen sich somit nach unterschiedlichen Kriterien einteilen (Abbildung 2. 8). Zum einen nach der geometrischen Gestalt des thermoplastischen Trägermaterials und nach kleberlosen und kleberunterstützten Aufbauten. Feineinteilungen ergeben sich anschließend entsprechend der möglichen Klebersysteme, die man wiederum nach der chemischen Basis oder dem Abbinde Mechanismus unterscheidet /150/ und Kupferfolientypen, die in der IPC-FM-150 /111/ untergliedert sind. Alle Komponenten zusammen verleihen dem Gesamtaufbau eine bestimmte Charakteristik.

### Eigenschaften bisher eingesetzter Klebstoffsysteme

Innerhalb der Folientechnologie werden unterschiedliche Klebstoffsysteme mit unterschiedlichen Eigenschaften eingesetzt. Deren Einfluß auf das Verhalten des Gesamtsystems ist oft entscheidend. Einen Überblick hierzu wird in /41/ gegeben. Die bekanntesten Vertreter sind Polyester-, Acrylat-, Epoxidharz-, Polyimid-, Butyrol-Phenolharz-, Cyanat-Ester- und druckaktivierbare Klebstoffe.

<sup>1</sup> Als schwer metallisierbare Kunststoffe gelten z.B. LCP, PBT, PEEK u.a..

<sup>2</sup> Diese Thematik wird in Kapitel 6.2 noch einmal aufgegriffen.

Polyesterbasierende Systeme werden üblicherweise zusammen mit Polyesterfolien<sup>1</sup> verwendet. Sie zählen zu den preisgünstigsten Repräsentanten und zeichnen sich durch einfache Verarbeitbarkeit aufgrund ihrer niedrigen Schmelztemperaturen von circa 120 °C aus. Hierdurch bedingt sind sie für herkömmliche Reflowlötvorgänge nicht zugänglich und in ihren Einsatzgebieten limitiert. Als weitere Nachteile können deren relativ geringen Schälhaftigkeiten und hohen Fließeigenschaften genannt werden.

Acrylat-Klebstoffe werden vornehmlich auf Polyimidfolien aufgebracht. Durch ihre gute Haftung und Temperaturstabilität (kurzzeitig 260 °C) bei einfacher Handhabung haben sie sich weite Anwendungsfelder erschlossen. Einschränkungen ergeben sich lediglich durch den relativ hohen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von bis zu  $300 \cdot 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$  und ihrer Unbeständigkeit in alkalischen Systemen /41/. Laut vorstehender Literatur sind sie hierdurch für Mehrlagen- und Starr-Flex-Aufbauten nicht geeignet. Weitere Forschungsaktivitäten gehen vornehmlich in die Richtung lösungsmittelfreier beziehungsweise wässriger Klebstoffsysteme. In /97/ wird zum Beispiel ein Acrylnitril-Acrylat-Klebstoffsystem beschrieben, welches sich durch hohe Haftfestigkeiten und gute dielektrische Eigenschaften auszeichnet.

Epoxid-Klebstoffe, Modifikationen und Blends eingeschlossen, zählen wohl zu den wichtigsten industriellen Klebstoffen für den Metall-Kunststoffverbund /134/. Sie sind für alle bisher großtechnisch eingesetzten thermoplastischen Folienmaterialien geeignet. Deren eingeschränkte Lagerfähigkeit und schwierige Verarbeitbarkeit werden durch breite Anwendungsmöglichkeiten aufgrund hoher Temperaturstabilität (bis 280 °C), großer Haftwerte und guten elektrischen Eigenschaften kompensiert. Einschränkungen ergeben sich ausschließlich durch deren bedingte chemische Beständigkeit und Flexibilität /87/.

Polyimid-Klebstoffe sind aufgrund ihrer hohen Verarbeitungstemperaturen nur zusammen mit Polyimidfolien anwendbar. Hierdurch erhält man jedoch Systeme die kurzzeitig gegenüber Temperaturen bis zu 400 °C beständig sind. Zu deren positiven Eigenschaften zählt weiterhin die geringe Wasseraufnahme von 1% bis 2%, deren geringe Dielektrizitätskonstante ( $\epsilon_{Max}$  circa 3,3 bei 1 MHz) und der gute Abbau von Spannungen /197/, wodurch sie für Mehrlagenaufbauten prädestiniert sind /41; 148/. Modifikationen von polyimidbasierenden Klebern können durch niedrigere Verarbeitungstemperaturen auch in Kombination mit anderen Basismaterialien verwendet werden. Deren Eigenschaften sind jedoch bezüglich Die-

---

<sup>1</sup> Zu Polyester zählen z.B. PC, PET, PEN und PBT.

lektrizitätskonstante, Haftungseigenschaften und Wasseraufnahme schlechter, beziehungsweise vergleichbar mit kostengünstigeren Epoxid- oder Butyrol-Phenol-Klebstoffen.

Letztgenannte sind nach der Aushärtung relativ steif, neigen jedoch zu geringer Feuchtigkeitsaufnahme (circa 2%) und zeichnen sich durch eine geringe Dielektrizitätskonstante aus ( $\epsilon_{Max}$  circa 3,0 bei 1 MHz) /41/. Diese Systeme enthalten bis zu 70% Lösungsmittel, das einen wesentlichen Nachteil in Hinblick auf deren Umweltverträglichkeit darstellt /97/.

Cyanat-Ester-Systeme sind eine relativ junge Produktgruppe, die sich ebenfalls durch eine sehr geringe Dielektrizitätszahl ( $\epsilon_{Max}$  circa 3,1 bei 1 MHz) auszeichnen und somit vor allem im Hochfrequenzbereich Anwendungen finden ( $\epsilon_{Max}$  circa 3,25 bei 10 MHz). Hohe Laminiertemperaturen und -zeiten begrenzen deren Verbreitung jedoch /41/.

Klebstofftyp	Einsatzigenschaften			Prozeß- und allgemeine Eigenschaften		
	Feuchtigkeitsaufnahme	$\epsilon_{Max}$ bei 1 MHz	Temp.best. kurzzeitig	Prozeßführung	Prozeßtemperatur	Sonstiges
Polyester	2,0%	4,0	120 °C	Einfach	Niedrig	Kostengünstig; Hohe Fließneigung
Acrylat	6,0%	4,0	260 °C	Einfach	Vertretbar	Geringe alkalische Beständigkeit; Hohe therm. Ausdehnung
Epoxidharz	4,0%	4,0	280 °C	Schwierig	Vertretbar	Nur kurz lagerfähig; Bedingt chemisch beständig
Polyimid	2,0%	3,3	400 °C	Schwierig	Sehr Hoch	Teuer; Guter Abbau innerer Spannungen
Butyrol-Phenol	2,0%	3,0	260 °C	Einfach	Vertretbar	Steif; Etwas geringere Haftungseigenschaft
Cyanat-Ester	Nicht verfügbar	3,1	260 °C	Schwierig	Hoch	Lange Laminierzeit (bis zu 4 Stunden)

Tabelle 2. 3: Eigenschaften von Klebstoffsystemen für thermoplastische Basismaterialien

In Tabelle 2. 3 sind noch einmal die wesentlichen Eigenschaften der erwähnten Klebstoffsysteme zusammengefaßt. Unter druckaktivierbaren Klebstoffen, die auch unter der Abkürzung PSA (Pressure Sensitive Adhesives) bekannt sind /132/, werden Systeme des Butadiens oder Acrylnitrils verstanden, die durch kurzzeitigen starken Druck verpreßt werden. Untergruppen hiervon sind Systeme, die in Kombination mit Druck und Temperatur die Vernetzungsreaktion initiieren /31/. Derartige Klebstoffe erhält man zum Beispiel durch Mischung des Butadiens mit Styrol (Styrol-Butadien-Blockpolymere). Eine allgemeine Charakterisierung solcher Systeme kann aufgrund fehlender Angaben in der Literatur nicht gegeben werden.

### Kupferfolien

Zur Laminierung thermoplastischer Basismaterialien werden fast ausschließlich Kupferfolien (Cu-Folien) verwendet, wenn auch andere Metalle durchaus vorstellbar sind. Nachdem jedoch Kupfer alle Eigenschaften für einen Einsatz als elektrisch leitendes Material erfüllt und zudem der ideale Werkstoff in Hinblick elektro-mechanischer Eigenschaften und Kosten ist, wird innerhalb dieser Ausführung nur auf Kupferfolien eingegangen.

In der IPC-FM-150 „Metal Foil for Printed Wiring Applications“, welche aus Vorgaben des militärischen Einsatzbereiches entstand, werden gewalzte und elektrolytisch abgeschiedene Folien in acht Klassen eingeteilt /111/. Weitere Klassifizierungsmerkmale innerhalb dieser Norm sind die Foliendicke, die Oberflächenbehandlung, das Oberflächenprofil und die Qualität. Weiterhin sind auf dem Markt auch Folientypen erhältlich, die nicht in diese Klassifizierung passen.

<i>Kupferfolientyp</i>	<i>Klasse</i>	<i>IPC Kurzbeschreibung</i>	<i>Eigenschaft/ Vorzugsweiser Einsatz</i>
<i>Elektrolytkupfer-Folie (E)</i>	1	<i>Standard</i>	<i>Starre Aufbauten</i>
	2	<i>Hochduktil</i>	<i>Flexibel während des Einbaus; Geschmeidig bei Raumtemperatur</i>
	3	<i>Hochtemperatur Ausdehnung</i>	<i>Hohe Bruchdehnung bei hohen Temperaturen; Wenige Bewegungszyklen</i>
	4	<i>Getempert</i>	<i>Wenige Bewegungszyklen; Geringe mechanische Beanspruchung</i>
<i>Walzkupfer-Folie (W)</i>	5	<i>„Wie gewalzt“</i>	<i>Hohe Anisotropie</i>
	6	<i>Kalt gewalzt</i>	<i>Hohe mechanische Beanspruchung</i>
	7	<i>Getempert</i>	<i>Schwere Handhabung; Hochflexibel auch bei tiefen Temperaturen</i>
	8	<i>Niedertemperatur getempert</i>	<i>Gute mechanische Beanspruchung; Geringe Anisotropie</i>

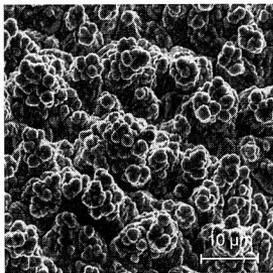
Tabelle 2. 4: *Eigenschaften der nach IPC-FM-150 klassifizierten Kupferfolien*

In Tabelle 2. 4 sind die 8 Klassifizierungen aufgelistet, die sich durch bestimmte Charakteristiken unterscheiden. Das Kriterium der Einteilung ist nicht eindeutig und es wird daher auf /111/ verwiesen. Die Angabe einer Eigenschaft ist als grobe Charakterisierungshilfe zu verstehen. Eine eindeutige Darstellung ist nur bei Berücksichtigung der oben erwähnten weiteren Klassifizierungsmerkmale möglich.

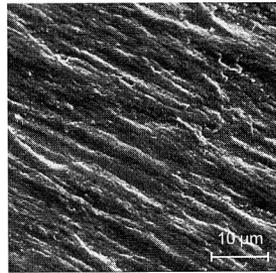
Grundsätzlich kann man sagen, daß für die Laminierung vorwiegend elektrolytisch abgeschiedene Folien (ED<sup>1</sup>-Folien) benutzt werden, da sie zum einen kostengünstiger als gewalzte Folien sind und zum anderen den meisten Ansprüchen genügen. ED-Kupferfolien weisen stets eine säulenartige Kornstruktur auf. Diese Säulen

<sup>1</sup> ED: Electro-Deposited.

len können bei einer extremen Biegebeanspruchung aufgerissen werden, das eine geringere Flexibilität und geringere Bruchstabilität zur Folge hat, jedoch Vorteile beim Ätzen feiner Strukturen bietet. Abbildung 2. 9 zeigt die beiden Seiten einer ED-Folie der Klasse 1. Wie bei allen Cu-Folien, also auch bei gewalzten, ist mindestens eine Seite behandelt, was bei der Laminierung mit dem Trägermaterial unterstützend für die Haftung wirkt. Es gibt eine Reihe unterschiedlicher Behandlungen die in /197/ ausführlich erläutert sind.



Rückseite



Vorderseite

Abbildung 2. 9: REM-Aufnahme der Vor- und Rückseite einer ED-Kupferfolie der Klasse 1 nach IPC-MF-150 /127/

Die behandelte Seite (Bild 2. 9 links) ist deutlich an der rauhen, globulären Kupferstruktur zu erkennen. Standardfolie der Klasse 1 wird aufgrund der säulenartigen Kornstruktur ausschließlich für statische Aufbauten empfohlen, Klasse 2 kann verwendet werden, wenn geringe Flexibilität während des Einbaus gefordert ist und die Dauerbetriebstemperatur des Aufbaus unter 180 °C liegt /111/. Durch unterschiedliche Wärmebehandlungen werden Rekristallisationsprozesse und damit eine Veränderung der Kornstruktur der ED-Folie erwirkt. Hierdurch können Folien der Klasse 3 und 4 auch für Applikationen mit geringer mechanischer Beanspruchung eingesetzt werden. Klasse 3 zeichnet sich gegenüber Klasse 4 durch ein höheres Elastizitäts-Modul bei Temperaturen über 180 °C aus. Die Dicke der verwendeten Cu-Folie kann, je nach der später fließenden Stromstärke, zwischen 18 µm und 400 µm variieren /97/.

Als ED-Kupferfolie, die speziell zum kleberlosen Prägen thermoplastischer Materialien optimiert wurde, kennt man die bereits erwähnte Heißprägefolie /179/. Sie zeichnet sich durch extreme Sprödigkeit und Rauigkeit aus, damit zum einen ein Abscheren der Leiterbahnen während des Prägevorgangs und zum anderen eine

hohe Haftfestigkeit der zurück gebliebenen Leiterbahnen auf den Thermoplasten gegeben ist<sup>1</sup>. Sie läßt sich nicht in die IPC-MF-150 Klassen einordnen.

Aufgrund der eingeebneten und gestreckten Kornstruktur weisen gewalzte Folien eine höhere Widerstandsfähigkeit gegenüber wiederholter mechanischer Beanspruchung als elektrolytisch hergestellte Folien auf und werden daher üblicherweise für flexible Anwendungen eingesetzt /21/. Folien der Klasse 5 und 6 weisen eine starke Anisotropie aufgrund des Walzprozesses auf. Durch entsprechende Temperungsprozesse kann dies wiederum vermindert werden, das durch die Klassen 7 und 8 ausgedrückt wird. Gruppe 7 ist auch bei tieferen Temperaturen noch hochflexibel. Gruppe 5 und 8 können benutzt werden, wenn eine geringere Flexibilität den Anforderungen genügt /21/. Im Gegensatz zum elektrolytischen Verfahren wird die Schichtstärke reduziert und nicht erhöht, was dazu führt, daß dünne Folien im Verhältnis zu dicken teurer sind /41/. Jedoch sind gewalzte Folien bereits ab einer Stärke von 6 µm erhältlich.

### Laminierprozesse

Zur Fertigung laminiertes thermoplastischer Materialien kann man grundsätzlich zwischen diskontinuierlichen und kontinuierlichen Verfahren unterscheiden.

Bei diskontinuierlichen Verfahren wird der Laminiervorgang kleberunterstützter Systeme in einer beheizten Presse durchgeführt. Druck, Temperatur und Dauer hängen von den verwendeten Einzelkomponenten ab. Um ein Verkleben der Kupferfolien mit dem Preßstempel zu verhindern, sollte ein Trennmittel eingesetzt werden. Der Kleber muß für einen kurzen Zeitpunkt dünnflüssig werden, um eine gute Benetzung der zu verklebenden Flächen zu gewährleisten /97/. Der Unterschied zu kontinuierlichen Verfahren besteht darin, daß die Lamination mit Hilfe von beheizten Rollen durchgeführt wird, wodurch der Parameter „Zeit“ durch „Geschwindigkeit“ ersetzt wird. Es wird zum Verwalzen empfohlen, bombierte Rollen einzusetzen, deren Biegung, bei Aufbringung der Walzkraft, im Idealfall in eine Gerade übergeht. Hierdurch kann zum einen das Auffedern der Maschine und zum anderen die Durchbiegung der Rollen kompensiert werden, wodurch über die gesamte Walzlinie die gleiche Kraft aufgebracht wird (Abbildung 2. 10). Diese Technik ist durch das Laminieren von Resisten und Biegen und Abkanten von Blechprofilen /22/ hinreichend bekannt.

---

<sup>1</sup> Deren Einsatzmöglichkeit für kleberlose, vollflächig kaschierte Thermoplasten ist Gegenstand von Kapitel 6.2.

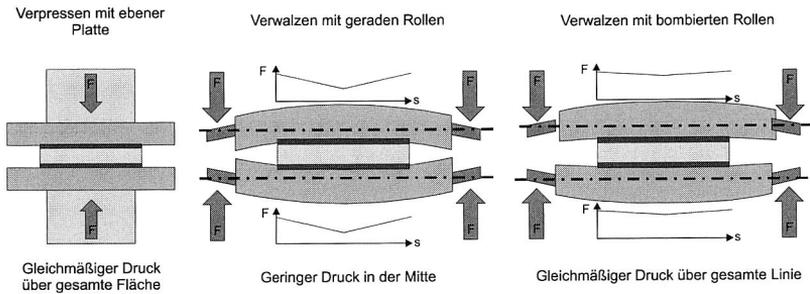


Abbildung 2. 10: Diskontinuierliches und kontinuierliches Laminieren (Mit und ohne Verwendung bombierter Rollen)

Ein weiterer Vorteil des kontinuierlichen Laminierens unter Verwendung bombierter Rollen ist die Austreibung von Luft einschüssen, die bei diskontinuierlichen Verfahren gelegentlich zu Problemen führen können. Abhilfe kann die Durchführung der Verpressung unter Luftausschluß oder ebenfalls durch die Verwendung bombierter Platten bringen, wobei es sich hierbei um eine dreidimensionale Bombierung handeln muß, welche nur sehr schwierig in die Preßplatten eingearbeitet werden kann.

Die Verpressung unter Luftausschluß in sogenannten Autoklaven ist daher die übliche Vorgehensweise. Luft einschüsse führen bei der nachfolgenden Ätzstrukturierung zwangsläufig zu Ausschuß. Bei einer strukturierten Laminierung stellen diese aufgrund der im Verhältnis zur Gesamtoberfläche der zukünftigen Leiterplatte geringen kaschierten Fläche ein eher untergeordnetes Problem dar.

### 2.3 Strukturierungs- und Herstellungsverfahren

Da eine Trennung zwischen Herstellung und Strukturierung, vor allem innerhalb der MID-Technologie, oft nicht eindeutig möglich ist, werden diese Verfahren in diesem Kapitel zusammengefaßt.

#### 2.3.1 Strukturierungsverfahren

Der Strukturierungsablauf zur Herstellung komplexer Standardleiterplatten und flexibler Folien ist allgemein standardisiert und bekannt. Es haben sich hierbei drei Prozesse herausgestellt, die unter den Begriffen Additiv-, Semiadditiv- und Subtraktivverfahren bekannt sind.

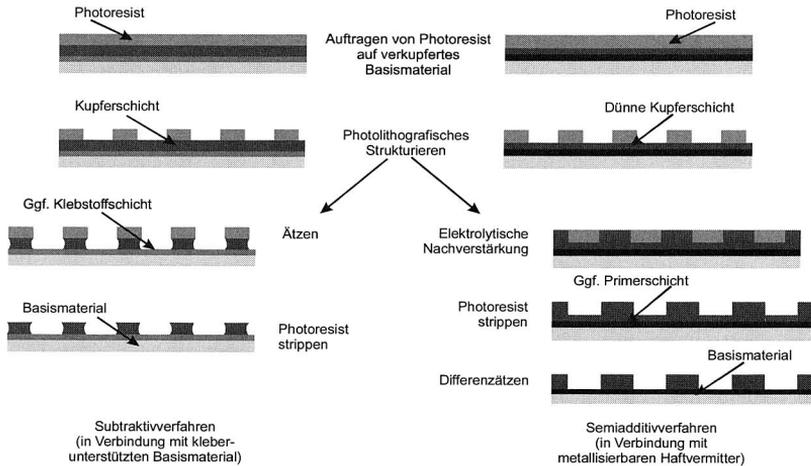


Abbildung 2. 11: Prinzipieller Ablauf des Subtraktivverfahren und Semiadditivverfahren

Unzählige Veröffentlichungen beschreiben ausgiebig die Prinzipien /49; 65; 73; 173/. Auf eine detaillierte Darstellung dieser Verfahren wird daher verzichtet und auf die angegebene Literatur verwiesen. Das Subtraktivverfahren, welches dem Prinzip der vollflächigen Metallisierung bis zur gewünschten Endschichtdicke mit anschließender Anwendung der Masken- und Ätztechnik folgt, hat mit circa 95% die größte Verbreitung gefunden (in Abbildung 2. 11 links ist der Ablauf bei Verwendung kleberunterstützter, kaschierter Basismaterialien dargestellt). Rund 4% aller angewendeten Verfahren entfallen auf die Semiadditivtechnik, bei welchem nach der Aufbringung einer dünnen Metallschicht das gewünschte Layout per Maskentechnik und elektrolytischer Verstärkung bis zur Endschichtdicke die dünne Metallschicht, wiederum per Ätztechnik, entfernt wird.

Das Semiadditivverfahren hat sich vor allem aus dem Bestreben einerseits Kupfer und damit Ätzzeit und andererseits Ätzmittelverbrauch zu reduzieren, ergeben. Das Ätzen, das sich vornehmlich in Sprühkammern von Ätzanlagen vollzieht, erfolgt gemeinhin mit Schwefelsäure ( $H_2SO_4$ ) und Wasserstoffperoxid ( $H_2O_2$ ) /73/. Bei diesem Verfahren kann der Angriff des Ätzmediums auch auf die Flanken der zu ätzenden Struktur nicht verhindert werden, wobei man hierbei davon ausgehen kann, daß pro 3  $\mu m$  circa 1  $\mu m$  seitlich abgeätzt wird /22/. In Abbildung 2. 11 rechts ist der schematische Ablauf in Verbindung mit der Beschichtung mit Hilfe metallisierbarer Haftvermittler (vgl. Kapitel 2.2.1) skizziert.

Das erklärt die zunehmende Aufmerksamkeit der Leiterplattenindustrie für das Semiadditiv- beziehungsweise Additivverfahren. Dem letztgenannten Verfahren ist zu eigen, daß die Metallschicht nur an den gewünschten Stellen abgeschieden wird. Hierzu kann zum Beispiel eine Maske direkt auf das Basismaterial aufgebracht werden, um anschließend mit Hilfe chemischer Metallisierungsverfahren nur an den zugänglichen Stellen Kupfer abzuschneiden. Begrenzt wird dieses Verfahren lediglich durch die geringen Abscheidungsraten chemischer Bäder /73/. Auch wenn momentan lediglich circa 1% der Standardleiterplatten mit Additivverfahren hergestellt werden, kann deren Vorteil bzgl. Ressourcenschonung (vor allem Metall und Wasser), reduzierter Prozeßschritte und hoher Kantensteilheit für spezielle Applikationen nicht außer Acht gelassen werden.

Die Strukturübertragung erfolgt im allgemeinen mit Hilfe von Ätzresisten, die über geätzte oder laserstrukturierte Metallmasken im Sieb- oder Schablonendruckverfahren aufgebracht werden. Als Ätzresiste fungieren zum Beispiel Zinn-Blei-Legierungen die im Anschluß an das Ätzen des Kupfers ebenfalls wieder abgeätzt werden. Hierdurch bedingt erhält man einen hohen Bleianteil im Abwasser was extrem teuer zu entsorgen ist. Zinn-Blei Masken lassen sich durchaus durch Zinn-Legierungen ersetzen, die durch geringere Entsorgungskosten auch ökonomisch sinnvoll sind. Eine weitere ökologisch unbedenklichere Möglichkeit besteht in der Verwendung von organischen Abdecklacken, die ebenfalls mittels Sieb- oder Schablonen-, aber auch mittels Tampondrucktechnik und Photolithographie strukturiert auf den Träger aufgetragen werden /65; 73/. Wobei sich die ersten zwei Techniken vornehmlich für ebene Substrate eignen, kann das Tampondruckverfahren für einfache dreidimensionale Geometrien noch Anwendung finden. Die Leistungsfähigkeit photolithografischer Verfahren ist durch die Planartechnologie der Elektronikindustrie bekannt /22; 106; 184/. Die verwendeten Resiste werden je nachdem ob der belichtete Bereich entfernt wird oder bestehen bleibt in Positiv- und Negativresiste eingeteilt. Weiterhin lassen sich diese Resiste hinsichtlich ihrem Auftrags- und Belichtungsverfahren unterscheiden. Man kennt Fest- und Flüssigresiste. Festresiste eignen sich ausschließlich für ebene Substrate. Flüssigresiste können durch Aufgießen, Eintauchen oder Elektrophorese auf die Leiterplatte aufgetragen werden. Elektrophoretisch arbeitende Resiste sind aufgrund ihrer gleichmäßigen Schichtdickenverteilung bei geometrisch komplizierten Bauformen zu bevorzugen /106/. Die Resistschichtdicke schwanken ja nach Verfahren zwischen 25 µm und 60 µm, wobei aufgrund der zu beachtenden Aspektverhältnisse /22/ für Feinstleiter der Trend zu noch dünner auftragbaren Resisten geht.

Die Belichtungsarten sind in /184/ in die drei Gruppen Kontakt-, Projektions- und Abstandsbelichtung eingeteilt. Während hier alle Verfahren noch von der Verwendung einer Maske in Kombination mit einer Quecksilber-Xenium- oder Deuterium-Belichtungsampe ausgehen, kann man durch den Einsatz eines Excimerlasers auch eine Direktbelichtung durchführen, die in der Literatur auch mit LDI (Laser Direct Imaging) abgekürzt wird. Je nach verwendetem Gas (XeCl, KrF, KrCl) kann ein bestimmter Lichtwellenbereich durch den Laser emittiert werden. Durch Belichtungsgeschwindigkeiten von  $5 \text{ mJ/cm}^2$  bis  $10 \text{ mJ/cm}^2$  werden sie zunehmend auch hinsichtlich der Produktivität interessant /27; 126/. Die Auswahl des geeigneten Resisttypen ist somit sehr kompliziert und nicht alle Eigenschaftskombinationen sind möglich. So ist zum Beispiel momentan kein elektrophoretischer Resist, der für den von UV-Laser emittierten Lichtwellenbereich zugänglich ist, auf dem Markt erhältlich, das eine immense Einschränkung für das LDI auf komplizierten geometrischen Oberflächen darstellt. Beholfen hat man sich innerhalb der 3-D MID Technologie durch Flüssigresiste, die mit Hilfe einer speziellen Vakuum-Maskentechnik belichtet werden /91/, die einen höheren Aufwand durch Handhabung und Maskenherstellung bedeuten. Die richtige Auswahl hängt im wesentlichen von der Applikation ab.

Neben der Ätztechnik kann die Metallschicht ebenfalls durch den Einsatz eines mechanischen Fräasers oder wiederum eines geeigneten Lasersystems direkt abgetragen werden /201/, die somit zu den semiadditiven oder subtraktiven Verfahren zählen. Durch Verwendung eines Excimerlasers in Verbindung mit einem UV-empfindlichen Edelmetallkatalysator kann der Schichtaufbau auch additiv erfolgen /51/. Einschränkungen bestehen hinsichtlich der erreichbaren Prozeßzeiten und Strukturdimensionen.

Eine äquivalente Einteilung ergibt sich, wenn man den Strukturierungsschritt zeitlich von der Metallisierung differenziert. So kann die Strukturierung vor, während und nach der eigentlichen Metallisierung durchgeführt werden. Verfahren die vor und während der Metallisierung das Leiterbahnbild bestimmen, können zu der Gruppe der integrierten Verfahren zusammengefaßt werden. Dies kann dadurch begründet werden, daß diese Verfahren direkt von dem anschließend angewendeten Metallisierungsverfahren abhängen. Strukturierungsverfahren die im Anschluß an die Metallisierung durchgeführt werden, können somit als differenzierte Verfahren bezeichnet werden.

### 2.3.2 *Herstellungsverfahren spritzgegossener Schaltungsträger*

Herstellungsverfahren spritzgegossener Schaltungsträger (MID) sind in der Literatur ausführlich beschrieben worden und werden daher nur kurz dargestellt /45; 91/. Die Mehrheit der MID-Herstellungsverfahren kann man ebenfalls einem der in Kapitel 2.3.1 beschriebenen drei Strukturierungsverfahren zuteilen, auch wenn die Metallisierung hiervon nicht getrennt betrachtet werden kann, da es sich um einen integrierten Prozessschritt handelt, beziehungsweise diese nahtlos ineinander übergehen. Um die Anzahl der Prozessschritte zu minimieren, sollte dies auch Ziel eines innovativen Verfahrens zur Herstellung thermoplastischer Leiterplatten sein.

Die dominierenden MID-Herstellungsverfahren sind das Zweikomponentenspritzgießen und Heißprägen, gefolgt vom Maskenbelichtungsverfahren und dem Laserstrukturieren, welches bereits in Kapitel 2.3.1 erwähnt wurde. Weiterhin kennt man das Umspritzen von Stanzgitterteilen, was eine ausgereifte und seit vielen Jahren etablierte Technologie zur Herstellung dreidimensionaler Baugruppen ist. Vor allem die Integration von Stecker und Stiften zur Ankontaktierung peripherer Geräte im Automobilbereich habe die Notwendigkeit dieser Technologie begründet.

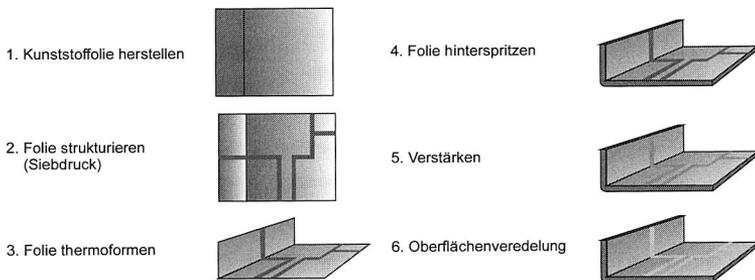


Abbildung 2. 12: Verfahrensablauf der Hinterspritztechnologie /137/

Von den bekannten Verfahren soll jedoch das „Folienhinterspritzen“ herausgestellt werden, da diese Art der MID-Herstellung noch öfters erwähnt wird. Hierbei wird eine strukturierte thermoplastische oder metallische Folie metallisiert und strukturiert, um sie anschließend in ein Spritzgußwerkzeug einzulegen und mit Kunststoff zu hinterspritzen. Man unterscheidet die Verfahren danach, ob auf der strukturierten oder nicht strukturierten Seite der Folie der Kunststoff aufgespritzt wird. Wird auf der strukturierten Seite hinterspritzt, muß die Metall- oder Kunststoffolie wieder entfernt werden. Bei Verwendung von Metallfolien kann dies durch eine zusätzli-

chen Ätzschritt, bei Kunststofffolien durch definiertes Auflösen in Laugen oder Säuren oder durch eine definiert auflösbare Zwischenschicht geschehen /146/. Vor dem Hinterspritzvorgang muß die Folie durch Warmumformen an die Kontur des Werkzeugs angepaßt werden.

Der Haftverbund kann mit Hilfe eines Haftvermittlers oder durch Aufschmelzen und Verschweißen der Folie mit dem Spritzguß-Kunststoff erfolgen. Die Verwendung einer Metallfolie (z.B. Aluminiumfolie auf der die Kupferstruktur aufgebaut wurde) wird vornehmlich in Verbindung mit PPS als Spritzgußwerkstoff durchgeführt /107/. In Patentschrift EP 0784417 A2 wird der Vorgang des Hinterspritzens sogar erst nach der Bestückung vorgenommen, wodurch Bauelemente in den Spritzgußkörper integriert werden /186/.

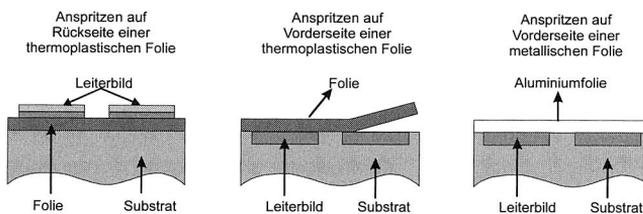


Abbildung 2.13: Alternative Verfahren der Hinterspritztechnologie /137/

Bisher hat die Hinterspritztechnologie hauptsächlich in Verbindung mit der Metallfolie zu Applikationen geführt. In Kombination mit thermoplastischen Folien aus Polyetherimid sind Studien bekannt, aus deren sich ein einziges Serienteil herauskristallisiert hat. Die Gründe, warum diese Technologie keine weitere Verbreitung gefunden hat, liegen im wesentlichen an dem fehlenden universellen Metallisierungsverfahren für thermoplastische Folienmaterialien (siehe Kapitel 1).

Weiterhin sieht man, daß lediglich mit Ausnahme der Verfahren Heißprägen und Umspritzen von Stanzgittern, sich alle MID-Herstellungsverfahren auf die galvanische Metallisierung, mit der in Kapitel 2.2.1 dargelegten Problematik, stützen.

## 2.4 Auswahl der Verfahren und Zusammenfassung

Die Materialauswahl kann nicht pauschalisiert werden. Jedoch bei geeigneter Auswahl des Kunststoffes kann ein erhebliches Einsparungspotential realisiert werden. Materialien wie LCP, PEI und PES sollten aufgrund ihrer hohen Temperaturbeständigkeit näher betrachtet werden. Aber auch ABS, PC, PBT und PA sind

aufgrund ihres günstigen Preises sehr interessant und bieten zudem bessere Eigenschaften als das bisher verwendete PET. Zu entwickelnde Verfahren dürfen jedoch nicht auf einen speziellen Kunststofftyp abzielen, sondern müssen so universell als möglich anwendbar sein. Eine Betrachtung unterschiedlicher Kunststoffe ist daher notwendig.

Bei den Strukturierungsverfahren sind die Additiv- und Semiadditivtechnologie aufgrund ihres schonenden Umgangs mit Abwasser und Ressourcen und ihrem Potential für weitergehende Miniaturisierung erstrebenswert.

Bei einem direkten Vergleich der beschriebenen Methoden zur Metallisierung hat sich ergeben, daß diese sich nach dem Grad der Substitution der spezifischen Teilschritte Vorbehandlung, Aktivierung, chemische Metallisierung und elektrolytische Nachverstärkung der klassischen Kunststoffgalvanisierung einteilen lassen. In Tabelle 2. 5 wurden die einzelnen Verfahren ihrem Ablauf entsprechend der ABS-Metallisierung gegenüber gestellt. Die chemische Metallisierung bis maximal fünf Mikrometer erfolgt hier mit Nickel. Bei dickeren Schichten ist eine Kombination mit der elektrolytischen Metallisierung aus wirtschaftlichen Gründen notwendig. Die Umweltbelastung ist bei der Elektrolyse weitestgehend vernachlässigbar, da diese Bäder in einem Kreislauf geführt werden und wieder aufbereitet werden können. Einzelne Prozeßschritte können eventuell durch spezielle Zwischenschritte noch ergänzt werden. Vor allem die Substitution der chemischen Vorbehandlung kann bis zu zehn Einzelschritte inklusive der umweltbelastenden Säuren ersetzen, was einem enormen ökologischen Potential gleich kommt. Hierdurch ist, aufgrund der identischen Vorbehandlung und eingeschränkten Flexibilität, die galvanische Direktmetallisierung kein potientes Verfahren zur Erfüllung der in Kapitel 1 aufgestellten Forderung, auch wenn es ökonomische Vorteile für einen Galvanisierbetrieb bei Umstellung auf dieses Verfahren mit sich bringen kann. Diese Technologie führt weitestgehend zu subtraktiven Strukturierungsverfahren und das Potential zur weiteren Miniaturisierung ist aufgrund von Schichtdickenschwankungen begrenzt. Die Beschichtungsparameter sind in Abhängigkeit der Kunststoffe beherrscht, wodurch der Prozeß jedoch auch inflexibel gegenüber verwendbaren Basismaterialien ist. Eine Durchlaufgalvanik für Folien ist vorstellbar aber sehr komplex vom Aufbau und empfindlich bei Störungen aufgrund des endlosen Materials. Ein Eingriff ohne Verlust der kompletten Folienrolle scheint kaum möglich. Das Separieren der Einzelschritte des Beschichtungsablaufs ist somit notwendig.

Bei der Metallisierung diskret auftragbarer metallisierbarer Schichten sind Primer durch ihre direkte Metallisierbarkeit ohne Aktivierungsschritt den Prekursoren und

Spezial-Polymeren wirtschaftlich überlegen und zudem einfacher in der Handhabung. Prekursor und Polymerschichten sind für die Additivtechnologie sehr interessant und bieten durchaus Vorteile bei der Prototypenherstellung. Die Einschränkungen bezüglich der Oberflächenqualität und damit der Miniaturisierung verhindern momentan noch eine großtechnische Umsetzung. Die vornehmlich in Chloroform gelösten Prekursor sind aus umwelttechnologischer Sicht ebenfalls bedenklich. Primer hingegen sind auch in lösemittelfreier Form verfügbar und technologisch beherrscht. Einschränkungen ergeben sich lediglich hinsichtlich der Flexibilität der zu metallisierenden Kunststoffe, wobei jedoch wesentliche Kunststoffe bereits mit Standardprimern metallisiert werden können. Einsparungen von Entsorgungskosten ergeben sich bei allen direkt metallisierbaren Bekeimschichten durch den Ersatz der chemischen Vorbehandlung und Aktivierung.

Die Verfahren zur Metallisierung aus der Gasphase hingegen sind generell sehr interessant, da sie sowohl die Vorbehandlung und Aktivierung als auch die chemische Metallisierung substituieren. PECVD-Prozesse sind technologisch noch nicht voll ausgereift wodurch noch keine Standardanlagen für eine industrielle Beschichtung zur Verfügung stehen. Einer Verbreitung ist aufgrund der sehr spröden Schichten und teuren Prekursoren noch nicht absehbar<sup>1</sup>. Für PVD-Prozesse sprechen neben den verfügbaren Anlagen und dem umweltfreundlichen Prozeß auch ökonomische Vorteile. Eine vergleichende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung hat ergeben, daß bis zu einer Schichtdicke von sechs Mikrometer PVD-Verfahren um circa 0,5 €/µm günstiger als galvanische Verfahren sind /33/. Dies legt die oft in der Literatur diskutierte Kombination mit der galvanischen Metallisierung für dicke Schichten nahe, was erhebliche wirtschaftliche und prozeßtechnische Vorteile birgt /50/. Aufgrund der verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen (Physik und Chemie) und dem mangelnden gegenseitigen Prozeßwissen konnte dies jedoch bisher industriell für Thermoplaste nicht umgesetzt werden. Durch die Möglichkeit beliebig dünne Schichten aufzutragen und die Zugänglichkeit zu Laser- und Plasmaprozeduren haben PVD-Verfahren ferner ein enormes Miniaturisierungspotential, das auch zu schonenden und effizienten Einsatz von Materialien führt.

Da es sich um trockene Beschichtungsverfahren handelt, fallen so gut wie keine Entsorgungskosten an und Materialien die durch eine hohe Feuchteaufnahme gekennzeichnet sind, können nach dem Metallisieren ohne Trocknen für nachfolgende Lötprozesse zur Verfügung gestellt werden.

---

<sup>1</sup> Das übliche Prekursormaterial TDMAT (Tetrakisdimethylamido)titan kostete zur Zeit der Drucklegung circa 2400 US\$/100g.

Die Plasmabehandlung ohne Nutzung der Möglichkeit der physikalischen Metallisierung hingegen ist ökonomisch nicht sinnvoll, da der größte Aufwand bereits durch die Evakuierung des Rezipienten entstanden ist. Ein weiterer Nachteil dieser Vorbehandlung mit anschließender chemischer Aktivierung und Metallisierung ist die so gut wie nicht vorhandene Lagerfähigkeit des Materials. Das gleiche gilt auch für UV-behandelte Thermoplasten. Die an der Oberfläche erzeugten chemischen und elektrischen Reaktionen befinden sich im allgemeinen nicht in einem Gleichgewicht und sind daher sehr reaktiv, wodurch eine schnelle Weiterverarbeitung notwendig wird, welches industriell kaum umsetzbar ist.

Die Einsparung von Entsorgungskosten und Eliminierung umweltbelastender Verfahren durch Substitution der chemischen Vorbehandlung ist gegeben, wodurch auch eine gewisse Flexibilität gegenüber verschiedenen Basismaterialien erreicht wird. Die relativ langen Durchlaufzeiten (bedingt durch die notwendigen Vorbehandlungszeiten) bis die gewünschten Reaktionen an der Oberfläche erzielt werden, der frühe Wechsel in die Naßchemie und die bisher noch nicht ausreichend beherrschten Prozeßparameter, schränken die Möglichkeiten dieser Verfahren ein.

Laminierverfahren sind durch deren weite Verbreitung und einfachen prozeßtechnischen und wirtschaftlichen Umsetzung interessant.

Ziel muß der Einsatz eines ökologisch unbedenklichen Klebstoffes oder die komplette Substitution dieses sein. Hierdurch sind Laminierverfahren ökologisch unbedenklicher als die Galvanik. Miniaturisierungspotential ist aufgrund der limitierten verfügbaren Folienstärken eingeschränkt. Die Natur des Verfahrensablaufs ist hauptsächlich auf subtraktive Strukturierungsverfahren ausgelegt und die Notwendigkeit des Einsatzes eines geeigneten Klebstoffes und materialabhängiger Laminierparameter erschweren den Einsatz dieser Verfahren für andere als bisher eingesetzte Materialien.

Eine gleichberechtigte dreistufige Bewertung (-1 = Anforderung nicht erfüllt; 0 = Anforderung bedingt erfüllt; 1 = Anforderung erfüllt) der verschiedenen Parameter aus den Bereichen Ökonomie, Ökologie, Prozeß und Technologie entsprechend obiger Argumente ist in Tabelle 2. 5 zusammengefaßt.

	Klassische Galvanik	Galvanische Direktmetallisierung	UV-/Licht-Vorbehandlung	Plasma-vorbehandlung	Primerauftrag bzw. Aktivierung	Pekursor-/ Polymer-schicht-Aktivierung	PVD-Vormetallisierung	PECVD-Vormetallisierung	Laminierung
Chemische Vorbehandlung	1 Reinigungsmittel 2 Chromschwefelsäure 3 Reinigungsmittel 4 Conditioner 5 Reinigungsmittel 6 Chromsäure 7 Reinigungsmittel 8 Neutralizer 9 Reinigungsmittel 10 Vortauchlösung	1 Reinigungsmittel 2 Chromschwefelsäure 3 Reinigungsmittel 4 Conditioner 5 Reinigungsmittel 6 Chromsäure 7 Reinigungsmittel 8 Neutralizer 9 Reinigungsmittel 10 Vortauchlösung	1 UV-/Licht-Bestrahlung	1 Plasmatätzen	1 Reinigen	1 Spülen 2 Trocknen 3 Belichten 4 Trocknen	1 Reinigen 2 Evakuieren	1 Reinigen 2 Evakuieren	1 Reinigen 2 Kleber aufbringen
	11 Pd-Aktivator, kollobidal 12 Pd-Aktivator 13 Beschleuniger 14 Reinigungsmittel	11 Pd-Sn-Aktivator 12 Reinigungsmittel 13 Beschleuniger 14 Reinigungsmittel	2 Pd-Aktivator 3 Reinigungsmittel 4 Beschleuniger 5 Reinigungsmittel	2 Pd-Aktivator 3 Reinigungsmittel 4 Beschleuniger 5 Reinigungsmittel	2 Pd-Aktivator 3 Reinigungsmittel 4 Beschleuniger 5 Reinigungsmittel	2 Primerauftrag 3 Trocknen 4 Beschleuniger 7 Konditionieren	5 Aktivieren 6 Spülen	3 Plasmatätzen	3 Konditionieren
Chemisch Metallisieren	15 NiSO <sub>4</sub> -Lösung 16 Spülmittel	12 Cu-Link	6 NiSO <sub>4</sub> -Lösung 7 Spülmittel	6 NiSO <sub>4</sub> -Lösung 7 Spülmittel	4 NiSO <sub>4</sub> -Lösung 5 Spülmittel	7 NiSO <sub>4</sub> -Lösung 8 Spülmittel	4 Beschichten 5 Abkühlen	4 Beschichten 5 Abkühlen	3 (2) Kupfer-Folie unter Druck und Wärme verpressen
Elektrolytisch Metallisieren	17 CuSO <sub>4</sub> -Lösung 18 Spülmittel 19 Trocknen	13 CuSO <sub>4</sub> -Lösung 14 Spülmittel 15 Trocknen	8 CuSO <sub>4</sub> -Lösung 9 Spülmittel 10 Trocknen	8 CuSO <sub>4</sub> -Lösung 9 Spülmittel 10 Trocknen	6 CuSO <sub>4</sub> -Lösung 7 Spülmittel 8 Trocknen	9 CuSO <sub>4</sub> -Lösung 10 Spülmittel 11 Trocknen	6 CuSO <sub>4</sub> -Lösung 7 Spülmittel 8 Trocknen	6 CuSO <sub>4</sub> -Lösung 7 Spülmittel 8 Trocknen	
Ökonomie	Einsparung -1 -1	Ensenkungskosten -1 -1	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	1 1	1 1
Ökologie	Metallekoeffizient -1 -1	Metallekoeffizient -1 -1	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	1 1	1 1
Prozess	Teilprozesse -1 -1	Teilprozesse -1 -1	-1 -1	-1 -1	-1 -1	-1 -1	0 0	0 0	-1 -1
Technologie	Umweltbelastende Verfahren -1 -1	Umweltbelastende Verfahren -1 -1	0 0	0 0	0 0	0 0	1 1	1 1	0 0
	Minimierung Ressourcenverbrauch -1 -1	Minimierung Ressourcenverbrauch -1 -1	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0
	Flexibilität bzgl. Basismaterialien -1 -1	Flexibilität bzgl. Basismaterialien -1 -1	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0
	Kompatibilität zu Folgeverfahren 0 0	Kompatibilität zu Folgeverfahren 0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0
	Minimierung der Durchlaufzeiten 0 0	Minimierung der Durchlaufzeiten 0 0	-1 -1	-1 -1	-1 -1	-1 -1	0 0	0 0	-1 -1
	Potential zu Miniatürisierung 0 0	Potential zu Miniatürisierung 0 0	0 0	0 0	0 0	-1 -1	-1 -1	-1 -1	-1 -1
	Präferenzien additiver Verfahren 0 0	Präferenzien additiver Verfahren 0 0	0 0	0 0	0 0	1 1	1 1	1 1	1 1
	Beherrschte Parameter -1 -1	Beherrschte Parameter -1 -1	-1 -1	-1 -1	-1 -1	-1 -1	-1 -1	-1 -1	-1 -1
	2	3	3	3	3	3	3	3	3
	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	2	2	2	2	2	2	2	2	2

Tabelle 2.5: Gegenüberstellung und Bewertung alternativer Metallisierungsverfahren

Hieraus haben sich die drei Verfahren Primerauftrag mit direkter chemischer Metallisierung, die physikalische Vormetallisierung und das Laminieren von Kupferfolien hervorgehoben, die jeweils die höchsten positiven Bewertungsindizes aufzeigten. Deren nicht erfüllten Anforderungen führten zu den in den nachfolgenden Kapiteln beschriebenen Technologieuntersuchungen (Abbildung 2. 14).

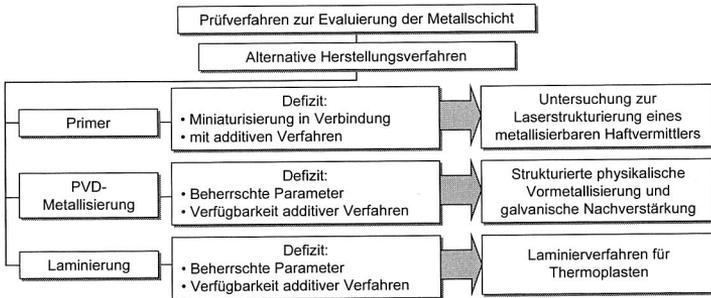


Abbildung 2. 14: Struktur der Forschungsaktivitäten und behandelte Defizite

Primer werden bisher vor allem vollflächig aufgebracht, metallisiert und geätzt, beziehungsweise per Siebdruck strukturiert aufgetragen, wodurch Defizite bezüglich der erreichbaren minimalen Strukturen bestehen. Eine Kombination mit der Laserstrukturierung ergab eine Reihe ökologischer Vorteile bei hohem Miniaturisierungspotential. Die Untersuchungen hierzu werden in Kapitel 4 beschrieben. Bei der Metallisierung mittels PVD-Verfahren bestand Entwicklungsbedarf hinsichtlich Haftfestigkeit und galvanischer Nachverstärkung der Metallschichten sowie der Ermittlung optimaler Prozeßparameter. Additive und semiadditive Prozesse boten sich aufgrund der Beschichtungsweise an, Verfahren hierzu waren bisher nur unzureichend bekannt. Dieser Thematik wird in Kapitel 5 ausführlich behandelt. Bei der Laminierung von alternativen Thermoplasten bestand sowohl bei der Auswahl des geeigneten Klebersystems beziehungsweise der Parameter beim kleberlosen Laminieren als auch bei der Verfügbarkeit von additiven Verfahren Forschungsbedarf, so daß diese Thematiken Gegenstand von Kapitel 6 sind.

Die Verkürzung der Prozesskette mit ressourcenschonenden Einzelverfahren und Aktivierung ökonomischen Einsparungspotentials war Ziel aller Verfahren. Weiterhin sollte die Umsetzung in kontinuierlichen Anlagen möglich sein, um die Produktivität zu maximieren. Bevor auf diese drei Verfahren näher eingegangen wurde, mußten zuerst die notwendigen Prüfverfahren zur Evaluierung der Metallschichten und Strukturen auf deren Anwendbarkeit untersucht werden (Abbildung 2. 14).

### 3 Prüfverfahren zur Evaluierung der Metallschicht

Zur Evaluierung von Metallschichten ist die Auswahl der Prüftechnologie oft ausschlaggebend, um zuverlässige Aussagen bezüglich der Qualität von metallischen Schichten auf Thermoplasten treffen zu können. Dies ist zum einen dadurch begründet, daß im Gegensatz zu Meßwerten von homogenen Materialien, das Grundmaterial beziehungsweise der Verbund Schicht/Grundmaterial das Ergebnis der Messung erheblich beeinflussen kann /76/, zum anderen ist ein Prüfverfahren oft nur für einen spezifischen Anwendungsfall ausgelegt.

Sowohl zur Schichtdicken- als auch zur Haftfestigkeitsmessung, welches die beiden wichtigsten Charakteristiken zur Beurteilung einer Schicht sind, muß zwischen dünnen und dicken Schichten unterschieden werden, da in Abhängigkeit der zu erwartenden Schichtstärke das anzuwendende Meßverfahren bestimmt wird. Bei den Ausführungen zur Haftfestigkeitsmessung soll unter dicken Schichten, in Abwandlung zu anderen Definitionen in der Literatur /45; 147/, Schichten größer zehn Mikrometer verstanden werden, da, ausreichende Kohäsion der Metallisierungsschicht vorausgesetzt, ab dieser Stärke ein Schältest nach DIN<sup>1</sup> IEC<sup>2</sup> 326 Teil 2 noch durchgeführt werden konnte (Kapitel 3.3.1). Korrespondierend sollen Schichten kleiner zehn Mikrometer als dünne Schichten verstanden werden.

Andere Meßwerte wie Oberflächenrauigkeit, Oberflächenspannung und optische Untersuchungen oberflächennaher Strukturen sind ebenfalls oft unerlässlich, um aufgetragene Schichten entsprechend dem beabsichtigten Einsatzgebiet näher beurteilen zu können.

#### 3.1 Oberflächenanalyse

Zur Messung der Oberflächenrauigkeit wurde ein Tastschnittgerät mit einer abnutzungsbeständigen Prüfspitze aus Korund eingesetzt. Die Prüfspitze wurde hierzu mit sehr geringem Auflagedruck über die zu messende Oberfläche bewegt, Abweichungen der Oberfläche (Oberflächenprofil) wurden elektrisch erfaßt und aufgezeichnet. In der DIN 4772 wird diese Meßmethode genauer beschrieben /109/.

---

<sup>1</sup> Deutsches Institut für Normung.

<sup>2</sup> International Electrotechnical Commission.

Eine wichtige Kennzahl zur Beurteilung von Haftungseigenschaften eines Substrates ist dessen Oberflächenspannung. So ist bekannt, daß zwei Phasen dann am besten aneinander haften, wenn ihre Oberflächenspannungen und Polaritäten annähernd gleich sind /196/. Mit speziellen Testtinten ließen sich die Oberflächenspannungen für die unterschiedlichen Substrate schnell ermitteln. Am Markt verfügbare Stifte haben üblicherweise einen Meßbereich von 30 mN/m bis 44 mN/m, gestuft in Zweierschritten. War die Oberflächenspannung der Prüffläche höher als der angegebene Meßbereich des Stiftes, wurde die Testtinte auf der Oberfläche gespreizt, war sie geringer, zog sich diese zusammen. Bei geschickter Auftragsreihenfolge konnte schnell der Wert der Oberflächenspannung näherungsweise ermittelt werden.

Zur Beurteilung aufgebrachtter Schichten war weiterhin die optische Betrachtung zwingend. Als Hilfsmittel wurden innerhalb dieser Arbeiten das Rasterelektronenmikroskop (REM) und das Lichtmikroskop zur Untersuchung oberflächennaher Strukturen und zur Auswertung der Schichtqualität herangezogen. Das Rasterelektronenmikroskop zeichnete sich durch seine große Vergrößerungsleistung bei gleichzeitig hoher Tiefenschärfe aus. Wurde beispielsweise eine Probe bei einem Raster von 10 µm x 10 µm abgetastet und das Bild auf einem 100 mm x 100 mm - Schirm dargestellt, erhielt man eine 10000-fache lineare Vergrößerung /56/. Die Funktionsweise des REM wird in /56/ und die des Lichtmikroskops in /71/ näher erläutert.

### 3.2 Schichtdickenmessung

Zur Bestimmung der Schichtdicke wurden in Abhängigkeit der zu erwartenden Schichtstärke und weiterer Untersuchungsziele direkte und indirekte Meßmethoden eingesetzt.

Nach dem direkten Meßprinzip arbeiten profilometrische Verfahren (DIN 50 933, ISO<sup>1</sup> 4518). Hierbei wurde die Schichtdicke unmittelbar aus dem Höhenunterschied (Stufensprung) von Schichtoberfläche und unbeschichteter Substratoberfläche beziehungsweise darunter liegender Schicht ermittelt. Die Stufenhöhe erhielt man durch Abdeckung während oder durch partielles anodisches Auflösen eines Bereiches nach der Beschichtung.

---

<sup>1</sup> ISO : International Standards Organization.

Durch den Stufensprung ließ sich die Schichtdicke mit einem geeigneten Meßgerät, z.B. optischen Oberflächenmeßgerät oder Tastschnittgerät (ISO 1880 und 3274 sowie DIN 4772) ermitteln /76/. Beim berührungslosen Messen mittels eines fokussierten Lichtes oder eines Laserstrahles zeigte das Verfahren bei Schichten mit starken Reflexionsunterschieden Mängel.

Zur indirekten Bestimmung der Schichtdicke wurde die Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) und das Wirbelstromverfahren eingesetzt. Mit der RFA bestand die Möglichkeit, Einfach-, Zweifach- und Dreifach-Schichtsysteme zerstörungsfrei zu analysieren. Außerdem konnte der prozentuale Elementanteil in Werkstoffen ermittelt beziehungsweise ein noch unbekannter Werkstoff identifiziert werden /178/. Bei diesem Verfahren wurde die Oberfläche mit einer Primär-Röntgenstrahlung aus einer Röntgenröhre beaufschlagt und die Schichtdicke indirekt über eine flächenbezogene Massenbestimmung ermittelt. Ein im Strahleingang liegender Kollimator definierte die Meßfleckgröße (z.B. 0,06 mm x 0,06 mm). Die Primärstrahlung trat hierzu in Wechselwirkung mit den Atomen der Deck- und, falls vorhanden, Zwischenschicht und dem Basiswerkstoff. Hatte die auftreffende Strahlung ein bestimmtes Energieniveau erreicht, wurde vom bestrahlten Meßpunkt eine materialcharakteristische Röntgenstrahlung, auch Fluoreszenzstrahlung genannt, ausgesandt. Diese Signale wurden aufgenommen und hinsichtlich Zählrate und Energie analysiert /77/.

Durch Vergleich mit hinterlegten Werten bekannter Schichtsysteme konnte die Schichtdicke bestimmt werden /76; 178/. Je nach hinterlegtem Kalibriersatz konnte man Schichten in einem Meßbereich von 0,1 µm bis 90 µm bei einer Meßunsicherheit von 1% bis 4% messen<sup>1</sup> /154/.

Ebenfalls zerstörungsfrei arbeitete das verwendete Wirbelstromverfahren (DIN 50 984, ISO 2360), welches vornehmlich zur Messung von dicken Kupferschichten eingesetzt wurde. Hierbei wird mit Hilfe eines hochfrequenten Wechselstroms in einer als Meßsonde ausgebildeten Spule ein elektromagnetisches Feld erzeugt. In Abhängigkeit der Schichtdicke entstanden Wirbelströme, welche über die Sonde ausgewertet wurden. Eine zuverlässige Anwendung war jedoch erst ab Kupferschichtdicken über zwei Mikrometer möglich /76; 140/.

---

<sup>1</sup> Messung von Kupfer war jedoch anlagentechnisch auf 35 µm begrenzt.

### 3.3 Haftfestigkeitsbestimmung dicker Schichten

Das grundlegende Kriterium für eine funktionierende Metallschicht ist seine ausreichende Haftfestigkeit. Hierunter versteht man den Zustand, in dem zwei Oberflächen durch eine Kraft, verursacht durch chemische oder mechanische Bindungen, zusammengehalten werden /112/. Die Prüfung der Haftfestigkeit eines metallischen Überzugs ist in DIN 53 494 und DIN EN<sup>1</sup> 60 249 geregelt. Ginge man jedoch von einer Verwendung der metallisierten Thermoplaste als Leiterplatte aus, war die DIN IEC 326 maßgeblich, welche Anforderungen und Prüfverfahren, die auf elektronische Schaltungsträger anzuwenden sind, enthält. In allen Richtlinien wird beschrieben, daß die Metallschicht im Normalklima senkrecht zum Basismaterial abgezogen wird, um deren Widerstand als Kraft pro Streifenbreite zu messen.

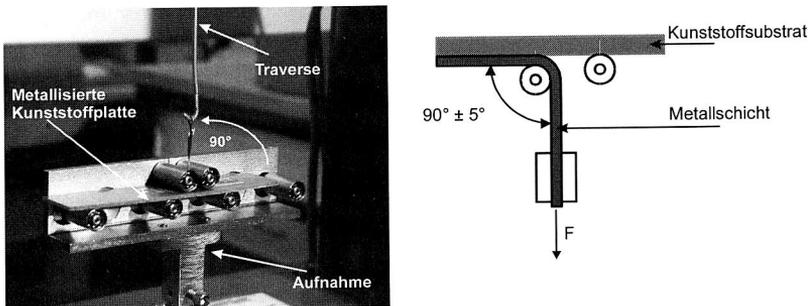


Abbildung 3. 1: Rollenvorrichtung für Schältest und Schemazeichnung nach DIN 53 494 beziehungsweise DIN EN 60 249

Nach DIN 53 494 wird an einem Ende des Prüflings ein 25 mm  $\pm$  0,5 mm breiter Streifen einer 40  $\mu$ m  $\pm$  4  $\mu$ m dicken Metallschicht auf einer Länge von circa 10 mm losgelöst, so daß eine Zugvorrichtung angebracht werden kann. Die ebene Leiterplatte, beziehungsweise eine auf einem Träger fixierte flexible Folie, wird hierzu in eine Rollenvorrichtung (Abbildung 3. 1) eingelegt, die sicherstellt, daß die Metallschicht in einem Winkel von 90° zum Substrat über eine Länge von mindestens 50 mm abgezogen wird /175/. Gemessen wird hierbei die Abzugskraft  $F$  in Newton die erforderlich ist, die Kupferschicht von der Probenoberfläche zu lösen /118/.

<sup>1</sup> EN: European Norm.

DIN 60 249 gibt im wesentlichen die gleichen Bedingungen wieder.

Der Prüfling kann jedoch auch frei auf einer Auflage liegen, wobei eine Winkelabweichung von  $\pm 5^\circ$  nicht überschritten beziehungsweise unterschritten werden darf. Die Abzugsgeschwindigkeit ist mit  $(50 \pm 5)$  mm/min festgelegt.

Die für elektronische Schaltungsträger maßgebende Norm DIN IEC 326, die aus der IEC 326 abgeleitet wurde, enthält bezüglich des Meßvorrichtungsbaus die gleichen Bedingungen wie DIN EN 60 249. Ergänzt wurde, daß die abzuziehende Leiterbahn hierbei eine Breite von 0,8 mm nicht unterschreiten darf /55/. Das gelöste Ende der Leiterbahn muß auf seiner ganzen Breite gehalten werden, z.B. mit Hilfe einer Klemmvorrichtung. Handelt es sich um einen flexiblen Prüfkörper, so kann dieser nach DIN EN 60 249 /123/ mit der Rückseite auf einen starren Träger geklebt mit der selben Vorrichtung geprüft werden. Für die Auswertung müssen vier Leiterbahnen auf einer Länge von mindestens 25 mm abgezogen werden. Die kleinste Kraft pro Leiterbahnbreite, die zum Abschälen des Leiters erforderlich ist, gilt als Abschälkraft und wird in Newton je Millimeter Leiterbahnbreite angegeben /124/.

Die DIN IEC 326 enthält Angaben über erforderliche Mindestabschälkräfte, die sich nach Basismaterial oder Einsatzbedingung unterscheiden /118; 138/. In Tabelle 3. 1 sind exemplarisch die wichtigsten Werte aufgelistet.

Norm	Anwendung	Schichtdicke $d$	Schälfestigkeit $\kappa$
DIN IEC 326-3-8.1.1	Epoxidharz-Hartpapier	35 $\mu\text{m}$	1,1 N/mm
DIN IEC 326-3-8.1.1	Phenolharz-Hartpapier	35 $\mu\text{m}$	0,8 N/mm
DIN IEC 326-2-e	Polyimidfolie (bei Anlieferung)	18 $\mu\text{m}$	0,6 N/mm
		35 $\mu\text{m}$	0,8 N/mm
		70 $\mu\text{m}$	0,9 N/mm
DIN IEC 326-3-7.1	Automobil, Telekommunikation	35 $\mu\text{m}$	0,8 N/mm
DIN IEC 326-2-7.1.1, 10 a	TV, HiFi, Video	35 $\mu\text{m}$	0,6 N/mm

Tabelle 3. 1: Mindestabschälkräfte der Metallschicht nach DIN IEC 326 /118; 124; 138/

Innerhalb der Untersuchungen wurde sich somit an dieser Norm und deren Mindestabschälkräfte orientiert. Jedoch mußte eine sinnvolle Übertragung der Richtlinien auf metallisierte Thermoplaste, welche als elektronische Schaltungsträger eingesetzt werden sollten, sicher gestellt werden<sup>1</sup>. Hierzu wurde die Meßapparatur und die innerhalb der DIN IEC 326 festgelegten Prüfbedingungen auf deren Relevanz für thermoplastische Schaltungsträger überprüft. Als Voraussetzung zur

<sup>1</sup> Zur Bestimmung der Abschälkraft an flexiblen Leiterplatten existiert zusätzlich die DIN IEC 52 (Sec) 426, welche einen Abzug der Metallschicht über eine Zylinder, der drehbar gelagert ist, vorschlägt.

Durchführung mußte gelten, daß die Kohäsion beziehungsweise die Zugfestigkeit der Metallschicht höher war als dessen Adhäsion, also Haftfestigkeit /49/.

### 3.3.1 *Einflußgrößenuntersuchung bei Messungen nach DIN IEC 326*

Zunächst wurde die vorhandene Apparatur mit zugehöriger Software, welche die analogen Signale des Kraftaufnehmers auswertete, näher betrachtet. Diese ermöglichte ebenso eine exakte Steuerung der Maschineneinheit sowie graphische Darstellung der Meßwerte, wobei Zeit-, Weg- und Kraftwerte ermittelt wurden. Um möglichst ungedämpfte Messungen zu erhalten, wurde die Abtastrate der Meßwerte auf sehr kurze Zeitintervalle ( $< 0,02$  s) eingestellt. Es hat sich somit die Frage gestellt, ob signifikante Unterschiede zwischen Messungen bei Verwendung einer Abzugsrolle (Abbildung 3. 1) und Messungen die bei fest eingespannten Proben durchgeführt werden auftreten, da eine Abzugsrolle bei 3-D MID Applikationen nicht verwendet werden konnte.

Um die in der DIN IEC 326 Teil 2 und DIN 53 494 vorgeschriebene senkrechte Abzugsrichtung mit einer zulässigen Winkelabweichung von  $\pm 5^\circ$  bei fest eingespannten Proben einhalten zu können, wurde ein 700 mm langes Verbindungselement zwischen Leiterbahn und Traverse der Zugprüfmaschine eingesetzt. Hierdurch schwankte die maximale Winkelabweichung bei einer Abzugslänge von 50 mm bis 90 mm lediglich zwischen  $2,38^\circ$  und  $4,29^\circ$  und war somit unterhalb der geforderten Toleranzgrenze.

Durch den Einsatz der Einspannvorrichtung wurde die Messung der Abschälkraft, nicht mehr direkt, sondern indirekt über eine Verlängerung gemessen, was das Meßergebnis wiederum beeinflussen konnte. Um diese Einwirkung beurteilen zu können, wurde die Längenänderung der Einspannvorrichtung ermittelt, indem die Verlängerung direkt an der Grundplatte der Zugprüfmaschine fixiert und eine Kraftmessung mit sehr geringer Abzugsgeschwindigkeit ( $v = 1$  mm/min) durchgeführt wurde. Es zeigte sich, daß im linearen Bereich, ab circa zwei Newton die Einspannvorrichtung eine relative Längenänderung von circa  $0,042$  mm/N aufwies. Im nicht linearen Bereich, unterhalb zwei Newton, war diese noch geringer. Bei den im allgemeinen zu erwartenden Abschälkräften von maximal vier Newton würde eine Verschiebung der Abschälkurven von höchstens  $0,168$  mm in positiver Wegrichtung auftreten. Da es sich hierbei um eine horizontale Verschiebung in Wegrichtung und nicht um eine vertikale Verschiebung in Krafrichtung handelte, trug diese Abweichung nicht zu einer Meßwertverfälschung bei.

Zum Vergleich der Meßergebnisse von fest eingespannten Proben gegenüber denen bei Verwendung einer Abzugsrolle, wurden die Haftfestigkeiten von drei Chargen metallisierter Kunststoffteile auf beiden Vorrichtungen vermessen und direkt miteinander verglichen<sup>1</sup>. Hierbei konnte man bei nahezu gleichen Mittelwerten lediglich eine irrelevant höhere Standardabweichung bei den Proben, die über die Abzugsrolle vermessen wurden, erkennen. Beide Abzugsvorrichtungen konnten somit als gleichwertig angesehen werden.

Wie bereits erwähnt, wird in der DIN IEC 326 Teil 2 bei der Haftfestigkeitsprüfung eine Abzugsgeschwindigkeit von 50 mm/min vorgeschrieben. Um eventuelle Einflüsse der Einspannvorrichtung auf die Meßkurven, zum Beispiel Systemschwingungen, zu minimieren, wurde der Einfluß der Abzugsgeschwindigkeit auf die Messung untersucht. Hierzu wurden auf Kunststoffplatten mehrere Leiterbahnen aufgebracht und mit verschiedenen Geschwindigkeiten abgezogen. Aus den Meßkurven wurde der Mittelwert der Haftfestigkeit und deren Standardabweichung herangezogen. Die Kurvenverläufe der Schälffestigkeits wiesen hierbei unabhängig von der Abzugsgeschwindigkeit den gleichen Charakter auf.

Es traten in keiner Kurve erkennbare systembedingte Schwingungen auf. Eine nennenswerte Abhängigkeit der Haftfestigkeit von der Abzugsgeschwindigkeit konnte somit ausgeschlossen werden, womit bei allen Untersuchungen die Geschwindigkeit auf die in der Norm vorgeschriebenen 50 mm/min festgelegt wurde.

Zur Untersuchung der Wiederholgenauigkeit und Streuung des Kraftaufnehmers der Zugprüfmaschine, wurde ein Körper mit einem Gewicht von 325 g an der Einspannvorrichtung befestigt und fünf Messungen mit den vorgeschriebenen Parametern durchgeführt. Zwischen den fünf Messungen wurde jeweils das Gewicht abgenommen und wieder montiert. Die dabei gemessenen Kraftmittelwerte mit deren Standardabweichung sind in Tabelle 3. 2 aufgeführt.

Messung	Kraftmittelwert $F$ in N	Standardabweichung $\sigma$ in N
1	3,05	0,0082
2	3,11	0,0071
3	3,06	0,0075
4	3,06	0,0083
5	3,14	0,0077

Tabelle 3. 2: Meßwerte zur Untersuchung der Wiederholgenauigkeit

<sup>1</sup> Fünf Proben pro Charge, fünf Messungen pro Probe, wobei Minimal- und Maximalwerte nicht in die Auswertung mit einbezogen wurden.

Der arithmetische Mittelwert aus den fünf Kraftmittelwerten betrug hierbei 3,084 N bei einer Standardabweichung  $\sigma$  von 0,035 N, die somit in einem sehr engen Bereich um 0,0078 N schwankten. Aufgrund dieses Ergebnisses wurde die Meßungengenauigkeit der Zugprüfmaschine bei der Auswertung der Meßkurven vernachlässigt.

Der Einfluß der Schichtdicke  $d$  auf den Schälwiderstand  $\kappa$  wurde bereits 1966 im Zusammenhang mit ABS-Pfropfpolymerisaten untersucht /161/. Hierbei wurde von der Annahme ausgegangen, daß die Kraft die notwendig ist, um das Kupfer vom Thermoplasten zu lösen, sich aus zwei Komponenten zusammensetzt.

$$F = F_D + F_H \quad (\text{Gleichung 3. 1})$$

mit:

$F_D$  = Kraftanteil zur Deformation der Kupferschicht in N

$F_H$  = Kraftanteil zur Überwindung des Haftmechanismus in N

$F_D$  war hierbei der Kraftanteil, der zur Deformation der Kupferschicht notwendig ist. Der Anteil  $F_H$  beschrieb hingegen die Kraft, die zur Überwindung des Haftmechanismus aufgebracht werden mußte. Nach /161/ konnte ein direkter Zusammenhang zwischen der Schichtdicke und der Schälfestigkeit bei ABS-Pfropfpolymerisaten und der mittleren Tiefe der herausgelösten Butadienkugeln nachgewiesen werden. Hierbei wurde jedoch angenommen, daß alle Poren eine gleich große kugelförmige Gestalt haben. Hiervon ausgehend wurden empirische Untersuchungen durchgeführt, ob ein linearer Einfluß der Schichtdicke auf die Schichthaftung auch bei Kunststoffen nachgewiesen werden konnte, die auf anderen Adhäsionseffekten /142/ als den bei ABS beobachteten Druckknopfeffekt beruhten. Dies war notwendig, um die Meßergebnisse des Schältests bei unterschiedlichen Schichtdicken miteinander und mit den in der IEC 326 Teil 2 geforderten Schälfestigkeiten (siehe Tabelle 3. 1) vergleichen zu können.

Versuchsreihen ergaben, daß der Schältest ab einer Schichtdicke von zehn Mikrometer anwendbar war. Somit wurden drei unabhängige Kunststoffchargen mit einer Kupferschicht zwischen 10  $\mu\text{m}$  und 30  $\mu\text{m}$  metallisiert<sup>1</sup>. Danach wurde die Haftfestigkeit im Schältest von Streifen der Breite 2, 3 und 5 mm gemessen<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Diese Untersuchungen wurden innerhalb des vom BMBF geförderten Projektes „Umweltverträgliche Verfahren zur haftersten Metallisierung von Kunststoffen und deren Einsatz in elektronisch/mechanischen Funktionselementen“ durchgeführt /37; 171/.

<sup>2</sup> Fünf Proben pro Charge, fünf Messungen pro Probe, wobei Minimal- und Maximalwerte nicht in die Auswertung mit einbezogen wurden.

In Abbildung 3. 2 erkennt man deutlich den Einfluß der Schichtdicke  $d$  auf die Schälfestigkeit  $\kappa$ , was grundlegend mit den Ergebnissen aus /161/ und /157/ übereinstimmt.

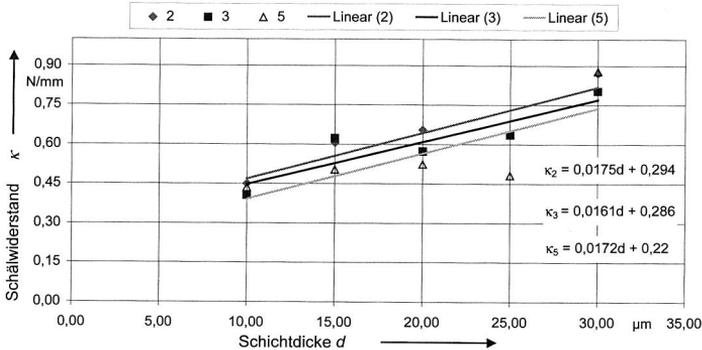


Abbildung 3. 2: Zusammenhang Schichtdicke und Schälwiderstand

Die annähernde Übereinstimmung der einzelnen Geradengleichungen der unabhängig voneinander vermessenen Schälfestigkeiten ließen die Formulierung einer für überwiegend stromlos und/oder elektrolytisch abgeschiedenen Metallschichten geltenden Geradengleichung aus den arithmetischen Mittelwerten der Einzelwerte zu:

$$|\kappa| \approx 0,017d + \tau \tag{Gleichung 3. 2}$$

mit:

$|\kappa|$  = Normierter Schälwiderstand in N/mm

$d$  = Schichtdicke in  $\mu\text{m}$

$\tau$  = Niveau der Geradengleichung

Hieraus folgte, daß ein Schälwiderstand  $\kappa$  von 0,44 N/mm bei einer Schichtdicke  $d$  von 10  $\mu\text{m}$  mit einem Schälwiderstand  $|\kappa|$  von 0,78 N/mm bei einer Schichtdicke von 30  $\mu\text{m}$  korrelierte. Das Niveau  $\tau$  der Geradengleichung gab die Grundqualität der Schichthftung an, wodurch dieser Wert auch als „Wahre Schälfestigkeit“ bezeichnet werden konnte, da unterschiedliche Schälfestigkeiten sich nur durch deren Niveau  $\tau$  unterschieden.

Durch Extrapolation konnte somit der Einfluß unterschiedlicher Schichtdicken auf die Schälfestigkeit durch die Differenz auf die Normschichtdicke mit nachfolgender Normierungsformel abgeschätzt werden:

$$c \approx 0,017 \cdot \Delta d \quad (\text{Gleichung 3. 3})$$

mit:

$$\Delta d = 35 - d$$

$c$  = Korrektur in N/mm

Der Korrekturfaktor  $c$  war somit mit entsprechendem Vorzeichen bei Ergebnissen von Schälfestigkeitsmessungen zu berücksichtigen (also zu addieren oder zu subtrahieren), die von der Normschichtdicke (hier 35  $\mu\text{m}$ ) abwichen.

### 3.3.2 Entwicklung einer computergestützten Interpretations- und Auswertehilfe

Als weiteres Problem stellte sich die innerhalb der DIN IEC 326 beschriebene Definition der Haftfestigkeit von Leiterbahnstrukturen heraus, die diese als kleinste gemessene Kraft einer Abschälkurve beschreibt.

Da innerhalb experimenteller Untersuchungen in einer Messung unterschiedliche Kraftwerte gemessen wurden, führte eine solche Interpretation zwangsweise zu Problemen bei der Auswertung. In Abbildung 3. 4 sind zur näheren Erläuterung zwei Abzugskurven dargestellt.

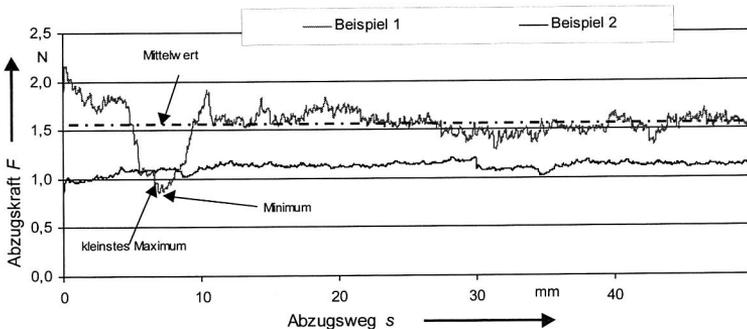


Abbildung 3. 3: Definition der Schälfestigkeit von Leiterbahnen

Die obere Abzugskurve wies bei einem Abzugsweg  $s$  von sieben Millimetern ein deutliches Tal auf, welches auf eine örtliche Störung des Haftverbundes, aufgrund nicht mehr nachvollziehbarer Einflüsse, zurückzuführen war. Über den restlichen Abschälweg verlief die Kurve gleichmäßig.

Nach Definition DIN IEC 326 betrug der Schälwiderstand  $\kappa$  somit 0,86 N/mm. Es ist jedoch deutlich erkennbar, daß die eigentliche Schälfestigkeit weitaus höher

lag. Würde zur Beurteilung der Auswirkung eines Prozeßparameters die zweite Abzugskurve herangezogen werden, die einen gleichmäßigen linearen Verlauf über den ganzen Abzugsweg, ebenfalls mit einem Minimum bei circa 0,86 N hatte, konnte aufgrund der nahezu gleichen Schälwerte kein Unterschied mehr festgestellt werden. In der Praxis wird oft auch die Haftfestigkeit als kleinstes gemessenes Maximum (Minimum Maximorum) definiert. Man geht hierbei davon aus, daß es durch ruckartiges Ablösen der Leiterbahnen beim Abziehen zu einem Voraus-eilen der Abschälung kommt, bei der örtlich keine oder zu geringe Spannungen gemessen werden. Einem erneuten Anstieg muß eine Haftung zugrunde liegen, die daher als Haftfestigkeit definiert werden kann.

In Abbildung 3. 4 lag das Minimum Maximorum bei einem Wert von 0,94 N und damit auch weit unter der realen Haftfestigkeit. Da es sich bei den experimentellen Untersuchungen innerhalb dieser Arbeit ausschließlich um relative Änderungen der Schälfestigkeiten handelte, mußte eine andere, als die in der DIN IEC 326 vorgeschlagene Definition, zur Bestimmung der Haftfestigkeit herangezogen werden.

Dadurch, daß die Verteilungsfunktion der Schwankungen und Ausreißer der Abschälkurven nicht bekannt waren, konnten statistische Methoden, wie z.B. der t-Test, F-Test oder der  $\chi^2$ -Anpassungstest /46; 100; 162; 190/, nicht angewendet werden. Um schließlich Abschälkurven und deren Bedeutung auf zu untersuchende Prozeßparameter richtig interpretieren zu können, mußte eine Methode entwickelt werden, mit dieser qualitativ Haftung erkannt und quantitativ Haftfestigkeit bestimmt werden konnte. Zu diesem Zweck wurde in der Programmiersprache Visual Basic für Microsoft Excel ein Programm geschrieben<sup>1</sup>, welches eine Auswertung der im ASCII-Code übertragenen Daten der Zugprüfmaschine, entsprechend dieser Problematik erlaubte. Die Funktionsweise dieses Programms wird im folgenden erläutert. In Abbildung 3. 4 ist eine ideale Abzugskurve mit gleichmäßigem Kurvenverlauf dargestellt. Der dunkle Kurvenbereich wurde zur Berechnung folgender Werte herangezogen:

- Mittelwert der Abzugskraft (= Schälfestigkeit)
- Standardabweichung
- Prozentuales Verhältnis der Standardabweichung zum Mittelwert

---

<sup>1</sup> Die Untersuchungen hierzu wurden von Herrn Dipl.-Ing. J. Heidinger unterstützt.

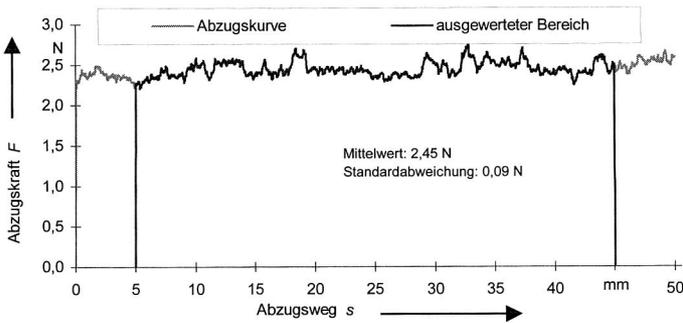


Abbildung 3. 4: Auswertung einer „konstant“ verlaufenden Abschälkurve

Die helleren Kurvenstücke wurden nicht mit in die Berechnungen einbezogen. Um eine Beeinflussung der Meßwerte durch Ein- und Ausschwingvorgänge der Meßeinrichtung zu vermeiden, wurden jeweils fünf Millimeter am Anfang und am Ende der Meßstrecke für die Auswertung ausgeschlossen. Bei einem Vergleich der Messungen verschiedener Leiterbahnbreiten mußte beachtet werden, daß der absolute Wert der Standardabweichung keine Aussagekraft hatte. Eine Umrechnung über dessen prozentuales Verhältnis zum Mittelwert war somit notwendig.

Bei Abzugskurven, die infolge fehlender Haftung größere Schwankungen und Täler aufwiesen, wurden die entsprechenden Bereiche aufgrund bestimmter Kriterien ausgeblendet. Hierzu untersuchte das Programm die Kurven auf Anwesenheit extremer Haftungsgefälle und -anstiege, wobei es letztere aus der Berechnung herausnahm. Bei einem steilen Kraftabfall (Steigung  $S < -6$ ) konnte von einer örtlichen Störung des Haftverbundes ausgegangen werden, die den eigentlichen Haftfestigkeitswert verfälschte. Bei einem flachen Kraftabfall (Steigung  $S > -6$ )<sup>1</sup> war jedoch ständig Haftung vorhanden, die mit in die Berechnung einfließen sollte (Abbildung 3. 5).

Weiterhin wurden Stellen ausgeblendet, die Schälfestigkeiten unterhalb eines Drittels des Maximums aufwiesen, da sich experimentell gezeigt hatte, daß dort keine beziehungsweise nur punktuelle Haftung bestand. Ferner blieben Proben bei Diskussionen bezüglich der Schälfestigkeit unberücksichtigt, bei denen die prozentualen Abweichungen der Standardabweichungen vom Mittelwert größer als 20% waren.

<sup>1</sup> Die Steigungswerte sind experimentell ermittelt worden.

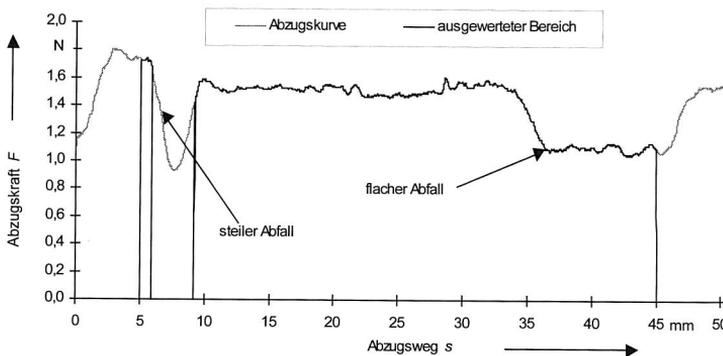


Abbildung 3. 5: Auswertung einer Abzugskurve bei unterschiedlichen Steigungen

Durch die entwickelte Auswertesoftware, welche die diskutierten Einflußfaktoren automatisch und auf identische Weise berücksichtigte, war ein Werkzeug vorhanden, mit welchem die Meßwerte objektiv miteinander verglichen werden konnten.

### 3.4 Haftfestigkeitsbestimmung dünner Schichten

Bis heute gab es keine konkrete Versuchsanordnung, welche die Haftfestigkeit von dünnen Schichten direkt bestimmt. Von den in der Industrie am häufigsten eingesetzten Verfahren, dem Gitterschnitttest, dem Rockwell-Eindrucktest dem Ritztest und dem Stirnzugtest, sind lediglich die letzteren zwei, quantitative Meßmethoden /112/. Der Ritztest hat nicht die Verbreitung wie der Stirnzugversuch, da er zum einen die Meßwerte indirekt erfaßt und zum anderen nur in einer europäischen Vornorm DIN V ENV 1071 Teil 3 beschrieben ist.

Für das quantifizierte Testen dünner Schichten wird somit im allgemeinen der Stirnzugversuch nach der ehemaligen DIN 50160 und der gültigen DIN EN 582 eingesetzt, der auch innerhalb dieser experimentellen Versuche zur Metallisierung angewendet wurde. Die Versuchsanordnung ist in diesen Normen lediglich schematisch festgelegt (Abbildung 3. 6).

Zur Messung wird hierzu ein Abzugskörper aus Metall (Stahl, Aluminium) mit definierter Fläche senkrecht auf die Oberfläche des beschichteten Kunststoffsubstrates geklebt. Von einer Löt- anstelle einer Klebeverbindung ist abzuraten, da vor allem bei dünnen Schichten die thermische Belastung zu Schädigungen führen kann. Durch Ritzen oder Ätzen wird die Fläche unter dem Abziehkörper von der restlichen Schichtfläche separiert /122/.

Dies soll schichtinterne Haftungswirkungen durch Querkräfte ausschließen. Der Abzugskörper wird zur Versuchsdurchführung momentenfrei eingespannt und unter konstanter Geschwindigkeit stoßfrei mit einer Zugkraft beaufschlagt, die soweit erhöht wird, bis sich entweder die Metallschicht löst oder die Klebeverbindung versagt. Kritisch bei hohen Haftungswerten der Schicht sind aus diesem Grund die Festigkeiten der am Markt erhältlichen Klebstoffe im ausgehärteten Zustand /143/.

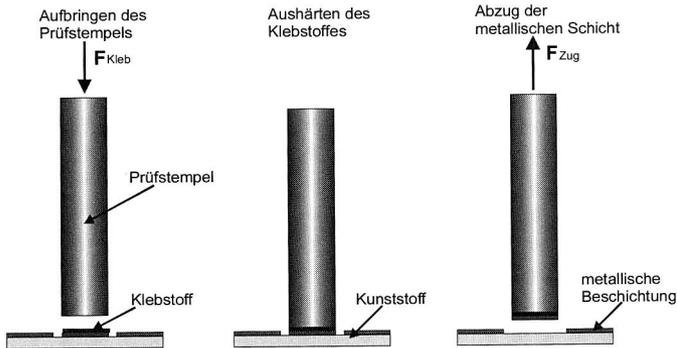


Abbildung 3. 6: Prinzip und Durchführung des Stirnzugversuches

Die Haftung (Stirnzugfestigkeit) ist durch nachfolgende Gleichung festgelegt:

$$\varphi = 4F/(\pi \varnothing^2) \quad (\text{Gleichung 3. 4})$$

mit:

$\varphi$  = Stirnzugfestigkeit in MPa

$F$  = Abreißkraft in N

$\varnothing$  = Durchmesser des Kontaktkörpers (Stempel) in mm

Die Maßeinheit ist somit MPa, in der Industrie und in der Literatur ist der Wert  $N/mm^2$  beziehungsweise die Maximalkraft  $N$  geläufiger. Innerhalb dieser Versuche wurde die Stempelfläche von  $20 \text{ mm}^2$  festgelegt, wodurch man die Werte in  $N/mm^2$  durch Multiplizieren der Ergebnisse mit vier und die Werte in  $N$  durch Multiplizieren mit  $1/5$  erhielt.

### 3.4.1 Einflußgrößenuntersuchung bei Messungen nach DIN EN 582

Die Durchführung des Stirnzugversuches brachte jedoch eine Vielzahl von Problemen mit sich. Experimentelle Untersuchungen zur Reproduzierbarkeit des Stirnzugversuches ergaben, daß diese nur dann erzielt werden konnten, wenn verschiedene Voraussetzungen erfüllt waren.

So mußte zur Ermittlung der Haftung zwischen dem Trägermaterial Kunststoff und der metallischen Schicht gelten, daß die Kohäsion des verwendeten Klebstoffes (1) sowie dessen Adhäsion gegenüber dem Prüfstempel (2) und der zu prüfenden Metallschicht (3) und die Kohäsion der metallischen Schicht höher war wie deren Adhäsion mit dem Trägermaterial (4). Weiterhin mußte die Kohäsion innerhalb des Trägermaterials (hier Thermoplast) höher sein, als die übrigen auftretenden Adhäsions- und Kohäsionskräfte.

Als wesentliche Prüfbedingung ergab sich somit:

$$F_{koh1}, F_{adh12}, F_{adh13}, F_{koh3} > F_{adh34} < F_{koh4} \quad (\text{Gleichung 3. 5})$$

mit

$F_{koh1}$  = Kohäsion Klebstoff

$F_{adh12}$  = Adhäsion Klebstoff /Prüfstempel

$F_{adh13}$  = Adhäsion Klebstoff /Metallschicht

$F_{koh3}$  = Kohäsion Metallschicht

$F_{adh34}$  = Adhäsion Metallschicht /Trägermaterial

$F_{koh4}$  = Kohäsion Trägermaterial

Die Kleberdosierung mußte bei jeder Versuchsdurchführung identisch sein. Denn bei Unterschreitung eines bestimmten Mindestvolumens des Klebstoffes war die Klebefläche nicht im ausreichenden Maße benetzt, bei Überschreitung des Volumens hingegen kam es während des Klebevorgangs zum Herausquellen des Klebstoffes aus dem Fügspalt, was zu einer Vergrößerung der Abzugsfläche und somit ebenfalls zu einer Verfälschung des Meßergebnisses führte. Außerdem durfte die Aushärtung des verwendeten Klebers weder Auswirkungen auf das thermoplastische Trägermaterial, noch auf die Verbindung Kunststoff/Metallschicht haben. Dies war besonders kritisch, wenn zum Abbinden des Klebstoffes Temperaturen über 100 °C notwendig waren, da es bei diesen Temperaturen bereits zu Brown'schen Molekularbewegungen kommen kann, die wiederum Einfluß auf den Haftverbund nehmen können /47/. Bei kraftaushärtenden Klebstoffen mußte weiterhin mindestens bis zum Abbinden des Klebers die Kraft konstant aufgebracht werden.

Als ein wesentliches Problem der Versuchsdurchführung stellte sich das exakt senkrechte Aufbringen des Prüfstempels heraus (Abbildung 3. 7), um ein momentenfreies Einspannen der Probe in die Zugprüfmaschine zu gewährleisten. Durch die relativ kleine plangedrehte Fügestelle des Prüfstempels, war es schwierig, diesen parallel zur Flächennormale der zu prüfenden Oberfläche aufzubringen. Zusätzlich wurde dies durch die viskosen Eigenschaften des aufgetragenen Kleb-

stoffes erschwert. Die Klebstoffaushärtung bis zur Endfestigkeit stellte ein weiteres Problem dar. Zum einen war es bei Aushärtezeiten von mehreren Stunden nicht möglich die Fügestelle bei kraftaushärtenden Klebern manuell mit einer konstanten Kraft über die gesamte Zeit zu belasten, zum anderen kam es bei einer beschleunigten Aushärtung in einem Ofen vermehrt zur Neigung des Prüfstempels aufgrund ungleichmäßiger Aushärtung des Klebstoffes und den damit verbundenen Schubkräften.

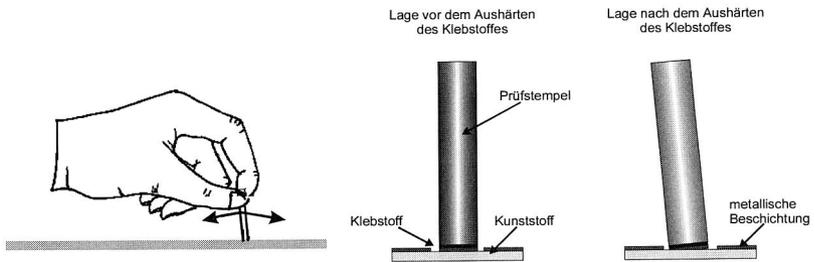


Abbildung 3. 7: Nicht senkrechte Positionierung durch manuelles Positionieren und thermische Einflüsse während der Aushärtung des Klebstoffes

Um den Einfluß von Querkräften der umgebenden metallischen Schicht auf das Meßergebnis der definierten Prüffläche zu vermeiden, war es notwendig die metallische Schicht auf der Kunststoffoberfläche entsprechend dem Umfang des Prüfstempels zu durchtrennen.

Durch die vorwiegend manuelle Probenvorbereitung, ergaben sich zwangsweise in allen oben aufgeführten Punkten Probleme, wodurch die Reproduzierbarkeit von Ergebnissen nahezu ausgeschlossen war. In der Industrie wird sich teilweise damit beholfen, daß neben dem quantitativen Wert eine qualitative Wertung mitgeführt wird, die eine bessere Vergleichbarkeit der einzelnen Ergebnisse gewährleisten soll. Diese Wertung kann in Anlehnung an den Gitterschnitttest (DIN 53151) /121/ oder in Anlehnung an eine Wertung nach K.-A. van Oeteren durchgeführt werden /26; 171/. Durch die Einführung eines qualitativen Wertefaktors wird somit versucht die mangelnde Reproduzierbarkeit des Stirnzugverfahrens auszugleichen, welches jedoch lediglich als Hilfsmittel für Versuche angesehen werden kann, die man nicht mit anderen Werten vergleichen will.

### 3.4.2 *Entwicklung und Aufbau einer Prüfvorrichtung*

Somit war es notwendig, eine Vorrichtung zu entwickeln, die eine reproduzierbare Durchführung des Stirnzugversuches nach DIN EN 582, bei Minimierung der in Kapitel 3.4.1 genannten Einflußfaktoren, garantierte<sup>1</sup>. Zur reproduzierbaren Durchführung der Messungen waren nachfolgende Randbedingungen von der Prüfvorrichtung und den zugehörigen Prüfkörpern zu erfüllen:

- Die Stirnfläche des zylindrischen Prüfkörpers muß sich exakt im 90° Winkel zur Seitenfläche desselben befinden.
- Der Prüfkörper muß 90° zur prüfenden Oberfläche aufgebracht werden.
- Aufspannung und Abzug der Probekörper muß innerhalb derselben Vorrichtung durchgeführt werden.
- Die metallische Schicht muß im Umfang des Prüfkörpers eingekerbt werden.
- Während der Durchführung des Klebevorganges soll durch direkte Zufuhr von Wärme und/oder Kraft die Haftfestigkeiten des Klebstoffes maximiert und Aushärtezeiten minimiert werden.
- Die Einleitung der zum Abzug notwendigen Kraft muß kontinuierlich und stoßfrei erfolgen.

Bedingungen (1), (2) und (3) sollten das Einbringen von Querkräften auf die zu messende Stelle und Bedingung (4) sollte die Einwirkung von Querkräften bei der Durchführung des Stirnzugversuches vermeiden. Im folgenden wird der Aufbau der Abzugsvorrichtung (auch Pull-Tester genannt) näher beschrieben.

Eine massive Stahlgrundplatte, zwei senkrecht justierte Präzisionsstahlwellen, sowie ein oberes Querjoch, das mittels Präzisionskugellager an den Führungswellen gehalten wurde, stellten den Maschinenrahmen dar. Hiermit wurde sichergestellt, daß die Bewegung des Aufnahmekopfes parallel zur Flächennormale des Prüflings erfolgte. Über drei zur Erfassung der auftretenden Zugkräfte dienende Piezo-Kraftaufnehmer wurde ein doppelt wirkender Pneumatikzylinder am oberen Querjoch der Vorrichtung aufgehängt, der zum einen die Positionierung des unterhalb des Zylinders befindlichen Aufnahmekopfes und zum anderen die Durchführung des Stirnzugversuches ermöglichte. Durch den Aufnahmekopf war das senkrechte Aufbringen des Prüfstempels, das definierte Aushärten sowohl eines warmaushärtenden Klebers mittels integrierter Heizung, als auch eines kraftaus-

---

<sup>1</sup> Konstruktion und Aufbau wurden mit Unterstützung von Herrn Dipl.-Ing. W. Meyer innerhalb des Verbundprojektes OSTec /171/ durchgeführt.

härtenden Klebstoffes über einen weiteren Pneumatikzylinder und das Einspannen zum Abziehen des Prüfstempels gewährleistet. Das untere Ende des Aufnahmekopfes bestand aus einem gehärteten Stahleinsatz um die Metallschicht entsprechend der Stempelfläche zu durchtrennen.

Entscheidend für die Dimensionierung und zur Auswahl des doppelt wirkenden pneumatischen Zylinders war die Bestimmung der beim Abzugsversuch erforderlichen Kraft. Die Gesamtabzugskraft wurde über die maximale Haftfestigkeit der zum Einsatz kommenden Klebstoffe bestimmt, die bei  $102 \text{ N/mm}^2$  /115/ lag und somit bei einer Stempelfläche von  $20 \text{ mm}^2$  und einem Sicherheitsfaktor von 2, mit  $4080 \text{ N}$  ermittelt wurde. Die zum Verkleben der Prüfstempel erforderliche Kraft beim Einsatz kraftaushärtender Kleber schwankte je nach Typ zwischen  $0,5$  und  $2,0 \text{ N/mm}^2$ , was somit bei gleichem Sicherheitsfaktor einer Gesamtkraft von maximal  $80 \text{ N}$  entsprach. Die Auswahl der pneumatischen Zylinder erfolgte mit Hilfe eines Druck-Kraft-Diagrammes der Zulieferfirma /129/.

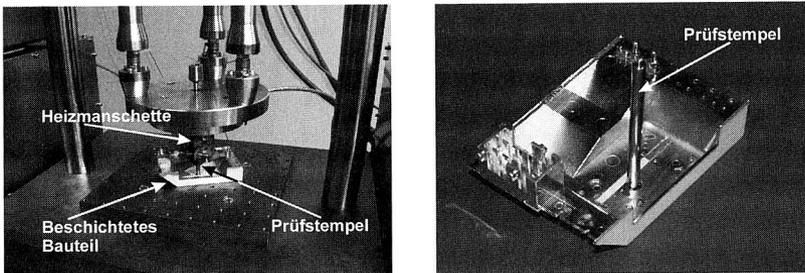


Abbildung 3. 8: Justier-/Schneideeinheit: Aufsetzen, Abscheren, Verkleben und Messen in einer Aufspannung bei exakt senkrechtem Aufsetzen des Prüfstempels

Für den Einsatz warm-aushärtender Klebstoffe mußte zusätzlich eine regelbare Heizvorrichtung für Temperaturen bis zu  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  in den Aufnahmekopf integriert werden (Abbildung 3. 8). Um eine Lage von  $90^\circ$  über die Länge des Prüfstempels beziehungsweise des Verfahrensweges mit einer maximalen Abweichung von  $0,5^\circ$  zu erreichen, wurden an jeder Seite des Joches zwei Lager angebracht die ein maximales Lagerspiel von  $57 \text{ }\mu\text{m}$  aufwiesen /125/. Bei einer wirksamen Länge der Lager von  $50 \text{ mm}$ , ergab sich eine maximale Winkelabweichung von  $7'50''$  aus der Senkrechten. Hinzu kam der vom Lager mögliche Ausgleich von bis zu  $30'$  von Wellenverformungen. Bei Einsatz von zwei Lagern je Seite (Abbildung 3. 9), deren Abstand inklusive wirksamer Länge  $300 \text{ mm}$  betrug, ergab sich eine maximal Abweichung von  $1'18''$ , was somit weit unter den tolerierten  $30'$  lag.

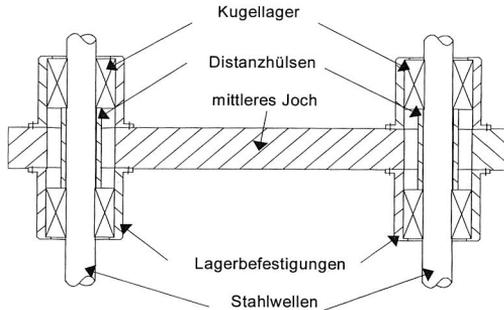


Abbildung 3. 9: Aufbau mittleres Joch mit vier Lagern

Die pneumatische Antriebstechnik wurde aufgrund ihrer hohen Belastbarkeit und Robustheit, der einfachen Erzeugung der Linearbewegung, der hohen Modularität und des geringen finanziellen Aufwandes gegenüber vergleichbaren Antriebsalternativen, ausgewählt.

Jedoch war somit eine Schaltung notwendig, welche sowohl die Linearbewegung des doppelt wirkenden, als auch die Kräfteinbringung des einfach wirkenden Pneumatikzylinder steuerte. Für die Linearbewegungen des doppelt wirkenden Zylinders genügte prinzipiell eine pneumatische Schaltung mit einem 4/2-Wege-Ventil /129/. Infolge der geforderten Positioniergenauigkeit der Vorrichtung war diese Schaltung aufgrund unerwünschter Kolbenbewegungen, bis sich Luftdruckverhältnisse im Bereich vor und nach der Abluftdrossel ausgeglichen haben, ungeeignet. Somit wurde ein 5/3-Wege-Ventil eingesetzt, mit welchem es durch regelbare Abluftdrosseln möglich war, die Hubgeschwindigkeit des Zylinders zu verändern. Hiermit konnte der sofortige Stillstand des Kolbens bei Loslassen des manuellen Ventils, sowie eine Stabilisierung der Kolbenlage für einen längeren Zeitraum auch unter Last, gewährleistet werden /129/.

Diese Schaltung wurde noch durch ein 2/1-Wege-Ventil ergänzt, mit welchem die Elemente des einfach wirkenden Pneumatikzylinder, sowie aus Sicherheitsgründen der doppelt wirkende Zylinder nur im Zweihandbetrieb, betätigt wurden (Abbildung 3. 10).

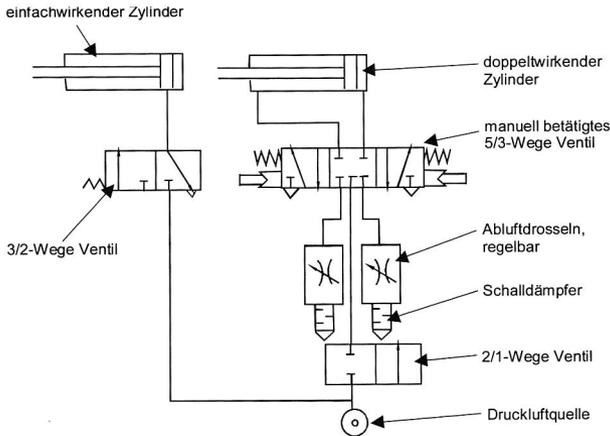


Abbildung 3. 10: Pneumatischer Schaltplan der Klebe-/Abzugsvorrichtung

Zur Aufnahme der Zug- und Druckkräfte wurden drei parallel geschalteter Piezo-Kraftaufnehmer unterhalb der Lager platziert (Abbildung 3. 11), um einen Einfluss der Reibung auf die Kraftaufnahme zu verhindern.

In Abhängigkeit des doppelt wirkenden Zylinders war der Meßbereich der Kraftaufnehmer bei mindestens  $\pm 4,7$  kN (Druckkraft des Zylinders) zuzüglich der an der Vorrichtung bewegten Masse (Gewichtskraft  $300 \text{ N}^1$ ) festgelegt. Zur Analog-/Digitalumwandlung der Meßdaten der Kraftaufnehmer wurde ein Ladungsverstärker mit Kontrollmonitor herangezogen, der sowohl die Momentan- als auch die Maximalkraft während einer Versuchsdurchführung darstellte und der zusätzlich über eine serielle RS 232 Schnittstelle diese Daten zur weiteren Auswertung an einen Personal Computer übertragen konnte. Zur Kalibrierung des Ladungsverstärkers auf die Empfindlichkeit der Kraftaufnehmer (Herstellerangabe  $4 \text{ pC/N}$ ) wurden diese hierzu auf der Grundplatte einer herkömmlichen Zugprüfmaschine befestigt. Als Verbindungselement zwischen den Kraftaufnehmern und der Zugfeder wurde eine verzugs- und verwindungssteife Stahlplatte eingesetzt. Zur Kalibrierung wurden Zugkräfte bis  $400 \text{ N}$  in Schritten von  $50 \text{ N}$  auf die Kraftaufnehmer, entsprechend den Angaben des Herstellers der Zugprüfmaschine, aufgebracht und abgeglichen.

<sup>1</sup> Das Gewicht des Mitteljochs, inkl. der Anbauteile wie Aufnahmekopf und Lager betrug etwa  $30 \text{ kg}$ .

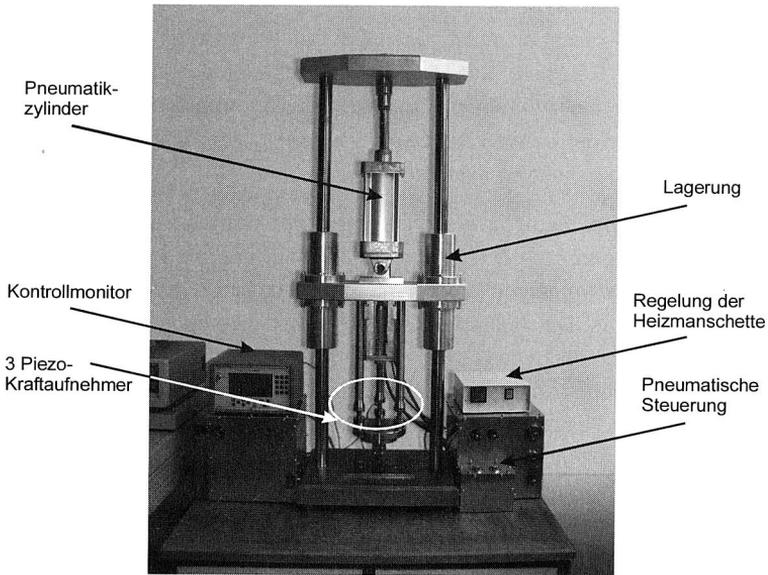


Abbildung 3. 11: Betriebsfertige Vorrichtung zur Bestimmung der Haftfestigkeit nach DIN EN 582

Unterhalb der Piezo-Kraftaufnehmer befand sich der Aufnahmekopf mit der Justier-/Schneideinheit. Mit diesem Bauteil erfolgte die exakte Positionierung der Prüfstempel über eine eng tolerierte Innenbohrung, das Einkerbungen der metallisierten Oberfläche durch eine gehärtete Schneidkante sowie die Einspannung der verklebten Prüfstempel zur Durchführung des Stirnzugversuches. Die Justier-/Schneideinheit war austauschbar, so daß auch Einheiten mit anderen Innendurchmessern eingesetzt werden konnten. Zum Einkerbungen der metallisierten Oberflächen wurde die Aufhängung für diese Einheit zusätzlich drehbar gelagert. In Abbildung 3. 11 ist die verwendete betriebsfertige Vorrichtung abgebildet.

### 3.4.3 Beschreibung des Prüfvorgangs und Evaluierung der Prüfvorrichtung

Auf das Reinigen von metallischen Oberflächen vor der Verklebung mit dem Prüfkörper sollte nicht verzichtet werden, da Verunreinigungen und Oxidschichten prinzipiell haftungshemmend wirken. Verunreinigungen und Reaktionsprodukte können der Grund für die Existenz sogenannter Weak-Boundary-Layers sein, an denen das Versagen des Haftungsverbundes stattfinden kann. Zum Entfernen von Verunreinigungen und Oxidschichten eigneten sich Detergenzien, waschmittelak-

tive oder auf wäßriger Basis aufgebaute alkalische Produkte, die sich sowohl gegenüber der Metallschicht als auch gegenüber den Kunststoffen neutral verhielten /29; 99/. Nach der Reinigung der Metallschicht befindet sich eine vorbehandelte Oberfläche jedoch nicht in einem Zustand des chemischen oder elektrischen Gleichgewichts und ist daher sehr reaktiv, welches eine schnelle Verarbeitung nach der Reinigung notwendig machte.

Zur Durchführung des Stirnzugversuches wurde der metallisierte Kunststoffkörper mit Spannwerkzeugen auf der Grundplatte befestigt und die Metallschicht durch die Scherkante des Aufnahmekopfes, entsprechend dem Durchmesser des Prüfstempels durchtrennt. Der Aufnahmekopf wurde mit Hilfe des pneumatischen Zylinders zur Metalloberfläche hin abgesenkt, bei Bedarf konnte durch eine manuelle Drehung des Aufnahmekopfes um den axialen Mittelpunkt dieser Vorgang noch unterstützt werden. Anschließend wurde in die Führungshülse des Aufnahmekopfes der zylindrische Prüfstempel und auf den metallisierten Probekörper der Klebstoff aufgebracht. Je nach Spezifikation des Klebers erfolgte nun die Aushärtung in der Vorrichtung durch Wärme und/oder durch Kraftaufbringung.

Nach der Aushärtung des Klebstoffes wurde der Prüfstempel mit Hilfe der Spannvorrichtung im Aufnahmekopf fixiert und die zum Abzug erforderliche Kraft wurde mit Hilfe des doppelt wirkenden Pneumatikzylinder aufgebracht. Die Kraftmessung erfolgte über die bereits beschriebenen Piezo-Kraftaufnehmer und den Ladungsverstärker mit LCD-Display. Die maximal gemessene Kraft entsprach der Stirnzugfestigkeit der metallischen Schicht und konnte entsprechend der Prüfstempelfläche auf die Einheiten  $N/mm^2$  oder  $MPa$  umgerechnet werden.

Zur Verifizierung der Vorrichtung wurden Untersuchungen zur Validität<sup>1</sup> und Reliabilität<sup>2</sup> durchgeführt. Zur Überprüfung der Wiederholgenauigkeit (Standardabweichung und Mittelwert) der Vorrichtung wurden Aluminium-Probekörper S3 nach DIN 53 504 /119/ angefertigt, die sowohl in dieser als auch in einer zertifizierten Zugprüfmaschine eingespannt, bis zum Bruch des Materials gezogen und miteinander verglichen wurden. Es hat sich gezeigt, daß die Standardabweichung bei der neuen Vorrichtung wesentlich geringer ( $\sigma = 9,84 N/mm^2$  bei einem Mittelwert von  $\varphi_{MW} = 495,81 N/mm^2$ ) ausfiel als bei der zertifizierten Zugprüfmaschine ( $\sigma = 20,11 N/mm^2$  bei einem Mittelwert von  $\varphi_{MW} = 411,43 N/mm^2$ ).

---

<sup>1</sup> Validität: Gültigkeit

<sup>2</sup> Reliabilität: Verlässlichkeit

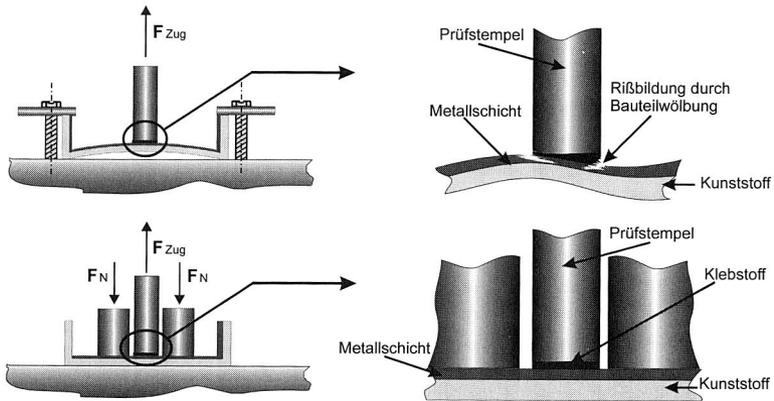


Abbildung 3. 12: Verhalten des Bauteils während des Stirnzugversuches mit und ohne Niederhalter

Während der Versuchsdurchführung wurde beobachtet, daß unterhalb der Stirnfläche des Stempels der Kunststoff ausbrach. Die jeweilige Kraft, die zum Ausbruch führte, hing wiederum von der Kohäsionsfestigkeit des verwendeten Kunststoffes ab. Dies hätte bedeutet, daß ab dieser Grenze eine Messung nicht mehr möglich gewesen wäre, jedoch auch die Adhäsion nicht gesteigert werden hätte können, da der Kunststoff bereits vor dem Bruch der Metallschicht mit der Oberfläche versagte. Nähere Untersuchungen haben gezeigt, daß eine ungünstige Aufspannung während der Messung bei 3-D MID Bauteilen und der damit verbundenen Verwindung einen frühzeitigen Ausbruch des Kunststoffes verursachte. So konnte sich beim Aufbringen von Zugkräften der Bauteilboden, auf dem die Prüfstempel aufgeklebt waren, vor dem Ab- beziehungsweise Ausriß entsprechend der Kraftereinwirkung nach oben wölben, wodurch Spannungsspitzen im Bereich der Einkerbung entstanden, die zum frühzeitigen Werkstoffversagen führten. Aufgrund einer Verformung des Bauteils (Abbildung 3.12 oben), kam es dann letztlich zum Ausschalen des Kunststoffes. Um dieses Problem zu umgehen, wurde stets ein Niederhalter eingesetzt, der das Bauteil um den Prüfstempel herum auf die Grundplatte preßte (Abbildung 3. 12 unten).

Bei weiteren Meßreihen kam es bei sehr hohen Meßwerten trotz Niederhalter zu Ausrissen. Um sicherzustellen, daß hierbei die Kohäsion des Kunststoffes geringer als die Adhäsion des aufgetragenen Metalls zum Kunststoff war, wurden Schliffbilder vom Haftverbund Prüfstempel, Kleberschicht, Metallschicht und Kunststoff angefertigt und unter dem Auflicht-Mikroskop betrachtet. Es sollte un-

tersucht werden, ob der Kleber durch die Metallschicht hindurch drang und somit nicht nur mit der Metallschicht, sondern auch mit dem Kunststoff einen Haftverbund einging. Optische Begutachtungen haben ergeben, daß kein Durchdringen des Klebers bis auf die Kunststoffschicht vorlag<sup>1</sup>. Die einzelnen Grenzflächen konnten deutlich voneinander getrennt identifiziert werden. Ein Einfluß des Klebers aufgrund einer Durchdringung bis auf die Kunststoffoberfläche konnte somit ausgeschlossen werden.

Nachdem hiermit die Validität<sup>2</sup> der Messungen als gegeben angesehen werden konnte, mußte zur endgültigen Verifizierung der Vorrichtung noch die Reliabilität untersucht werden. Eine Messung gilt dann als reliabel, wenn das Ergebnis der Messung unabhängig von einem bestimmten Meßvorgang ist, beziehungsweise die Wiederholbarkeit eines Ergebnisses bei mehreren Messungen eines Konstrukts unter der Voraussetzung, daß sich das Konstrukt selbst nicht ändert, sichergestellt ist /20/. Hierfür wurde die Stirnzugfestigkeit zwei voneinander unabhängiger Lose, Kupfer beziehungsweise Kupfer-/Gold beschichteter 3-D MID Bauteile, vermessen.

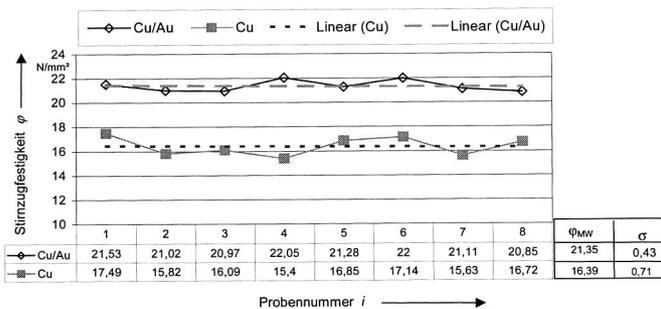


Abbildung 3.13: Messungen zur Reliabilität der Meßvorrichtung

Zum einen erwartete man, daß die Ergebnisse innerhalb einer Charge kaum streuten und zum anderen sich deutlich von der zweiten Charge unterschieden. Abbildung 3.13 zeigt in der unteren Kurve die Ergebnisse der ersten Charge, die um den Mittelwert von  $\varphi_{MW} = 16,39$  N/mm<sup>2</sup> streuten ( $\sigma = 0,713$ ). Dies entsprach in dem Intervall von 14,25 bis 18,53 N/mm<sup>2</sup> einem Vertrauensbereich von 99,7%<sup>3</sup>.

<sup>1</sup> Es muß hierbei jedoch eingeschränkt werden, daß keine der untersuchten Schichten dünner als 1,0 µm war.

<sup>2</sup> Eine Messung gilt als valide, wenn damit genau das gemessen wird, was gemessen werden soll /20/.

<sup>3</sup> Intervall des Vertrauensbereiches 99,7% wurde mit der Beziehung  $\varphi \pm 3\sigma$  ermittelt.

Die Ergebnisse der goldverstärkten Kupferschichten zeigten eine noch geringere Standardabweichung ( $\sigma = 0,49 \text{ N/mm}^2$ ) innerhalb dieser Charge, bei einem deutlich höheren mittleren Stirnabzugswert ( $\varphi_{MW} = 21,35 \text{ N/mm}^2$ ) als die erste Charge. Dies bewies, daß Messungen mit dieser Vorrichtung als reliabel eingestuft werden konnten. Das Intervall eines Vertrauensbereiches von 99,7% erstreckte sich somit von 19,88 bis 22,82.

Theoretisch durfte der Stirnabzugversuch im Gegensatz zur Schälfestigkeitsmessung nach DIN IEC 326 keine Schichtdickenabhängigkeit zeigen, was ein wesentlicher Vorteil dieses Verfahrens wäre. Zur Untersuchung wurden, analog zu den Messungen der Schichtdickenabhängigkeit nach DIN IEC 326 (siehe Kapitel 3.1), vier unabhängige Chargen Kunststoff auf unterschiedliche Schichtdicken mit Kupfer galvanisch verstärkt und deren Haftfestigkeit nach beiden Meßverfahren gemessen. Die Meßwerte des Schälwiderstandes zeigten den für diesen Test typischen Einfluß der Schichtdicke (vgl. Abbildung 3. 14). Im Gegenzug war der Einfluß der Schichtdicke beim Stirnzugversuch mit dem Pull-Tester nahezu bedeutungslos im Verhältnis zur Streuung. Der Mittelwert der Standardabweichung von  $\varphi$  wurde mit  $1,11 \text{ N/mm}^2$  ermittelt und der Einfluß der Schichtdicke  $d$  von  $10 \mu\text{m}$  bis  $30 \mu\text{m}$  betrug  $1,08 \text{ N/mm}^2$ . Der Mittelwert  $\varphi_{MW}$  der Messung des Pull-Testers bei dieser Schicht konnte mit  $8,60 \text{ N/mm}^2$  angegeben werden.

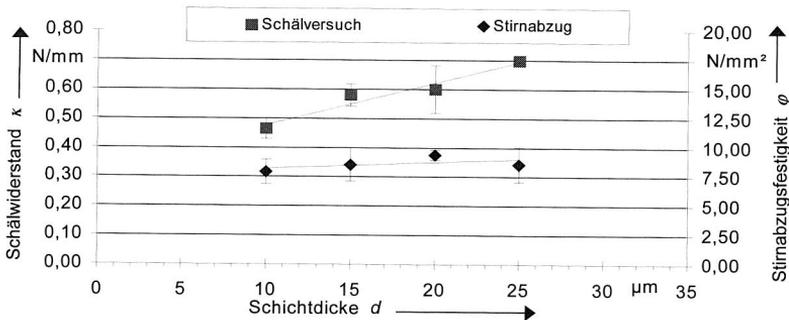


Abbildung 3. 14: Einfluß der Schichtdicke beim Stirnzugversuch im Vergleich zur Schälfestigkeit

Somit konnte gezeigt werden, daß die Schichtdicke der Metallschicht keinen Einfluß auf das Ergebnis der Messung mit dem Pull-Tester hatte.

### 3.5 Übertragbarkeit der DIN EN 582 auf DIN IEC 326

Nachdem nun sowohl die Voraussetzungen zur definierten Messung von Haftfestigkeiten nach dem Stirnzugverfahren als auch nach dem Schälversuch erfüllt waren, wurde untersucht, ob ein funktioneller Zusammenhang zwischen diesen beiden Ergebnissen bestand. Dies war bisher aufgrund fehlender reproduzierbarer Durchführung der Meßverfahren nicht möglich. Um diesen vermuteten Zusammenhang zwischen dem Ergebnis des Stirnzugverfahrens in  $N/mm^2$  und des Schälwiderstandes in  $N/mm$  ermitteln zu können, wurden mehrere Chargen unterschiedlicher Kunststoffe mit unterschiedlichen Schichtdicken mit Kupfer metallisiert und deren Haftfestigkeit entsprechend der Norm IEC 326 ermittelt. Die Meßwerte wurden mit Hilfe der in Kapitel 3.3.2 beschriebenen Software ausgewertet und auf die Schichtdicke  $35 \mu m$  normiert (siehe Kapitel 3.3.1). Anschließend wurden die Chargen mit dem Pull-Tester auf deren Stirnzugfestigkeit  $\varphi$ , entsprechend DIN EN 582 überprüft, wobei fünf Meßwerte pro Leiterbahn aufgenommen wurden.

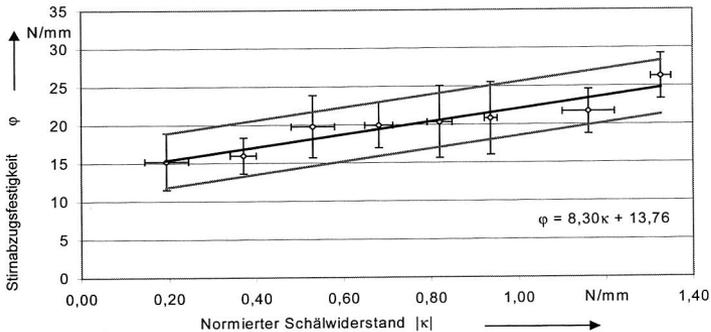


Abbildung 3. 15: Zusammenhang Stirnabzugsfestigkeit  $\varphi$  und Schälwiderstand  $|\kappa|$

Nach der Auswertung ergab sich der in Abbildung 3. 15 dargestellte Zusammenhang, was erstmals eine Abschätzung zwischen Haftwerten  $\varphi$  in  $N/mm^2$  und  $\kappa$   $N/mm$  zuließ. Die Relation konnte mathematisch durch die Geradengleichung 3.6 (in Abbildung 3. 15 durch eine lineare mittlere Trendlinie dargestellt), bei Berücksichtigung des arithmetischen Mittelwertes der Standardabweichungen  $\sigma$  in x- und y-Richtung, ausgedrückt werden (in Abbildung 3. 15 sind die arithmetischen Mittelwerte der y-Richtung durch eine obere und untere lineare Trendlinie dargestellt). Bei der Umrechnung zur Abschätzung des jeweiligen Wertes war die Standardab-

weichung des exakt ermittelten Meßwertes wegzulassen. Da es sich nicht um einen physikalischen Zusammenhang handelte, ergaben sich nicht die korrekten Einheiten aus der mathematischen Formel. Diese waren somit während der Umrechnung zu vernachlässigen und anschließend entsprechend dem errechneten Wert zu ergänzen. Weiterhin mußte berücksichtigt werden, daß Werte  $|\kappa| < 0,17$  N/mm beziehungsweise  $\varphi < 10,22$  N/mm<sup>2</sup> nicht in dieser Definition enthalten waren, da hier keine Relation ermittelt werden konnte.

$$\varphi \pm \sigma_{\varphi MW} \approx 8,30 |\kappa| + 13,76 \pm \sigma_{\kappa MW} \quad (\text{Gleichung 3. 6})$$

mit:

$\varphi$  = Stirzugfestigkeit in N/mm<sup>2</sup>

$|\kappa|$  = Normierte Schälfestigkeit in N/mm

$\sigma_{\kappa MW}$  = Arithmetischer Mittelwert der Standardabweichung der Schälfestigkeit in N/mm

$\sigma_{\varphi MW}$  = Arithmetischer Mittelwert der Standardabweichung der Stirzugfestigkeit in N/mm<sup>2</sup>

$|\kappa| \approx 0,17$  N/mm;

$\varphi \approx 10,22$  N/mm<sup>2</sup>

Die Mittelwerte der Standardabweichungen ergaben folgende Werte:

$$\sigma_{\varphi MW} \approx \pm 3,54$$

$$\sigma_{\kappa MW} \approx \pm 0,03$$

Trotz der noch relativ groben Abschätzung des jeweilig errechneten Wertes hatte diese einen großen praktischen Nutzen. Zum einen konnten die gemessenen Werte  $\varphi$  dünner Schichten mit den Anforderungen  $|\kappa|$  an dicken Schichten verglichen werden, was es erlaubte eine Mindestanforderung an Werten  $\varphi$  in N/mm<sup>2</sup> festzulegen. Womit auch die Qualität einer dünnen Schicht bzgl. Haftfestigkeit exakter bestimmt werden konnte. Zum anderen ließen sich Meßwerte  $\varphi$  in N/mm<sup>2</sup> direkt mit Meßwerten  $|\kappa|$  in N/mm vergleichen. Bei Ausschluß weiterer Einflüsse während eines galvanischen Nachverstärkungsprozesses des Kupfers konnten auch Aussagen über zu erwartende Schälwiderstände bereits an dünnen Schichten (> 1 µm) getroffen werden, ohne dicke Schichten zu erzeugen. Dies bedeutete einen erheblichen Vorteil bei der Entwicklung von Schichtsystemen durch kürzere und damit schnellere Aussagen über die Wirkung von chemischen, physikalischen und mechanischen Vorbehandlungen oder Haftvermittlerschichten. In Zukunft sind somit verminderter Materialverbrauch und geringere Entwicklungskosten durch diese erstmalige Abschätzung zu erwarten.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Mathematisch kann man das Problem auch durch Algorithmen bei unscharf formulierter Menge ausdrücken /163/.

## 4 Einsatz metallisierbarer Haftvermittler in Verbindung mit der Laserstrukturierung

Grundlage der vorgestellten Verfahren ist eine polymere Beschichtung, entsprechend der Beschreibung in Kapitel 2.2.1, welche auf die Oberfläche von Thermoplasten aufgebracht und entweder vor der Metallisierung oder im Anschluß daran, mit einem Laserstrahl strukturiert wird. Hierbei wird somit entweder ein voll-additives oder subtraktives Verfahrensprinzip des Leiterbahnzugaufbaus verfolgt /9/.

<i>Kunststoffname</i>	<i>Einteilung nach DIN 7724</i>	<i>Eigenschaften und Füllstoffe</i>
Polyamid	Teilkristalliner Thermoplast	Nicht transparent; 15% Glasfasern
Acrylnitril/ Butadien/ Styrol - Polycarbonat - Blend	Amorpher Thermoplast	Nicht transparent; Keine Füllstoffe
Polycarbonat	Amorpher Thermoplast	Transparent Keine Füllstoffe

Tabelle 4. 1: Übersicht über die verwendeten Thermoplaste

Die Untersuchungen wurden repräsentativ an drei technischen Thermoplasten, Polyamid 6 (PA 6), Acrylnitril/Butadien/Styrol - Polycarbonat - Blend (ABS/PC-Blend) und Polycarbonat (PC) (Tabelle 4. 1) in Verbindung mit einer lösemittelhaltigen und einer wäßrigen Sprühformulierung eines Primers<sup>1</sup>, dessen mittlere Schichtdicke maximal 16 µm war, durchgeführt.

### 4.1 Lasergestütztes Additivverfahren metallisierbarer Haftvermittler<sup>2</sup>

Additive Verfahren zur Herstellung von Leiterbahnstrukturen zeichnen sich dadurch aus, daß die Metallschicht erst nach dem Herstellen des Leiterbahnlayouts aufgebracht wird. Dies hat den Vorteil, daß nur diejenigen Bereiche metallisiert werden, die im späteren Leiterbahnbild elektrisch leitend sein sollen. Der Leiterzugaufbau geschieht hierzu mit Hilfe stromloser Kupferbäder /82/.

<sup>1</sup> Unter dem Handelsnamen Baymetec® der Fa. Bayer AG auf dem Markt erhältlich.

<sup>2</sup> Bei der Durchführung der Versuchsreihen wurde der Verfasser durch Herrn Dipl.-Ing. G. Renner, Laser & Engineering GmbH, Herrn Dr. G.D. Wolf, Bayer AG und Herrn Dipl.-Ing. T. Muschweck unterstützt.

Das Primersystem wurde zu diesem Zweck auf die Oberfläche des Polymers aufgebracht, getrocknet und anschließend mit einem Excimerlaser strukturiert, wobei der mit einer Maske geformte Laserstrahl innerhalb der bestrahlten Bereiche den gesamten Haftvermittler abtrug. An diesen Stellen durfte sich somit während der anschließenden chemischen Metallisierung kein Kupfer abscheiden. Der prinzipielle Verfahrensablauf ist in Abbildung 4. 1 dargestellt.

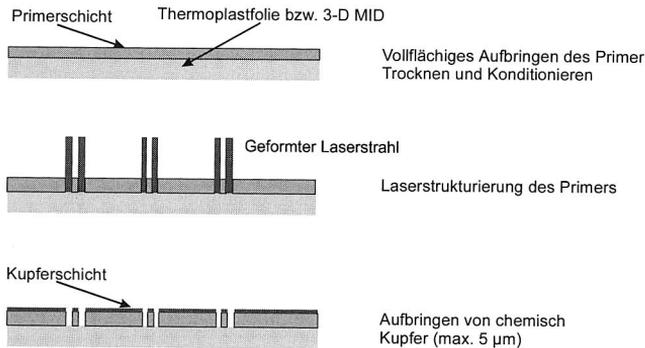


Abbildung 4. 1: Prinzipieller Verfahrensablauf des additiven Verfahrens

Die Anwendung dieser erstmalig untersuchten Kombination der Laserstrukturierung von Primersystemen erweist eine Reihe von Vorteilen:

- Bei Verwendung entsprechender Masken können auch komplexe Leiterbahnstrukturen innerhalb weniger Laserpulse hergestellt werden.
- Die Anzahl der Verfahrensschritte wird im Vergleich zu den bisher eingesetzten Laserstrukturierungsverfahren deutlich reduziert /198/.
- Um den Haftvermittler haftfest mit dem Kunststoff zu verbinden sind keine mechanischen oder ökologisch bedenkliche, chemische Vorbehandlungsverfahren der Substratoberfläche notwendig.
- Ein Aufbringen und anschließendes Strippen eines Photoresists beziehungsweise eines Ätzresists ist nicht notwendig.
- Additivtechnologie gewährleistet im Vergleich zur konventionellen Subtraktivtechnik höhere Umweltverträglichkeit.
- Der Einsatz der Lasertechnologie zur Strukturierung läßt ein hohes Auflösungsvermögen bis in den Feinstleiterbereich ( $< 50 \mu\text{m}$ ) erwarten /77/.

#### 4.1.1 Voruntersuchungen zum Einsatz des Excimerlasers

Für die Untersuchung kam ein wassergekühlter Excimerlaser<sup>1</sup> mit einer Wellenlänge von  $\lambda = 248$  nm zum Einsatz, der bei einer Puls wiederhol frequenz  $f_P$  von 200 Hertz eine Pulsenergie  $E_P$  von maximal 460 mJ erreicht. Die Pulsdauer  $t_i$  betrug 25 ns und der Rohstrahl hatte einen Strahlquerschnitt von circa (7-10) mm x 20 mm bei einer Divergenz  $\theta_0$  von (2 x 3) mrad<sup>2</sup>. Die Kenngrößen sind in Tabelle 4. 2 zusammengefaßt.

Lasermedium	KrF	Strahlabmessungen	7 - 10 mm x 20 mm
Anregungsart	Gasentladung	Divergenz $Q_x \times Q_y$	2 x 3 mrad <sup>2</sup>
Wellenlänge $\lambda$	248 nm	Gasfüllung	Fluor, Krypton, Neon
Pulsdauer $t_i$ (FWHM)	25 ns	Wärmeaustausch	H <sub>2</sub> O - Kühlung
Pulsenergie $E_P$	460 mJ	Elektr. Versorgung	380 V / 16 A
Puls wiederhol frequenz $f_P$	max. 200 Hz	Vorionisierungsart	Funkenentladung
mittlere Leistung $P_L$	70 W bei 200 Hz	Leistungsstabilität	± 4 %

Tabelle 4. 2: Kenngrößen des verwendeten Excimerlaser

In der Literatur wurde bereits umfangreich über Modelle zum Abtrag von Polymeren mit Excimerlasern berichtet, die zum Teil gegensätzliche Darstellungen vertreten /1; 52/. Zum einen wird beschrieben, daß die hohe Photonenenergie der Excimerlaser-Strahlung eine photolytische Zersetzung bewirkt, wodurch es nach /66/ ermöglicht wird, Material nichtthermisch zu bearbeiten, da die abgetragenen Bereiche mit hoher kinetischer Energie von der Oberfläche entfernt werden und somit das Grundmaterial kaum thermische Erwärmung erfährt. In /67/ wird das Modell erweitert und ein photochemischer und photothermischer Prozeß unterschieden. Als Gemeinsamkeit kann jedoch aufgegriffen werden, daß sich die abtragende Bearbeitung mit UV-Lasern durch einzigartige Kantenschärfe und minimale thermische Belastung des Materials auszeichnet /66/. Diese Eigenschaften und dessen in der Industrie bewährter Einsatz innerhalb der Mikrotechnologie, gaben den Ausschlag zur Durchführung der Versuche zur Strukturierung eines Haftvermittlers auf polymerer Basis mit einem Excimerlaser.

Weiterhin war bei erfolgreichen Versuchen die Möglichkeit gegeben, sowohl das Polymer, z.B. für Mikrolöcher als auch den Primer mit demselben Werkzeug zu bearbeiten.

<sup>1</sup> Zum Funktionsprinzip des Excimerlasers siehe /11; 19; 30; 56; 66; 72; 185/

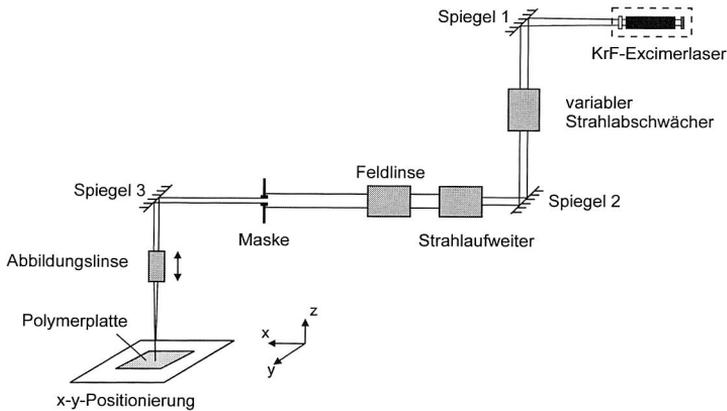


Abbildung 4. 2: Aufbau der optischen Komponenten des Lasersystems

Der optische Aufbau des verwendeten Lasersystems ist in Abbildung 4. 2 skizziert. Mit diesem wurde der vom Laser bereitgestellte Rohstrahl geformt und auf die Bearbeitungsfläche geführt. Nach der Auskopplung des Laserstrahls aus der Kavität und der Umlenkung an Spiegel 1 durchlief der Rohstrahl einen variablen Strahlabschwächer, der es ermöglichte, die vom Laser gelieferte Pulsenergie stufenlos im Bereich von 3% bis 97% der Ausgangsenergie des Lasers einzustellen. In diesem Strahlabschwächer wurden zwei hintereinander liegende Quarzplatten jeweils um gleiche Winkelschritte gegeneinander verdreht. Es bestand somit die Möglichkeit, in Abhängigkeit des eingestellten Winkels, einen Teil des Laserlichts aus dem Strahl heraus zu reflektieren.

Nach Umlenkung an Spiegel 2 wurde der Rohstrahl durch einen Strahlaufler geführt, der im wesentlichen aus zwei Zylinderlinsen bestand, einer plankonkaven Zerstreuungslinse und einer plankonvexen Sammellinse. Der Strahlaufler ermöglichte die Expansion des Laserstrahls in der ursprünglich schmalen  $x$  - Richtung, wodurch ein annähernd quadratischer Strahlquerschnitt erzeugt werden konnte. Um die Energiedichte des so vorgeformten Laserstrahls zu erhöhen, wurde eine Feldlinse zwischen Strahlaufler und Abbildungsmaske positioniert. Die Feldlinsenoptik bestand ebenfalls aus einer plankonkaven Zerstreuungslinse und einer plankonvexen Sammellinse, deren Abstand zueinander verändert werden konnte. Hierdurch konnte die Brennweite der Feldlinse und somit die Konvergenz des Laserstrahls variiert werden. Mit Hilfe dieser Optik wurde der Strahlengang auf die Abbildungsmaske vorfokussiert.

Der durch eine entsprechende Maske geformte Strahl wurde anschließend an Spiegel 3 in die Vertikale umgelenkt, wobei auch das Koordinatensystem des Laserstrahls gespiegelt werden mußte, so daß es mit dem Koordinatensystem der x-y-Positionierung übereinstimmte. Lediglich für die Ausbreitungsrichtung  $z'$  des Laserstrahls gilt der genormte Zusammenhang  $z' = -z / 120/$ . Nach dem Durchlaufen eines höhenverstellbaren Abbildungsobjektivs, mit der die Fokuslage eingestellt werden konnte, wurde die Maske auf das zu bearbeitende Werkstück, welches auf dem x-y-Positioniertisch auflag, abgebildet. Der Verfahrtschicht war transputergesteuert und erreichte eine Positioniergenauigkeit von  $\pm 2 \mu\text{m}$  in x- und y-Richtung. Die Ansteuerung der Positioniereinheit erfolgte mit Hilfe eines PCs, über dessen Software dem Laser auch andere Daten wie z.B. Pulswiederholfrequenz und Pulsanzahl bereitgestellt werden konnten. Der Abbildungsmaßstab, mit dem die Maske auf das Werkstück projiziert wurde, konnte über das Verhältnis der Abstände Maske zu Abbildungslinse und Abbildungslinse zu Werkstück geändert werden.

#### 4.1.2 *Excimerlaser-Strukturierung metallisierbarer Haftvermittler*

Um auf einem mit UV-Laser bestrahltem Polymer einen Materialabtrag hervorzurufen, muß nach /177/ in einem kurzen Zeitintervall in einem relativ kleinen Polymervolumen eine ausreichend große Anzahl von Bindungen aufgebrochen werden. Dieser Vorgang führt zu einem sehr großen Druckanstieg, der durch die Volumenveränderung hervorgerufen wird und Polymerfragmente werden mit hoher Vibrations- und Rotationsenergie aus dem Material herausgeschleudert. Dies bedeutet, daß eine minimale Photonendichte, verbunden mit einer minimalen Energiedichte notwendig ist, damit Material abgetragen wird. Unterhalb dieser Schwellenergiedichte  $H_T$  findet kein Materialabtrag statt. Die durch die UV-Laserstrahlung in das Material eingebrachte Energie wird lediglich in thermische Wärmeschwingungen umgewandelt und führt zu einer Erwärmung des Werkstoffs. Diese Schwellenergiedichte ist abhängig vom bearbeiteten Material und der verwendeten Wellenlänge und verschiebt sich mit größeren Wellenlängen zu höheren Werten /191/.

Im Rahmen von Voruntersuchungen wurde festgestellt, daß bei Energiedichten nahe der Abtragsschwelle ein vollständiger Abtrag der beiden Haftvermittlerformulierungen, auch bei Bestrahlung mit sehr hohen Pulszahlen, nicht möglich ist. Dieses Verhalten deutet auf die Existenz einer Bearbeitungsschwelle hin /25/. Untersuchungen mit dem Rasterelektronenmikroskop gaben einen Einblick in die Art

der festgestellten Oberflächendefekte (Abbildung 4. 3<sup>1</sup>). Es handelte sich um Kegelformationen, die in unterschiedlicher Größe aus dem umgebenden Material heraus ragten.

Das Auftreten von kegelförmigen Oberflächendefekten bei der Bearbeitung von Polymeren mit Energiedichten nahe ihrer Schwellenergiedichte wurde schon in verschiedenen Veröffentlichungen beschrieben /183/. Auch bei oxidischen Keramiken (Siliziumoxid, Aluminiumoxid) kann die Entstehung von Kegeln bei der Bestrahlung mit Excimerlaser beobachtet werden. Hierin wurde die Entstehung der Kegelgebilde auf Abschirmungseffekte durch im Kunststoff eingelagerte Partikel, Ablagerung von Abtragsprodukten auf der Werkstoffoberfläche oder Inhomogenitäten des Laserstrahls zurückgeführt. Vor allem die Ablagerung von Materialniederschlag (der aus Materialbruchstücken und Kohlenstoff besteht) in der Bearbeitungszone und die dadurch vermutete Abschirmung der Laserstrahlung wurde häufig für die Entstehung der Kegelgebilde verantwortlich gemacht.

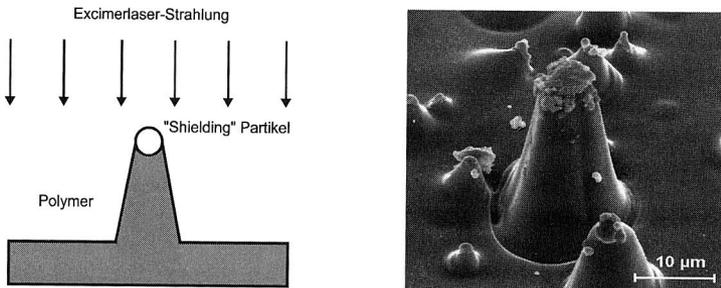


Abbildung 4. 3: Kegelbildung durch Abschirmung des Laserlichts

In der Literatur /90/ wurde bei der Bestrahlung von Polyimidfolien mit Laserlicht der Wellenlänge von 248 nm festgestellt, daß sich bei Bearbeitung nahe der Abtragsschwelle, sowohl unter Atmosphärenbedingungen als auch im Hochvakuum, kegelförmige Strukturen auf der Oberfläche bildeten. Somit kann als bewiesen angesehen werden, daß abgetragenes Material, welches sich auf der Bearbeitungsstelle absetzt, keine Rolle bei der Entstehung und dem Wachstum der Kegelgebilde spielt.

<sup>1</sup> Hier am Bsp. von Polycarbonat i.V.m. lösemittelhaltigem Primer; Laserparameter: Pulsdauer:  $t_p = 25$  ns (FWHM); Energiedichte:  $H = 600$  mJ/cm<sup>2</sup>; Pulsfrequenz:  $f_p = 20$  Hz; Pulszahl:  $N = 100$ .

Vielmehr gehen die Autoren davon aus, daß Karbon-Anreicherungen auf der Probenoberfläche die Kegelbildung einleiten, da die Abtragsschwelle an diesen Stellen zu höheren Werten verlagert wird. Es wird in diesem Zusammenhang auch der Begriff „Strahlungshärten“ (radiation hardening) verwendet.

In Konsequenz zu den in der Literatur beschriebenen Ergebnissen wurde eine Elementanalyse mittels Röntgen-Elektronen-Spektroskopie (XPS) durchgeführt, die eine Karbon-Anreicherung an der Polymeroberfläche relativ zum übrigen Kunststoff nachwies. Hierdurch konnte die Vermutung nach /90/ nachgewiesen werden, daß aufgrund der Karbon-Akkumulation die Abtragsrate an der Kegelspitze geringer ist, als die des umgebenden Materials. Die Kegelbildung startete hierbei mehr oder weniger zufällig. Wurde die Pulszahl weiter erhöht, bildeten sich immer mehr Kegel, die zusätzlich aus dem umliegenden Material heraus geformt wurden, bis schließlich die gesamte bestrahlte Fläche mit Kegeln bedeckt war und der Abtrag zum Erliegen kam.

Wurden die Proben jedoch mit Energiedichten oberhalb der Abtragsschwelle ( $H \geq 700 \text{ mJ/cm}^2$ ) bearbeitet, konnten beide Haftvermittlerformulierungen unabhängig vom Kunststoffsubstrat innerhalb weniger Pulse komplett abgetragen werden.

Aufgrund der bei der Ermittlung der Bearbeitungsschwelle gewonnenen Erkenntnisse, wurde die mittlere Energiedichte  $H$  zwischen  $800 \text{ mJ/cm}^2$  und dem für den experimentellen Aufbau maximal erreichbaren Wert von  $2,0 \text{ J/cm}^2$  und die Puls-wiederholfrequenz in den Bereichen  $f_p = 1, 10, 20, 50$  und  $100 \text{ Hz}$  variiert und hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die erzeugten Kanalgeometrien und die Bearbeitungsrandzone untersucht.

Die erzeugten Kanalgeometrien wurden nach dem Grad ihrer Kantensteilheit und Kantenschärfe und die Bearbeitungsrandzone wurde in Hinblick auf mögliche Randaufwürfe beziehungsweise Randzonenschädigungen hin untersucht. Als Randaufwürfe wurden Ablagerungen von sublimiertem Material im Bereich der Kanalränder bezeichnet, wohingegen Randzonenschädigungen ungewollte Materialveränderungen im Strukturbereich darstellten.

Unabhängig von der eingestellten Energiedichte konnten sowohl im lösemittelhaltigen als auch im wäßrigen Primer, Strukturen mit sehr steilen Kanalfanken und hoher Kantenschärfe erzeugt werden. Es ist jedoch bei allen verwendeten Kunststoffen ein deutlicher Einfluß der Energiedichte auf die Abtragstiefe festzustellen. Randaufwürfe beziehungsweise Schädigungen der Bearbeitungsrandzone in Abhängigkeit der Energiedichte beziehungsweise Puls-wiederholfrequenz waren we-

der bei den mit lösemittelhaltigem noch bei den mit wäßrigem Haftvermittler besprühten Kunststoffen festzustellen. Allerdings bildete sich bei der Bearbeitung in der Umgebung der Abtragszone an der Oberfläche ein dünner schwarzer Niederschlag (siehe Abbildung 4. 4<sup>1</sup>). Die Ausdehnung der Niederschlagszone variierte mit der mittleren Energiedichte. Ein Einfluß der Pulswiederholffrequenz auf die Ausdehnung der Niederschlagszone war nicht erkennbar.

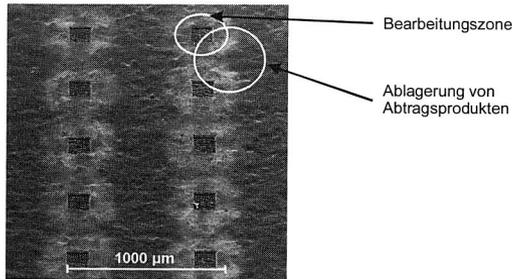


Abbildung 4. 4: Ablagerung von Abtragsprodukten um die Bearbeitungszone (Pulswiederholffrequenz: linke Linie  $f_p = 50$  Hz; rechte Linie  $f_p = 100$  Hz)

Ablagerungen in der Umgebung der erzeugten Strukturen sind ein generelles Problem der Materialbearbeitung mit Excimerlaser. Analysen dieser Abtragsprodukte zeigten, daß sie einen hohen Anteil an Kohlenstoff aufweisen /185/. Definierte Gasatmosphären, vor allem die Verwendung von Helium als inertes Gas, und niedrige Drücke können diesen Effekt stark mindern /79/.

Die Variation der Pulswiederholffrequenz im angegebenen Bereich zeigte ebenfalls keinen signifikanten Einfluß auf die Kanalgeometrie der erzeugten Strukturen. Auf allen Probenkörpern waren bei Betrachtungen unter dem Lichtmikroskop und dem REM, Strukturen mit sehr steilen Kanalflanken und hoher Kantenschärfe zu beobachten. Randaufwürfe oder Randzonenschädigungen in Abhängigkeit der Frequenz konnten nicht festgestellt werden.

Die Abtragstiefe bei der Bearbeitung von ABS/PC-Blend und PC war bei gleicher mittlerer Energiedichte und Pulszahl (hier  $H = 2,0$  J/cm<sup>2</sup>;  $N = 30$ ) von der Pulswiederholffrequenz unabhängig.

<sup>1</sup> Hier am Bsp. von ABS/PC-Blend i.V.m. wäßrigem Primer; Laserparameter: Pulsdauer:  $t_i = 25$  ns (FWHM); Energiedichte:  $H = 1000$  mJ/cm<sup>2</sup>; Pulsfrequenz:  $f_p = 100$  Hz rechte Linie,  $f_p = 50$  Hz linke Linie; Pulszahl:  $N = 30$ .

Der Vergleich der optischen Eindringtiefe mit der Wärmeleitfähigkeit lieferte materialspezifisch den dominierenden Energietransportprozeß. Die optische Eindringtiefe im Falle von ABS/PC-Blend und PC war so groß, daß innerhalb der Laserstrahleinwirkung die Dissipation der Energie aufgrund der Wärmeleitung vernachlässigt werden konnte (siehe Abbildung 4. 5<sup>1</sup>).

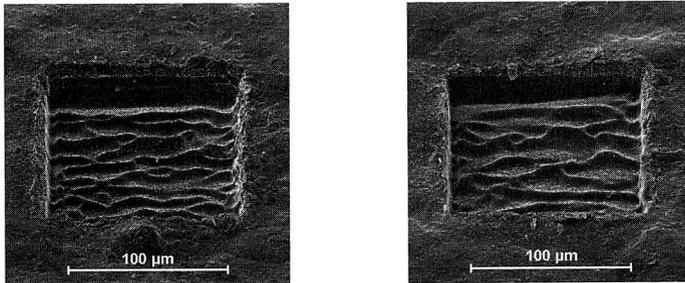


Abbildung 4. 5: Einfluß der Variation der Pulsfrequenz am Beispiel von ABS/PC-Blend (Puls wiederhol frequenz: links  $f_p = 50$  Hz; rechts  $f_p = 100$  Hz)

Bei der Bearbeitung von PA 6 konnte hingegen ein deutlicher Einfluß der Puls wiederhol frequenz auf die erzeugte Abtragstiefe festgestellt werden (Abbildung 4. 6<sup>2</sup>). Dieser Effekt kann mit der im Vergleich zu ABS/PC-Blend und PC hohen Wärmeleitfähigkeit beziehungsweise geringeren optischen Eindringtiefe von PA 6 begründet werden. Aufgrund der optischen Eindringtiefe von PA 6 drang die Energie (hier  $H = 800$  mJ/cm<sup>2</sup>;  $N = 30$ ) in das Material und wirkte als Volumenquelle der Wärme. Bei der Bearbeitung mit kleinen Puls wiederhol frequenzen wurde die im Material entstandene Wärme durch die hohe Wärmeleitfähigkeit bis zum Auftreffen des folgenden Pulses gut abgeleitet.

Diese Energie stand demnach für nachfolgende, thermisch begleitete Photoprozesse nicht mehr zur Verfügung und es wurden bei den folgenden Bearbeitungspulsen weniger Bindungen gebrochen.

<sup>1</sup> Hier am Bsp. von ABS/PC-Blend i.V.m. wäßrigem Primer; Laserparameter: Pulsdauer:  $t_i = 25$  ns (FWHM); Energiedichte:  $H = 2000$  mJ/cm<sup>2</sup>; linkes Bild: Pulsfrequenz:  $f_p = 1$  Hz; rechtes Bild:  $f_p = 100$  Hz; Pulszahl:  $N = 30$ .

<sup>2</sup> Hier am Bsp. von PA 6 i.V.m. lösemittelhaltigem Primer; Laserparameter: Pulsdauer:  $t_i = 25$  ns (FWHM); Energiedichte:  $H = 800$  mJ/cm<sup>2</sup>; linkes Bild: Pulsfrequenz:  $f_p = 1$  Hz; rechtes Bild:  $f_p = 100$  Hz; Pulszahl:  $N = 30$ .

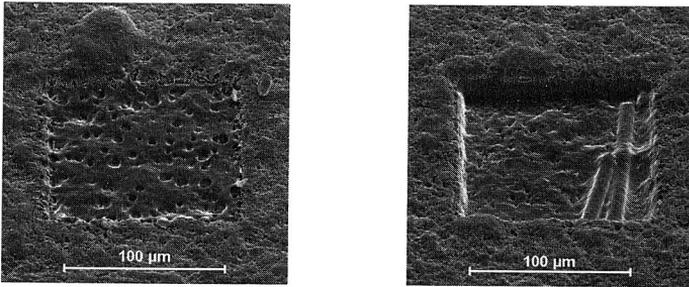


Abbildung 4. 6: Abhängigkeit der Abtragtiefe von der Pulswiederholfrequenz bei PA 6; (links  $f_p = 1$  Hz; rechts  $f_p = 100$  Hz)

Bei der Untersuchung der bestrahlten PA 6-Proben unter dem REM konnte festgestellt werden, daß selbst bei Bearbeitung mit der für den experimentellen Aufbau maximal erreichbaren Energiedichte von  $H = 2,0 \text{ J/cm}^2$  keine Schädigung der in der Matrix enthaltenen Glasfaserfilamente auftritt. Die Fasern werden, je nach Energiedichte, nach circa 20 bis 25 Pulsen freigelegt (siehe Abbildung 4. 7).

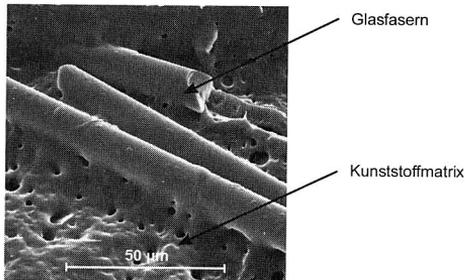


Abbildung 4. 7: Freigelegte Glasfaserfilamente bei Polyamid

Aufgrund der qualitativen Bewertung der Abtragsuntersuchungen im Energiedichteintervall  $800 \text{ mJ/cm}^2 \leq H \leq 2,0 \text{ J/cm}^2$  und dem gewählten Frequenzbereich  $1 \text{ Hz} \leq f_p \leq 100 \text{ Hz}$  konnte festgestellt werden, daß für beide Primerformulierungen unabhängig vom Kunststoffsubstrat Strukturen mit hoher Kantensteilheit ohne Randaufwürfe und ohne sichtbare Schädigungen der Bearbeitungsrandzone erzeugt werden konnten.

Davon ausgehend konnte sich der Untersuchung des Abtragsprozesses des Haftvermittlers komplexer Strukturen zugewandt werden. Zu diesem Zweck wurde speziell eine mit Chrom beschichtete Quarzglas-Maske verwendet, auf der im Feinätzverfahren photolytisch die gewünschten Strukturen (konzentrische Kreise; mehrstrahlige Sterne; Musterleiterbahnstruktur) erzeugt wurden. Die Pulswiederholfrequenz betrug konstant  $f_p = 10$  Hz, die mittlere Energiedichte wurde wieder innerhalb des Bereiches  $800 \text{ mJ/cm}^2 \leq H \leq 2,0 \text{ J/cm}^2$  und die Pulszahlen zwischen 15 bis 35, bei einer Fünfer-Schrittweite, variiert. Der optische Aufbau war auf einen Maßstab von 6:1 eingestellt.

Die Ergebnisse bezüglich Kantensteilheit, Randaufwürfe, Randzonenschädigung und Bodenstruktur entsprachen denen, die bei einfachen Strukturen bereits beobachtet werden konnten. Das gleiche galt für den Einfluß der Energiedichte auf die Abtragstiefe.

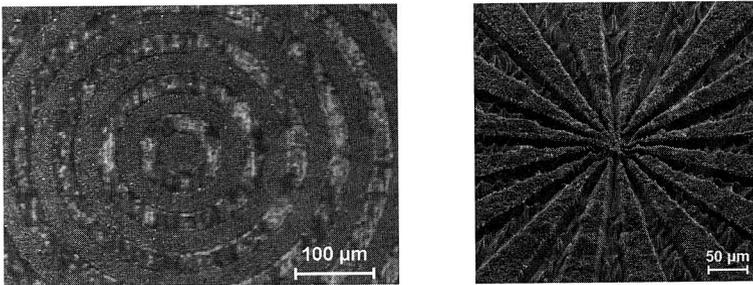


Abbildung 4. 8: Auflösung komplexer Strukturen

Es konnte somit zunächst festgestellt werden, daß für beide Haftvermittlerformulierungen, unabhängig vom Kunststoffsubstrat, sehr hohe Auflösungen bei der Strukturierung mittels UV-Excimerlaser erreicht wurden. In Abbildung 4. 8 links<sup>1</sup> sind beispielhaft konzentrische Kreise zu sehen, deren Breite und Abstände jeweils  $30 \mu\text{m}$  betragen. Rechts<sup>2</sup> davon werden Sternstrukturen gezeigt, die eine Auflösung bis in einen Bereich von wenigen  $10 \mu\text{m}$  aufwiesen. Beide Strukturen mit sehr hoher Kantensteilheit.

<sup>1</sup> Hier am Bsp. von PA 6 i.V.m. lösemittelhaltigem Primer; Laserparameter: Pulsdauer:  $t_p = 25$  ns (FWHM); Energiedichte:  $H = 1500 \text{ mJ/cm}^2$ ; Pulsfrequenz:  $f_p = 10$  Hz; Pulszahl:  $N = 35$ .

<sup>2</sup> Hier am Bsp. von ABS/PC-Blend i.V.m. lösemittelhaltigem Primer; Laserparameter: Pulsdauer:  $t_p = 25$  ns (FWHM); Energiedichte:  $H = 1000 \text{ mJ/cm}^2$ ; Pulsfrequenz:  $f_p = 10$  Hz; Pulszahl:  $N = 30$ .

Bei der optischen Untersuchung der Strukturen wurde festgestellt, daß mit Erhöhung der Energiedichte auch die erreichbare Auflösung stieg. Für dieses Verhalten konnte man zwei Effekte verantwortlich machen. Zum einen wurden bei der Bestrahlung der Proben mit hohen Energiedichten die Abtragsbruchstücke mit hoher kinetischer Energie aus der Bearbeitungszone herausgeschleudert und führten aufgrund der engen Strukturen zu abrasiven Effekten an den Kanalwänden. Der andere verantwortliche Effekt kam aufgrund der Optik des Systems zustande. In Abbildung 4. 9 ist im unteren Teil des Bildes die prinzipielle Intensitätsverteilung hinter der Maske mit Transmission  $X$  (Abbildung 4.9, oben) qualitativ dargestellt.

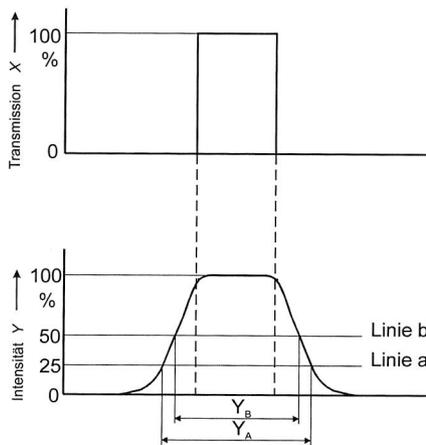


Abbildung 4. 9: Intensitätsverteilung hinter der Maske

Das dargestellte Intensitätsmaximum von 100 % soll dem Höchstwert von zwei Intensitäten  $A$  und  $B$ , mit der Relation  $A = 2 B$  entsprechen. Weiterhin soll für die Schwellintensität  $C$  eines beliebigen Werkstoffes  $C = \frac{1}{4} A = \frac{1}{2} B$  gelten. Somit repräsentiert Linie  $a$  (beziehungsweise  $b$ ) die Schwellintensität des Werkstoffes bei Bestrahlung mit der Intensität  $A$  (beziehungsweise  $B$ ).

Infolgedessen ergab sich aufgrund der hinter der Maske herrschender Energieverteilung ein breiterer Abtrag durch Intensität  $A$ , als durch die niedrigere Intensität  $B$  ( $Y_A > Y_B$ ) /38/.

Dies erklärte auch die festgestellte Verbreiterung der Kanäle beziehungsweise die Abnahme der Kreisbreite bei Bestrahlung mit höherer Energiedichte bei ABS/PC-

Blend und PC. Ein mit steigender Energiedichte verstärkter Materialabtrag ließ sich vor allem am Randbereich von Strukturen erkennen (siehe Abbildung 4. 10<sup>1</sup>).

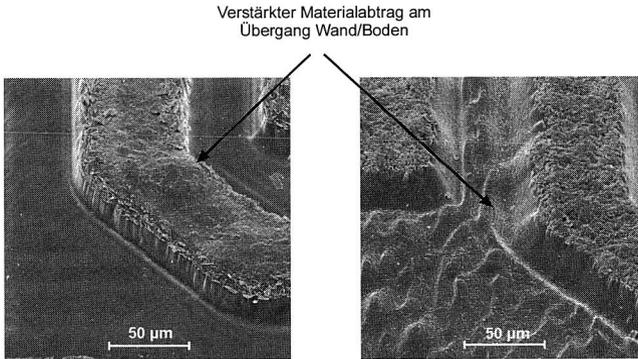


Abbildung 4. 10: Verstärkter Materialabtrag an Randbereichen durch reflektierte Laserstrahlung

Die Ursache hierfür war die Energieerhöhung aufgrund der an der gleichzeitig erzeugten Primerwandung reflektierten Laserstrahlung. Dieser Effekt konnte jedoch bei PA 6 nicht festgestellt werden, da dieser Kunststofftyp im Vergleich zu ABS/PC-Blend und PC eine vierfach höhere Schwellenergiedichte besaß. Dadurch, daß der Energiebeitrag der an der Wandung reflektierten Strahlung durch die Absorption geschwächt wurde, reichte dieser nicht aus, um bei PA 6 einen verstärkten Materialabtrag zu bewirken (Abbildung 4. 11 links<sup>2</sup>).

In Abbildung 4. 11 rechts<sup>3</sup> ist ein Ausschnitt des erzeugten Musterleiterbahnbildes zu sehen, welches eine Gesamtabmessung von circa 1,8 mm<sup>2</sup> hatte. Bei einem Abbildungsverhältnis von 6:1 ergab sich somit eine auf der Maske bestrahlte Fläche von circa 8 mm x 8 mm. Die Breite der Leiterbahnen wurden unter dem Lichtmikroskop vermessen und konnten mit circa 50 µm bestimmt werden.

<sup>1</sup> Links am Bsp. von PC i.V.m. wäßrigem Primer; Laserparameter: Pulsdauer:  $t_p = 35$  ns (FWHM); Energiedichte:  $H = 2000$  mJ/cm<sup>2</sup>; Pulsfrequenz:  $f_p = 10$  Hz; Pulszahl:  $N = 35$ ; Rechts am Bsp. von ABS/PC-Blend i.V.m. lösemittelhaltigem Primer; Laserparameter: Pulsdauer:  $t_p = 25$  ns (FWHM); Energiedichte:  $H = 2000$  mJ/cm<sup>2</sup>; Pulsfrequenz:  $f_p = 10$  Hz; Pulszahl:  $N = 35$ .

<sup>2</sup> Hier am Bsp. von PA 6 i.V.m. wäßrigem Primer; Laserparameter: Pulsdauer:  $t_p = 25$  ns (FWHM); Energiedichte:  $H = 2000$  mJ/cm<sup>2</sup>; Pulsfrequenz:  $f_p = 10$  Hz; Pulszahl:  $N = 35$ .

<sup>3</sup> Hier am Bsp. von ABS/PC-Blend i.V.m. lösemittelhaltigem Primer; Laserparameter: Pulsdauer:  $t_p = 25$  ns (FWHM); Energiedichte:  $H = 1000$  mJ/cm<sup>2</sup>; Pulsfrequenz:  $f_p = 10$  Hz; Pulszahl:  $N = 35$ .

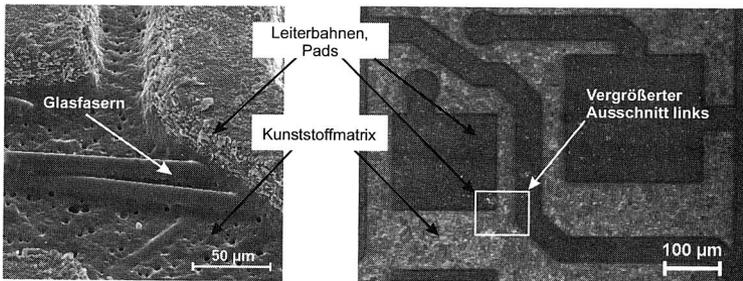


Abbildung 4. 11: Scharfkantige Ränder ohne Vertiefung bei PA 6 am Beispiel des Muster-Leiterbahnbildes (REM-Aufnahme links; Auflichtmikroskop-Aufnahme rechts)

Nachdem die Laserparameter nun optimal bestimmt waren, konnten Proben mit den verschiedenen Mustern zur chemischen Metallisierung vorbereitet werden<sup>1</sup>.

#### 4.1.3 Ergebnisse der chemischen Metallisierung

Das Verfahren der chemischen Metallisierung<sup>2</sup> wurde bereits in Kapitel 2.2.1 ausführlich beschrieben. Die Metallisierung der Proben erfolgte mit einem chemischen Kupferbad entsprechend der in Tabelle 4. 3 aufgelisteten Parameter<sup>3</sup>. Der Badtemperaturbereich lag zwischen 43 °C und 46 °C innerhalb dessen sich das Kupfer mit einer Geschwindigkeit von 2,0 µm/h bis 3,0 µm/h abschied /136/.

Komponente	Bereich	Optimum
Kupfer (Cu)	1,8 – 2,2 g/l	2,0 g/l
Natriumhydroxid (NaOH)	6,0 – 8,0 g/l	7,0 g/l
Formaldehyd (CH <sub>2</sub> O)	1,5 – 2,5 g/l	2,0 g/l

Tabelle 4. 3: Wesentliche Bestandteile des verwendeten chemischen Kupferbades /136/

Die durch die Metallabscheidung verbrauchten Chemikalien mußten während der Abscheidung kontrolliert und nachdosiert werden, damit der eingestellte pH-Wert und die Temperatur konstant gehalten wurden /49/. Im Anschluß an die einstündige chemische Metallisierung der Präparate wurde die Kupferschichtdicke mit einem Wirbelstrommeßgerät bestimmt. Die gemessenen Schichtdicken der Proben lagen in einem akzeptablen Bereich zwischen 2,8 µm und 3,1 µm.

<sup>1</sup> In Abbildung 4. 11 liegen die Glasfasern frei, da die Schwellenergiedichte der verwendeten Kunststoffe unter der eingestellten Energiedichte liegt.

<sup>2</sup> Synonyme Bezeichnung: Stromlose Metallisierung.

<sup>3</sup> Kupferbad Cuposit CP-78 Electroless Copper, Shipley GmbH.

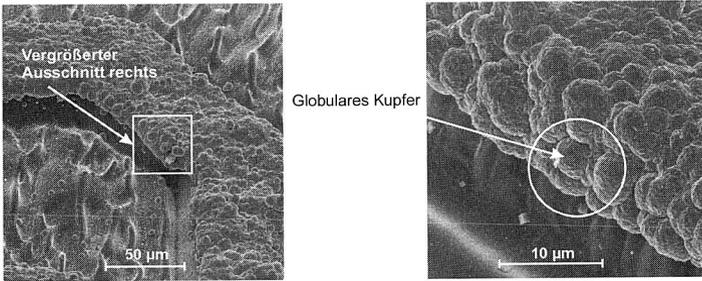


Abbildung 4. 12: Globulare Kupferstruktur mit leichtem Überwuchs des Randbereiches der Strukturen

Bei Betrachtungen der verkupferten Proben sowohl unter dem Lichtmikroskop als auch unter dem REM konnte eine sehr gute Nachbildung der Laserstrukturen mit ausgezeichneter Kantenschärfe des Kupferaufwuchses beobachtet werden. Ein Unterschied zwischen der wäßrigen und lösemittelhaltigen Haftvermittlerformulierung war nicht feststellbar. Die Kupferschichtdicke war homogen und die Morphologie zeigte typische globulare Kupferpartikel (Abbildung 4. 12<sup>1</sup>).

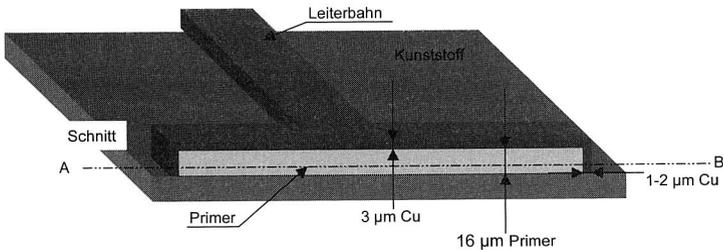


Abbildung 4. 13: Skizze: Schnitt durch metallisierte Leiterbahn

Bei Betrachtungen mit Hilfe des Raster-Elektronen-Mikroskopes konnte man ein deutliches Überwachsen des Kupfers über die ursprünglichen Primerstrukturrränder hinaus erkennen (Abbildung 4. 12 rechts), was aufgrund der verhältnismäßig dicken Primerstruktur von 16 µm zu erwarten war (Abbildung 4. 13). Jedoch wuchs die Kupferschicht horizontal wesentlich langsamer als vertikal.

<sup>1</sup> Hier am Bsp. von ABS/PC-Blend i.V.m. lösemittelhaltigem Primer; Laserparameter: Pulsdauer:  $t_p = 25$  ns (FWHM); Energiedichte:  $H = 2000$  mJ/cm<sup>2</sup>; Pulsfrequenz:  $f_p = 10$  Hz; Pulszahl:  $N = 35$ .

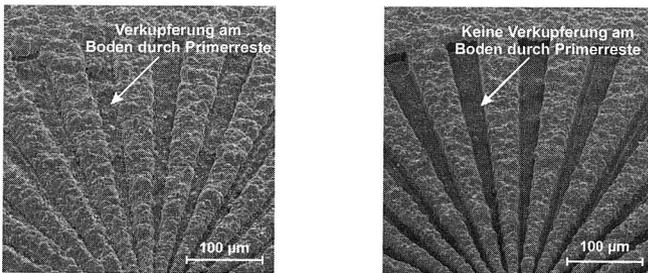


Abbildung 4. 14: Abhängigkeit der Qualität der Kupferabscheidung von der Laserpulszahl REM-Aufnahmen (links: Pulszahl N = 15; rechts: Pulszahl N = 35)

Ein direkter Einfluß auf die Qualität der Kupferabscheidung konnte durch die Anzahl der Laserpulse, mit der die Strukturen aus dem Primer geformt wurden, ermittelt werden. Wurden diese mit einer zu geringen Anzahl von Pulsen erzeugt, kam es am Kanalboden zu unerwünschten Kupferabscheidungen aufgrund von Primerresten, die nicht abgetragen wurden. In Abhängigkeit von der Energiedichte kann jedoch bei einer Mindestpulszahl von 20 ein vollständiger Abtrag der Primerschicht erreicht werden (Abbildung 4. 14<sup>1</sup>).

Bei den mit optimierten Parametern strukturierten und metallisierten Proben wurde bei der optischen Begutachtung, sowohl unter dem Lichtmikroskop als auch unter dem REM, Kupferabscheidungen an den freigelegten Glasfaserfilamenten beobachtet, obwohl, wie in Abbildung 4. 15<sup>2</sup> zu sehen, am Kanalboden keine Kupferpartikel gefunden wurden. Es lag nahe, die UV-Strahlung für die Aktivierung der Glasfasern als Keimzelle der chemischen Metallisierung verantwortlich zu machen, da in der Literatur schon öfters beschrieben wurde, daß die chemische Verkuperung oft an den, aus der Kunststoffmatrix herausstehenden Glasfasern beginnt /49/. Zum anderen ist es Gegenstand mehrerer Forschungsvorhaben durch Bestrahlung mit kurzwelligem ultravioletten Licht Kunststoffoberflächen chemisch so zu modifizieren, daß eine selektive Metallabscheidung nur auf den bestrahlten Flächen erfolgt /37/.

<sup>1</sup> Hier am Bsp. von ABS/PC-Blend i.V.m. lösemittelhaltigem Primer; Laserparameter: Pulsdauer:  $t_p = 25$  ns (FWHM); Energiedichte:  $H = 2000$  mJ/cm<sup>2</sup>; Pulsfrequenz:  $f_p = 10$  Hz; Pulszahl links : N = 15, rechts: N = 35.

<sup>2</sup> Hier am Bsp. von PA 6 i.V.m. wäßrigem Primer; Laserparameter: Pulsdauer:  $t_p = 25$  ns (FWHM); Energiedichte:  $H = 2000$  mJ/cm<sup>2</sup>; Pulsfrequenz:  $f_p = 10$  Hz; Pulszahl N = 35.

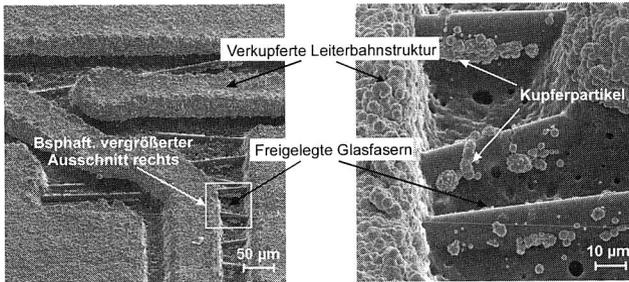


Abbildung 4. 15: Kupferabscheidung an freigelegten Glasfaserabschnitten

Zur Überprüfung dieser Theorie wurden unbehandelte PA 6-Platten, deren Glasfasern mechanisch freigelegt wurden, eine Stunde dem chemischen Kupferbad ausgesetzt und anschließend unter dem Auflichtmikroskop betrachtet. Es hat sich gezeigt, daß sich auch an diesen Glasfaserabschnitten Kupfer abgeschieden hat, welches somit die UV-Strahlung als Verursacher dieses Effektes ausschloß. Der Grund lag vielmehr in der Führung des chemischen Kupferbades, denn die freigelegten Glasfasern reagierten sehr sensibel auf eine ungenaue Einhaltung des vorgegebenen Prozeßfensters (pH-Wert, Kupferanteil an der Gesamtlösung etc.) und zeigten eine Affinität zum chemisch abgeschiedenen Kupfer, was sich in der Abscheidung loser Kupferpartikel entlang der Glasfasern bestätigte. Bei genauer Beachtung der Prozeßparameter für das außenstromlose Bad konnte diese unerwünschte Kupferabscheidung vermieden werden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß Strukturauflösungen, vergleichbare beziehungsweise identische Laserparameter vorausgesetzt, unter 50 µm selbst auf kostengünstigen Konstruktionskunststoffen erreicht werden können (Abbildung 4. 16). Weiterhin konnte man feststellen, daß je höher die Schwellenergie-dichte des verwendeten Basiskunststoffes war, desto schärfere Kanten und damit höhere Auflösungen konnten erreicht werden. Bei Verwendung von Polyetherimid (PEI), beziehungsweise Polyimid (PI), sind somit aufgrund der höheren Schwellenergie-dichte /66/ bessere Ausgangslagen zur Erzeugung feinerer Strukturen gegeben /104/. Hinzu kommt, daß chemisch bedingt auf diesen Kunststoff der Primer lediglich 2 µm dick aufgetragen werden muß, was somit auch den diskutierten Kupferüberwuchs eindämmt und somit zu Strukturen unterhalb 20 µm führt. Dieses wurde bei weiterführenden Arbeiten innerhalb der Industrie auch nachgewiesen /194/.

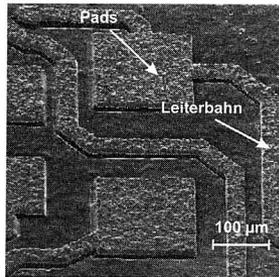


Abbildung 4. 16: Strukturierte Musterleiterbahn mit Auflösungen unter 50 µm

Das vorgestellte Verfahren kann in vielen Fällen zu einer Anwendung führen, ob als lokale Erzeugung von Mikrostrukturen auf ausgewählten Bereichen (sowohl auf 3-D MID Baugruppen oder auf flexiblen Schaltungsträgern) oder als Strukturierung von Flex Interposern, welche für den Aufbau integrierter Schaltungen benötigt werden. Als Voraussetzung muß jedoch gelten, daß eine Kupferschicht von maximal 5 µm für die vorgesehene Anwendung ausreichend ist, da man bei dieser Schichtdicke sowohl ökonomisch als auch technologisch an die Grenzen der chemischen Kupferabscheidung kommt /40; 194/.

#### 4.2 Lasergestützte Subtraktivverfahren metallisierter Haftvermittler<sup>1</sup>

Als Ergänzung zur Additivtechnologie wurden Untersuchungen zur Anwendung von subtraktiven Verfahren in Kombination mit einem Nd:YAG-Laser der Wellenlänge 1064 nm unternommen. Der wesentliche Unterschied zum volladditiven Verfahren war hierbei, daß die 5 µm starke chemische Kupferschicht elektrolytisch bis zur gewünschten Schichtdicke verstärkt wurde, um anschließend definiert wieder abgetragen zu werden. Erklärtes Ziel der sich anschließenden Untersuchungen war es somit, möglichst geringe Isolationskanalbreite mit Hilfe des Lasers entweder durch direktes Strukturieren des Kupfers oder eines zuvor aufgetragenen Coatings, was somit einen nachfolgenden Ätzschrift bedingte, zu applizieren, ohne hierbei das Substratmaterial zu schädigen. Durch den zusätzlichen Ätzschrift und der Verwendung eines Coatings birgt dieses Verfahren neben dem Nachteil der zusätzlichen Arbeitsschritte auch Defizite bezüglich der Ökologie, wodurch

<sup>1</sup> Bei der Durchführung der Versuchsreihen wurde der Verfasser durch Herrn Dipl.-Ing. G. Renner, Laser & Engineering GmbH, Herrn Dr. G.D. Wolf, Bayer AG und Herrn Dipl.-Ing. T. v. Hacht unterstützt.

sich zunächst auf die direkte Strukturierung der Kupferschicht konzentriert wurde (Abbildung 4. 17).

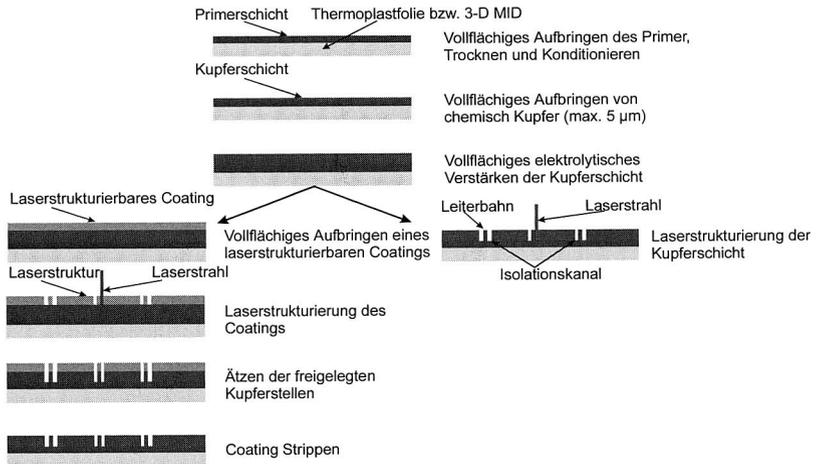


Abbildung 4. 17: Verfahrensablauf der subtraktiven Laserstrukturierung; Links mit Coating; Rechts ohne Coating

Der Verfahrensablauf der Kupfer-Direktstrukturierung ist in Abbildung 4. 17 rechts dargestellt. Spezifische Vorteile eines subtraktiven Verfahrens in Verbindung mit einem Primersystem decken sich teilweise mit den bereits dargelegten Vorteilen der additiven Verfahrenskombination. Der Vollständigkeit halber werden sie jedoch in der nachfolgenden Aufzählung noch einmal genannt.

- Um den Primer hafter mit dem Kunststoff zu verbinden, sind keine mechanischen oder ökologisch bedenkliche, chemische Vorbehandlungsverfahren der Substratoberfläche notwendig.
- Chemische Grundmetallisierung kann ökonomisch und ökologisch mit elektrolytischen Metallisierungsverfahren kombiniert werden.
- Die Anzahl der Verfahrensschritte wird im Vergleich zu den bisher eingesetzten Laserdirektstrukturierungsverfahren deutlich reduziert.
- Ein Aufbringen und anschließendes Strippen eines Photoresists beziehungsweise eines Ätzresists ist nicht notwendig.
- Subtraktivtechnologie mit Lasereinsatz gewährleistet im Vergleich zur konventionellen Subtraktivtechnik höhere Umweltverträglichkeit.
- Eine Durchführung in Semiadditivtechnik ist problemlos machbar.

- Der Einsatz eines Lasers zur Strukturierung läßt ein hohes Auflösungsvermögen bis in den Feinstleiterbereich von unter 50 µm bei hoher Wirtschaftlichkeit durch den Einsatz eines Nd:YAG-Laser erwarten /35/.

#### 4.2.1 Voruntersuchungen zum Einsatz des Nd:YAG-Festkörperlaser

Zur Durchführung der Versuche kam ein Nd:YAG-Multifunktionslaser<sup>1</sup> mit einer Wellenlänge von  $\lambda = 1064$  nm und einer Ausgangsleistung von 70 Watt zum Einsatz (Tabelle 4. 4).

Wellenlänge	1064 nm	Stabilität der Amplitude	< 5 %
Ausgangsleistung	multimode 70 W	Nenneingangsleistung	4 kW
	TEM <sub>00</sub> -mode 15 W	Abmessung Laserkopf	200 (B) x 160 (H) x 1400 (L) mm
Durchmesser des	multimode 1,2 mm	Abmessung Netzteil	480 (B) x 255 (H) x 685 (L) mm
Laserstrahls	TEM <sub>00</sub> -mode <1 mm	Abmessung Kühlsystem	480 (B) x 380 (H) x 635 (L) mm
Strahlabweichung	multimode 6,0 mrad	Netzvoraussetzung	3 x 380 V, 50 Hz, 25 A
	TEM <sub>00</sub> -mode 2,5 mrad	Kühlsystemanforderung	10 l/min, 2-6 bar max. 20° C
Lampentyp	Krypton Bogenlampe	Sicherheitsklasse	Klasse IV Laserprodukt

Tabelle 4. 4: Kenngrößen des verwendeten Nd:YAG-Lasers

Auch wenn in dieser Arbeit nicht auf das Funktionsprinzip des Nd:YAG-Laser näher eingegangen werden soll, ist zum besseren Verständnis der Argumentationen der praktischen Ergebnisse eine kurze Erläuterung zu den verschiedenen Betriebsarten dieses Festkörperlaser notwendig.

Im Dauerbetrieb, oder cw-Betrieb (continuous wave) stellt sich die Strahlungsleistung so ein, daß die Inversion auf dem Wert der Schwellinversion gehalten wird. Nach dem Überschreiten der Schwellpumpleistung steigt die Ausgangsleistung nahezu linear an und es kann bei hohen Pumpleistungen aufgrund der thermischen Belastung zu Leistungsverlusten kommen. Eine Bearbeitung von Metallen ist somit mit dieser Einstellung bei dem verwendeten Lasersystem nicht möglich /101/. Will man Metalle durch Sublimation abtragen, ist es notwendig, kurze Pulse mit hoher Spitzenleistung zur Verfügung zu stellen. Eine Möglichkeit dies zu realisieren bietet eine sogenannte Güteschaltung oder Q-Switch. Beim Q-Switch handelt es sich um ein Pulsverfahren, bei dem die Laserstrahlung in einem begrenzten Zeitintervall durch einen optischen Schalter abgegeben wird, der während des

<sup>1</sup> Zum Funktionsprinzip des Nd:YAG-Lasers siehe /11; 19; 30; 56; 72/.

Pumpprozesses die stimulierte Emission im Resonator vollständig unterdrückt. Da keine stimulierte Emission auftritt, kann die Inversion durch das Pumpsystem solange aufgebaut werden, bis sich ein Gleichgewicht zwischen Pumpprozeß und spontaner Emission einstellt. Wird der Schalter zum Zeitpunkt der maximalen Inversion geöffnet, so liegt die im Lasermedium vorhandene Inversion weit über der Schwellinversion und die erzeugte Pulsleistung weit über der im cw-Betrieb realisierbaren /101/.

Von außerordentlicher Bedeutung für das Strukturieren von feinen Leiterbahnen mit dem Nd:YAG-Laser, ist der Einfluß der transversalen Moden, da die Fokussierbarkeit eines Laserstrahls unmittelbar von ihnen abhängt. Hierbei ist der TEM<sub>00</sub>-mode der Grundmode mit gaußförmiger Intensitätsverteilung. Er hat die geringste Divergenz und kann zum kleinstmöglichen Punkt fokussiert werden /11; 72/.

Falls sich an die Strukturierung ein weiterer Metallisierungsschritt anschließt, ist ebenfalls die vollständige Entfernung des Primers notwendig, da, wie aus Vorversuchen bekannt, ansonsten die Gefahr bestand, daß die offenen Primerstellen in einem anschließenden chemischen Metallisierungsbad wieder zuwachsen. Somit mußten Untersuchungen sowohl zum Abtragsverhalten der Polymerschicht (Primer) als auch zum Metall und deren Wechselwirkung zueinander, durchgeführt werden.

Metalle lassen sich aufgrund des schlechten Absorptionsverhaltens bei  $\lambda = 1064$  nm nur schlecht bearbeiten /68/. Kupfer bildet hingegen bei der Bearbeitung mit einem Nd:YAG-Laser bei höheren Intensitäten ( $> 7^7$  W/cm<sup>2</sup>) ein sogenanntes lasereinduziertes Plasma, welches die Energieeinkopplung in die Kupferoberfläche aufgrund hoher Elektronendichte und Reduzierung der Oberflächenreflexion verbessert. Um den Effekt der erhöhten Energieeinkopplung durch Plasmabildung nutzen zu können, ist die richtige Wahl von Intensität, Einwirkungsdauer und Fläche des Laserstrahls notwendig. Für eine Laserintensität von circa  $10^8$  W/cm<sup>2</sup> und einer Pulsdauer von 100 ns können Leistungsverluste vernachlässigt werden, die bei geringen Intensitäten vor allem durch Wärmeleitung bedingt sind. Bei höheren Leistungen und längeren Pulsdauern dominieren dagegen Absorptions- und Streuverluste im Plasma, wodurch die einfallende Laserenergie vollständig für den Bearbeitungsvorgang ausgenutzt werden kann /101/.

Bei der Absorption von Licht der Wellenlänge  $\lambda = 1064$  nm durch Polymerwerkstoffe spielt der Übergang von elektronischer Anregung im sichtbaren Teil des Spektrums zur Vibrationsanregung von Molekülbausteinen im mittleren Infrarotbereich eine wichtige Rolle. Die Vibrationsanregung der Molekülbausteine führt hier-

bei zu einer Temperaturerhöhung, die bis zur thermischen Zersetzung des Polymers führen kann. In Verbindung mit dem statistischen Aufbau der Polymere ist eine Zuordnung des für den Abtrag verantwortlichen Prozesses nicht eindeutig. Es kommen also für die Bearbeitung von Polymerwerkstoffen beide Prozesse in Betracht /84/. Dieser Literatur konnte auch der Absorptionskoeffizient für reines Polyamid und Polycarbonat entnommen werden, welcher bei Polyamid 6 in einem Temperaturbereich von 20 °C bis 120 °C konstant unter 10% liegt, hingegen bei Polycarbonat im gleichen Temperaturbereich von 40% auf unter 10% zurückgeht. Da das verwendete ABS/PC-Blend einen relativ hohen Anteil an Polycarbonat enthielt, wurde angenommen, daß es sich ähnlich wie reines Polycarbonat verhält /67/.

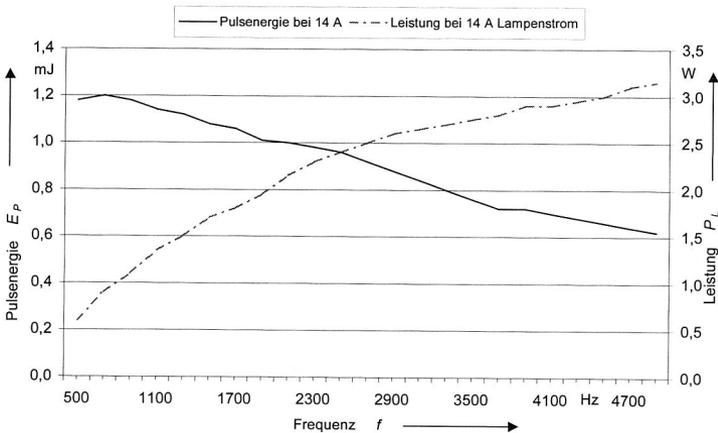


Abbildung 4. 18: Abhängigkeit des Einzelpulses von der Pulsfrequenz und der Leistung von der Frequenz des Lasers

Um ein optimales Bearbeitungsergebnis zu erhalten, mußten zunächst die wesentlichen Laserparameter ermittelt werden. Der Fokussdurchmesser wurde hierzu mit kupferbeschichteten Standard-Epoxidharz-Leiterplatten, auf der mehrere parallele Linien mit dem Laser abgetragen wurden, ermittelt. Nach iterativer Veränderung des Abstandes der Fokussierlinse zur Probe um 0,1  $\mu\text{m}$  wurde ein Fokussdurchmesser von circa 30  $\mu\text{m}$  eingestellt.

Der verwendete Laser konnte sowohl mit konstanter Frequenz (fixed mode) des Q-Switch, als auch mit konstantem Pulsabstand betrieben werden (proportional mode). Bei Betrieb mit konstanter Frequenz kam es bei langsamen Strukturie-

rungsgeschwindigkeiten zu einem größeren Überlappen der Einzelpulse und somit zu einer höheren Energieeinwirkung auf diese Teilstrecken. Zur Vermeidung dieser Überlappung konnte der Pulsabstand durch die Software vorgegeben werden, wodurch die Frequenz des Q-Switch an die Verfahrgeschwindigkeit angepaßt wurde. Der Q-Switch wurde somit bei langsamer Fahrt länger geschlossen gehalten als bei schneller. Dies hatte jedoch wiederum zur Folge, daß es bei dem sich anschließenden Puls zu einer Energieerhöhung kam, welche das Substratmaterial ebenso schädigen kann. Über eine spezielle Elektronik wurde hierzu bei längeren Verschlusszeiten des Q-Switch der erste Puls abgeschwächt. Der optimale Bearbeitungsmodus mußte jedoch entsprechend dem Material durch Versuche festgelegt werden.

Mit Hilfe der Abbildung 4. 18 konnten die Devidereinstellungen (bei proportional mode) und Frequenzen (bei fixed mode) in Laserleistung oder Pulsenergie umgerechnet werden. Die Pulsfrequenz ergab sich (proportional mode vorausgesetzt) aus der mathematischen Beziehung:

$$f = \frac{V_{\text{Vorschub}}}{D/2} \quad (\text{Gleichung 4. 1})$$

mit:

$V_{\text{Vorschub}}$ : Vorschubgeschwindigkeit<sup>1</sup> des x-y-Verfahrtesches  $v$  in  $\mu\text{m/s}$

$D$ : Devider

$f$ : Pulsfrequenz des Lasers in Hz

In Abbildung 4. 18 ist die Charakteristik zu erkennen, daß mit zunehmender Laser-Pulsfrequenz die Leistung steigt, hingegen die Einzelpulsenergie abnimmt, da sich im Lasermedium nicht genügend Energie aufbauen kann, bis es zum Öffnen des Q-Switch kommt.

Zur Ermittlung des Abtragsverhaltens des Primers und des Einflusses der Laserstrahlung auf das Thermoplastbasismaterial wurde zunächst der Primer ohne Kupferschicht durch direkte Laserbestrahlung abgetragen. In einer ersten Versuchsreihe wurde für den Lampenstrom<sup>2</sup> 13,2 A und für die Verfahrgeschwindigkeit der höchst mögliche Wert von 15 mm/s als Grundeinstellung gewählt, um den Thermoplasten so wenig als möglich thermisch zu belasten. Zur Reduzierung der

<sup>1</sup> Die Verfahrgeschwindigkeit war anlagentechnisch auf maximal 15 mm/s begrenzt.

<sup>2</sup> Der Lampenstrom entspricht der für das laseraktive Medium (hier der mit  $\text{Nd}^{3+}$ -Ionen dotierte Yttrium-Aluminium-Granat (YAG)) notwendigen Anregungsenergie.

Versuchsanzahl wurde sich zudem auf die Untersuchung des bereits oben erwähnten kritischen Abtragsvorgangs in Kurvenfahrten beschränkt. Im proportional mode wurden hierbei Devidereinstellungen von 6 bis 18 variiert, wo jedoch bei keiner Versuchsprobe, unabhängig vom verwendeten Material, ein befriedigendes Ergebnis erzielt werden konnte. Es wurden sowohl Ausbrüche im Strukturkanal als auch schlechte Kantensteilheiten beobachtet. Weiterhin konnten noch Primerreste im Kanalboden und eine starke Schwärzung des Thermoplasten beobachtet werden. Weitere Untersuchungen wurden somit im fixed mode mit Frequenzen zwischen 300 bis 4000 Hz durchgeführt. Schwärzungen konnten hier lediglich bei ABS/PC-Blend und PC, hingegen nicht bei PA 6, beobachtet werden.

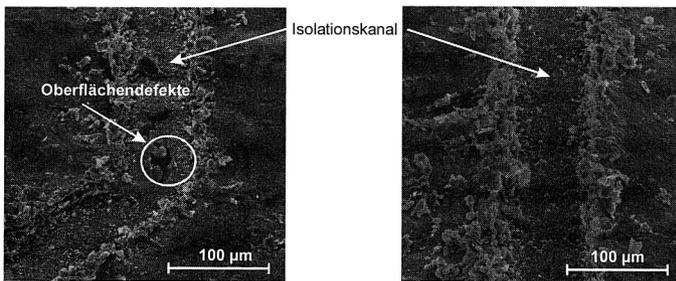


Abbildung 4. 19: Links: Oberflächendefekte im ABS/PC-Blend durch Laserstrukturierung  
Rechts: Keine sichtbaren Oberflächendefekte im PA 6 Polymer

Bei Betrachtung im REM konnte ebenso keine Schädigung des Thermoplasten PA 6 erkannt werden, wohingegen bei PC und ABS/PC-Blend deutlich Oberflächendefekte sichtbar waren (vgl. Abbildung 4. 19<sup>1</sup>). Auffällig war bei allen Proben die schlechte Beschaffenheit der Kanten auch in diesem mode.

Als geeignete Frequenz stellte sich  $f = 500$  Hz heraus, bei der minimale Isolationsskanalbreiten von circa  $70 \mu\text{m}$  erreicht wurden. Ein Einfluß der Verwendung von wäßrigem oder lösemittelhaltigem Primer auf das Ergebnis der Laserstrukturierung konnte dabei nicht festgestellt werden.

Es wurde infolgedessen beobachtet, daß der verwendete Nd:YAG-Laser aufgrund seiner relativ hohen Leistung bei einer Wellenlänge von  $1064 \text{ nm}$  zur hochauflösenden Strukturierung mit guter Kantensteilheit eines Haftvermittlers auf Ther-

<sup>1</sup> Laserparameter: fixed mode; Frequenz:  $f = 500$  Hz; Verfahrensgeschwindigkeit:  $v = 15 \text{ mm/s}$ ; Lampenstrom:  $I = 13,2 \text{ A}$ .

moplasten ungeeignet war, jedoch diesen, ohne den Kunststoff wesentlich zu schädigen, entfernen konnte. Zur Durchführung der Subtraktiv- oder Semiadditivtechnologie war dies zunächst ausreichend.

Will man dennoch feine Strukturen mit dem Festkörperlaser erzeugen, können Polarisationsfilter eingesetzt werden, die den Laserstrahl entsprechend abschwächen. Ebenso kann eine Frequenzverdoppelung aufgrund der veränderten Photonenenergie ein besseres Ergebnis bedeuten, da das Licht dieser Wellenlänge weniger durch thermische Anregung gekennzeichnet ist, sondern Atombindungen aufspaltet, was auch die Ergebnisse aus Kapitel 4.1 zeigten.

Zur Untersuchung der direkten Strukturierung des metallisierten Primers mußte zunächst die Einstellung für den Lampenstrom in Abhängigkeit der Kupferabtragsrate untersucht werden. Mit Hilfe eines Profilometers<sup>1</sup> wurde die Abtragstiefe für den Lampenstrom von 14,0 A von der Devidereinstellung ermittelt, die als Anhaltspunkt für weitere Lasereinstellungen diene. Auch hierbei haben sich wiederum starke Schwärzungen sowohl im Isolationskanal als auch herausgeschleuderte Ablagerungsprodukte entlang der Strukturierung gezeigt.

Die Schwärzungen wurden mit Hilfe der Raman<sup>2</sup>-Spektroskopie näher untersucht, wobei angenommen werden mußte, daß es sich hierbei um eine Umwandlung des im Kunststoff gebundenen Kohlenstoffes in kristallinen, elektrisch leitfähigen Graphit handelt. Die Raman-Spektroskopie, die in /83/ näher beschrieben ist, erlaubt eine hochgenaue Materialidentifikation durch Messung von Frequenzverschiebungen, mit Hilfe eines Argon-Ionen-Lasers, bei angeregten Gitterschwingungen des Materials. Der Referenz-Peak bei  $1581\text{ cm}^{-1}$  von kristallinen Graphit konnte auch bei den laserstrukturierten Proben beobachtet werden, was die Existenz von Graphit im Thermoplasten bewies (Abbildung 4. 20).

Zur Überprüfung dieser Ergebnisse wurde noch einmal eine Messung mit Hilfe der Elektronen-Spektroskopie für die chemische Analyse (ESCA) durchgeführt. Grundlage dieses Verfahrens ist die Wechselwirkung von Photonen mit gebundenen Elektronen /76/. Diese führt zur Bildung von Photoelektronen, deren Maß für die Effizienz dieses Photoionisationsprozesses der sogenannte Photoionisationsquerschnitt ist, welcher in Tabellenform vorliegt /76/.

---

<sup>1</sup> Das Prinzip der profilometrischen Messung wurde bereits in Kapitel 3.2 beschrieben.

<sup>2</sup> Raman, Sir Chandrasekhara Venkata (1888-1970), indischer Physiker. Wies 1928 die von A.G.S. Smekal 1923 vorausgesagte unelastische Streuung von Photonen an Materie nach (Smekal-Raman-Effekt) /116/.

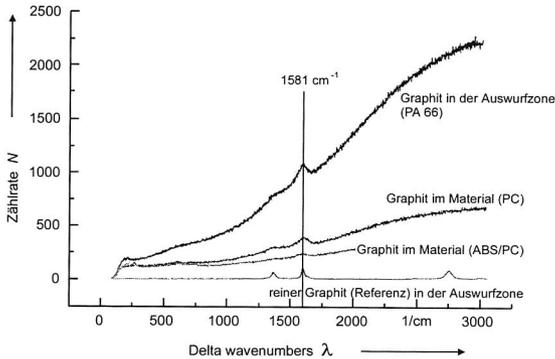


Abbildung 4. 20: Raman-Spektroskopie als Nachweis für Graphitbildung

Ein Vergleich der Referenz-Spektren von Kohlenstoff, mit den reinen Thermoplasten und den mit Nd:YAG-Laser strukturierten Thermoplasten ergab, daß die Graphitbildung auch mit diesem Analyseverfahren nachgewiesen werden konnte.

Bei beiden Analyseverfahren wurde der Graphit besonders deutlich bei Polycarbonat und etwas schwächer bei ABS/PC-Blend beobachtet. Polyamid zeigte nur in der Auswurfzone Karbonisierungserscheinungen. Bei Betrachtung der Monomersequenz der verwendeten Thermoplaste fiel auf, daß Polyamid im Gegensatz zu den anderen verwendeten Thermoplasten keine Phenylgruppen enthält [24], welches somit ein Zusammenhang zwischen dem Grad der Graphitbildung und dem Anteil der Phenylgruppen an der Monomersequenz vermuten lies. Diese Theorie konnte jedoch trotz intensiver Literaturrecherche nicht verifiziert werden.

Zur Bestätigung der aufgestellten Theorie wurde zunächst das Verhältnis der Phenylgruppen in *g/mol* zur Gesamtmasse der Monomersequenz der verwendeten Thermoplaste mathematisch mit Hilfe nachstehender Formel bestimmt:

$$P_h = \frac{A}{B} \times 100$$

(Gleichung 4. 2)

mit:

$P_h$ : Verhältnis Masse Monomersequenz zu Masse Phenylgruppe in %

A: Masse Phenylgruppe in *g/mol*

B: Masse Monomersequenz in *g/mol*

Für nachfolgende Kunststoffe wurde somit das Verhältnis der Phenylgruppen am Gesamtverbund der Monomersequenz exemplarisch bestimmt (Tabelle 4. 5).

Polymer	Masse Monomersequenz in g/mol	Anzahl der Phenylgruppen in g/mol	Masse Phenylgruppen in g/mol	Verhältnis Masse (Monomersequenz/ Phenylgruppe) in %
PA	113	0	0	-
ABS	635	3	231	36,38
ABS/PC	459	3	231	50,33
PC	254	2	152	59,84

Tabelle 4. 5: Masseanteil von Phenylgruppen an der Grundeinheit von PA, ABS und PC

Die mathematischen Berechnungen erhärteten somit die Vermutung, daß sich die Graphitbildung desto stärker ausbildete, je höher der Anteil der Phenylgruppen an der Gesamteinheit der Monomersequenz des Thermoplasten war.

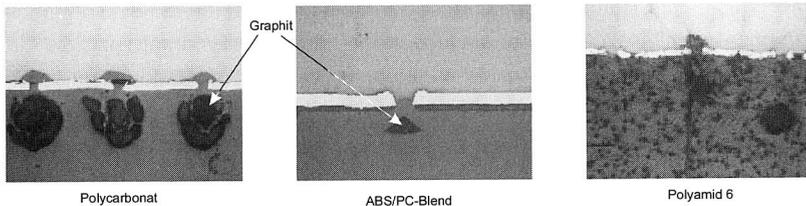


Abbildung 4. 21: Schlifffbilder der Graphitbildung unterhalb des Isolationskanals laserstrukturierter Proben (D = 6)

Um die Möglichkeit einer Auswirkung der Graphitbildung auf den Isolationswiderstand der Thermoplasten im zu erzeugenden Isolationskanal ausschließen zu können, wurden Schlifffbilder von Proben mit einer Kupferschichtdicke von 20  $\mu\text{m}$  angefertigt, die zuvor mit Devidereinstellungen zwischen 4 und 12 (zweier Schritte) und hohen Laserintensitäten (Lampenstrom 14,2 A) strukturiert<sup>1</sup> wurden. Hierdurch sollte bewußt eine verstärkte Graphitbildung provoziert werden. In der Abbildung 4. 21 kann man erkennen, daß sich der Graphit vor allem unterhalb der Oberfläche bildete

Das darüberliegende Material wurde also aus dem Isolationskanal heraus gedrückt. Die Schwärzungen, die bei Aufsicht unter dem Lichtmikroskop erkennbar waren, lagen folglich bis zu 100  $\mu\text{m}$  unter der Oberfläche.

<sup>1</sup> Vorschubgeschwindigkeit wurde konstant auf  $v = 8 \text{ mm/s}$  eingestellt.

Ein Einfluß der Graphitbildung auf den Isolationswiderstand bestand somit nicht zwangsweise<sup>1</sup>, was auch Leitfähigkeitsmessungen nachgewiesen haben. Der Grund dafür, daß leitfähiger Graphit unter der Oberfläche entstand, lag in dem Absorptionsverhalten des Materials, welches Infrarotstrahlung millimetertief eindringen lies /84/. Je schlechter somit das Absorptionsverhalten des Substrates war, desto geringer war die Graphitisierung nach der Einwirkung der Nd:YAG-Laserstrahlung.

#### 4.2.2 Nd:YAG-Laser-Strukturierung des metallisierten Haftvermittlers

Zur Direktstrukturierung des Kupfers auf dem Primer wurden die Laserparameter Lampenstrom  $I$  auf 14,0 A und Verfahrgeschwindigkeit  $v$  auf 8 mm/s im proportional mode eingestellt. Zur systematischen Bestimmung einer geeigneten Devidereinstellung in Abhängigkeit der jeweiligen Kupferschichtdicke wurde der Pulsabstand zwischen 5 bis 20 variiert. Für die Direktstrukturierung der Kupferschicht

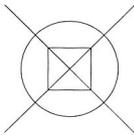


Abbildung 4. 22: Testlayout

konnte aus den Voruntersuchungen festgestellt werden, daß es keinen Unterschied macht, welcher Primer sich unter der Kupferschicht befindet, da dieser aufgrund der hohen Laserintensität, wie in Kapitel 4.2.1 beschrieben, mit abgetragen wird. Die Schichtdicke des abzutragenden Kupfers wurde auf maximal 20  $\mu\text{m}$  begrenzt, da sonst die Gefahr bestand den

Thermoplasten aufgrund der hohen notwendigen Laserleistung zu schädigen. Die Versuche wurden mit dem in Abbildung 4. 22 gezeigten Testlayout durchgeführt.

Bei einer Devidereinstellung  $D = 20$  konnte lediglich an Kreuzungspunkten eine vollständige Entfernung des Kupfers erreicht werden. Eine Graphitbildung des Substratmaterials war bei dieser geringen Intensität bereits erkennbar. Der Pulsabstand wurde solange verkürzt, bis eine vollständige Durchtrennung der Kupferschicht über die gesamte Struktur gewährleistet war, da die Graphitbildung nicht nachweislich einen Einfluß auf den Isolationswiderstand hatte. Ab einer Devidereinstellung  $D = 16$  konnte die Kupferschicht inklusive der Primerschicht rückstandsfrei entfernt werden.

Durch die Bearbeitung zeigten sich sowohl bei Polycarbonat als auch bei ABS/PC-Blend an den Isolationskanalrändern Aufwürfe und im Isolationskanal waren mechanische Fehlstellen und aufgeschmolzener Kunststoff zu beobachten. Die

<sup>1</sup> Im Gegensatz zur der in /91/ auf Seite 14 von 26 vertretenen Ansicht.

Oberfläche war wellig und mechanisch angegriffen, wohingegen die Kantensteilheit der strukturierten Kanäle bei den abgebildeten Isolationskanalbreiten von circa  $35\ \mu\text{m}$ , bei einem Fokusbereich von  $30\ \mu\text{m}$ , als ausreichend bezeichnet werden konnte (Abbildung 4. 23<sup>1</sup>).

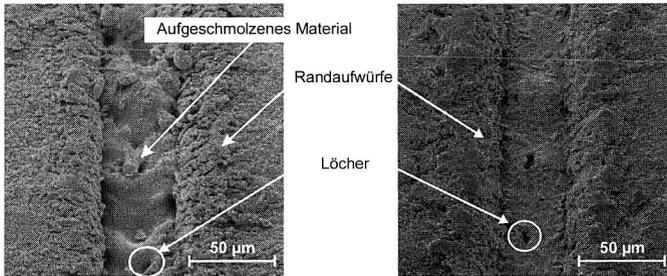


Abbildung 4. 23: Isolationskanal (circa  $35\ \mu\text{m}$ ) auf PC (links) und ABS/PC-Blend (rechts)

Die beobachteten Erscheinungen waren bei Polycarbonat wesentlich deutlicher zu erkennen als bei ABS/PC-Blend. Dennoch zeigten die Versuche die prinzipielle Eignung als Substratmaterialien für die Strukturierung durch Nd:YAG-Laser. Bei Polyamid hingegen konnte bis zu einer Devidereinstellung von  $D = 6$  keine Schädigung (Graphitbildung) des Polymers erkannt werden, was die Voruntersuchungen bereits erwarten ließen. Die optimale Devidereinstellung konnte bereits mit  $D = 10$  ermittelt werden, wodurch ein relativ breites „Bearbeitungsfenster“ zur Verfügung stand, welches bei großen Schichtdickenschwankungen des Kupfers ein Vorteil war.

Auf der Kupferschicht links und rechts des Isolationskanals waren keine Randaufwürfe erkennbar (Abbildung 4. 24<sup>2</sup>), der Isolationskanal war nicht aufgeschmolzen und die Kantenschärfe war wesentlich besser als bei PC oder ABS/PC. Die Kupferschicht lies sich sauber strukturieren und es blieben keine Reste von Kupfer im Isolationskanal zurück. Es hat sich somit gezeigt, daß je temperaturstabiler und je geringer das Absorptionsverhalten des verwendeten Thermoplasten war, desto besser eignete er sich für eine Direktstrukturierung des Kupfers.

<sup>1</sup> Laserparameter: proportional mode; Devider:  $D = 16$ ; Verfahrensgeschwindigkeit:  $v = 8\ \text{mm/s}$ ; Lampenstrom:  $I = 14,0\ \text{A}$ ; Wäßriger Primer;  $20\ \mu\text{m}$  Kupfer.

<sup>2</sup> Laserparameter: proportional mode; Devider:  $D = 10$ ; Verfahrensgeschwindigkeit:  $v = 8\ \text{mm/s}$ ; Lampenstrom:  $I = 14,0\ \text{A}$ ; Wäßriger Primer;  $20\ \mu\text{m}$  Kupfer.

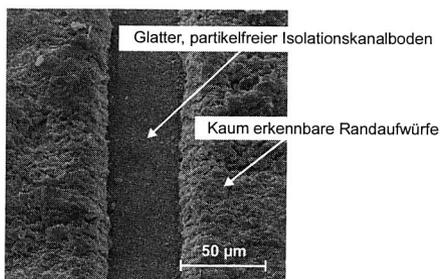


Abbildung 4. 24: Isolationskanal (35 µm) von strukturiertem Kupfer auf Polyamid 6

Um thermisch empfindliches Substratmaterial wie Polycarbonat oder ABS/PC-Blend, trotz der beschriebenen Probleme, mit einem Nd:YAG-Laser strukturieren zu können, wurde das Kupfer zusätzlich mit einer Zinn-Blei-Schicht (SnPb) chemisch metallisiert.

Das Verfahren stellte sich somit entsprechend dem Ablauf, wie in Abbildung 4. 17 links skizziert, dar. SnPb-Schichten werden, ebenso wie Zinn, in der Leiterplattenfertigung standardmäßig als Endsicht eingesetzt. Die Leiterplatten werden somit gegen Oxidation geschützt und die Metallresistschicht bleibt auch noch über längere Lagerungszeit hinweg lötfähig, was jedoch bei den hier verwendeten Materialien, aufgrund der geringen Temperaturstabilität, nicht möglich wäre /64/. SnPb-Schichten eignen sich jedoch auch als Grundmetallisierung für das Leitkleben, was bei diesen Thermoplasten eine realisierbare Verbindungstechnologie darstellt /95/.

Ziel innerhalb dieser Untersuchungen war es, mit dem Nd:YAG-Laser die SnPb-Schicht zu strukturieren ohne dabei die Kupferschicht anzugreifen, um wiederum den Energieeintrag in den Thermoplasten zu vermeiden. Die Durchstrukturierung bis auf das Substratmaterial erfolgte in einem anschließenden Ätzschritt in einem herkömmlichen  $H_2O_2$ -Bad. Das Verfahren war eine Anlehnung an das in /16/ beschriebene SIL-Verfahren. Der Unterschied hierzu war, daß keine Zinn (Sn), sondern eine SnPb-Schicht benutzt wurde, welches den Vorteil hatte, daß diese im Anschluß an die Strukturierung nicht notwendigerweise wieder entfernt werden mußte /45/. Das Verfahren verkürzte sich hierdurch gegenüber der Darstellung in Abbildung 4. 17 links um den Arbeitsschritt des Strippens.

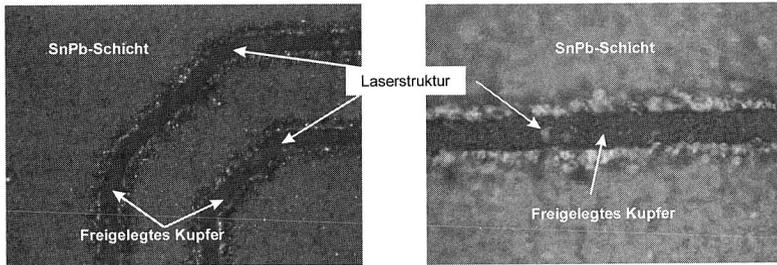


Abbildung 4. 25: Laserstruktur auf SnPb-Schicht

Die optimalen Einstellungen wurden wieder an kupferbeschichteten Epoxid-Harz-Leiterplatten ermittelt, welche ebenfalls SnPb beschichtet waren. Nach optischer Begutachtung wurde für weitere Versuche eine Devidereinstellung von  $D = 13$ , ein Lampenstrom von 13,2 A bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 8 mm/s im proportional mode gewählt. Der fixed mode erwies sich bei der Strukturierung der Zinn-Blei-Schicht als ungünstig, da es in Kurvenbereichen zu ungleichmäßig breiten Isolationskanälen kam. Generell stellte sich die Strukturierung einer SnPb-Schicht als unproblematisch heraus (Abbildung 4. 25). Durch die zwischen SnPb und Substrat liegende Kupferschicht hatte man ein ausreichend breites Bearbeitungsfenster, ohne das Material zu schädigen.

Abbildung 4. 26 links zeigt einen Querschnittscliff einer laserstrukturierten SnPb-Schicht und anschließend geätzten Kupferschicht. Man erkennt deutlich die Unterätzung, die je tiefer ausfiel, desto länger die Verweildauer im  $H_2O_2$ -Ätzbad war, die wiederum durch die zu ätzende Kupferschichtdicke bestimmt wurde. Im vorliegenden Fall verbreiterte sich der Isolationskanal von circa 30  $\mu m$  auf circa 70  $\mu m$ .

Neben der Unterätzung war in einer REM-Aufnahme des Isolationskanals (Abbildung 4. 26 rechts) zusätzlich noch der Primer am Isolationsboden erkennbar, der durch die Laserstrukturierung nicht entfernt werden konnte. Dies schließt eine weitere chemische Metallisierung aus, welches aufgrund der Verwendung von SnPb als laserstrukturierbares Coating jedoch nicht notwendig war.

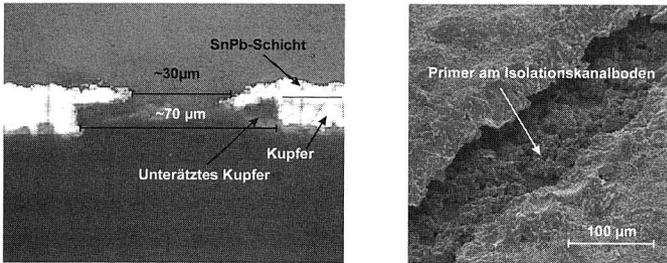


Abbildung 4. 26: Laserstrukturierte SnPb-Schicht und anschließend geätzter Isolationskanal

Die Strukturierung von SnPb-beschichteten Leiterplatten mittels Nd:YAG-Laser konnte somit als einfaches Strukturierungsverfahren thermisch empfindlicher Substratmaterialien angewendet werden. Die Isolationskanalbreiten wurden jedoch durch den Effekt des Unterätzens erhöht, was somit eine Limitierung der Leiterbahnbreiten im Hinblick auf Miniaturisierung bedeutet. Die Kombination dieses Verfahrens mit der Semiadditivtechnik vermindert diesen Effekt jedoch wiederum.

#### 4.2.3 Steigerung der Schälfestigkeit

Zur Bestimmung der Schälfestigkeit<sup>1</sup> der Kupferschicht auf den verschiedenen Basismaterialien wurden jeweils fünf Messungen pro Probe durchgeführt.

Die Haftfestigkeit des Kupfers auf PA 6 in Kombination mit dem lösemittelhaltigem Primer war teilweise so gering, daß von Strukturierungsversuchen abgesehen wurde. Auch bei anderen Kunststoff-Primer Kombinationen war teilweise eine nach IEC 326 zu geringe Haftfestigkeit zu beobachten, wobei jedoch sich der Primer vom Kunststoff gelöst hat, welches auf eine zu geringe Adhäsion des Primer-Kunststoff-Verbundes wies. Aus diesem Grund wurde durch Aufrauen mittels Korund- und Glaskugelstrahlen versucht, die mechanische Adhäsion des Haftvermittlers zu erhöhen.

Beim Korundstrahlen hat sich herausgestellt, daß kleine Partikel im Kunststoff zurück blieben und dadurch ein verkupfern, sowohl des wäßrigen als auch des lösemittelhaltigen Haftvermittlers, teilweise nicht mehr möglich war. Die Proben, die sich trotz des oben genannten Effektes metallisieren ließen, zeigten dennoch eine deutliche Steigerung der Schälfestigkeit um circa 0,3 N/mm (Abbildung 4. 27).

<sup>1</sup> Bestimmung nach IEC 326, siehe Kapitel 3.3.

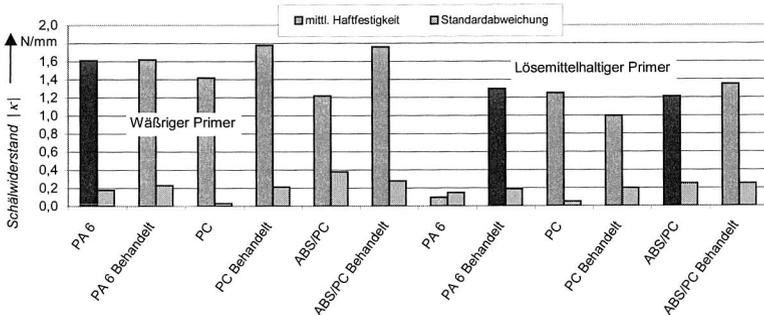


Abbildung 4. 27: Schälwiderstände  $|x|$  unbehandelter und mit Korund gestrahlter Proben (behandelt)

Im Gegensatz hierzu ergaben sich beim chemischen Metallisieren der Proben, die mit Glaskugeln aus Natrium-Kalk-Glas und einer durchschnittlichen Dichte von  $2,5 \text{ g/cm}^3$  bestrahlt wurden, keine Probleme. Die Größe der verwendeten Glaskugeln schwankte zwischen  $70 \text{ }\mu\text{m}$  und  $110 \text{ }\mu\text{m}$ . Der Bearbeitungsdruck betrug  $4 \text{ kg/cm}^2$ . Die Werte der Haftfestigkeit lagen in der gleichen Größenordnung wie beim Sandstrahlen. Der Primer verblieb nach dem Schältest der Kupferschicht auf der Kunststoffoberfläche zurück, was nachwies, daß die Adhäsion der Primerschicht auf der Kunststoffoberfläche höher war, als die der Kupferschicht auf dem Haftvermittler.

### 4.3 Zusammenfassung und Ausblick der Laserstrukturierung von Haftvermittlern

Es konnte innerhalb der vorgestellten Untersuchungen gezeigt werden, daß die lasergestützte Strukturierung, sowohl die additive als auch die subtraktive Variante, in Kombination mit der Primermetallisierung, eine dem Stand der Technik vorausgreifende Technologie darstellt. Sowohl im Hinblick auf die Vorteile, die durch die extreme Verkürzung der Prozeßkette zur Herstellung von Schaltungsträgern auf thermoplastischen Basismaterialien hervorgerufen werden, als auch durch die Ökologie und das Potential der Miniaturisierung der erzeugbaren Strukturen von unter  $30 \text{ }\mu\text{m}$ . Gegenüber bereits eingesetzten lasergestützten Strukturierungsverfahren wie dem Maskenbelichtungsverfahren /91/, der Laser-Direkt-Strukturierung /16/ und der Semi-Additivtechnik /91/ ergeben sich klare Vorteile bezüglich der Anzahl der Prozeßschritte und der erreichbaren Strukturweiten. Die Möglichkeiten

der Anwendung ergeben sich innerhalb der Technologien 3-D MID, der flexiblen Schaltungsträger als auch für Flex Interposer von CSP's<sup>1</sup>.

Weiterhin konnten aus den Erfahrungen bei der Strukturierung des Primers mit dem Excimer- und dem Nd:YAG-Laser allgemeine Erkenntnisse zur Laserstrukturierung von Thermoplasten gewonnen werden. So konnte gezeigt werden, daß die Kegelbildung durch Graphitablagerung bei der Bearbeitung von Polymeren nahe ihrer Schwellenergiedichte entsteht und ein verstärkter Materialabtrag am Übergang von Wand-Boden bei Thermoplasten mit geringer Schwellenergiedichte ein zu beachtendes Phänomen bei der Strukturierung mit dem UV-Excimer-Laser ist. Bei der Anwendung des Nd:YAG-Laser konnte dargelegt werden, daß man durch eine vorherige Betrachtung der Monomersequenz des zu bearbeitenden Polymer abschätzen kann, ob dieser zu einer Karbonisierung unterhalb der Laserstruktur neigen wird.

Eine Kombination der beiden Lasertypen beziehungsweise eine Kombination mit der Ätztechnik zur Erzeugung von Durchkontaktierungen kann ein weiterer Aspekt sein, der sich bei der Betrachtung des Verlaufs der Abtragsrate über die Energiedichte für Kupfer, bei Einsatz des Excimerlasers, ergeben hat (Abbildung 4. 28<sup>2</sup>).

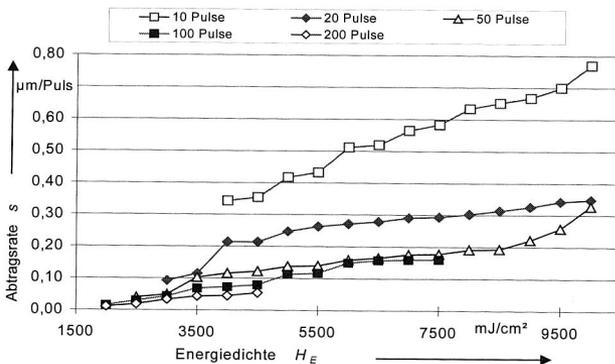


Abbildung 4. 28: Verlauf der Abtragsrate über der Energiedichte für Kupfer bei Einsatz des Excimerlasers

<sup>1</sup> CSP: Chip Size Packaging; Chip Scale Packaging; Verpackungsform integrierter Schaltungen.

<sup>2</sup> Ergebnisse beziehen sich auf ein Fläche von 1,5 mm x 0,075 mm; Die Abtragschwelle sinkt etwas bei geringeren Strukturbreiten.

Beachtet man den großen Unterschied bei den Abtragungsschwellen von Kupfer zum Primer beziehungsweise zu den verschiedenen Polymeren (Tabelle 4. 6), so kann man dies für ein neuen Verfahrensablauf nutzen.

Werkstoff	Schwellenergiedichte $H_T$ in $\text{mJ}/\text{cm}^2$
Kupfer	2000
ABS/PC-Blend	200
PC	200
PA 6	800
Lösemittelhaltiger Primer	600
Wässriger Primer	700

Tabelle 4. 6: Schwellenergiedichten  $H_T$  der untersuchten Materialien

So kann beispielsweise die Kupferschicht zunächst mit dem Nd:YAG-Laser oder durch ein Ätzmedium an den gewünschten Stellen geöffnet werden. Anschließend wird dann mittels UV-Excimer-Laser ohne zusätzliche Maske eine Art selbstthemendes Bohren durchgeführt. Hierbei sind sowohl vollkommen durchgängige Löcher als auch Sacklöcher denkbar. Anschließend kann mit der Primertechnologie oder anderen Durchkontaktierungsverfahren eine Verbindung zur nächsten beziehungsweise gegenüberliegenden Ebene erzeugt werden (Abbildung 4. 29).

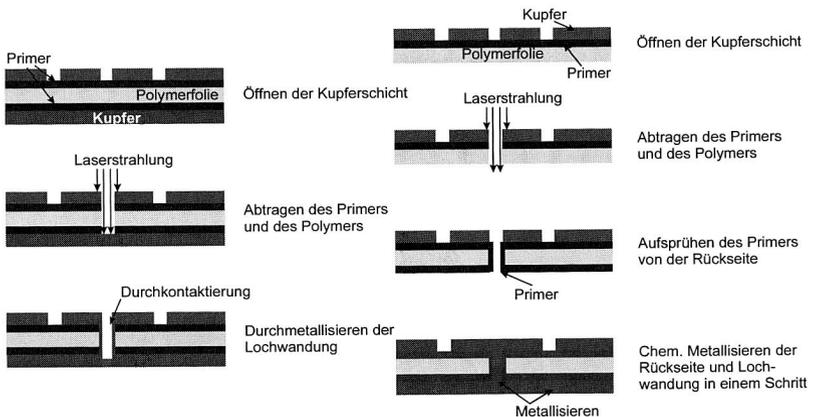


Abbildung 4. 29: Konzepte zur Durchkontaktierung

Es soll in diesem Kapitel nicht näher auf diese Verfahrensvariante eingegangen werden. Andererseits sollte mit diesem Beispiel jedoch ein Ausblick auf die nicht ausgeschöpften Möglichkeiten der Kombination von Technologien gegeben werden.

## 5 Strukturierte physikalische Vormetallisierung und chemisch-galvanische Nachverstärkung

Zur umweltfreundlichen und flexiblen Metallisierung bieten sich vor allem physikalische Verfahren an /40/. Ein breiter Einsatz dieser Verfahren, als Ersatz der chemischen Vorbehandlung für funktionelle Schichten, scheiterte bisher daran, daß entweder bei den technisch relevanten Kunststoffen keine ausreichende Haftfestigkeiten der physikalischen Schichten vorlagen oder sich diese bei der Nachverstärkung in den chemisch-galvanischen Kupferbädern gelöst haben.

Von dieser Situation ausgehend, wurde für relevante Kunststoffe<sup>1</sup> ein Beschichtungsablauf entwickelt, der als eigenständiger Prozeß für Schichten bis 5 µm und als Vormetallisierungsprozeß zur chemisch-galvanischen Nachverstärkung angewendet werden konnte. Die Strukturierung nahm eine gleichrangige Position innerhalb des entwickelten Verfahrens ein, da diese während der physikalischen Beschichtung, um einen zusätzlichen Arbeitsschritt zu vermeiden (Volladditivverfahren), oder während der chemisch-galvanischen Nachverstärkung, um den Verbrauch von Beschichtungsmaterial effizient zu gestalten (Semiadditivverfahren), vorgenommen wurde. Die Haftfestigkeiten (Stirnabzugverfahren) wurden entsprechend DIN EN 582 mit der in Kapitel 3.4 beschriebenen Vorrichtung gemessen.

Intention der nachfolgend beschriebenen Untersuchungen war somit, ein für eine Vielzahl von Kunststoffen anwendbares Verfahren zu entwickeln. Damit konnten strukturierte, elektrisch leitfähige Schichten mit einer nach DIN IEC 326 ausreichenden Haftung, die sich bei Bedarf in einem herkömmlichen chemischen oder elektrolytischen Kupferbad auf eine gewünschte Schichtdicke verstärken lassen, erzeugt werden. Ein Anspruch, der auch Thema öffentlicher Forschungsvorhaben war, jedoch aufgrund der Komplexität bisher nicht zufriedenstellend gelöst werden konnte /2/.

---

<sup>1</sup> Bzgl. MID- und Folien-Anwendungen.

## 5.1 Universelles Verfahren zur Metallisierung von Thermoplasten

Das erklärte Ziel der Untersuchungen zur Metallisierung war ein optimiertes Beschichtungsverfahren, das auf einfache Weise mit dem Vorgang der Strukturierung kombiniert werden<sup>1</sup> konnte. Somit mußte dahingehend unterschieden werden, ob eine vollflächige physikalische Metallisierung beziehungsweise die erzeugten Strukturen miteinander verbunden waren, oder ob ein komplexes Layout mit voneinander getrennten Strukturen vorlag. Je nach Anwendungsfall, konnte somit eine Nachverstärkung in elektrolytischen oder nur in chemischen Kupferbädern erfolgen /26/. Die technologischen und ökologischen Vorteile, die sich aus der Kombination einer physikalischen Vormetallisierung mit der chemisch-galvanischen Nachverstärkung ergeben, lassen sich im folgenden zusammenfassen:

- Ersatz der zur Vorbehandlung benötigten Beizlösungen und Quellmittel bei chemischer Metallisierung.
- Reduzierung der Anzahl der Einzelprozessschritte.
- Höhere Prozeßrobustheit als chemische Verfahren.
- Minimierung des Materialverbrauchs und des Abwassers.
- Höhere Flexibilität gegenüber einsetzbaren Thermoplasten.
- Metallisierung von chemisch schwer beziehungsweise nicht metallisierbaren Thermoplasten.

Nach Voruntersuchungen an verschiedenen Kunststoffen und Aufarbeitung des Standes der Technik wurden die optimalen vakuumtechnischen Prozeßparameter<sup>2</sup> zunächst an ebenen Platten der technischen Thermoplaste Liquid Crystal Polymer (LCP) und Polyamid 66 (PA 66) ermittelt, die beide als schwer metallisierbar galten, und anschließend mit chemisch-galvanischen Verfahren nachverstärkt<sup>3</sup>. In einem weiteren Schritt wurden die optimierten Parameter auf andere Thermoplaste übertragen.

---

<sup>1</sup> Thema des Kapitels 5.2.

<sup>2</sup> Aufgrund der Komplexität der vakuumtechnischen Beschichtung konnte nicht immer detailliert auf bestimmte Eigenschaften und Zusammenhänge eingegangen werden. Es wird auf die jeweilig angegebene Literatur verwiesen.

<sup>3</sup> Aufgrund der Typenvielfalt der verwendeten Thermoplaste werden relevante Eigenschaften an entsprechender Stelle erwähnt.

### 5.1.1 Voruntersuchungen zur physikalischen Metallisierung

Aus der Vielzahl der existierenden PVD-Verfahren /47; 58; 99/ wurde sich für das Magnetron-Sputterverfahren entschieden. Hierbei wird dem elektrischen Feld ein statisches Magnetfeld überlagert. Da in einem Magnetfeld auf einen bewegten Ladungsträger (Gasionen) eine Kraft ausgeübt wird, konnte durch geeignete Anordnung der Magnete bei niedrigeren Substrattemperaturen die Materialausbeute der Kathode gegenüber herkömmlichen PVD-Verfahren beträchtlich gesteigert werden /34/. Weiterhin wird dieses Verfahren bereits erfolgreich zum großflächigen Beschichten von Glas eingesetzt /152/, das somit auf eine hohe Wirtschaftlichkeit schließen läßt. Ein zusätzlicher Vorteil dieses Verfahrens war, daß das bei thermischer Verdampfung gültige Kosinusgesetz /45; 99/, welches besagt, daß aufgrund des geradlinigen Weges der Metallatome zwischen Verdampfer und Substrat eine homogene Metallschicht nicht realisiert werden kann, keine Gültigkeit mehr hat. Durch die Überlagerung eines elektrischen und magnetischen Feldes werden die Elektronen beim Magnetron-Kathodenerstäuben auf eine spiralförmige Bahn gelenkt und geben hierdurch den Impuls zur Ionisation der vorhandene Gasatome in beliebiger Richtung weiter /47/. Dies haben Untersuchungen an einem dreidimensionalen Probekörper bewiesen. Hinterschneidungen, Löcher und ein komplizierter Steckerbereich konnten gleichmäßig, ohne Manipulation des Bauteils beschichtet werden (Abbildung 5. 1). Bohrlochwandungen bis zu Aspektverhältnissen (Durchmesser/ Tiefe) von 1:4 konnten problemlos mit dieser Sputtertechnik beschichtet werden /50/.

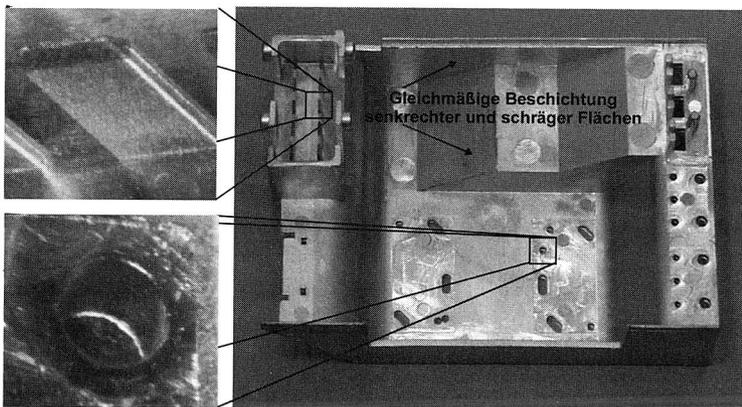


Abbildung 5. 1: Gleichmäßige Beschichtung dreidimensionaler Bauteile ohne Manipulation während der Metallisierung

Um eine haftfeste Schicht auf einer Oberfläche zu erhalten, sind eine Vielzahl physikalischer, chemischer und mechanischer Wechselwirkungen ausschlaggebend. Die unterschiedlichen Theorien der Haftmechanismen sind in der Literatur ausführlich dargelegt /151; 169/. Prinzipiell lassen sich die Behandlungen zur Steigerung der Adhäsion sowohl vor und nach der eigentlichen Metallisierung, als auch innerhalb und außerhalb der Beschichtungskammer<sup>1</sup> durchführen.

Die Möglichkeiten der Behandlung der Kunststoffoberflächen zur Erhöhung der Haftfestigkeit einer nachträglich aufgetragenen Metallschicht außerhalb des Rezipienten sind zahlreich und zielen meist auf eine bestimmte Adhäsionstheorie ab. Als Beispiele seien mechanische /36; 40; 47/ und chemische Verfahren /49; 169/, wie das Sandstrahlen und das Beizen mit Chromschwefelsäure genannt, welche die zu beschichtenden Oberflächen vergrößern, sowie Vorbehandlungen mit Ozon oder oxidierenden Gasen /43/, die Beflammung /28/, die Bestrahlung mit kurzwelligem, ultraviolettem Licht /13; 37; 70/ oder Corona-Entladung /23; 160/ und das chemische Beizen, welche eine Veränderung der Oberflächenspannung und Polarität zum Ergebnis haben. Deren Wirkungen sind in der angegebenen Literatur ausführlich beschrieben. Neben spezifischen Vor- und Nachteilen dieser Verfahren, wurde zum einen aus ökonomischen Gründen und zum anderen zur Verkürzung der Prozeßkette auf jegliche Vorbehandlung außerhalb des Rezipienten verzichtet. Selbst eine Reinigung der Oberflächen wurde nicht durchgeführt, wenn von einer sorgfältigen Handhabung ausgegangen werden konnte.

Thermische Behandlungen des Substrates vor und nach der Metallisierung wurden in die Untersuchungen miteinbezogen, um einen Einfluß innerer thermischer Spannungen des Spritzgießens beziehungsweise des Sputterprozesses zu vermeiden. Eine Erwärmung der Thermoplasten konnte auch innerhalb des Rezipienten durchgeführt werden /99/, was sich aus prozeßtechnischer Sicht auch anbot. Hierzu wurde ein Plasmaätzprozeß, welcher das Substrat mit Inertgasionen beschoß, angewendet. Dieser entfernte zusätzlich oxidische Reaktionsschichten auf der Oberfläche des Substrates und aktivierte dieses /93; 103/. Während des Ätzens wurden die Gasionen durch das angelegte hochfrequente Wechselfeld zu einem ständigen Richtungswechsel gezwungen. Dabei traten Verlustleistungen auf, die in Abhängigkeit des dielektrischen Verlustfaktors, das verwendete Substrat erwärmten.

---

<sup>1</sup> Auch Rezipient genannt.

Eine zusätzliche Erwärmung des Substrats erfolgte durch den Beschuß der Oberfläche mit Ionen und Elektronen. Die Ätzdauer bestimmte maßgeblich die beim Ätzzvorgang auf der Substratoberfläche ablaufenden Reaktionen. Wurde diese erhöht, kam es zu einer zunehmenden Aktivierung und Erwärmung der Oberfläche. Wurde die Hochfrequenz (HF)-Leistung erhöht, so stieg die Energie der im Plasma erzeugten Ionen und Elektronen. Dadurch erhielten immer mehr Elektronen die notwendige Ionisationsenergie, der Ionisationsgrad des Plasmas nahm zu. Durch einen intensiveren „Beschuß“ der Substratoberfläche mit Ionen war die Wahrscheinlichkeit chemischer und physikalischer Reaktionen, die zu einer Aktivierung und Modifizierung der Oberfläche führten, weitaus größer als beim Plasmaätzen mit geringeren HF-Leistungen.

Zudem wurde auch hier der Reinigungseffekt der Substratoberfläche von mikroskopischen Schichten und Verunreinigungen erhöht<sup>1</sup>.

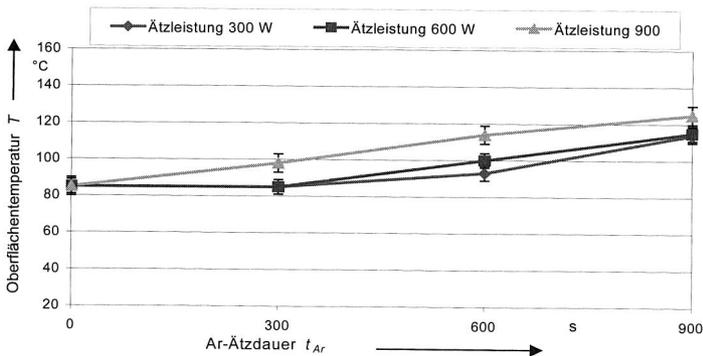


Abbildung 5. 2: Einfluß der Ar-Ätzdauer  $t_{Ar}$  und -leistung  $P_{Ar}$  auf die Substrattemperatur  $T$

Inwieweit die Dauer und Intensität des Plasmaätzens das Substrat erwärmte, zeigt Abbildung 5. 2<sup>2</sup> am Beispiel von PA 66 bei Verwendung von Argon als Ätzzgas. Die Erwärmung der Kunststoffplatten hing somit vornehmlich von der Dauer des Ätzprozesses ab, im geringeren Maße von der Intensität.

<sup>1</sup> Die Wechselwirkungsprozesse der Niederdruckplasmabehandlung sind in /12; 13; 93; 160/ beschrieben.

<sup>2</sup> Bei allen Diagrammen mit Standardabweichungen wurde von einer Grundgesamtheit von fünf Proben pro Meßwert ausgegangen, worauf jeweils fünf Messungen durchgeführt wurden und der Maximal- und Minimalwert nicht in die Auswertung miteinbezogen wurden.

Die Glasübergangstemperatur<sup>1</sup>  $T_G$  des verwendeten Kunststoffes wurde hierbei überschritten, wodurch Nachkristallisationsprozesse nicht ausgeschlossen werden konnten. Deren Einflüsse auf die Haftfestigkeit waren jedoch nicht Gegenstand näherer Untersuchungen. Weiterhin haben Messungen ergeben, daß keine dimensionsrelevanten Verzüge eines exemplarischen 3-D MID Bauteils aus Polybutylenterephthalat<sup>2</sup> (PBT), das eine geringere Temperaturstabilität aufweist als LCP oder PA 66, durch die Temperaturbelastung während der Plasmavorbehandlung und Beschichtung aufgetreten waren.

Mit unterschiedlichen Ätzgasen lassen sich Substratoberflächen gezielt durch das Anlagern funktioneller Gruppen verändern. Tabelle 5. 1 zeigt mögliche Einflüsse verschiedener Prozeßgase.

Prozeßgas	Resultierende funktionelle Gruppen
Argon (Ar)	Oxide
Sauerstoff (O <sub>2</sub> )	Carbonyl; Carboxyl; Ester; Ether; Hydroxyl; Peroxide
Stickstoff (N <sub>2</sub> ), Ammoniak (NH <sub>3</sub> )	Amine; evtl. Nitro(so)-Verb.; Nitril
Wasser (H <sub>2</sub> O)	Hydroxyl; Aldehyd

Tabelle 5. 1: Beispiele funktioneller Gruppen auf Polymersubstraten nach der Plasmabehandlung /12/

Die theoretischen Annahmen aus der Literatur haben sich bei Versuchen zum Plasmaätzen zweier LCP-Typen<sup>3</sup> mit reinem Argon (Ar) bestätigt. Argon als inertes Gas modifiziert die Oberfläche vornehmlich physikalisch, wodurch die erhöhten Haftfestigkeiten auf überwiegend mechanischen Effekten beruhen.

Dies konnte in Abbildung 5. 3 am Beispiel von LCP A beobachtet werden. Mit zunehmender Oberflächenrauigkeit stieg die Stirnzugfestigkeit von aufgesputtertem Kupfer (Beschichtungszeit 1200 s) bis zu einem Maximalwert, anschließend verlor die Vergrößerung der Oberfläche ihre Wirkung. LCP B hingegen zeigte diese Eigenschaft nicht. Bei unwesentlicher Veränderung der Oberflächenrauigkeit stieg trotzdem die Haftfestigkeit. Die chemischen Haftmechanismen überwogen hier die mechanischen. Somit wurde für weitere Versuche Sauerstoff (O<sub>2</sub>)- beziehungsweise ein Argon-Sauerstoff (Ar/O<sub>2</sub>)-Gemisch als Ätzgas verwendet. Durch die O<sub>2</sub>-Komponente sollte zusätzlich eine intensive chemische Aktivierung erreicht werden, welches eine positive Auswirkung auf die Schichthaftung erwarten ließ.

<sup>1</sup>  $T_G$ : 72 °C; Ultramid® A3HG5; Hersteller: BASF.

<sup>2</sup> Crastin® SK 603; Hersteller: DuPont de Nemours.

<sup>3</sup> LCP A: Zenite® 6130; LCP B: Zenite® 6330; Hersteller: DuPont de Nemours.

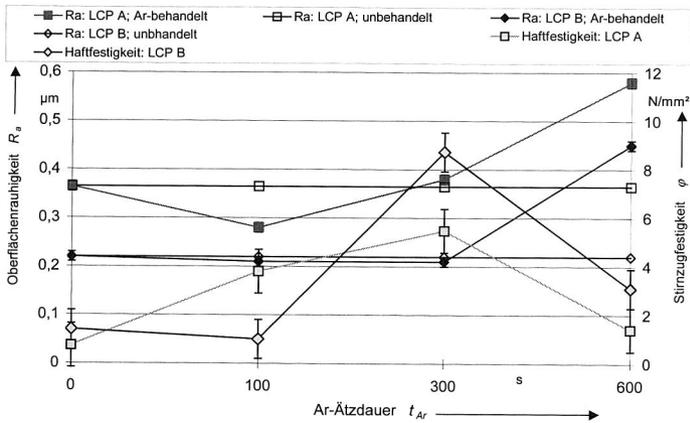


Abbildung 5. 3: Stützfestigkeit  $\varphi$  und Oberflächenrauigkeit  $R_a$  in Abhängigkeit der Plasmaätzdauer  $t_{Ar}$  mit Argon

Die haftverbessernde Wirkung von Zwischenschichten wie zum Beispiel Titan, Tantal, Aluminium, Chrom oder Chrom/Nickel, die vor der eigentlichen leitfähigen Kupferschicht aufgebracht werden, war bekannt. So ist zum Beispiel Kupfer im Gegensatz zu oben genannten Metallen nicht in der Lage kovalente Bindungen zu Polyimid aufzubauen /13; 155/. Was ebenso ein Grund für die geringen Haftfestigkeiten bei den hier untersuchten LCP-Typen sein konnte. Wesentliche Nachteile von Haftvermittlerschichten waren, daß die verwendeten Metalle zum Teil nicht oder nur schwer ätzbar sind, sich aufgrund ihrer hohen Oberflächenwiderstände nicht elektrolitisch nachverstärken ließen und sich der Gesamtprozess verlängerte.

Somit wurden die Untersuchungen mit Kupfer (Cu), Palladium (Pd) und Aluminium (Al) durchgeführt, die alle direkt in cyanidischem Elektrolyten verkupfert werden konnten. Palladium wurde untersucht, da es zum einen, nach Ruthenium, das billigste Platinmetall war und sich im Gegensatz zu allen anderen in konzentrierter Salpetersäure löste, wodurch auch eine Ätzstrukturierung möglich war. Weiterhin war durch dessen hoher chemischer Beständigkeit, bei direktem Einsatz als Leiterbahn keine weitere Schutzschicht notwendig /49/. Palladium ist gut lötlbar und löste sich im Vergleich zu Kupfer um den Faktor 10 langsamer in Sn60Pb40-Lot (Pd löst sich mit circa  $0,005 \mu\text{m/s}$  und Cu mit circa  $0,1 \mu\text{m/s}$  bei circa  $230 \text{ }^\circ\text{C}$ ), wodurch Schichtstärken von  $2 \mu\text{m}$  noch gut lötlbar waren /85/. Aluminium hingegen war kostengünstiger als Kupfer und als Beschichtungsmetall für Reflektoren weit verbreitet. Dessen gute Haftfestigkeit war bekannt /92/ und es war unbeständig gegen verschiedene Säuren und Laugen /49/.

Zusammenfassend konnte der untersuchte Vakuum-Beschichtungsprozeß somit in das Plasmaätzen, das Sputtern<sup>1</sup> und Abkühlen unterteilt werden, wobei die Einflüsse der Ätzgase Ar/O<sub>2</sub> und O<sub>2</sub>, der Ätzdauer und der Beschichtungsmetalle Kupfer, Palladium und Aluminium untersucht wurden. Da für Konstruktionsteile auch Kunststoffe wie z.B. ABS und PA 6 mit einer thermischen Stabilität von 90 °C bis 140 °C verwendet werden, wurden die auftretenden Temperaturen während der physikalischen Metallisierung durch geeignete Prozeßführung kleiner 140 °C gehalten, um dem Verfahren ein weites Anwendungsfeld zu eröffnen.

### 5.1.2 Prozeß zur physikalischen Metallisierung<sup>2</sup>

Vor dem Beschichten wurden die Kunststoffe bei unbekannter Vorgeschichte in einem Ultraschallbad mit Intensivreiniger von Verschmutzungen befreit. Auf diesen Schritt wurde bei sorgfältiger Handhabung nach dem Spritzgießen beziehungsweise Extrudieren verzichtet. Ein Teil der Proben wurden danach einer 24-stündigen Wärmebehandlung bei 200 °C unterzogen. Der Rest zusammen mit den Polyamiden bei 60 °C für mindestens zwei Stunden getrocknet. Die aufgetragenen Schichtdicken lagen bei maximal 1,5 µm, wobei anlagentechnisch Schichten unter 1 µm nicht erreicht werden konnten.

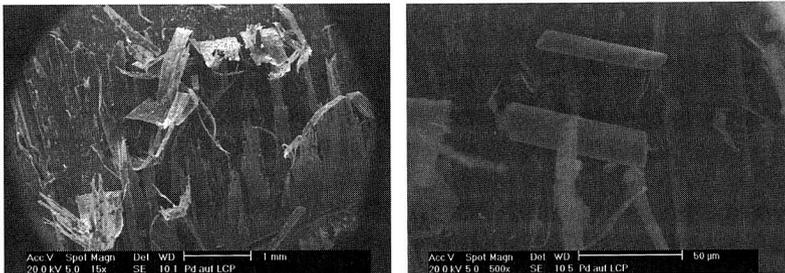


Abbildung 5. 4: REM-Aufnahme einer Prüffläche eines LCP-Substrates nach dem Stirnzugtest

Bei den gemessenen Haftfestigkeiten der beschichteten LCP-Substrate war festzustellen, daß alle aufgetragenen Schichten sich unter Schädigung des Kunststoffes vollständig ablösten.

<sup>1</sup> Unter Sputtern soll das hier angewandte Verfahren des Magnetron-Kathodenerstäubens verstanden werden.

<sup>2</sup> Bei der Durchführung der Versuchsreihen wurde der Verfasser zum Teil durch Herrn Dipl.-Ing. G. Kolbeck, Herrn W. Fruth und bzgl. LCP von dem Central Research & Development Center der Fa. DuPont unterstützt.

Ein Klebeband-Test brachte die Erkenntnis, daß dieses Verhalten bei manchen LCP-Varianten bereits bei Belastungskräften der Schicht unter 4 N auftrat. Aufnahmen mit dem Rasterelektronen-Mikroskop zeigten, daß ein Versagen der kunststoffinternen Haftungskräfte (Kohäsion) innerhalb einer sogenannten Spritzhaut vorlag (Abbildung 5. 4).

Dies bedeutete, daß die gemessenen Maximalkräfte beim Stirnabzugsversuch nicht die eigentlichen Haftungskräfte der Schicht wiedergaben, sondern die Grenzbelastungskräfte des Kunststoffverbundes repräsentierten. Somit konnten die gemessenen Werte bei LCP als Mindesthaftungskräfte interpretiert werden.

Um dieses, für flüssigkristalline Polymere, spezifische Problem zu minimieren, erfolgte nach dem Beschichten eine erneute Wärmebehandlung aller LCP für 48 Stunden bei einer Temperatur von 150 °C<sup>1</sup>.

<i>Schichtwerkstoff</i>	<i>Beschichtungsdauer in s</i>	<i>Beschichtungsleistung in W</i>
Aluminium auf PA 66	675	2 Targets á 3000
Aluminium auf LCP	900	2 Targets á 2000
Kupfer	340	2 Targets á 3000
Palladium	2000	1 Target á 500

Tabelle 5. 2: Konstant gehaltene Parameter für die einzelnen Schichtwerkstoffe und Substrate

Tabelle 5. 2 zeigt die Prozeßparameter, welche in Vorversuchen ermittelt und während der Beschichtung bei den einzelnen Schichtwerkstoffen konstant gehalten wurden. Die Beschichtungsdauer und -leistung wurde in Abhängigkeit der auftretenden Prozeßtemperaturen und der materialspezifischen Beschichtungsrate festgelegt. Zusätzlich wurde bei allen Prozessen eine Anodenspannung von 60 V und eine HF-Leistung von 30 W eingestellt. Der Gasdurchfluß beim O<sub>2</sub>-Ätzen lag bei 50 mln, beim Ar/O<sub>2</sub>-Ätzen bei 25 mln / 25 mln.

Bei den Untersuchungen zeigte sich, daß alle Schichtwerkstoffe ohne Ätzung annähernd die gleichen Haftfestigkeiten aufwiesen. Mit zunehmender Ätzdauer nahmen die gemessenen Haftfestigkeiten bis zu einem Zeitpunkt von 600 s beim Ar/O<sub>2</sub>-Ätzen für alle Substrate und Schichtwerkstoffe, mit Ausnahme von Palladium auf Polyamid und Kupfer auf LCP (Abbildung 5. 5), zu, während diese beim O<sub>2</sub>-Ätzen länger als 300 s sowohl bei Aluminium als Schichtwerkstoff als auch bei Polyamid als Träger einen deutlichen Rückgang der Stirnzugfestigkeiten zur Folge hatte (Abbildung 5. 6) beziehungsweise keine Verbesserungen erzielt wurden.

<sup>1</sup> Nach Angaben von DuPont konnte aufgrund von Nachkristallisationsprozessen die Haftfestigkeit der Schicht gesteigert werden.

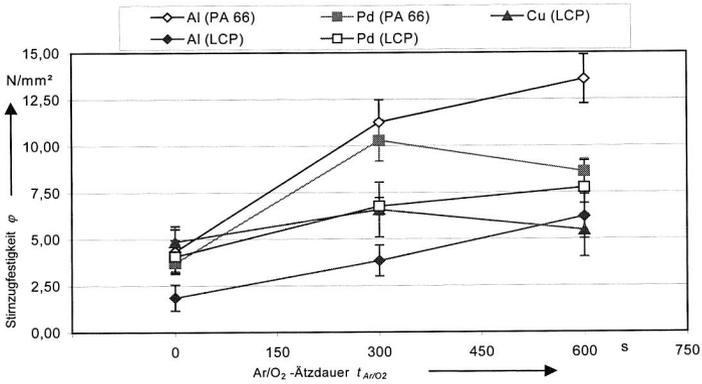


Abbildung 5. 5: Einfluß der Ätzdauer  $t_{Ar/O_2}$  auf die Stirnzugfestigkeit  $\varphi$  beim Ar/O<sub>2</sub>-Ätzen (Ätzleistung 600 W)

Lediglich bei Palladium auf LCP konnte auch beim O<sub>2</sub>-Ätzen für eine Ätzdauer über 300 s eine Zunahme der Schichthaftung festgestellt werden, jedoch nicht so vehement wie beim Ar/O<sub>2</sub>-Ätzen. Dies zeigte, daß LCP auf jede Art von Plasma-behandlung mit erhöhten Haftfestigkeiten zur aufgebrachtten Metallschicht reagierte und eine Kombination eines physikalisch-chemisch wirkenden Plasmas als erfolgversprechend angesehen wurde. Polyamid hingegen reagierte wesentlich schneller als LCP auf die Plasmabehandlungen.

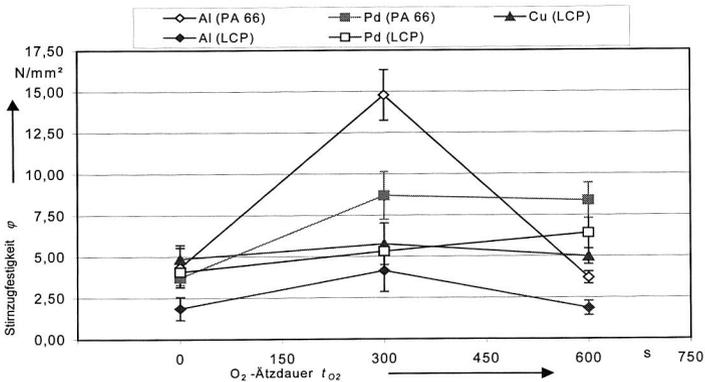


Abbildung 5. 6: Einfluß der Ätzdauer  $t_{O_2}$  auf die Stirnzugfestigkeit  $\varphi$  beim O<sub>2</sub>-Ätzen (Ätzleistung 600 W)

Eine Behandlung mit Sauerstoff hat zwar sein Maximum bereits nach 300 s gefunden, dieses lag jedoch höher als das Maximum bei einer Ar/O<sub>2</sub>-Behandlung nach 600 s. Kupfer hingegen zeigte nur sehr begrenzte Reaktionen auf die Plasmabehandlungen. Weder Ar/O<sub>2</sub> noch O<sub>2</sub> haben hier einen eindeutigen Effekt erzeugen können.

Die Untersuchungen bezüglich des Einflusses der Ätzleistung auf die Haftungsergebnisse legten dar, daß sich eine Erhöhung dieser, bei allen Substraten und Schichtwerkstoffen im begrenzten Umfang positiv auf die Haftung auswirkte (Abbildung 5. 7).

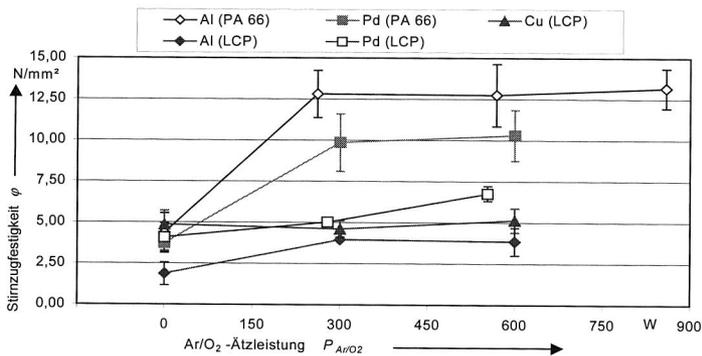


Abbildung 5. 7: Einfluß der Ätzleistung  $P_{Ar/O_2}$  auf die Stirnzugfestigkeit  $\phi$  beim Ar/O<sub>2</sub>-Ätzen (Ätzdauer 300 s)

Die Haftfestigkeitszunahmen zwischen 0 W und 300 W konnten alleine auf die Wirkung der Ätzdauer von 300 s mit dem entsprechenden Gas zurückgeführt werden (vgl. Abbildung 5. 7). Eine Erhöhung der Ätzleistung bei konstanter Ätzdauer zeigten bei Ar/O<sub>2</sub> keine bis sehr geringe Wirkungen, die bei Betrachtung der Standardabweichungen lediglich bei Palladium in Kombination mit LCP als relevant angesehen werden konnten.

Bei einer Erhöhung der O<sub>2</sub>-Ätzleistung (Abbildung 5. 8) konnte eine zunehmende Haftfestigkeit bei allen Kunststoffen festgestellt werden. Selbst Kupfer zeigte hier eine geringe Zunahme der Haftfestigkeit im Vergleich zu den Auswirkungen bei Variation der Ätzdauer beziehungsweise bei Verwendung von Ar/O<sub>2</sub> als Ätzgas.

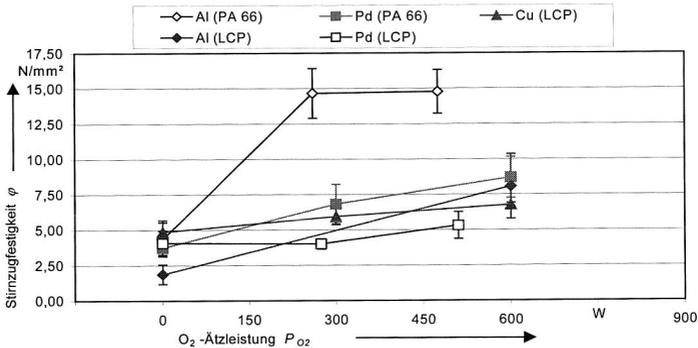


Abbildung 5. 8: Einfluß der Ätzleistung  $P_{O_2}$  auf die Stirrzugfestigkeit  $\phi$  beim  $O_2$ -Ätzen (Ätzdauer 300 s)

Im weiteren wurde die Auswirkung der einzelnen Plasmabehandlungen auf die Oberflächenspannung untersucht, welche als Kennzahl für die Haftungseigenschaften einer Schicht auf einem Substrat gilt. Mit steigender Oberflächenspannung kommt es theoretisch auch zu einer Verbesserung der Schichthftung /196/.

Die gemessenen Oberflächenspannungen  $\delta_o$  der ungeätzten und geätzten Substrate mit den entsprechenden Schichtwerkstoffen sind in Tabelle 5. 3 zusammengefaßt. Um die Vergleichbarkeit sicherzustellen wurden die Ätzparameter (Ätzleistung 600 W, Ätzdauer 600 s) bei allen Schichtwerkstoffen und Substraten konstant gehalten.

Schichtwerkstoff	Substrat	$\delta_o$ in mN/m		
		Ungeätzt	$O_2$	Ar/ $O_2$
Aluminium	PA 66	32 - 34	< 30	> 44
Palladium	PA 66	36 - 38	36 - 38	32 - 34
Kupfer	LCP	36 - 38	36 - 38	34 - 36
Aluminium	LCP	34 - 36	34 - 36	38 - 40
Palladium	LCP	40 - 42	> 44	> 44

Tabelle 5. 3: Einfluß der Ätzgase auf die Oberflächenspannungen der Substrate

Stellt man die Oberflächenspannung der korrespondierenden Schichthafffestigkeit gegenüber, war deutlich ein Zusammenhang erkennbar. Abbildung 5. 9 zeigt das Verhalten der Oberflächenspannung und der Hafffestigkeit für verschiedene Ätzgase am Beispiel eines mit Aluminium beschichteten Polyamids. Das Diagramm verdeutlicht, daß mit Zunahme der Oberflächenspannung eine Erhöhung der Hafffestigkeit verbunden war.

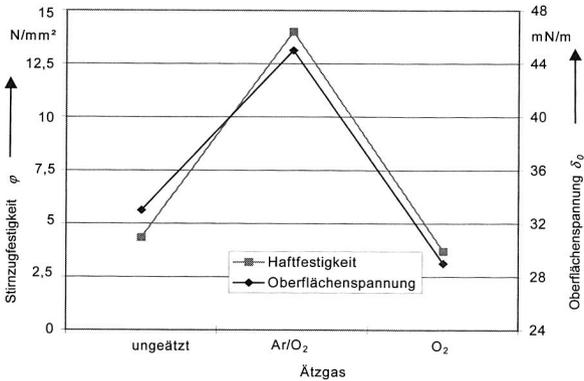


Abbildung 5. 9: Oberflächenspannung und Stirnzugfestigkeit für verschiedene Ätzgase am Beispiel von Aluminium auf Polyamid

Dies konnte für alle verwendeten Schichtwerkstoffe und Thermoplaste nachgewiesen werden. Im folgenden wurden die verschiedenen Ätzgase hinsichtlich der maximal erreichten Stirnzugfestigkeiten der verwendeten Schichtwerkstoffe miteinander verglichen. Hierzu wurden 15 Chargen á fünf Proben beschichtet. Zur Auswertung wurde der Mittelwert aus fünf Messungen pro Probe ermittelt, wobei der jeweilige Minimal- und Maximalwert pro Probe nicht in die Auswertung einbezogen wurde.

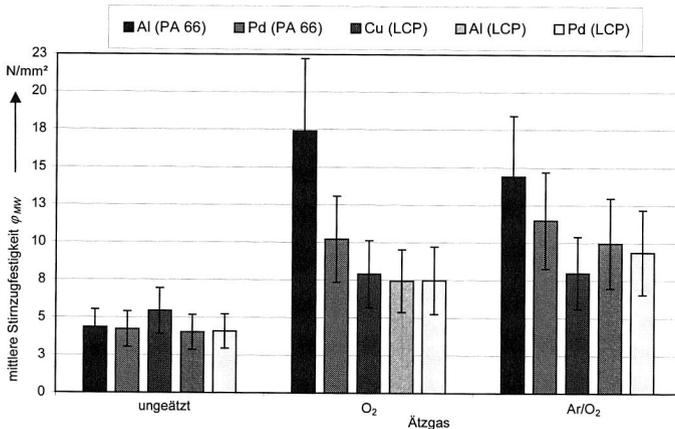


Abbildung 5. 10: Erreichte Stirnzugfestigkeiten  $\varphi_{MW}$  in Abhängigkeit der verwendeten Ätzgase

Abbildung 5. 10 zeigt die maximal erreichten Schichthafungen für die Ätzgase  $O_2$  (Ätzleistung 600 W, Ätzdauer 300 s) und  $Ar/O_2$  (Ätzleistung 600 W, 600 s) und ungeätzte Proben. Ätzleistung und Ätzdauer wurden entsprechend der besseren Ergebnisse der zuvor durchgeführten Versuche festgelegt.

Die Versuche haben somit ergeben, daß bei allen Kunststoffen und Beschichtungsmaterialien eine Plasmabehandlung, sowohl mit  $O_2$  als auch mit  $Ar/O_2$  zu enormen Haftfestigkeitssteigerungen führten. Die Ergebnisse der Behandlungen mit  $Ar/O_2$  fielen bis auf die Kombination Aluminium auf PA 66 höher aus, jedoch waren auch die Ergebnisse dieser Kombination mit einer  $Ar/O_2$ -Behandlung noch als überdurchschnittlich gut zu bewerten.

Auch die LCP-Kunststoffe konnten ohne nennenswerte Schwierigkeiten mittels dem PVD-Verfahren metallisiert werden. Lediglich bereitete der kunststofftechnische Aufbau der Substrate Probleme beim Aufbringen hafter Schichten. So kam es bei der Ermittlung der Schichthaffigkeiten in allen Fällen zu einer Schädigung des Kunststoffes, während sich die Schichten vollständig ablösten. Dies kann man besonders deutlich in Abbildung 5. 10 sehen. Die Haftfestigkeitswerte der mit  $O_2$ -Plasma vorbehandelten Oberflächen aller Schichtwerkstoffe befanden sich im Mittelwert auf einem Niveau. Die chemische Anlagerung polarer Gruppen, beziehungsweise die Aufoxidierung der Kunststoffoberfläche führte nur bis zu einem bestimmten Wert (bei diesen Parametern circa  $8 \text{ N/mm}^2$ ) zu einer Haftfestigkeitssteigerung. Somit wurden die kohäsiven Grenzhaftungen des Kunststoffes erreicht und nicht die adhäsiven der Schicht, die repräsentativ für die maximale Schichthaftung sind. Die gemessenen Werte konnten jedoch als Mindesthaftigkeiten der Schicht interpretiert werden. Das  $Ar/O_2$ -Plasma mit seinem mechanisch wirkenden Argon-Anteil modifizierte die Oberfläche so, daß höhere Werte erreichbar waren, was auf eine Entfernung der thermoplastischen Spritzhaut zurückzuführen war.

Da die Substrattemperaturen, die während der Ätz- und Beschichtungsprozesse auftraten, bei den hochtemperaturbeständigen LCP-Kunststoffen eine untergeordnete Rolle spielten, wurden zur Anfertigung von Proben für die galvanische Nachverstärkung mit Kupfer diese im Hinblick auf die Ätzdauer noch einmal optimiert. Die Ätzleistung wurde konstant bei  $600 \text{ W}^1$  belassen. Lediglich die LCP-Proben wurden zusätzlich nach der Substratreinigung bei  $200 \text{ °C}$  für 24 Stunden getrocknet.

---

<sup>1</sup> Anlagentechnisch bedingt konnten höhere Ätzleistungen nicht eingestellt werden.

Hierdurch wurden Stirnzugfestigkeiten bis zu  $17,5 \text{ N/mm}^2$  auf LCP und  $25 \text{ N/mm}^2$  auf PA 66 mit Palladium erreicht, die entsprechend der Umrechnung aus Kapitel 3.5 Schältestigkeiten von annähernd  $0,5 \text{ N/mm}$  beziehungsweise  $1,3 \text{ N/mm}$  entsprachen und als Ausgangssituation für das elektrolytische Verstärken als ausreichend angesehen werden konnten.

### 5.1.3 *Galvanische Nachverstärkung physikalisch vormetallisierter Thermoplaste*

Da PVD-Verfahren ihre hohe Wirtschaftlichkeit beim Aufbringen dicker Schichten im allgemeinen verlieren, wurde eine Kombination mit der chemisch-galvanischen Nachverstärkung als ökonomisch sinnvoll und ökologisch vertretbar angesehen /33/ (siehe Kapitel 2.4).

Die Zielsetzung bestand somit in der direkten Nachverstärkung mit Kupfer der aufgetragenen Sputter-Schichten. Die Versuche konzentrierten sich vor allem auf die elektrolytische Nachverstärkung, da hier eine Reihe verschiedener Beschichtungsbäder zur Auswahl standen. In der Praxis werden jedoch fast ausschließlich cyanidische und schwefelsaure Kupferelektrolyte eingesetzt. Diese wurden bereits in Kapitel 2.2.1 erläutert. In der Literatur wird des öfteren von der elektrolytischen Nachverstärkung einer dünnen PVD-Schicht geschrieben, jedoch wenig darüber, daß der chemogalvanische Prozeß an die veränderte Ausgangsposition angepaßt werden muß /50; 155; 158/.

So wird in konventionellen galvanischen Prozessen in der Leiterplattenfertigung ein starkes chemisches Anätzen bei Prozeßbeginn durchgeführt, wobei bis zu  $2 \mu\text{m}$  der vorherigen Schicht entfernt werden, was somit zur Zerstörung der aufgetragenen dünnen Sputter-Schicht führt. Zur Reinigung wurden die Proben daher maximal 15 Sekunden in 5%-iger Schwefelsäure dekapiert, was dünne Oxidfilme und andere Passivschichten, die sich während der Lagerung und Handhabung der Kunststoffproben bilden konnten, entfernte. Auf diesen Schritt wurde jedoch verzichtet, wenn sichergestellt war, daß die Probenoberflächen noch rein waren.

Vorversuche zur Verkupferung der Palladium- und Kupfer-Sputterschicht in schwefelsauren Elektrolyten, an denen eine Stromdichte von  $2,5 \text{ A/dm}^2$  angelegt wurde, zeigten, daß eine galvanische Nachverstärkung ohne Schwierigkeiten durchgeführt werden konnte. Anschließende Schältests haben jedoch keine reproduzierbaren Ergebnisse ergeben, welche nur mit erhöhtem Forschungsaufwand innerhalb der Galvanotechnologie erreicht werden hätten können.

Für weitere Untersuchungen zum elektrolytischen Verkupfern wurde somit ein cyanidisches Kupferbad ausgewählt, welches auch eine direkte elektrolytische Nachverstärkung der Aluminium Schicht erlaubte. Die wesentlichen Vorteile cyanidhaltiger gegenüber sauren Kupferelektrolyten waren, daß sie sehr gut decken, feinkörnig waren und eine außergewöhnlich gute Haftfestigkeit besaßen /49/. Vorzüge, die besonders in Hinblick für Anwendungen als flexible Leiterplatte oder 3-D MID mit komplizierten geometrischen Formen überzeugten. Das gewählte Bad wurde ohne Veränderung von Zusätzen des Herstellers bei einer Temperatur zwischen 40 °C bis 65 °C mit einem Wirkungsgrad von 70% bis 95% betrieben.

Damit sich die Kunststoffteile und -folien, aufgrund ihrer geringeren Dichte gegenüber der verwendeten Flüssigkeit des elektrolytischen Bades nicht vom Gestell lösten, wurden sie an mindestens zwei Punkten befestigt. Zur Vermeidung einer gegenseitigen Abschirmung war der Teileabstand mindestens 10 mm.

Bei allen Proben wurde zunächst mit einer Stromdichte von 0,1 A/dm<sup>2</sup> bis 0,5 A/dm<sup>2</sup> vorverkupfert, um ein Verbrennen an Kontaktstellen zu vermeiden und bei 3-D MID Bauteilen kritische Bereiche, wie Wandübergänge, Stufen und scharfe Kanten, zu verstärken. Nach etwa fünf Minuten wurde die Stromdichte auf 1 A/dm<sup>2</sup> erhöht, was einem Schichtwachstum von circa 0,5 µm/min entsprach und auf circa 25 µm Kupfer verstärkt. Wichtig war, daß die Bauteile vor dem Eintauchen in das Kupferbad bereits an Spannung lagen.

Mit dieser Vorgehensweise konnten alle Proben zuverlässig mit Kupfer metallisiert werden.

Nach der galvanischen Metallisierung wurden die LCP-Proben bei 150 °C und die Polyamid-Proben bei 85 °C für 24, 48 und 96 Stunden getempert und deren Schälfestigkeiten gemessen (siehe Kapitel 3.3) und auf die Standardleiterplattenstärke von 35 µm normiert, da untersucht wurde, ob eine nachträgliche Wärmebehandlung die Haftfestigkeiten beeinflusste. Das Trocknen von Thermoplasten vor dem eigentlichen Lötprozeß ist aufgrund der entweichenden Feuchtigkeit und mit dem hiermit verbundenen Risiko der Ablösung der Leiterbahnen, in jedem Fall empfehlenswert /180/.

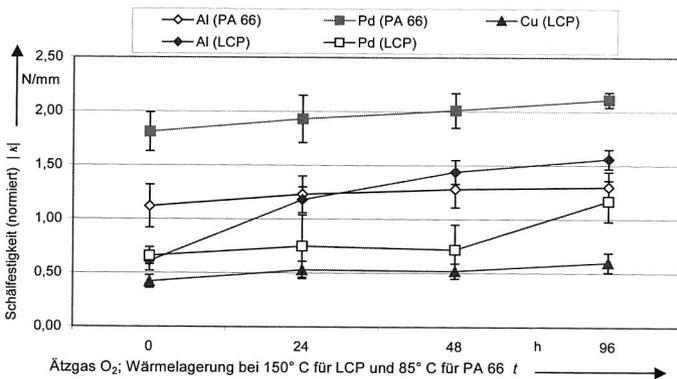


Abbildung 5. 11: Schälfestigkeit (normiert)  $|\kappa|$  in Abhängigkeit von der Dauer  $t$  der Wärmelagerung

Die erreichten Schälwiderstände ohne Temperung entsprachen den theoretisch errechneten. Wie erwartet zeigte Polyamid ausgesprochen hohe Schälfestigkeiten in Verbindung mit Palladium als Haftvermittler, aber auch mit Aluminium wurden die geforderten DIN IEC 326 Werte überschritten. Die normierten Werte lagen fast doppelt so hoch, als die Werte die mit thermischen Aufdampfen gewonnen wurden /180/. Sie waren vergleichbar mit denen, die bisher mit rein chemischen Metallisierungsverfahren erreicht wurden /96/. Aufgrund der hohen Ausgangswerte der Haftung und dem geringen Einfluß bei Temperurlagerung war eine Wärmelagerung von Polyamid nur für 3 bis 4 Stunden sinnvoll. Nach dieser Zeit konnte man von einer ausreichenden Trocknung für den nachfolgenden Lötprozess ausgehen.

Die normierten Haftfestigkeitswerte bei LCP hingegen zeigten einen deutlichen Einfluß nach einer mehrstündigen Temperurlagerung. So konnte in Verbindung mit Palladium und Aluminium der Ausgangswert nach 96 Stunden Temperurlagerung bei 150 °C verdoppelt werden. Proben, die mit Kupfer besputtert wurden, zeigten hingegen selbst nach Temperurlagerung nicht die gewünschten Haftfestigkeiten von mindestens 0,6 N/mm. Bei der Temperurlagerung konnte kein eindeutiges Maximum in Bezug auf die erreichten Haftfestigkeitswerte festgestellt werden. Eine Lagerung länger als 96 Stunden war wirtschaftlich gesehen jedoch fragwürdig und wurde daher nicht näher untersucht.

Ein etwas anderes Bild ergab sich für die Proben, die mit  $\text{Ar}/\text{O}_2$ -Ätzgas vorbehandelt wurden.

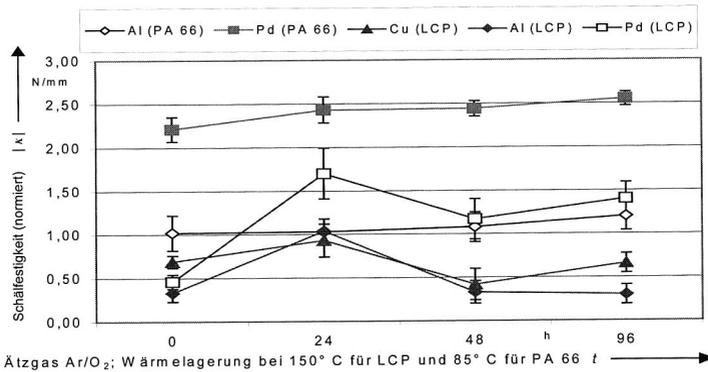


Abbildung 5. 12: Schälfestigkeit (normiert)  $|\kappa|$  in Abhängigkeit von der Dauer  $t$  der Wärmelagerung

Bei nahezu gleichem Ausgangswert zeigten die Palladium/LCP-Proben schon nach 24 Stunden Temperaturlagerung Werte, die zwar verhältnismäßig weit streuten, jedoch im Mittel weit über 1 N/mm lagen. Das gleiche Verhalten, jedoch auf geringem Haftfestigkeitsniveau, zeigten auch die Proben, die mit Aluminium beziehungsweise mit Kupfer vormetallisiert wurden. Es ergab sich somit ein Maximum nach 24 Stunden Temperaturlagerung.

Die Palladium/Polyamid-Proben zeigten wieder die höchsten Werte, die noch einmal über denen, die mit  $O_2$ -Ätzgas behandelt wurden, lagen. Die normierten Schälfestigkeiten der Aluminium/Polyamid-Proben waren etwas geringer, jedoch stets über 1 N/mm.

Die Versuche zur chemischen Kupfermetallisierung waren nur erfolgreich bei Proben, die mit Palladium und Aluminium (mit einer zusätzlich gesputterten Kupferschicht) metallisiert wurden. Proben die nur mit Kupfer vorbesputtert wurden, konnten nicht haftfest verstärkt werden. Die Ergebnisse waren im wesentlichen mit denen der galvanischen Verstärkung identisch, lediglich die hohen Haftwerte konnten nicht immer realisiert werden. Ein pH-Wert von 11 oder niedriger hat sich als günstig erwiesen, wobei jedoch hierdurch auch die Abscheidengeschwindigkeiten reduziert wurden (circa 2  $\mu\text{m/h}$ ). Polyamid zeigte normierte Schälfestigkeiten von circa 1,2 N/mm und LCP von 0,6 N/mm. Die Verstärkung erfolgte in handelsüblichen chemischen Kupferbädern. Die Vorbehandlung war der für Proben zur elektrolytischen Nachverstärkung identisch.

Es konnte somit gezeigt werden, daß eine Vorbehandlung mit  $O_2$  und  $Ar/O_2$  in Verbindung mit Palladium und Aluminium und anschließender galvanischer Verstärkung mit Kupfer stets zu ausreichenden Schälfestigkeiten führte, die sowohl für Anwendungen im Telekommunikations- als auch im Automobilbereich ausreichend waren.

In nachfolgenden Untersuchungen wurden die erarbeiteten Parameter in Verbindung mit den ausgewählten Materialien auf die Kunststoffe Polyimid (PI), Polyetherimid (PEI) und Polyethersulfon (PES) übertragen, wobei Werte von 0,6 N/mm bei PI, 2,1 N/mm bei PEI und 0,8 N/mm bei PES in Verbindung mit Palladium erreicht werden konnten. Selbst PET konnte mit Hilfe einer unterhalb der Folie angebrachten Wärmeleitfolie ohne Substratschädigung haftfest metallisiert werden. Dies führte zu der Schlußfolgerung, daß man mit dieser Kombination ein weitestgehend universelles Metallisierungsverfahren gefunden hatte, welches zu einer schutzrechtlichen Anmeldung führte /10/.

## 5.2 Verfahren zur Maskenstrukturierung

Die angewandten Technologien zur Strukturierung sollten vor allem flexibel und den Anforderungen aus der industriellen Praxis genügen. Prinzipiell konnte ein Subtraktivverfahren nach der elektrolytischen Nachverstärkung mit Kupfer in herkömmlicher Weise ohne Probleme angewendet werden. Bei einer Gesamtbeurteilung des Systems sollte zudem die Prozeßkette durch die Strukturierung nicht wesentlich verlängert werden. Infolgedessen wurde die Strategie verfolgt, die Strukturierung mit einem Metallisierungsschritt zu kombinieren, wodurch man den höchsten Grad der Verfahrensintegration erreichte. Hierbei gewann man nicht nur umweltspezifische sondern auch technologische Vorteile.

Somit bot sich vor allem das Semiadditiv- und das Additivverfahren an.

### 5.2.1 *Semiadditive Maskenstrukturierung*

Beim Semiadditivverfahren wurde nach der PVD-Metallisierung die dünne Metallschicht mit einem photosensitiven Abdecklack überzogen (Ätz- oder Galvanoresist). Die Vorgehensweise entsprach der bereits in Kapitel 2.2 und in der Literatur ausführlich beschriebenen /91/. Somit waren sowohl Technologien zur Strukturierung von Folien als auch 3-D MID Technologien vorhanden, die bereits für Serienprodukte eingesetzt wurden.

Lediglich die Kombination des Semiadditivverfahrens mit dem beschriebenen Sputterverfahren und galvanischer Nachverstärkung war bisher aufgrund fehlender zuverlässiger physikalischer Beschichtungsmethoden für funktionelle Anwendungen im Elektronikbereich nicht angewendet worden.

Der gesamte Verfahrensablauf stellte sich somit wie in Abbildung 5. 13 abgebildet dar.

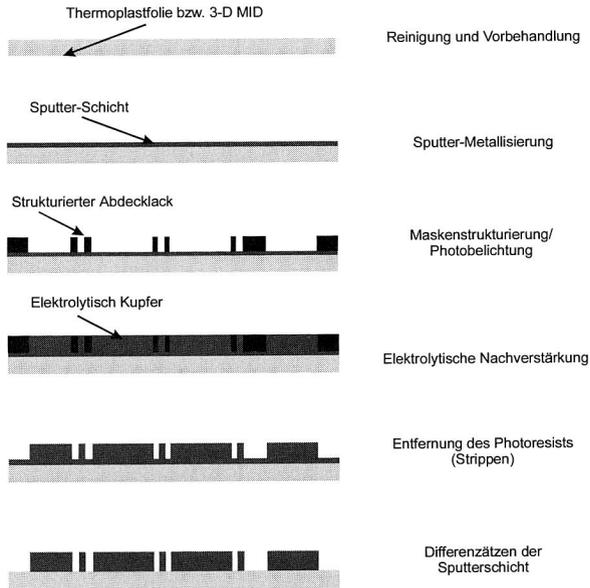


Abbildung 5. 13: Verfahrensablauf der semiadditiven Strukturierung in Verbindung mit der Sputtermetallisierung

Um eine definierte Schichtdicke des Abdecklackes auf dreidimensionalen Oberflächen zu erhalten, sollten vor allem elektrophoretisch arbeitende Galvanoresisten eingesetzt werden. Falls Durchkontaktierungen vorhanden waren, empfahl es sich zum anschließenden Strippen positiv arbeitende fotosensitive Ätzresisten einzusetzen, die ebenfalls elektrophoretisch abgeschieden werden konnten, da somit das konventionelle „Tent and Etch“ - Verfahren umgangen werden konnte. Auch Verunreinigen ergeben bei positiv arbeitenden Resisten keine Fehlstrukturen, wie dies bei Negativresisten der Fall sein konnte. Die Belichtung des Galvano- und Ätzresisten erfolgte durch UV-Lampen mit dreidimensionalen Masken /91/. Weiterhin war

die resultierende Unterätzung aufgrund der geringen Schichtdicke des zu ätzenden gesputterten Kupfers zu vernachlässigen /22/.

Die sich hieraus ergebenden Vorteile des Gesamtverfahrens waren somit:

- Universelle Vorbehandlung und Grundmetallisierung durch das Sputterverfahren.
- Hierdurch Einsparung von bis zu 19 sequentiellen Einzelschritten.
- Keine umweltbelastende chemische Vorbehandlung des Thermoplasten.
- Geringer Materialeinsatz durch semiadditive Strukturierung.
- Ökonomische elektrolytische Nachverstärkung.
- Bei Einsatz von elektrophoretischen Resisten feine Leiterzüge möglich /172/.
- Bei Durchkontaktierungen entfällt ein zusätzlicher „Tent & Etch“ Prozeß.
- Geringere Unterätzung gegenüber Voll-Subtraktivverfahren /22/.

### 5.2.2 Additive Maskenstrukturierung

Den höchsten Grad der Integration erreichte man mit einer Direktstrukturierung während des physikalischen Beschichtungsvorgangs. Die bereits beschriebene chemische Metallisierung ermöglichte eine Nachverstärkung. Eine geschickte Zusammenführung aller Strukturen an einen entfernbaren Randbereich ließ jedoch auch eine elektrolytische Nachverstärkung zu. Dies war für eine Vielzahl von Applikationen, wie Flex-Interposer, Signalstromleitungen etc. nicht notwendig, da hierfür eine Schichtdicke von 8 µm bis 12 µm oft ausreichend war. Das Interesse an Additivverfahren ist aufgrund ihrer Wirtschaftlichkeit und zahlreichen prozeßtechnischen Vorteile groß. Bevor jedoch diese einzeln aufgelistet werden, soll das entwickelte Additivverfahren, anwendbar für flexible Folienschaltungen und planare Leiterplattenmaterialien, beschrieben werden.

Das vorgestellte Verfahren bestach durch seine Einfachheit und problemlose Durchführung. Es war keine spezielle chemische Aktivierung des zu beschichtenden Basismaterials notwendig, da die Beschichtung mittels der bereits beschriebenen Sputtertechnologie realisiert wurde. Prinzipiell waren aber auch alle anderen vakuumtechnischen Beschichtungsverfahren einsetzbar. Weiterhin war auch nicht die Anwendung des komplizierten Tampondruckverfahrens (oder anderer verwandter Verfahren) notwendig.

Zur Demonstration des Verfahrens wurde ein Testmodul einer funktionellen Schaltung mit integrierter Spule herangezogen<sup>1</sup>. Die einzelnen Elemente der Musterschaltung werden an gegebener Stelle näher erläutert. Abbildung 5. 14 zeigt die einzelnen Zwischenschritte am Beispiel des verwendeten Testmoduls.

Zur Durchführung wurde ein beliebiges planares Basismaterial gereinigt (z.B. Ultraschallbad in Methanol) und mit einem Abdecklack direkt strukturiert überzogen. Das Aufbringen des Abdecklacks konnte sowohl im Maskendruck- als auch im Siebdruckverfahren durchgeführt werden /64/ (Abbildung 5. 14; 1. Schritt). Das Lacksystem entsprach im wesentlichen den herkömmlichen in der Elektronikfertigung eingesetzten Abdecklacken, die entweder mechanisch entfernbar oder in entsprechenden Laugen oder Säuren löslich waren. Das hierfür verwendete Resistsystem war in 3% bis 5%iger Natronlauge (NaOH) bei 50 °C und in Glykolether lösbar. Zusätzlich war das Lacksystem für Feinstleiterstrukturierung zugänglich und gegenüber hohen Temperaturen, die während des Sputterverfahrens auftrafen, resistent.

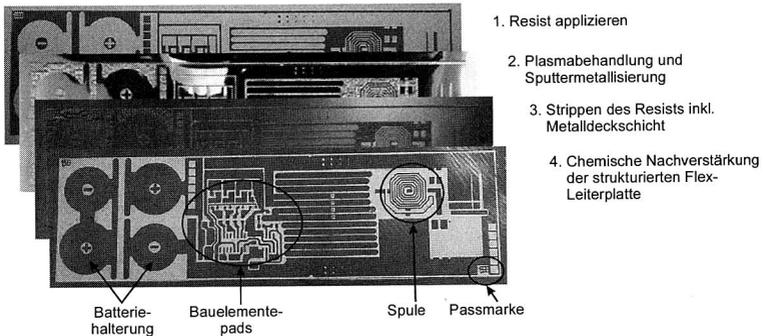


Abbildung 5. 14: Verfahrensablauf der additiven Maskenstrukturierung in Verbindung mit der vakuumtechnischen Beschichtung

Um das für den Sputterprozeß notwendige Hochvakuum von  $10^{-4}$  mbar bis  $10^{-8}$  mbar zu erreichen /40/, durfte das verwendete Lacksystem nicht ausgasen. Dies bedeutete, das keine flüchtigen Lösungsmittel enthalten sein durften, beziehungsweise diese nicht entweichen konnten. Ein speziell hierfür geeignetes Lacksystem ist in /81/ beschrieben.

<sup>1</sup> Das Demonstratormodul wurde zusammen mit Herrn H. Landeck, Loewe Opta GmbH definiert.

Die Resistdicke betrug, in Abhängigkeit der Strukturbreiten und gewünschten vakuumtechnologisch aufgetragenen Metallschicht, zwischen 6 µm bis 40 µm. Hierbei galt, je feiner die gewünschten Strukturen, desto dünner mußten der Resist und damit die PVD-Metallschicht sein. Als maximales Aspektverhältnis hat sich in praktischen Versuchen 1:4 (Leiterbahnbreite/ Resisthöhe<sup>1</sup>) ergeben, wodurch Einschränkungen durch den Resistauftrag außer Acht gelassen werden konnten.

Kantenunschärfen, die in /45/ beschrieben wurden, spielen nur bei punktförmigen Verdampferquellen eine Rolle und konnten aufgrund des angewendeten Magneton-Sputterverfahrens vernachlässigt werden. Jedoch auch bei Einsatz von punktförmigen Verdampfern ergibt sich, infolge des direkten Kontaktes zwischen Maske und Substrat, lediglich ein minimaler Einfluß der Kantenunschärfe, die eine Funktion der Maskendicke, Durchmesser der Beschichtungsquelle und des Abstandes zwischen Maske und Substrat ist /17; 170/.

Nach dem Aufbringen des Abdecklackes wurde die Oberfläche entsprechend dem oben beschriebenen Vakuum-Beschichtungsverfahren einem Plasmaätzprozeß unterzogen, um diese zu reinigen und zu aktivieren. Somit erfolgt eine Behandlung nur an den nicht abgedeckten Stellen und führte in dem anschließenden chemischen Beschichtungsprozeß nicht zu unerwünschter Fremdabscheidung. Dies war möglich, da bestimmte thermoplastische Materialien durch eine gezielte Plasmabehandlung direkt für eine chemische Metallisierung zugänglich gemacht werden konnten<sup>2</sup> /158/.

Hierauf schloß sich der eigentliche Beschichtungsvorgang mit dem gewählten Sputtermaterial an, wobei der zu beschichtende Körper, also auch der Resist (Abbildung 5. 14, 2. Schritt), vollflächig mit Metall überzogen wurde.

Nach langsamen Abkühlen innerhalb des Rezipienten wurde der beschichtete Thermoplast dem Rezipienten entnommen und der Abdecklack mechanisch abgezogen beziehungsweise mit Glykolether abgewaschen (Abbildung 5. 14; 3. Schritt).

---

<sup>1</sup> Analog zum Aspektverhältnis von Bohrlochwandungen.

<sup>2</sup> Bisher hat diese Form der Vorbehandlung zu keinen reproduzierbaren Ergebnissen geführt, so daß i.a. eine zusätzliche Aktivierung mit Palladium notwendig war /189/.

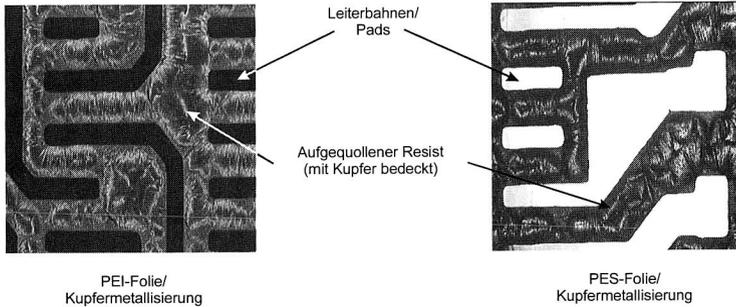


Abbildung 5. 15: Kein Haftverbund des Kupfers durch aufgequollenen Resist

Dadurch, daß handelsübliche Resiste aufgrund ihrer vorbestimmten Einsatzfelder (Galvanoresist, Lötstopplacke etc.) geringe Benetzbarkeit aufwiesen, konnte sich auf diesen auch keine haффeste Sputterschicht ausbilden. Dies kann man in Abbildung 5. 15 an der gequollenen Kupferstruktur erkennen. Messungen der Oberflächenspannung haben Werte unter 22 mN/m ergeben. Der geringe Haftverbund und die Stufenhöhe zwischen Resist und Metallschicht ermöglichten es, daß sich der Abdecklack mit der aufgetragenen Metallschicht vom Basiswerkstoff ohne Risse im Randbereich abheben ließ. Die Einflüsse durch Kohäsionskräfte der Sputterschicht waren somit vernachlässigbar.

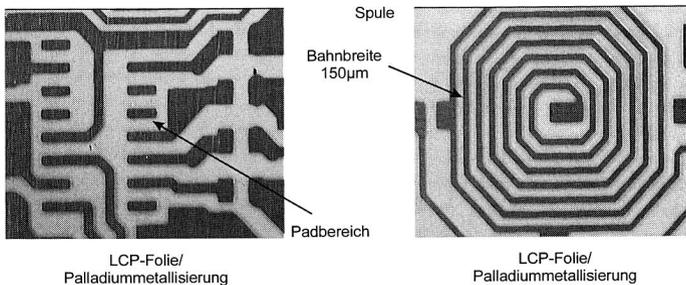


Abbildung 5. 16: Abbildung integrierter Elemente im Feinstleiterbereich

Die verbleibende Metallstruktur entsprach dem gewünschten Layout. Falls gewünscht konnte die verbleibende Struktur noch chemisch additiv oder elektrolytisch (bei vorhandenen Galvanikrand) verstärkt werden (Abbildung 5. 14; 4. Schritt).

Mit diesem Verfahren konnten mit löslichen Abdecklacken Strukturen bis zu 100  $\mu\text{m}$  ohne Probleme hergestellt werden. Mechanisch abziehbare Lacke zeigten bis 300  $\mu\text{m}$  gute Ergebnisse. Funktionselemente wie Spulen, Kondensatoren und Widerstände<sup>1</sup> konnten zusätzlich direkt erzeugt werden (Abbildung 5. 16).

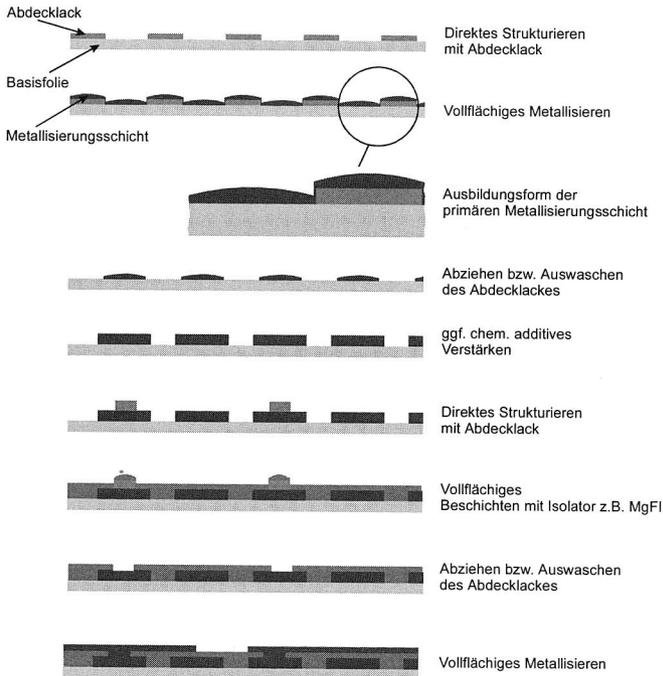


Abbildung 5. 17: Sequentieller Aufbau einer Mehrlagenleiterplatte in Sputtertechnologie

Die Schritte 1 bis 4 waren beliebig oft wiederholbar. Insofern war diese Technologie auch zum Aufbau von mehrlagigen Leiterplatten (Multilayer) geeignet. Durch die Wahl eines vakuumtechnisch aufbringbaren Isolators konnte eine beliebig Anzahl von Ebenen hergestellt werden. Der Gesamttablauf eines sequentiellen Mehrlagenaufbaus ist in Abbildung 5. 17 skizziert. Als Dielektrikum kann zum Beispiel Magnesium-Fluorid (MgFI), welches durch Anwendungen im Optikbereich bekannt war, eingesetzt werden.

<sup>1</sup> Widerstände können z.B. durch Aufputtern einer ZnO:Al-Schicht erzeugt werden, deren definierter Oberflächenwiderstand bei 300  $\mu\Omega\text{cm}$  liegt [152].

Alternativ konnte zur sequentiellen Fertigung ein photobelichtbares Dielektrikum eingesetzt werden /86/. Aber auch die Siebdrucktechnik mit Polymerpasten (Widerstands- und Leitpasten) stellt für eine Großserie eine kostengünstige Lösung dar, falls die Strombelastung der gedruckten Ebenen gering gehalten werden konnte, da diese im allgemeinen mit relativ hochohmigen Pastensystemen hergestellt werden /41/. Wurden sowohl Leit- als auch Isolationspasten in Kombination aufgebracht, konnten Widerstände, abgleichbare Spulen<sup>1</sup> und Kondensatoren realisiert werden (Abbildung 5. 18 rechts).

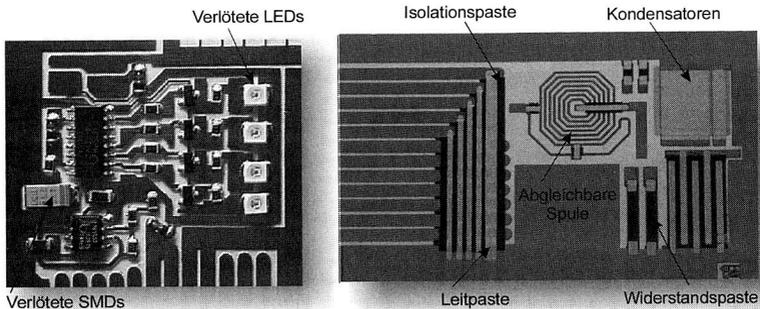


Abbildung 5. 18: Testmodul mit aufgedruckter zweiter Leiterbahnebene und integrierten Funktionselementen

Die Durchmetallisierung von eingebrachten Löchern während der PVD-Metallisierung wurde bereits in Abbildung 5. 1 angedeutet und hat sich innerhalb dieser Versuche noch einmal bestätigt. In Abbildung 5. 18 sind Ausschnitte zweier voll funktionsfähiger Testmodule dargestellt. Die Bauelemente des linken Moduls wurden in einer herkömmlichen Dampfphasenlötanlage verlötet<sup>2</sup>.

Es zeigte sich somit, daß Strukturen bis 100 µm zuverlässig mit der vorgestellten Maskentechnik hergestellt werden konnten. Weiterhin waren die erzeugten physikalisch aufgetragenen Strukturen haftfest und konnten ohne Probleme in den weiteren Ablauf einer Leiterplattenproduktion gegeben werden. Werden Strukturen unter 100 µm gefordert, konnte dies über einen Zwischenschritt geschehen. Hierbei wird der Photoresist so behandelt, daß die tieferliegende Photoresistschicht eine höhere Löslichkeit hat als die Deckschicht, um so einen Überhang zu schaffen, der es erlaubt feinste Strukturen direkt zu erzeugen /174/.

<sup>1</sup> Die Spule war aufgrund der Rückführung abgleichbar.

<sup>2</sup> Zu „Mediengebundene Lötverfahren“ siehe /39/.

Die Vorteile des entwickelten Verfahrens lassen sich somit zu nachfolgenden Punkten zusammenfassen, die sich teilweise mit denen der Semiadditivtechnik decken:

- Universelle Vorbehandlung und Grundmetallisierung durch das Sputtern.
- Hierdurch Einsparung von bis zu 19 sequentiellen Einzelschritten.
- Keine umweltbelastende chemische Vorbehandlung des Thermoplasten.
- Materialeinsatz nur in der benötigten Menge durch additive Strukturierung.
- Bei Bedarf ökonomische chemische Nachverstärkung.
- Kein zusätzlicher Ätzschritt und somit keine Unterätzung.
- Multilayerfähiger Prozeß durch SBU-Technologie.

### 5.3 Zusammenfassung und Ausblick der PVD-Technologie

Die vorgestellten Verfahren konnten aufgrund der Photoresisttechnologie nicht direkt auf 3D-Flächen übertragen werden. Hierzu wäre ein Photoresist notwendig, der sich gleichmäßig auf eine dreidimensionale, nichtleitende Oberfläche niederschlägt, durch Maske oder Laser belichtet werden könnte und anschließend sich ebenso wieder entfernen läßt /182/. Momentan war ein solcher Abdecklack nicht bekannt /174/. Folglich bietet sich für ein Additivverfahren nur die Laserdirektstrukturierung (LDS) der aufgesputterten Metallschicht an, welche auf Folien bereits industriell angewendet wird /201/. Größere Flächen waren jedoch nur mit hohem Zeitaufwand abzutragen. Wirtschaftlichkeit war somit nur dann gegeben, wenn Isolationskanäle geschrieben werden konnten und das restliche Kupfer auf dem Trägermaterial verbleiben konnte.

Ohne Einschränkung hingegen konnte das Semiadditivverfahren auch auf dreidimensionalen Flächen angewendet werden. Zur Belichtung des Resistes wird eine dreidimensional geformte Maske benötigt. Die gleichmäßige Verteilung des Photoresisten über die Oberfläche konnte mit elektrophoretisch arbeitenden Resisten gelöst werden. Die Kombination des direkten Aufbringens des Lötdecklacks auf das zu beschichtende Basismaterial in Verbindung mit dem entwickelten universellen Vorbehandlungs- und Beschichtungsverfahren durch Vakuumtechnik, eröffnet ein hohes Potential hinsichtlich Kosten, Prozeßzeit und Umwelt, welches sowohl auf starren als auch flexiblen Substraten Anwendung finden kann.

Durch mehrfache Wiederholung können im „Sequential-Build-Up“ (SBU)-Verfahren Multilayer /41/ hergestellt werden, die sowohl als eigenständige Leiterplatte als auch als Flex-Interposer Anwendungen erschließen. Alle bekannten Leiterplatten- und Multilayer-Aufbauten, reine einseitige Flexschaltungen bis hin zu Starr-Flex- als auch 3-D MID-Flex-Kombinationen auf rein thermoplastischer Basis waren bei Kombination mit der Hinterspritztechnologie realisierbar. Die direkte Zugänglichkeit zu weiteren Verfahren der Leiterplattenproduktion wie Pastendruck- und Lötverfahren wurde durch die Herstellung voll funktionsfähiger Module nachgewiesen<sup>1</sup>.

Weiterhin war man gerade durch den Sputterprozeß zugänglich für sehr feine Strukturen und der SBU-Technologie, welche momentan neben dem Laserdirektstrukturieren als eines der beiden Technologien gehandelt wird, die zukünftig die Entwicklung der Leiterplatte mitbestimmen werden. Dieser Technologie waren somit beim jetzigen Stand der Technik keine Grenzen gesetzt.

---

<sup>1</sup> Als Ziel wurde unter anderem die Entwicklung kontinuierlich arbeitender Verfahren genannt, jedoch wurden die Versuche zur physikalischen Metallisierung in einem Batch-Prozeß durchgeführt. Dies widerspricht nicht der Zielsetzung, da auf dem Markt Beschichtungsanlagen zur Metallisierung von endlosen thermoplastischen Kondensator- und Verpackungsfolien erhältlich sind und an die Bedürfnisse der Metallisierung von Folien für elektronische Anwendungen angepaßt werden könnten.

## 6 Laminierverfahren für Thermoplaste

Der Stand der Technik von Laminierverfahren wurde in Kapitel 2.2.2 bereits ausführlich beschrieben. Entsprechend der Einteilung von Abbildung 2. 8 wurden die Untersuchungen in kleberunterstützte und kleberlose Verfahren aufgeteilt, da man sich auf die haftvermittelnden Schichten konzentrierte. Diese waren zum einen der Kleber und zum anderen die Kupferfolie mit der entsprechenden Vorbehandlung, was somit zusätzlich bei kleberunterstützten Systemen eine Verträglichkeitsuntersuchung des Klebersystems mit den Ätzmedien zum Strukturieren notwendig machte (siehe Kapitel 2.3.1). Ebenfalls Gegenstand der Arbeiten war, den Einfluß von Oberflächenbehandlungen des Thermoplasten auf die Haftfestigkeit der Kupferfolie zu ermitteln.

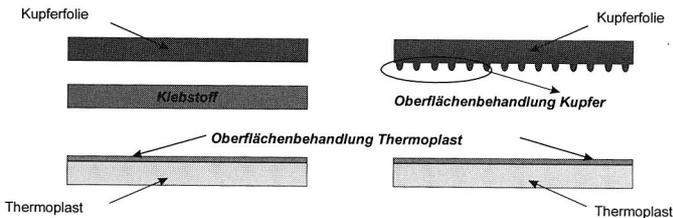


Abbildung 6. 1: Fokussierung der Untersuchungen auf die haftvermittelnde Schicht

Innerhalb des Kapitels, das sich mit dem kleberlosen Laminieren beschäftigt, wird weiterhin zwischen der vollflächigen und strukturierten Laminierung unterschieden, da die hierfür entwickelten Verfahren differierten. Die Untersuchungen wurden sowohl für Standardkunststoffe als auch für Hochleistungskunststoffe durchgeführt, das zu unterschiedlichen Einsatzbereichen und Applikationen führte.

Zur Überprüfung markanter Unterschiede wurden alle beschriebenen Verfahren sowohl auf kontinuierlichen als auch diskontinuierlich arbeitenden Vorrichtungen durchgeführt, wobei keine erwähnenswerten Differenzen bei den Haftfestigkeiten zu verzeichnen waren und somit die Ergebnisse entsprechend zusammengefaßt wurden.

Die Herausforderung zu den bereits industriell im Einsatz befindlichen Verfahren war der zu erbringende Nachweis, daß das Verbundsystem aus Kunststoff und Kupferfolie und eventuell Klebstoff sowohl technischen Anforderungen eines serientauglichen elektronischen Massenkonsumproduktes, als auch recyclinggerechte Bedingungen erfüllen muß.

## 6.1 Kleberunterstützte Laminierung

Die Untersuchungen wurden wiederum an den Hochleistungskunststoffen LCP und PEI und an dem Standardkunststoff ABS durchgeführt. Wie bereits in vorhergehenden Kapiteln erwähnt, sind Hochleistungskunststoffe im Gegensatz zu Standardkunststoffen für Lötverfahren zugänglich, was infolgedessen auch bei der Auswahl des entsprechenden Klebstoffes berücksichtigt werden mußte, um das Gesamtsystem in den Anwendungsmöglichkeiten nicht einzuschränken. Der ausgewählte Klebstoff mußte somit ebenfalls den Lötprozeß unbeschadet überstehen, welches bei Verwendung von Standardkunststoffen nicht notwendig war. Hier mußten wiederum andere Verbindungstechniken, wie das Einpressen oder Leitkleben, eingesetzt werden.

Da Laminierverfahren für die ausgewählten Kunststoffe nicht bekannt waren, teilten sich die Untersuchungen auf das Reinigen der Thermoplaste, die Auswahl des Klebersystems und Ermittlung der Prozeßparameter auf. Der Gesamtverfahrensablauf unterschied sich nicht wesentlich von einem standardmäßigen Subtraktivverfahren (Abbildung 6. 2).

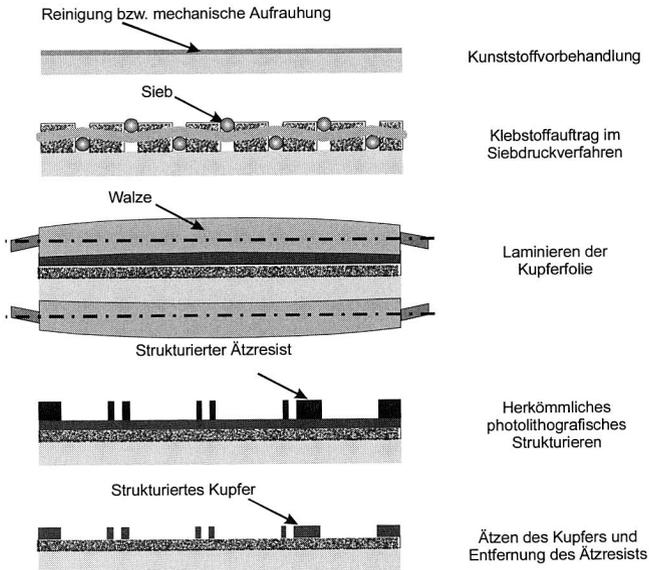


Abbildung 6. 2: Verfahrensablauf der kleberunterstützten Laminierung

Zur Verifizierung des Haftverbundes und der Einsatzfähigkeit des ausgewählten Gesamtsystems mußten die Proben unterschiedlichen Prüfungen unterzogen werden. So wurde zum einen der Schälversuch nach DIN IEC 326 mit der in Kapitel 3.3 beschriebenen Auswertesoftware angewendet und zum anderen ein Ätztest mit schwefelsauren Wasserstoffperoxid-Lösungen (10 g/l bis 40 g/l  $\text{H}_2\text{O}_2$ ; 70 g/l bis 190 g/l  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) durchgeführt. Für alle Untersuchungen wurden Standardkupferfolien der Klasse 2 nach IPC-FM-150 mit einer Dicke von 18  $\mu\text{m}$  und 35  $\mu\text{m}$  verwendet (siehe Tabelle 2. 4), da diese preisgünstig waren und mit Einschränkungen auch flexible Eigenschaften aufwiesen. Auf der unteren Seite waren die verwendeten Folien mit einer dünnen galvanisch aufgetragenen Messingschicht beschichtet, die für bessere Hafteigenschaften an dem Klebstoff sorgen sollte.

Bei der Verklebung der Kupferfolien galten die allgemeinen Grundlagen der Klebetechnik wie sie in der Fachliteratur /59/ und in Kapitel 2.2.2 ausführlich beschrieben sind. Bei der Auswahl des geeigneten Klebstoffes stellten zum einen die Verarbeitungs- als auch die Dauergebrauchstemperatur die entscheidenden Parameter, die eine Anwendung für Standardkunststoffe und Durchführung eines Lötprozesses zulassen, dar. Da der gleiche Klebstoff sowohl für Standard- als auch für Hochleistungskunststoffe verwendet werden sollte, wurden nur Klebstoffsysteme ausgewählt, die aufgrund ihrer Temperaturstabilität ein Lötprozeß zuließen. Mit Hilfe von Tabelle 2. 3 konnte somit eine Vorauswahl getroffen werden. Polyestersysteme schieden aufgrund ihrer niedrigen Temperaturstabilität und Polyimid durch seinen hohen Preis aus. Cyanat-Ester-Systeme waren wegen ihrer hohen Prozeßtemperaturen für Standardkunststoffe nicht geeignet und Butyrol-Phenol wurde aufgrund seiner hohen Steifigkeit und damit eingeschränkten Verwendbarkeit für flexible Folien nicht in die Betrachtungen mit einbezogen.

Somit wurden von den in Tabelle 2. 3 aufgelisteten Klebstofftypen Acrylat, Epoxidharz und zusätzlich ein PSA-System (Pressure Sensitive Adhesives) auf Styrol-Butadien-Basis mit unterschiedlichen Aushärtemechanismen ausgewählt (Tabelle 6. 1).

Grundsätzlich haben sich die verwendeten Klebstoffsysteme noch dahin unterschieden, ob diese bereits auf die Kupferfolie aufgebracht waren (integrierte Klebstoffsysteme) oder erst kurz vor dem Verkleben mit den Thermoplasten aufgetragen wurden. Dies spielte für nachfolgende Versuche jedoch eine untergeordnete Rolle, da bei entsprechender Nachfrage und anlagentechnischer Auslegung sowohl das eine als auch das andere System verfügbar ist.

Der verwendete PSA-Klebstoff auf Styrol-Butadien-Basis konnte in Kombination mit der Kupferfolie bezogen werden, so daß ein vorheriges Mischen, Dosieren und Auftragen entfiel. Die Vernetzung des Klebstoffes erfolgte bei einem Druck von 70 kN bis 90 kN und einer Temperatur zwischen 125 °C bis 150 °C über eine Zeitspanne von 2 s bis 4 s. Aufgrund der kurzen Zeitdauer von maximal vier Sekunden konnte mit diesen Temperaturen auch der ABS-Kunststoff verarbeitet werden.

Die beiden ausgesuchten Acrylatklebstoffe unterschieden sich durch die Art der Initiierung der Aushärtereaktion. Das eine System härtete innerhalb von 30 Minuten bei 70 °C bis 80 °C unter leichten Druck aus, wobei das zweite System die Zugabe eines speziellen Aktivators (aliphatisches Aldehyd-Anilin-Kondensat) benötigte. Beide Systeme gehörten zu den Polymerisationsklebstoffen, bei denen die Endfestigkeit erst nach einigen Stunden erreicht wurde /113/.

Chemische Basis		Styrol-Butadien	Acrylat		Epoxid		
Komponenten		1	1	2	2	2	1
Aushärteparameter	Temperatur in °C	125 bis 150	70 bis 80	Nicht definiert	100 bis 120	20 bis 22	Nicht definiert
	Druck in kN	70 - 90	Nicht definiert				
	Zeit	2 s	30 min	4 h bis 5 h	2 h	24 h	24 h
	Sonstige	-	-	Aktivator	-	-	Licht $\lambda \approx$ 400 bis 550 nm; 5 s

Tabelle 6. 1: Eigenschaften der ausgewählten Klebstoffe (Standardparameter)

Da Epoxidklebstoffe zu den am meisten verwendeten industriellen Klebstoffen für Metall/Kunststoffverbunde gehören, wurden drei Systeme, die alle mittels Polyaddition vernetzten, betrachtet. Der untersuchte warmhärtende Zweikomponenten-Epoxidklebstoff härtete bei einer Temperatur zwischen 100 °C bis 120 °C innerhalb von zwei Stunden aus. Aufgrund seiner mittleren Viskosität von 600 mPa·s und dadurch, daß er keine Füllstoffe enthielt, erschien dieser Klebstoff besonders interessant, da folglich Schichtdicken von unter 15 µm erreicht werden konnten. Die Temperaturbeständigkeit lag bei circa 280 °C bei einer Wärmeleitfähigkeit von circa 0,57 W/mK. Das Mischungsverhältnis Harz/Härter betrug bei dem verwendeten System 100:80 Gewichtsanteilen mit einer Topfzeit von vier Stunden. Für ABS-Kunststoffe war eine Aushärtung bei Temperaturen über 100 °C über zwei Stunden eher kritisch. Um den Kunststoff nicht zu schädigen, wurde die Aushärtetemperatur auf 90 °C reduziert und die Aushärtezeit verdoppelt. Der verwendete kalthärtende Zweikomponenten-Epoxidklebstoff erwies sich durch seine hohe Feuchtebeständigkeit und geringen Schrumpfung von 0,2 Prozent während der

Aushärtung als interessant. Außerdem war dieser Klebstoff beständig gegen Säuren (wie zum Beispiel Salz-, Phosphor-, Schwefel-, Salpetersäure). Nach dem Mischen der beiden Komponenten Harz und Härter im Verhältnis 100:8 in Gewichtsanteilen härtete dieser Klebstoff bei 21 °C nach etwa 24 Stunden aus. Er enthielt als Füllstoff  $\text{Al}_2\text{O}_3$  mit einer maximalen Partikelgröße von 44  $\mu\text{m}$ , was die hohe Wärmeleitfähigkeit von 1,85 W/mK begründete, jedoch auch die minimale Schichtdicke limitierte [114]. Weiterhin wurde in die Untersuchungen ein modifizierter einkomponentiger Epoxidklebstoff einbezogen, der mittels Bestrahlung eines Lichts mit der Wellenlänge zwischen 400 nm bis 550 nm über fünf Sekunden zur Aushärtung angeregt und anschließend unter Raumtemperatur innerhalb von 24 Stunden ausgehärtet wurde.

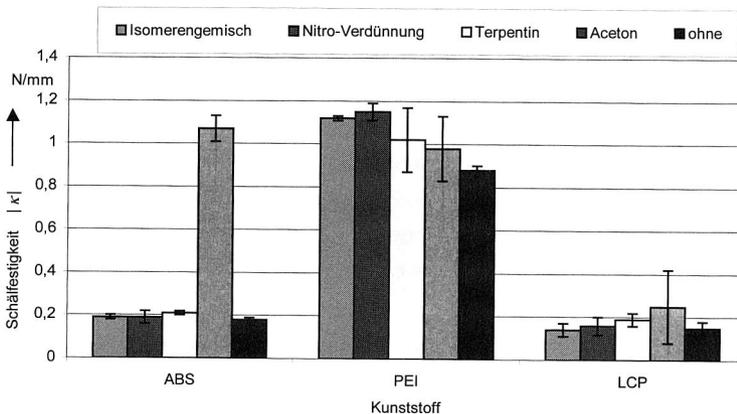


Abbildung 6. 3: Einfluß der Reinigungsmittel auf die Haftfestigkeit  $|\kappa|$  am Beispiel des kalthärtenden Zweikomponenten-Epoxidklebstoffes

Zur Überprüfung der Chemikalienbeständigkeit gegenüber einem herkömmlichen Leiterplattenprozeß, wurden die Klebstoffe auf einen planen Thermoplasten mit Hilfe eines Rakels ohne Schichtdickenoptimierung aufgetragen, mit einer 35  $\mu\text{m}$  starken Kupferfolie verklebt, entsprechend einem standardmäßigen Subtraktivverfahren mit einem Testlayout nach DIN EN 60 249 strukturiert und anschließend mit chemisch Zinn-Blei (Sn/Pb) versehen. Hier hat sich gezeigt, daß sowohl der Styrol-Butadien-Klebstoff als auch die Acrylatklebstoffe entweder zu Reaktionen mit dem schwefelsauren Wasserstoffperoxid oder mit dem chemischen Sn/Pb-Bad neigten, welches sich durch ein Verschmieren und Aufquellen des Klebstoffes bemerkbar machte.

Epoxidklebstoffe eigneten sich somit am ehesten zur Verwendung innerhalb einer Leiterplattenproduktion. Nach dieser Behandlung wurden die erreichten Haftfestigkeiten nach DIN IEC 326 gemessen und der Einfluß unterschiedlicher Reinigungsmittel mit der unbehandelten Oberfläche verglichen (Abbildung 6. 3). Hierzu wurden ungefüllte HT-Kunststoffe und ABS mit vier verschiedenen Mitteln gereinigt, um anschließend eine 35 µm starke Kupferfolie mit Standardparametern der drei Epoxidklebstoffe diskontinuierlich zu laminieren<sup>1</sup>. Nach vorhergehender Literaturrecherche wurde benzolfreies Aceton, eine handelsübliche Nitro-Verdünnung, Terpentin (Mischung aus Benzin und aromatischen Verbindungen) und ein Gemisch aus Isomeren (Propan, Isobutan, Hexan etc.) ausgewählt /32; 109; 156/.

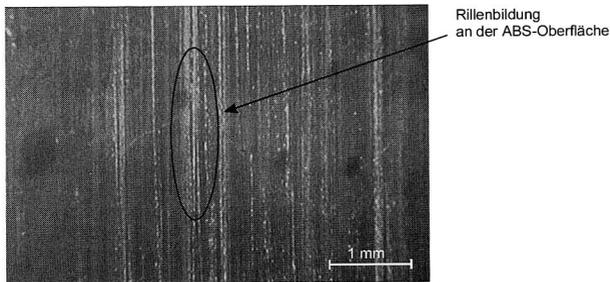


Abbildung 6. 4: Aufrauung (Rillenbildung) der ABS-Oberfläche nach Reinigung mit Aceton

Wohingegen bei den beiden HT-Kunststoffen ein relativ geringer Einfluß der Reinigungsmittel festzustellen war, zeigte sich eine vehemente Haftfestigkeitsverbesserung bei ABS durch vorhergehende Behandlung mit Aceton. Dieser Effekt beruhte darauf, daß Aceton den ABS-Kunststoff anlöste und in Abhängigkeit von der Auftragstechnik die Oberfläche aufraute. In Abbildung 6. 4 ist dies deutlich an den Rillen zu erkennen, die nach der Reinigung sichtbar wurden.

Bei den anderen Reinigungsmitteln konnte keine Veränderung der Oberfläche festgestellt werden. Nachfolgende Versuche haben ergeben, daß dieser Effekt auch durch eine mechanische Aufrauung erzielbar war. Die Haftfestigkeitserhöhung war somit auf rein mechanische Adhäsionsmechanismen zurückzuführen.

---

<sup>1</sup> Bei allen Diagrammen mit Standardabweichungen wurde von einer Grundgesamtheit von fünf Proben pro Meßwert ausgegangen, worauf jeweils fünf Messungen durchgeführt wurden und der Maximal- und Minimalwert nicht in die Auswertung miteinbezogen wurde.

Der Kunststoff PEI zeigte ohne Optimierung der Klebparameter ausreichende Haftfestigkeiten entsprechend DIN IEC 326 (vgl. Tabelle 3. 1). Es wurde jedoch festgestellt, daß wesentliche Unterschiede bei der Verarbeitung von ungefüllten und gefüllten Thermoplasten aufgrund differierender Oberflächenspannungen herührten. Oberflächen mit einer Spannung unter 37 mN/m konnten nicht ohne Luftblasenbildung mit Klebstoff überzogen werden (Abbildung 6. 5).

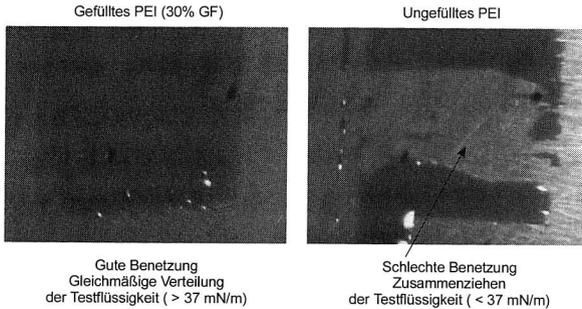


Abbildung 6. 5: Unterschiedliche Benetzung von ungefüllten und gefüllten PEI

Die Messungen wurden mit den in Kapitel 3. 1 beschriebenen Teststiften durchgeführt. Neben der bereits in Kapitel 5.1.2 beschriebenen Spritzhautproblematik, war die schlechte Benetzbarkeit ein weiterer Grund der geringen Haftfestigkeiten von LCP-Kunststoffen. Dies machte ein vorhergehendes mechanisches Aufrauen notwendig, wodurch man Oberflächenspannungen über 42 mN/m erreichte.

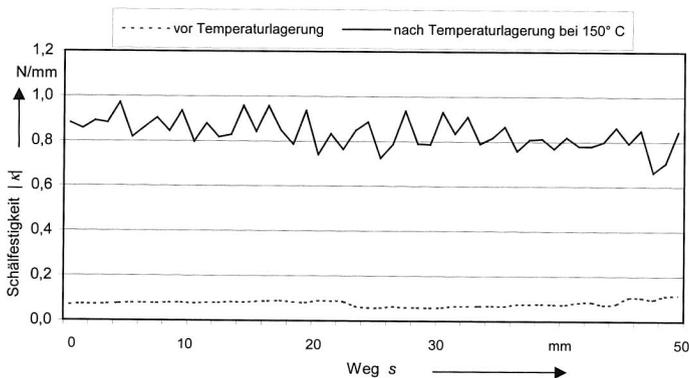


Abbildung 6. 6: Einfluß der Haftfestigkeit  $|\kappa|$  bei LCP bei mehrstündiger Lagerung bei 150 °C

Eine wesentliche Haftfestigkeitssteigerung konnte bei LCP jedoch erst, wie auch beim physikalischen Beschichten aus der Gasphase (vgl. auch Abbildung 5. 12), durch eine mehrstündige Wärmelagerung bei 150 °C erreicht werden. In Abbildung 6. 6 ist dies an einer Probe dargestellt, die diesen Einfluß besonders ausgeprägt gezeigt hat.

Zur Optimierung der Laminierparameter mußte zunächst der gleichmäßige Auftrag des Klebstoffes auf die Oberfläche der Thermoplaste gesichert werden. Hierbei war darauf zu achten, daß der Klebstoff so dünn wie prozeßtechnisch möglich aufgetragen wurde, da diese desto besser hafteten, je geringer das Klebstoffvolumen war. Weiterhin wurde hierdurch die Gesamtaufbaustärke der Leiterplatte reduziert und der Materialverbrauch minimiert.

Das Siebdruckverfahren bot sich zum Auftragen des Klebstoffes durch seine einfache Handhabung und allgemeine Verbreitung in der Leiterplattenindustrie an. Hierbei wurde der Klebstoff mit Hilfe eines Rakels durch ein Sieb gedrückt, wobei die Klebfilmstärke  $d_K$  durch die Maschenweite  $w$ , Webdraht- oder Fadendurchmesser  $\varnothing_D$  und Gewebedicke  $d_G$  bestimmt wird /130/.

Die Berechnung der Klebfilmstärke  $d_K$  konnte demgemäß mit der mathematischen Gleichung 6. 1 erfolgen.

$$\frac{w^2 + \varnothing_D}{(w + d_G)^2} = d_K \quad (\text{Gleichung 6.1})$$

mit:

$d_K$  = theoretische Klebfilmstärke in  $\mu\text{m}$

$w$  = Maschenweite in  $\mu\text{m}$

$\varnothing_D$  = Drahtdurchmesser in  $\mu\text{m}$

$d_G$  = Gewebedicke in  $\mu\text{m}$

In Tabelle 6. 2 sind unterschiedliche Siebe mit der berechneten Klebfilmstärke aufgelistet.

Ein Auswahlkriterium der geeigneten Siebe war mitunter die Maschenweite  $w$  von ungefähr 120  $\mu\text{m}$ . Diese war notwendig, damit drei  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Füllstoffpartikel des kalthärtenden Zweikomponenten-Epoxidklebstoffes, welche vom Klebstoffhersteller mit einer maximalen Partikelgröße von circa 44  $\mu\text{m}$  angegeben wurden /114/, eine Masche nebeneinander durchqueren konnten ohne das Sieb zu verstopfen.

Material	Drahtdurchmesser $\varnothing_D$ in $\mu\text{m}$	Maschenweite $w$ in $\mu\text{m}$	Gewebedicke $d_G$ in $\mu\text{m}$	Klebfilmdicke $d_K$ in $\mu\text{m}$
Edelstahl	56	132	132	65
Edelstahl	56	118	130	59
Edelstahl	36	118	76	44
Polyester	45	290	120	90
Leinen	75	425	180	130

Tabelle 6. 2: Siebauswahl zur Schichtdickenoptimierung für Klebstoff mit Füllpartikel

Klebstoffe ohne Füllstoffpartikel konnten durch die Verwendung anderer Siebe wesentlich dünner aufgetragen werden. Hierbei wurden Klebfilmdicken von circa 20  $\mu\text{m}$  realisiert. Innerhalb der praktischen Versuche stellte man fest, daß Edelstahlsiebe nach zwei- bis dreimaligen Gebrauch verklebten und somit ausgewechselt werden mußten. Polyestersiebe hingegen wurden nicht mit Klebstoff benetzt und konnten ein vielfaches mehr eingesetzt werden. Die theoretisch berechneten Klebfilmdicken haben sich in der Praxis bestätigt, wodurch mit der Optimierung der Aushärteparameter der Klebstoffe begonnen werden konnte. Zur Überprüfung der Haftfestigkeiten wurden die Schälfestigkeiten vor und nach einem Temperaturwechseltest nach DIN 53 496 gemessen<sup>1</sup>. Eine Aufrauung der Oberfläche und eine Wärmelagerung über 48 Stunden bei 150 °C nach dem Laminieren wurde nur bei dem Kunststoff LCP durchgeführt. Weiterhin wurden zur Optimierung nur gefüllte HT-Kunststoffe herangezogen.

Bei dem kalt- und warmhärtenden Epoxid-Klebstoff wurden somit Stempeldruck und -temperatur variiert. Zur Initiierung der Aushärtereaktion des lichtaktivierbaren Klebstoffes war bei optimalem Abstand der Metallhalogenid-Lampe zu der mit Klebstoff beschichteten Kunststoffoberfläche und ausreichender Aktivierzeit des Klebstoffes, eine Intensität zwischen 50  $\text{mW}/\text{cm}^2$  bis 100  $\text{mW}/\text{cm}^2$  notwendig. Zur Aufnahme der Strahlungsintensität wurde ein Intensitätsmeßgerät verwendet, welches aus einer LCD-Anzeige und einem über ein Kabel verbundenen, hitzebeständigen UV-Sensor bestand. Eine Aktivierzeit von beispielhaft sechs Sekunden brachte eine Offenzeit von etwa 60 Sekunden, innerhalb derer die Füge­teile ohne Festigkeitsverlust verbunden werden mußten.

In Tabelle 6. 3 sind die Schälfestigkeiten vor und nach dem Temperaturwechseltest in Abhängigkeit der Aktivierzeit und des Abstandes der Lampe zur Klebstoffoberfläche wiedergegeben.

<sup>1</sup> Drei Zyklen à 12 h trockener Wechselklimatetest bei -10 °C und +60 °C im 6 h-Wechsel mit 1 K/min Steigung.

Abstand $a$ in cm	Aktivierzeit $t_A$ in s	Mittelwerte der normierten Schälfestigkeiten $ \kappa $ in N/mm	
		Vor Temperaturwechselfest	Nach Temperaturwechselfest
6	6	0,88	1,09
6	5	0,84	1,25
6	4	1,05	1,72
5	6	1,13	1,84
5	4	1,33	1,32
4	6	1,72	1,45
4	4	1,48	1,02
3	6	1,37	1,20
3	4	1,17	1,62

Tabelle 6. 3: Schälfestigkeiten  $|\kappa|$  des lichtaktivierbaren Epoxidklebstoffes in Abhängigkeit der Parameter Lampen-Abstand  $a$  und Aktivierzeit  $t_A$

Man erkennt, daß die Distanz der Metallhalogenid-Lampe zu dem Klebstoffilm einen größeren Einfluß auf das Ergebnis als die Aktivierzeit hatte. Der optimale Abstand  $a$  konnte zwischen 3 cm und 4 cm innerhalb der Aktivierzeit  $t_A$  von 4 bis 6 Sekunden ermittelt werden. Der Temperaturwechselfest hat den Haftverbund nicht beeinflusst.

Parameter		ABS			HT mit $\delta > 37\text{mN/m}$			HT mit $\delta < 37\text{mN/m}$		
Vorbehandlung		Aceton			-			Aufrauen		
Klebstoff		KH	WH	LH	KH	WH	LH	KH	WH	LH
Laminieren	$T_L$ in °C	65	65	65	120			65	120	
	$p_L$ in kN	35								
	Andere	-	-	s.o.	-	-	s.o.	-	-	s.o.
Aushärten	$T_A$ in °C	65	65	65	120	150	80	120	150	80
	$t$ in h	0,5			0,2	1	0,5	0,2	1	0,2
	$p_A$ in kN	5 bis 10								
Kennwerte	$d_k$ in $\mu\text{m}$	44	15	20	44	15	20	44	15	20
	$ \kappa $ vor TW in N/mm	> 1,1	> 0,8	> 0,8	> 1,0	> 1,2	> 1,2	> 1,0	> 1,0	> 1,0
	$ \kappa $ nach TW in N/mm	> 0,9	> 0,7	> 0,7	> 0,9	> 1,1	> 1,0	> 0,8	> 0,9	> 0,9

Tabelle 6. 4: Übersicht über die Laminierparameter

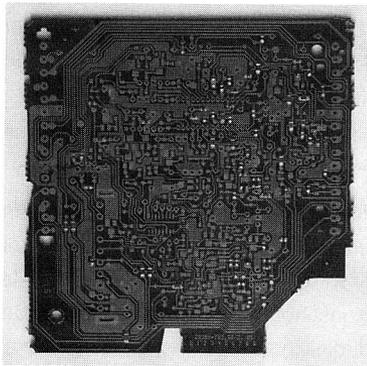
mit:

- KH = kalthärtender Zweikomponenten-Epoxidklebstoff  
 WH = warmhärtender Zweikomponenten-Epoxidklebstoff  
 LH = lichtinitiiertes Einkomponenten-Epoxidklebstoff

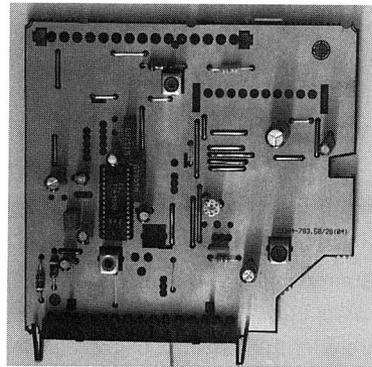
Neben den bereits bekannten Einflüssen auf die Schälfestigkeit, wie Oberflächenspannung und Reinigungsmittel, wurden systematisch Druck und Stempel- beziehungsweise Walzentemperatur für alle drei Epoxidklebstoffe optimiert. Die Parameter in Abhängigkeit des Kunst- und Klebstoffes sind in Tabelle 6. 4 aufgelistet.

Mit diesen Parametersätzen wurde in Subtraktivtechnik voll funktionsfähige Schaltungen zur Dekodierung der Empfangsinformation von TV-Satelliten hergestellt. Die Verbindungstechnik wurde mit Hilfe von Leitklebstoffen realisiert /95/.

Die einzelnen Schritte zur Herstellung waren somit das Reinigen beziehungsweise Aufrauen der Oberfläche, das Aufbringen des Klebstoffes und Laminieren der Kupferfolie und das Bohren der spritzgegossenen Thermoplasten mit anschließender Leiterbahnstrukturierung. Zum Schutz vor Oxidation wurde selektiv mit organischem Schutzlack und zur Verringerung der Kurzschlußgefahr ein Lötstoplack aufgebracht. Im Anschluß erfolgte das Bestücken der bedrahteten und unbedrahteten Bauelemente und deren Kontaktierung mit Leitklebstoff. In Abbildung 6. 7 ist die Vorder- und Rückseite der funktionsfähigen Applikation dargestellt.



Rückseite (zum Teil bestückt)



Vorderseite (voll bestückt)

Abbildung 6. 7: Im Laminierverfahren hergestellte funktionsfähige Applikation (hier ABS in Verbindung mit kalthärtenden Zweikomponenten-Epoxidklebstoff)

Leiterbahnbreiten von bis zu 200  $\mu\text{m}$  konnten ohne Haftfestigkeitsverlust zuverlässig herausgeätzt werden. Die Klebstoffe haben keine Rückstände in den einzelnen Prozessschritten des oben beschriebenen Verfahrensablaufes hinterlassen.

Das Verfahren eignete sich direkt zur Herstellung von thermoplastischen Schaltungsträgern unter Weiterverarbeitung in einer herkömmlichen Elektronikfertigung.

## 6.2 Kleberlose Laminierung

Kleberlos laminierte Leiterplatten aus thermoplastischen Materialien stellen eine bisher wenig beachtete Kombination dar. Lediglich innerhalb der 3-D MID Technologie ist das Heißprägen eine etablierte Methode um Strukturen auf Thermoplasten mittels eines Stempels zu übertragen. Das Verfahren zeichnet sich vor allem durch seine Schnelligkeit und den niedrigen Kosten aus. Einschränkungen sind bisher bezüglich der erreichten Leiterbahn- und Isolierbreiten von 200  $\mu\text{m}$  bis 300  $\mu\text{m}$  und durch die begrenzte Metallisierungsfläche der verfügbaren Prägefolien und Stempeldimensionen zu verzeichnen /91/. Der Einschränkung durch die Stempeldimension kann man durch eine kontinuierliche Laminierung über strukturierte Walzen begegnen. Die Limitierung der Leiterzugdimensionen bleibt jedoch bestehen und die Größe der zu übertragenden Struktur ist weiterhin durch den Durchmesser der Walze begrenzt. Ebenso ist eine Strukturierung der gekrümmten Walzenoberfläche kompliziert und teuer. Flexibler gestaltet sich somit die vollflächige Laminierung. Das Verfahren war flexibler und die Struktur konnte anschließend mit herkömmlichen Semiadditiv- oder Subtraktivverfahren erzeugt werden. Das die vollflächige Laminierung nicht unbedingt auch unstrukturierte Laminierung bedeutete, wird innerhalb diesem Kapitel dargestellt.

### 6.2.1 Vollflächige kleberlose Laminierung

Bei der kleberlosen Laminierung wird der Haftverbund zwischen Kunststoff und Kupferfolie vornehmlich durch das Aufschmelzen und dem sich anschließendem Erstarren des Thermoplasten erreicht. Hierbei wird zum einen die Oberfläche des Kupfers benetzt und zum anderen fließt der Kunststoff in Hinterschneidungen und Poren der Kupferoberfläche. Die Haftung wird folglich sowohl durch chemische als auch durch physikalische Adhäsionsmechanismen bestimmt, die man durch spezielle Behandlungen der Kupferfolie zu beeinflussen versucht. Der Aufbau einer Kupferfolie für den Einsatz als Leiterplattenmetallisierung kann prinzipiell in vier Schritte unterteilt werden:

- 1) Kupferfolienherstellung (Walzen oder elektrolytische Abscheidung)
- 2) Behandlung zur besseren Haftung ("Bonding Treatment")
- 3) Aufbau einer Diffusionsschicht

#### 4) Passivierungsschicht

Somit wird nach der elektrolytischen oder walztechnischen Folienherstellung ein sogenanntes "Bonding Treatment" aufgebracht. Hierbei handelt es sich im allgemeinen um eine extrem dichte und gleichmäßige Mikroprojektion von metallischem Kupfer, wodurch die zur Haftung an dem Polymersubstrat verfügbare Oberfläche erheblich vergrößert wird. Diese Behandlung beeinflusst die Oberflächentopographie maßgeblich. Im Anschluß erfolgt der Aufbau einer Diffusionschicht, die bei ED-Kupferfolien üblicherweise aus Zink besteht. Während des Laminierens vermischt sich die Zink-Sperrschicht mit dem Kupfer durch wärmebeschleunigte Diffusion. Hierdurch bildet sich eine Messingschicht, die keine chemische Reaktion mit dem Polymersystem eingeht und zudem den Ätzzvorgang unterstützt. Die chemische Stabilität der Sperrschicht gewährleistet, daß das Haftvermögen der Metallfolie-Polymer-Grenzschicht während aller Verfahrensschritte der Leiterplattenherstellung und während ihrer gesamten Nutzungsdauer unverändert bleibt, wobei eine chemische Behandlung ebenso wie Temperaturwechselbeanspruchung beim Löten und Nachhärten ausgehalten werden. Optional beziehungsweise als Ergänzung kann auch eine Benzotriazol (BTA)/ Toluotriazol (TTA)-Schicht aufgebracht werden, die gleichzeitig als Oxidationsschicht und Passivierung dient. Der Passivierungsfilm, der zum Beispiel auch durch Chromatisierung oder Aufbringen von Silanen realisiert wird, macht die behandelte Oberfläche widerstandsfähig gegen das Eindringen von bei der Herstellung der Leiterplatten eingesetzten Chemikalien und verleiht der Folie Beständigkeit gegenüber einer Langzeiteinwirkung bei hohen Temperaturen /197/.

An diese vier Grundschrirte zur Herstellung von Kupferfolien können sich weitere Sonderbehandlungen anreihen, wozu jedoch die Passivierungsschicht wieder entfernt werden muß.

In die Auswahl zur Durchführung der Versuche kamen zwei ED-Kupferfolien, IPC-FM-150 Klasse 2, mit den oben beschriebenen Behandlungsschritten. Die Passivierung wurde mittels Chromatisierung realisiert. Eine BTA/ TTA-Schicht war nicht aufgebracht. Der Unterschied zwischen diesen beiden Folien lag darin, daß bei einer Folie das "Bonding-Treatment" intensiver durchgeführt wurde und somit größere Kupferknollen an der Oberfläche erzeugt wurden, was sich auch in der Oberflächenrauigkeit widerspiegelte.

Zwei weitere ED-Kupferfolien wurden nach der standardmäßigen Herstellung einer Sonderbehandlung unterzogen. Zum einen wurde eine Mikroätzung vorgenommen und zum anderen wurde eine Behandlung durch Abscheiden von Schwarzoxid an

der Oberfläche durchgeführt. Die Ergebnisse sind veränderte Oberflächen mit wesentlich höheren  $R_a$ -Werten. Diese Folien entsprachen vor der Sonderbehandlung ebenfalls der Klasse 2 nach IPC-FM-150.

Vor allem der Trend zu feineren Strukturen bedingt geringere Oberflächenrauigkeiten, was auch die zusätzliche Zeit reduziert, die notwendig ist, um Kupferknollen aus dem Basismaterial zuverlässig herauszuätzen [22]. Infolgedessen wurden in die Versuchsreihe Walzkupferfolien der IPC-FM-150 Klasse 8 mit einbezogen, die einer dendritischen Kupferbehandlung unterzogen wurden und anschließend eine Chromat- beziehungsweise BTA-Passivierung erhielten. Durch eine weitere Spezialbehandlung wurde an der Oberfläche eine sehr regelmäßige Kupferknollenstruktur erzeugt. Aufgrund der rosanen Farbgebung nach der Sonderbehandlung, wird diese auch als „Pink Treatment“ bezeichnet. Die Oberflächentopographie dieser beiden Kupferfolien war unter dem Rasterelektronenmikroskop betrachtet identisch.

In iterativer Annäherung an die idealen Parameter Druck und Temperatur wurden in Abhängigkeit der Oberflächenbehandlung und des verwendeten Thermoplasten unterschiedliche Haftungsergebnisse erzeugt, die ja nach Kunststofftyp variierten. Beim Laminieren wurde zum Schutz der Kupferfolien-Testmuster eine weitere Metallfolie aufgelegt.

In Abbildung 6. 8 sind die Parameter aufgelistet, mit denen die höchsten Schälfestigkeiten erreicht wurden (vorwiegend PEI). Die Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen der Thermoplastoberflächen wurden nach vorherigem Abätzen des laminierten Kupfers angefertigt, wodurch sicher gestellt werden konnte, daß die Oberfläche durch das Abschälen nicht beschädigt wurde und somit ein verfälschtes Abbild des Thermoplasten wiedergegeben würde.

Mit Ausnahme der mikrogeätzten Kupferfolie erkannte man sehr leicht die Topographie der Kupferoberfläche als Negativabdruck in den Thermoplasten, was sich auch in den Haftungswerten niederschlug.

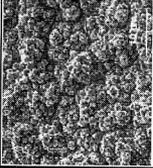
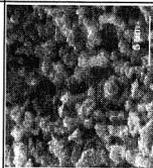
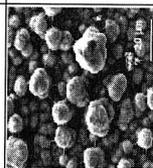
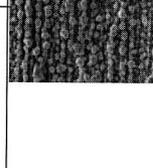
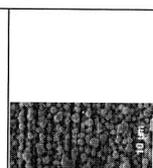
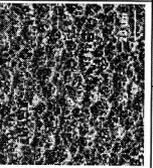
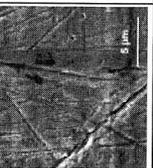
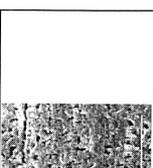
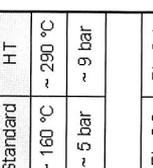
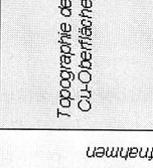
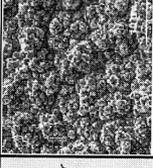
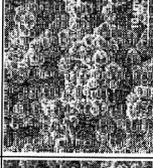
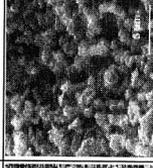
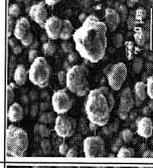
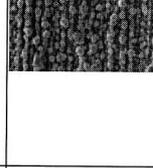
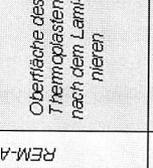
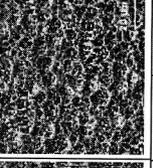
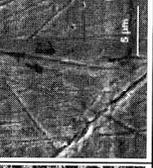
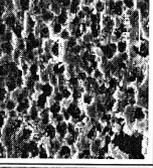
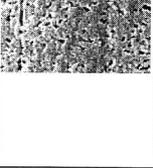
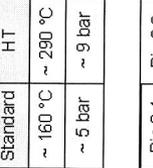
Schicht		ED-Kupferfolie						Walzkupferfolie		
Bonding	Standard	Intensiv	Standard	Standard	Standard	Dendritisch	Dendritisch			
Diffusion	Zink	Zink	BTA/TTA	BTA/TTA	BTA/TTA	-	BTA/TTA			
Passivierung	Chromat	Chromat				Chromat	Chromat			
Sonderbehandlung	-	-	Mikroätzung				Pink Treatment			
$R_a$ in $\mu m$	0,80	0,96	0,96	0,96	1,12	0,30	0,47			
Topographie der Cu-Oberfläche										
										
Oberfläche des Thermoplasten nach dem Laminieren										
										
Kunststoff	Standard	HT	Standard	HT	Standard	HT	Standard	HT	Standard	HT
	Standard	Standard	Standard	Standard	Standard	Standard	Standard	Standard	Standard	Standard
Temperatur	~ 140 °C	~ 140 °C	~ 150 °C	~ 260 °C	~ 150 °C	~ 260 °C	~ 160 °C	~ 290 °C	~ 160 °C	~ 290 °C
	~ 11 bar	~ 11 bar	~ 6 bar	~ 6 bar	~ 6 bar	~ 6 bar	~ 5 bar	~ 9 bar	~ 5 bar	~ 9 bar
Druck	~ 11 bar	~ 11 bar	~ 6 bar	~ 6 bar	~ 6 bar	~ 6 bar	~ 5 bar	~ 9 bar	~ 5 bar	~ 9 bar
	~ 11 bar	~ 11 bar	~ 6 bar	~ 6 bar	~ 6 bar	~ 6 bar	~ 5 bar	~ 9 bar	~ 5 bar	~ 9 bar
Geschwindigkeit	> 1,8 m/min									
	Bis 0,4 N/mm	Bis 0,8 N/mm	Bis 1,9 N/mm	Bis 0,2 N/mm	Bis 0,3 N/mm	Bis 1,0 N/mm	Bis 2,5 N/mm	Bis 0,4 N/mm	Bis 0,8 N/mm	Bis 0,2 N/mm

Abbildung 6. 8: Versuchparameter und Ergebnisse des Laminierens von Thermoplasten

Die Oberflächenrauigkeit  $R_a$  war somit kein zuverlässiger Parameter für ausreichende Haftwerte, was sich durch die höheren Schälwiderstände der glatteren Walzkupferfolie bestätigen ließ. Wesentlichen Einfluß hatten jedoch die knollenartigen Strukturen die, je größer sie ausgebildet waren, desto höhere Haftwerte lieferten. Dies erkannte man vor allem bei einem Vergleich der normierten Schälfestigkeiten von HT-Kunststoffen.

Je kleiner die knollenartige Struktur des Kupfers war, desto höher mußten der Druck und/oder die Temperatur beim Laminieren gewählt werden. Dies provozierte ein fließen des Thermoplasten, wodurch hinter die Knollen des Kupfers Kunststoffmaterial gelangte und infolgedessen zu einem Verankerungseffekt führte. So konnten bei ED-Kupferfolie mit intensiverer Standardbehandlung (in Abbildung 2. 8 zweite Spalte) hohe Haftwerte nur bei entsprechend hoher Temperatur realisiert werden, wodurch der Thermoplast aufweichte und sich die Kupferknollen in die Oberfläche drücken ließen. In Abbildung 2. 9 ist die Thermoplastoberfläche eines PEI-Kunststoffes dargestellt, der mit drei verschiedenen Parametersätzen mit der erwähnten Kupferfolie laminiert wurde. Man erkennt deutlich, je höher Druck und Temperatur gewählt wurden, desto mehr fing der Kunststoff an zu fließen und desto mehr Kupferknollen trugen zum Haftverbund zwischen Thermoplast und Kupferfolie bei.

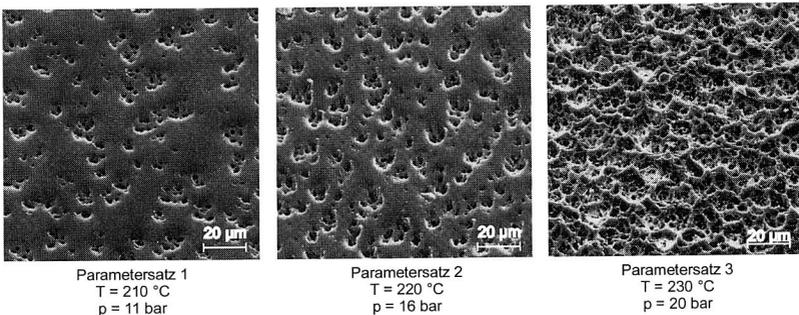
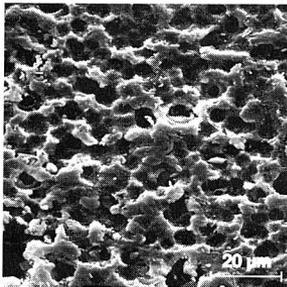


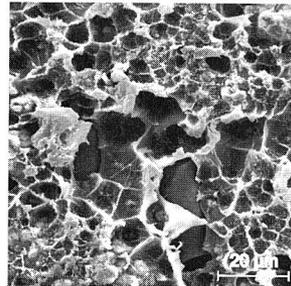
Abbildung 6. 9: Thermoplastoberfläche bei unterschiedlichen Laminierparametern (hier PEI mit ED-Kupferfolie)

Eindeutig konnte man diesen Effekt bei einem Vergleich der Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen von Thermoplastoberflächen erkennen, bei denen zum einen das Kupfer nach dem Laminieren geätzt wurde und zum anderen der Schältest entsprechend DIN IEC 326 durchgeführt wurde. Durch das Ätzen wurde sicherge-

stellt, daß die Knollen aus der Oberfläche herausgelöst wurden, ohne diese zu beschädigen.



Abdruck im Thermoplasten  
der "schwarzoxidbehandelten"  
Oberfläche



Hohe Haftfestigkeit durch  
Ausriß der Kupferknollen  
aus dem Thermoplasten

Abbildung 6. 10: Einfluß der Kupferknollen auf den Haftmechanismus

In Abbildung 6. 10 sieht man, wie der Kunststoff die Kupferknollen umschlossen hat und wie diese bei Durchführung des Schälversuchs die Oberfläche aufrissen und somit wesentlich zum Haftmechanismus zwischen Kupfer und Kunststoff beitrugen.

Einen weiteren Einfluß zeigte die unterschiedliche Passivierung der Walzkupferfolien. So wies die chromatisierte Kupferfolie bei gleicher Topographie wesentlich höhere Werte bei HT-Thermoplasten (vor allem bei PPS) auf als BTA/TTA-passivierte Folien. Somit trugen neben der physikalischen Adhäsion auch chemische Reaktionen zum Haftverbund bei.

Die Versuche haben hiermit gezeigt, daß sich ein Haftverbund zwischen Thermoplast und Kupferfolie auch ohne Klebstoff als Haftvermittler herstellen läßt, Einschränkungen ergaben sich im wesentlichen bei Standardkunststoffen, die bei einigen Parametersätzen ein starkes Fließen aufwiesen, das sich in einem Austreten des Kunststoffes über die ursprüngliche geometrische Form bemerkbar machte. Sorgfältige Parameterwahl und eine Kupferfolie mit entsprechender Knollenstruktur konnten dies verhindern. Bei HT-Thermoplasten konnten jedoch auch Folien mit geringerer Knollenstruktur laminiert werden, welches wiederum Vorteile in bezug auf die Dielektrizitätskonstante hatte. Man kann sich sehr leicht vorstellen, daß bei einer 50 µm starken Thermoplastfolie eine mit bis zu 20 µm großen Kupferknollen laminierte Folie durchaus zu Problemen führen kann, da die thermoplastische Isolationsschicht zwischen manchen Punkten nur noch 10 µm

betragen würde. Weiterhin bedeutete dies auch eine Erhöhung der Ätzeit bei Durchführung eines Subtraktivverfahren mit einhergehenden Einschränkungen in der Kantensteilheit von Leiterbahnen und Isolationskanälen (siehe Kapitel 2.3.1).

### 6.2.2 *Strukturierte kleberlose Laminierung*

Zur Vermeidung des Subtraktivverfahrens entsprechend der Forderungen aus Kapitel 2 wurde ein patentiertes Laminierverfahren zur strukturierten Metallisierung von HT-Schaltungsträger entwickelt. Im Stand der Technik war bekannt, daß MID-Bauteile mittels eines Heißstempelverfahrens hergestellt werden konnten. Hierbei wird einerseits die Kupferfolie so strukturiert, daß die gewünschten Leiterbahnen entstehen und durch Anschmelzen des Kunststoffes mit diesem verbinden. Wodurch lediglich homogene und relativ grobe ( $> 300 \mu\text{m}$ ) Leiterbahnstrukturen herstellbar sind. Zum anderen war durch die vorausgegangenen Versuche und durch das Laminierverfahren von Epoxidharz-Leiterplatten bekannt, daß vollflächig metallisierte Bauteile hergestellt werden konnten. Was jedoch die schwierige Handhabung der empfindlichen Kupferfolien verlangte. Die Anwendung des Hinterspritzens von Kunststoff (siehe Kapitel 2.3.2), kann weiterhin nur durchgeführt werden, wenn gleichartige Kunststoffe verwendet werden.

Hiervon ausgehend wurde ein Verfahren entwickelt, welches erlaubt MID-Bauteile und Folien auch mit feinen Leiterbahnstrukturen zuverlässig und mittels Großserienfertigung kostengünstig herzustellen. Die Leiterbahnstrukturen wurden hierzu auf einer mechanisch und thermisch unempfindlichen Trägerfolie ausgebildet, die einfach zu handhaben war. Diese Folie konnte während der Herstellung von Bauteilen von einer Rolle zugeführt werden. Sobald die Leiterbahnstrukturen mit dem eigentlichen Kunststoffkörper zuverlässig verbunden war, konnte die Trägerfolie abgezogen werden, so daß eine Beschädigung der Leiterbahnen ausgeschlossen werden konnte. Die Leiterbahnen wurden spiegelbildlich durch chemisch volladditive Abscheidung von Kupfer definierter Haftung auf die Trägerfolie aufgebracht. Eine weitere Möglichkeit bestand in der Verwendung von Haftvermittlerschichten, wie zum Beispiel die in Kapitel 2 beschriebenen Primersysteme<sup>1</sup>, die nicht vollständig ausgehärtet wurden, um sie anschließend wieder zu lösen. Hieran schloß sich ein herkömmliches Semiadditivverfahren, wodurch die späteren Leiterbahnen hervorstanden.

---

<sup>1</sup> Zum Beispiel Baymetec 3308 der Fa. Bayer AG.

Als Resiste boten sich wiederum mechanisch abziehbare oder lösliche Photolacke an (vgl. Kapitel 5.2.2).

Unter Bezugnahme auf die Ergebnisse der vollflächigen kleberlosen Laminierung wurde das Kupfer einer Sonderbehandlung unterzogen, um die gewünschte Knollenstruktur zu erhalten. Durch diesen Schritt wurde sichergestellt, daß die Haftung zwischen Kupfer und Leiterplatte größer als zwischen Haftvermittler und Trägerfolie, beziehungsweise zwischen chemischer Kupferschicht und Trägerfolie, war.

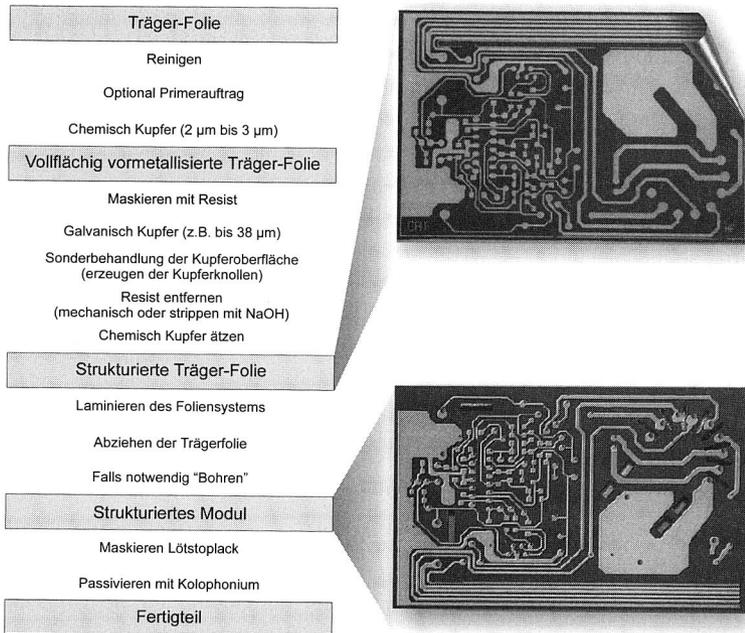


Abbildung 6. 11: Verfahrensablauf der kleberlosen strukturierten Laminierung (Folie: PEEK; Modul: LCP)

Die Trägerfolien konnten sowohl aus Aramid- oder Kevlarfasern gewebt sein, aber auch aus temperaturbeständigen Thermoplasten bestehen. Bei der Auswahl der Trägerfolie mußte lediglich darauf geachtet werden, daß die Temperaturbeständigkeit höher als die des Bauteiles war, damit ein Aufschmelzen realisiert werden konnte. Abbildung 6. 11 zeigt die aufeinanderfolgenden Fertigungsstufen, die bei der Herstellung einer thermoplastischen Leiterplatte durchlaufen wurden.

In Abbildung 2. 11 wurde die chemische Kupferschicht bereits von der Trägerfolie entfernt. Die einen Schritt zuvor erzeugten Knollenstrukturen des Kupfers wurden hierdurch nicht beschädigt, da die chemische Kupferschicht lediglich 2  $\mu\text{m}$  bis 3  $\mu\text{m}$  stark war. In Abwandlung zu diesem Ablauf konnte das Entfernen der chemischen Kupferschicht auch nach dem Laminieren erfolgen.

Nach der Fertigung des strukturierten Moduls folgten weitere Arbeitsschritte wie Bohren, Aufbringen eine Lötstoplacks, Passivieren mit Kolophonium, Dispensen von Lot, Bestücken etc. .

Einschränkungen erfuhr das Verfahren lediglich darin, daß die Positionierung der zu laminierenden Trägerfolie und des spritzgegossenen Moduls schwierig war, was sich in einem Versatz an Löchern und Ausbrüchen zeigte. Die Vorteile des entwickelten patentierten Dekalverfahrens wurden darin gesehen, daß es die Einzelteilhandhabung auf ein Minimum reduzierte, eine möglichst kontinuierliche Fertigung begünstigte und die Flexibilität bezüglich des zu verwendenden Kunststoffes erhöhte. Somit konnten auch Thermoplaste verwendet werden, auf denen Kupfer nur sehr schlecht haftete /61/.

Es konnte folglich ein Verfahren entwickelt werden, welches erlaubte MID-Bauteile kostengünstig herzustellen, die zugleich gegenüber herkömmlichen Bauteilen verbesserte Eigenschaften aufwiesen.

### **6.3 Zusammenfassung und Ausblick des Laminierens von Thermoplasten**

Das Laminieren von thermoplastischen Materialien zeigte eine hohe Gemeinsamkeit mit dem herkömmlichen Kaschieren von Epoxidharz-Leiterplatten. Ein Teil der Versuche wurde auch mit diesen Vorrichtungen durchgeführt. Eine Umstellung oder Einführung der Herstellung thermoplastischer Leiterplatten ist somit unproblematisch. Eine schnelle Umsetzung ist dadurch gesichert.

Die Ergebnisse der kleberunterstützten als auch die der kleberlosen Laminierung zeigten, daß eine Wettbewerbsfähigkeit mit bereits auf dem Markt verfügbaren Materialien gegeben ist. Es konnten feine Strukturen (150  $\mu\text{m}$ ) mit inhomogenen Leiterstrukturen hergestellt werden. Weiterhin konnten die Bauteile zum überwiegenden Teil kontinuierlich gefertigt werden. Die Verwendung von intrinsisch flammhemmenden Kunststoffen bei Applikationen, bei denen Flammschutz gefordert wird kann somit umweltverträglich gelöst werden, welches erhebliche Vorteile bei der Entsorgung und Wiederverwertung des elektronischen Bauteiles mit sich

bringt. Eigenschaft dieser Kunststoffe ist zugleich die hohe Temperaturbeständigkeit, das eine problemlose Durchführung von Lötprozessen sicher stellte.

Ist dies aufgrund des zukünftigen Einsatzes des elektrischen Bauteiles nicht gefordert und müssen oberflächenmontierte Bauelemente (Surface Mount Devices) nicht gesetzt werden, ist ein Lötprozeß ebenfalls nicht notwendig. Die Verbindungstechnik kann in diesem Fall zum Beispiel mit Hilfe der Einpreßtechnik gelöst werden. Eine durchgeführte Machbarkeitsstudie zeigte, daß die Einpreßtechnik auch für thermoplastische Materialien in Abhängigkeit der Geometrie des verwendeten Einpreßstiftes zu akzeptablen Ergebnissen sowohl in Hinsicht auf Auszugskräfte als auch Leitfähigkeiten führte. Eine Ankontaktierung ist über die lediglich an der Oberfläche geführte Leiterbahn möglich (Abbildung 6. 12)<sup>1</sup>.

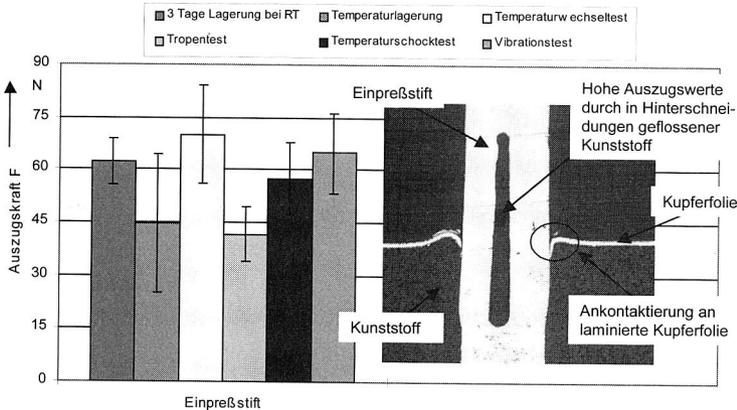


Abbildung 6. 12: Erreichte Auszugswerte  $F$  und Ankontaktierung laminierter Thermoplaste mittels Einpreßtechnik (Hier am Beispiel von PA 6/6)

Die Auszugskräfte lagen bei dem Kunststoff Polyamid sogar nach den einzelnen Zuverlässigkeitstests über 35 Newton und die Widerstandswerte trotz Zuwüchsen nach den Tests noch unter 10 mΩ und damit innerhalb der, von der Automobilindustrie akzeptierten Werten. Hierdurch ergeben sich weitere Aspekte, die in zukünftigen Untersuchungen weiter evaluiert werden müssen. Es konnte somit zusätzlich gezeigt werden, daß auch das Laminieren mit nachfolgenden Verfahren der Leiterplattenproduktion kombinierbar ist.

<sup>1</sup> Die Untersuchungen hierzu wurden von Herrn Dipl.-Ing. R. Noßke unterstützt.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Die Prozesse Metallisierung und Strukturierung sind sowohl die qualitäts- als auch innovationsbestimmenden Schritte innerhalb der Herstellung eines elektronischen Schaltungsträgers. Unter diesen Randbedingungen versucht die Industrie Kombinationen von ökologisch und ökonomisch effizienten Verfahren zu erreichen, die zusätzlich zu kürzeren Prozeßketten führen. In dieser Dissertation werden unterschiedliche Verfahrenskombinationen zur Polymerbeschichtung und Strukturierung beschrieben, wobei jeweils von einem anderen physikalischen Ausgangszustand des zu beschichtenden Materials ausgegangen wurde. Um den qualitätsbestimmenden Nachweis sowohl für dünne als auch für dicke Schichten erbringen zu können, wurde eine Meßvorrichtung entwickelt und das zugehörige Meßverfahren standardisiert. Es konnte erstmalig ein Zusammenhang zwischen dem Schältest nach DIN IEC 326, welcher für dicke Schichten ( $> 10 \mu\text{m}$ ) angewendet wird und dem Stirnabzugtest nach DIN EN 582 für dünne Schichten aufgezeigt werden, der es ermöglichte die Meßwerte dieser beiden Verfahren miteinander zu vergleichen.

Nach einer vorhergehenden detaillierten Recherche und Gegenüberstellung aller alternativer Metallisierungs- und Strukturierungsverfahren wurden die in Hinblick der Bewertungsfaktoren Ökologie, Ökonomie, Prozeß und Technologie vielversprechendsten Verfahren identifiziert und bezüglich ihrer noch bestehenden Defizite analysiert. Die untersuchten Verfahren waren somit die Primer- in Kombination mit der Lasertechnologie, das physikalische Beschichten und das Laminieren. Eingehende Prozeßuntersuchungen aus Beschichtungs- und Strukturierungstechnologie konnten effizient miteinander kombiniert werden und führten so innerhalb der einzelnen Technologien zu universellen und dem Stand der Technik vorausgreifenden Ergebnissen.

Der Einsatz des metallisierbaren Haftvermittlers in Zusammenhang mit der Lasertechnologie führte zu Strukturen von deutlich unter  $30 \mu\text{m}$  bei gleichzeitiger Prozeßkettenverkürzung. Das ursprüngliche Defizit der Miniaturisierung dieses Verfahrens wurde somit behoben. Weiterhin konnten neben diesen minimalen Strukturen auch allgemeine Erkenntnisse über das Verhalten von Thermoplasten bei Beaufschlagung von Laserstrahlung gewonnen werden.

Durch die Kombination eines geschützten PVD-Verfahrens mit einer speziellen additiven Maskentechnologie und optimierten galvanischen Prozessen konnten selbst schwer metallisierbare Kunststoffe für MID-Applikationen und flexible

Schaltungsträger zugänglich gemacht werden. Die Parameter der PVD-Metallisierung waren durch geeignete Wahl des Beschichtungsmaterials und der Plasmaätzgase beschersschbar. Die elektrolytische Nachverstärkung konnte zuverlässig in cyanidischen Bädern durchgeführt werden. Durch die Kombination mit der entwickelten volladditiven Strukturierung konnte dieses Verfahren erst sein komplettes Potential entfalten, wobei die Bauelemente eines im Anschluß voll funktionsfähigen Testmoduls in einer Standardlötanlage verlötet werden konnten.

Zur Durchführung der Laminierung von Thermoplasten wurden sowohl geeignete Klebstoffe als auch Kupferfolien gefunden und eine funktionsfähige Schaltung aufgebaut. Zur kleberlosen Laminierung wurden ausführliche Untersuchungen der Haftmechanismen der Kupferfolie in Abhängigkeit ihrer Vorbehandlung durchgeführt. Thermoplaste wurden sowohl vollflächig als auch strukturiert laminiert, wobei die strukturierte Laminierung zu einer patentrechtlichen Anmeldung geführt hat. Dieses Verfahren welches aus der Kombination von drei verschiedenen Metallisierungsverfahren besteht, steigerte die Flexibilität bezüglich verwendbarer Materialien bei gleichzeitiger Verminderung von Strukturbreiten. Die anfänglichen Defizite in Hinblick auf Parameter und additiver Verfahren waren somit beseitigt.

Vergleicht man die Trends und Aspekte der Leiterplattenindustrie mit den Ergebnissen dieser Arbeit, so erkennt man, daß wesentliche Punkte hierdurch abgedeckt wurden. Es konnten neue Basismaterialien mit verbesserten Eigenschaften bezüglich Temperaturbelastung verwendet werden. Der Feinstleiteteknik wird durch den Einsatz des Lasers und der physikalischen Metallisierung genüge getan. Durch die durchgehende Favorisierung der Additivtechnologie wird dies noch unterstützt. Dadurch, daß alle Verfahren davon ausgingen, daß sowohl Platten als auch Folien eingesetzt werden, kann ein zukunftsorientiertes Leiterplattenkonzept mit durchgehender mechanischer und elektrischer Funktionstrennung /89/ während der Fertigung bei gleichzeitiger Ausnutzung der Funktionsintegration während der Nutzung realisiert werden. Dies bedeutet eine Ausnutzung der wirtschaftlichen Prozesse in der Ebene mit kontinuierlicher Fertigung der elektrischen Funktionen durch Differenzierung und Nutzung der Vorteile der Integration während der Montage durch vorhergehende Verbindung des elektrischen und mechanischen Systems.

## 8 Literaturverzeichnis

- /1/ Andrew, J.E.; Dyer, P.E. et. alt.: Applied Physics Letters 43(8), 1983
- /2/ Autorenteam: Themenkreis: Ersatz aggressiver naßchemischer durch umweltfreundliche Behandlungs- und Beschichtungsverfahren; in: Wey, K. (fachl. Konzeption): Statusseminar Oberflächen und Schichttechnologien, Band 2, Würzburg 9. - 11.06.1997, VDI Technologiezentrum Physikalische Technologien, Düsseldorf 1997, S. 191 ff.
- /3/ Auwärter, M.: Ergebnisse der Hochvakuumtechnik und der Physik dünner Schichten, Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft m.b.H., Stuttgart 1957
- /4/ Bauer, Ch. E.: Market Drivers and Expectations in Advanced Interconnect Structures; in: Tagungsunterlagen EPC European PCB Convention, September 29th to October 1st, Wiesbaden 1998
- /5/ Baumann, R.; Roth, H.-K.; Schrödner, M.; Bargon, J.: Laser Induced Permanent Conductivity in Poly(bisethylthioacetylene); in: Bull.Amer. Phys.Soc. 36 (1991), S. 478 ff.
- /6/ Beil, S.; Horn, H.; Pochner, K.: Selective Metallization by UV Treatment of Plastics; in: Proceedings 3. Int. Congress Molded Interconnect Devices, Erlangen 1998, Meisenbach Verlag, Bamberg 1998, S. 199 ff.
- /7/ Beitinger, G.: Economic Combinations of Structure and Metallizing Processes; In: Productronica 97, 11. - 13. November, 1997, FAPS: Innovative Production of Electronic Systems, Documentation, München 1997, S. 13 ff.
- /8/ Beitinger, G.: Neue Metallisierungsverfahren, 1. Workshop Räumliche Schaltungsträger: Forschungsergebnisse und Entwicklungstrends; 7. Oktober, Erlangen 1997
- /9/ Beitinger, G.; Feldmann, K.: UV(248nm)-Laser Structuring and Additive Metallization versus Subtractive Nd:YAG-Laser Structuring, Proceedings IPC/SMTA Electronics Assembly Expo -The Technology, The Business and The Art of Electronics Manufacturing, Providence R.I. October 24-29, 1998, S. 20 ff.
- /10/ Beitinger, G.; Kolbeck, G.: Process For Metal Plating Liquid Crystalline Polymers And Compositions Related Thereto, AD-6533
- /11/ Bimberg, D.: Materialbearbeitung mit Laser, Grundlagen und Anwendungen, Expert Verlag, Berlin 1997
- /12/ Bischoff, C.: Kunststoffoberfläche im Plasma, Kunststoffe 83, Carl Hanser Verlag, München 1993
- /13/ Bode, M.; Kreutz, E.W.; Krösche, M.: Direct writing of conducting traces by chemical modification of solid coatings with laser radiation, in: applied surface science 69, Springer Verlag, Berlin 1990

- /14/ Bogenschütz: JOT 33 (1993), 6, 18
- /15/ Boone, L.: Metallisieren und Strukturieren von Spritzgußteilen mit integrierten Leiterzügen; in: 15. Ulmer Gespräche - Kunststoffmetallisierung und leitende Polymere, Eugen G. Leuze Verlag, Saulgau 1993, S. 100 ff.
- /16/ Boone, L.; Heerman, M.; Mattelin, A.; Roelants, E.: Integration mit SIL-Technik, Siemens-Zeitschrift Special FuE, Herbst 1992
- /17/ Botzler, P.: Metallisierung von Kunststoffen durch PVD-Verfahren; in: Proceedings 1. Int. Congress Molded Interconnect Devices, Erlangen 1994, Meisenbach Verlag, Bamberg 1994, S. 211 ff.
- /18/ Britton, P.L.: Ultra-Feinleiter auf Leiterplatten; in: EPP Elektronik Produktion & Prüftechnik, Konradin Verlag Robert Kohlhammer GmbH Juli/August 1994, S. 26 ff.
- /19/ Brunner, W.; Junge, K.: Lasertechnik, Eine Einführung, Dr. Alfred Hüthig Verlag, Heidelberg 1987
- /20/ Churchill, G.: A Paradigm for Developing Better Measures of Marketing Constructs, in: Journal of Marketing Research, 02/1979, S. 64 - 73
- /21/ Crum, S.: Flexible Laminate Materials Affect Circuit Performance, in: Electronic Packaging and Production, November 1994
- /22/ Dietz, K.-H.: Trends in Photoresist Technology; in: Tagungsunterlagen EPC European PCB Convention, September 29th to October 1st, Wiesbaden 1998
- /23/ Dominik, M.: Oberflächenveredelung - von der Vorbehandlung zur Dekoration, in: Kunststoffe 83, Carl Hanser Verlag, München 1/1993
- /24/ Domininghaus, H.: Kunststoffe und ihre Eigenschaften, VDI-Verlag, Düsseldorf 1988
- /25/ Dyer, P. E.; Jenkins, S. D. et al.: Applied Physics Letters 49, 1986
- /26/ Ebnetz, H.; Riedel, W.: Galvanische Verfahren, in: Kunststoff-Metallisierung, Handbuch für Theorie und Praxis, Eugen G. Leuze Verlag, Saulgau 1992
- /27/ Ehlin, M.J.: High Speed Photoresist for Laser Direct Imaging, CircuiTree Magazine, June 1998
- /28/ Ehrenstein, G.W.: Polymere Werkstoffe, Carl Hanser Verlag, München 1990
- /29/ Ehrenstein, G.W.: Vorlesungsunterlagen Kunststofftechnik 1, Lehrstuhl für Kunststofftechnik, Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen 1991
- /30/ Eichler, H.J.: Lasertechnik, Springer Verlag, Berlin 1990

- /31/ Fahrner, H.M.; Hartmann, U.: Heißprägen von räumlichen Schaltungsträgern; in: Proceedings 1. Int. Congress Molded Interconnect Devices, Erlangen 1994, Meisenbach Verlag, Bamberg 1994, S. 243 ff.
- /32/ Fauner, G.; Endlich, W.: Angewandte Klebetechnik, Carl Hanser Verlag, München 1979
- /33/ Feldmann K., Beitinger G.: PVD versus Galvanik; in: mo metalloberfläche Beschichten von Metall und Kunststoff, 5/96 50. Jahrgang, Carl Hanser Verlag, München 1996, S. 400 ff.
- /34/ Feldmann K., Beitinger G.: Sputtern ersetzt naßchemische Vorbehandlung; in: mo metalloberfläche Beschichten von Metall und Kunststoff, 5/97 51. Jahrgang, Carl Hanser Verlag, München 1997, S. 349 ff.
- /35/ Feldmann, K.; Beitinger, G.: Alternative Leiterplattenkonzepte - Materialien und Verfahren zur Metallisierung und Strukturierung; in: mo metalloberfläche Beschichten von Metall und Kunststoff, 11/97 51. Jahrgang, Carl Hanser Verlag, München 1997, S. 816 ff.
- /36/ Feldmann, K.; Beitinger, G.: PVD kontra Galvanik -Hafffestes Strukturieren und Beschichtung von Kunststoffkörpern, EPP Elektronik Produktion & Prüftechnik, Konradin Verlag Robert Kohlhammer GmbH, 5. Mai 1996; S. 52 ff.
- /37/ Feldmann, K.; Beitinger, G.: Umweltverträgliche Verfahren zur hafffesten Metallisierung, InfoPhysTech Nr. 20/ September 1998, VDI Technologiezentrum Physikalische Technologien, Düsseldorf 1998
- /38/ Feldmann, K.; Beitinger, G.; Muschweck, T.; Renner, G.; Kickelhain, J.: Excimerlaserstrukturierung und additive Metallisierung von Thermoplasten; in: F&M Feinwerktechnik Mikrotechnik Mikroelektronik, Carl Hanser Verlag München 3/98 106. Jhg., S. 150 ff.
- /39/ Feldmann, K.; Eisenbarth, M.; Reichenberger, M.: Mediengebundene Lötverfahren vor dem Hintergrund höherschmelzender Lotlegierungen; in: Leiterplatten und Baugruppenteknik '99 S., Vorträge der GMM-Fachtagung am 8. Und 9. März 1999 in Bad Nauheim, VDE-Verlag GmbH, Berlin 1999, S. 265 ff.
- /40/ Feldmann, K.; Franke, J.; Beitinger, G.: Strukturiertes physikalisches Beschichten von Kunststoffkörpern; in: mo metalloberfläche Beschichten von Metall und Kunststoff, 11/95 49. Jahrgang, Carl Hanser Verlag, München 1995, S. 862 ff.
- /41/ Fjelstad, J.: An Engineer`s Guide To Flexible Circuit Technology, Electrochemical Publications Ltd, Asahi House, Church Road, Port Erin, Isle of Men, British Isles, England 1997
- /42/ Fonz, V.: Kupfer direkt auf Polyimid, in: Metalloberfläche 44 (1990), Carl Hanser Verlag, München 1990

- /43/ Förster, F.: Untersuchungen zum Mechanismus der Haftung zwischen Polymeren und außenstromlos abgeschiedenen Metallschichten, Dissertation an der Technischen Universität Berlin 1985
- /44/ Franck, A.; Biederbick, K.: Kunststoffkompendium, 3. Überarbeitete Auflage, Vogel Buchverlag, Stuttgart 1991
- /45/ Franke, J.: Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien für räumlich spritzgegossene Schaltungsträger (3-D MID); Dissertation an der Universität Erlangen, Carl Hanser Verlag, München 1995
- /46/ Franz D.: Statistik, Hüthig Buch Verlag GmbH, Heidelberg 1991
- /47/ Frey, H.: Ionenstrahlgestützte Halbleitertechnologie, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf 1992
- /48/ Frost & Sullivan; Seminarunterlagen Kabelkonfektion-Quo Vadis?, IPA, Stuttgart 1998
- /49/ Gaida, B.; Aßmann, K.: Technologie der Galvanotechnik, 1. Auflage, Eugen G. Leuze Verlag, Saulgau Württ. 1996
- /50/ Ganz, J.: PVD plus Galvanik - Die Kombination; in: mo metalloberfläche Beschichten von Metall und Kunststoff, 5/94 48. Jahrgang, Carl Hanser Verlag, München 1994, S. 144 ff.
- /51/ Ganz, J.; Köhler, E.: LAD - Ein neuartiges, laserunterstütztes Beschichtungsverfahren für feine Strukturen in der Elektronik; in: Metall Wissenschaft + Technik, 45. Jahrgang, Heft 1, 1991
- /52/ Garrison, B.J.; Srinivasan, R.: Applied Physics Letters 44(9), 1984
- /53/ Geiger, M.: Laserstrahlbearbeitung, Skriptum zur Vorlesung; Lehrstuhl für Fertigungstechnologie, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg 1993
- /54/ Geiger, M; Pucher, H.-J.; Glasmacher, M.; Hutfless, J.; Kickelhain, J.: Konzepte zur laserstrahlunterstützten, strukturierten Metallisierung von 3-D MIDs; in: Proceedings 1. Int. Congress Molded Interconnect Devices, Erlangen 1994, Meisenbach Verlag, Bamberg 1994, S. 243 ff.
- /55/ Gerhard, M.: Qualitätssteigerung in der Elektronikproduktion durch Optimierung der Prozeßführung beim Löten komplexer Baugruppen; Dissertation an der Universität Erlangen, Meisenbach Verlag, Bamberg 1997
- /56/ Goodhew P.J.; Humphreys F.J.: Elektronenmikroskopie: Grundlagen und Anwendung, deutsche Fassung, Maidenhead (UK) 1991, S.115ff.
- /57/ Goosey, M.: The Impact of Environmental Issues on the European Printed Circuit Board Industry; in: Tagungsunterlagen EPC European PCB Convention, September 29th to October 1st, Wiesbaden 1998

- /58/ Grainger, S.: Funktionelle Beschichtung in Konstruktion und Anwendung, Eugen G. Leuze Verlag, Saugau/Württ. 1994
- /59/ Habenicht, G.: Kleben: Leitfaden für die praktische Anwendung und Ausbildung; Verlag Vieweg, Braunschweig 1995
- /60/ Haller, H. O.: MID Technology for Power Modules, demonstrated on Examples of the Project: „Green TV“; in: Proceedings 3. Int. Congress Molded Interconnect Devices, Erlangen 1998, Meisenbach Verlag, Bamberg 1998, S. 105 ff.
- /61/ Haller, H.-O.; Beiting, G.; Strubel, V.: Method for the production of an electrotechnical device; Patentnummer 99111866.2-2214, DE 19829248
- /62/ Hampelmann, S.: Direktmetallisierung von Kunststoffen; in: metalloberfläche Beschichten von Metall und Kunststoff, 1/96 50. Jahrgang, Carl Hanser Verlag, München 1996
- /63/ Hartmann, U.: Strukturierte Metallisierung von Kunststoffoberflächen; in: Statusseminar Oberflächen und Schichttechnologien Band 1, Würzburg 9. - 11.06.1997, VDI Technologiezentrum Physikalische Technologien, Düsseldorf 1997, S. 9 ff.
- /64/ Herrmann, G. (Hrsg.): Handbuch der Leiterplattentechnik, Band 3, Eugen G. Leuze Verlag, Saugau/Württ., 1993 München
- /65/ Herrmann, G.; Egerer, K. (Hrsg.): Handbuch der Leiterplattentechnik, Band 2, Eugen G. Leuze Verlag, Saugau/Württ. 1991
- /66/ Herziger, G.; Loosen, P. (Hrsg.): Werkstoffbearbeitung mit Laserstrahlung, Carl Hanser Verlag München, Wien 1993
- /67/ Hesse, D.: Abtragen und Schneiden von Kohlefaserverbundwerkstoffen mit Excimerlaserstrahlung, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2: Fertigungstechnik, Nr. 333, VDI Verlag 1998
- /68/ Heumann, E.: Materialbeschriftung mittels Laser, Laser : Technologie und Anwendung; Vulkan Verlag, Essen Jahrbuch 1988, S. 246 ff.
- /69/ Heyer, J.; Steinius, O.: Metallisieren von Hochtemperatur-Kunststoffen; in: metalloberfläche Beschichten von Metall und Kunststoff, 1 (1998) 52. Jahrgang, Carl Hanser Verlag, München 1998
- /70/ Hiroyuki, N.; Yabe, A.: Excimerlaser polymer ablation: formation of positively charged surfaces and its application into the metallization of polymer films, in: applied surface science 69, Springer Verlag, Berlin 1993
- /71/ Hofmann; Fahrenwaldt: Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung Band 1, Dr.-Lüdecke-Verlagsgesellschaft, Heidelberg 1975, S. 54ff.
- /72/ Hügel, H.: Strahlwerkzeug Laser; Teubner Studienbücher, Maschinenbau, 1991

- /73/ Hummel, M.: Einführung in die Leiterplattentechnologie, 3. Aufl., Eugen G. Leuze Verlag, Saulgau Württ. 1990
- /74/ Hunter, P.: Circuit Structuring of Moulded Interconnect Devices by Selective Application of an Electroless Plating Catalyst Technology; in: Proceedings 2. International Congress Molded Interconnect Devices, Erlangen 1996, Meisenbach Verlag, Bamberg, S. 231 ff.
- /75/ Jäkel, E.: Galvanotechnik 84 (1993) 5, 1548
- /76/ Jehn, H.; Reiners, G.; Siegel, N.: Charakterisierung dünner Schichten, DIN-Fachbericht 39, Beuth Verlag GmbH, Berlin 1993
- /77/ John, R.; Rößiger, V.: Welche Kriterien gelten für die Auswahl von Röntgenfluoreszenz-Schichtdickenmeßgeräten?; in: Galvanotechnik Nr. 11 (85), Eugen G. Leuze Verlag 1994
- /78/ John, W.: Primertechnologie - ein neuer Weg zum selektiven Metallisieren; in: Proceedings 3. International Congress Molded Interconnect Devices, Erlangen 1998, Meisenbach Verlag Bamberg 1998
- /79/ Kahlert, H.-J.: Untersuchung zur industriellen Umsetzung von Excimerlaserstrahlungswechselwirkungen mit verschiedenen Materialien, Forschungsbericht BMFT
- /80/ Kämpf, G.: Industrielle Methoden der Kunststoff-Charakterisierung: Eigenschaften polymerer Werkstoffe; 1. Auflage, Carl Hanser Verlag München 1996, S. 10 ff.
- /81/ Kausche, H.; Peters, W.: Verfahren zur Herstellung metallischer Strukturen, insbesondere Folienschaltungen, Offenlegungsschrift 27 35 045, Siemens AG, Berlin 1995
- /82/ Kickelhain, J.: Laserunterstützte Herstellung von Feinstleiterstrukturen in Additivtechnik, Galvanotechnik, Nr. 2 (88), Eugen G. Leuze Verlag, Saulgau, 1997
- /83/ Kittel, Ch.: Einführung in die Festkörperphysik; R. Oldenburg Verlag, München 1989, S. 358 ff.
- /84/ Klein, R.-M.: Bearbeitung von Polymerwerkstoffen mit infraroter Strahlung; Dissertation an der technischen Hochschule Aachen 1990
- /85/ Klein-Wassink, R.J.: Weichlöten in der Elektronik 2. Auflage, Eugen G. Leuze Verlag, Saulgau 1991
- /86/ Knudsen, P.; Brainard, R.; Schell, K.: A Photoimageable Dielectric for Sequential PWB Fabrication, IPC Review 1994
- /87/ Kober, H. et al.: Flexible Leiterplatten für die Direktmontage ungehäuster Chips in Flip-Chip-Technik; in: VTE 3/94, Seite 149-155

- /88/ Kober, H.: Is reel-to-reel manufacturing the only way to make tomorrow's PCB; in: Tagungsunterlagen EPC European PCB Convention, September 29th to October 1st, Wiesbaden 1998
- /89/ Kostelnik, Jan.: Horizonte öffnen -Zukunftsorientiertes Leiterplattenkonzept schont Umwelt und Ressourcen; in: Elektronik Praxis Nr. 23 1996
- /90/ Krajnovich, D. J.; Vazquez, J. E.: Formation of „intrinsic“ surface defects during 248 nm photo-ablation of polyimide, J. Appl. Phys. 73(6), 1993
- /91/ Krautheim, T.B.; Pöhlau, F.; Lorenz, W.; Stampfer, S.: Handbuch für Anwender und Hersteller: Herstellungsverfahren, Gebrauchsanforderungen und Materialkennwerte Räumlicher Elektronischer Baugruppen 3D-MID; Hrsg.: Forschungsvereinigung Räumliche Elektronische Baugruppen 3D-MID e.V., Erlangen 1997
- /92/ Krempel-Hesse, J.; Kukla, R.; Adam, R.: Sputtering - A New Technique For Depositing Metals Onto Three Dimensional Plastic Parts; in: Proceedings 2. Int. Congress Molded Interconnect Devices, Erlangen 1996, Meisenbach Verlag, Bamberg 1996 S. 231 ff.
- /93/ Liebel, G.: Reinigung und Modifizierung von Kunststoffoberflächen, Stromlose Beschichtung von Metall, Kunststoff, Glas und Keramik, Berichtsband über das 10. Ulmer Gespräch am 5. Und 6. Mai 1988 in Neuulm (Donau), Eugen G. Leuze Verlag, Saulgau/Württ. 1988
- /94/ Lindahl, B.: The Wire Harness of the Future: Wire Harness Replacement Using Flexible Printed Circuitry in Automotive Applications; Seminarunterlagen Kabelkonfektion-Quo Vadis?, IPA, Stuttgart 1998
- /95/ Luchs, R.: Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT; Dissertation an der Universität Erlangen, Meisenbach Verlag, Bamberg 1998
- /96/ Maaßen, E.; Gleixner, J.: Connector-PCB for Anti-Blocking-Systems; in: Proceedings 3. Int. Congress Molded Interconnect Devices, Erlangen 1998, Meisenbach Verlag, Bamberg 1998, S. 57 ff.
- /97/ Maempel, L.: Umweltfreundlich kaschieren; kleben & dichten Adhäsion, Jahrgang 40, 3/96
- /98/ Markstein, H.-W.: Flexible circuit suppliers meet user demands; in: Electronic Packaging and Production, Band 35 (1995) Heft 7, Seite 47-48
- /99/ Mäschtig, K.: Dünnschichttechnologie - Allgemeine Grundlagen und Methoden der Dünnschicht-Technik zur Oberflächenvergütung, Syntex GmbH, Frankfurt/Main 1988
- /100/ Masing W.: Handbuch der Qualitätssicherung, Carl Hanser Verlag, München 1996
- /101/ Matt, I.: Spektrale Untersuchung eines durch Laser induzierten Plasmas; Fachhochschule Lübeck 1992

- /102/ Meerkamm H., Fruth W., Krumpiegl T.: Reibungsarme PVD-Verschleißschutzschichten für ungeschmierte Lagerkomponenten, Veröffentlichung; in: VDI-Berichte Nr. 1331, Düsseldorf 1997
- /103/ Meerkamm, H.; Fruth, W.; Krumpiegl, T.: Tribologische Optimierung von ungeschmierten Lagerkomponenten durch reibungsarme PVD-Verschleißschutzschichten; in: Tribologie-Fachtagung 1997 - Reibung, Schmierung und Verschleiß, Göttingen 1997
- /104/ Meier, D.; Renner, G.: Neue laserunterstützte Verfahren zur Herstellung flexibler Leiterplatten; Seminarunterlagen zum fowep Seminar „Innovative Fertigungsverfahren und -konzepte für elektronische Schaltungsträger; 26.02.1998
- /105/ Meier, D.: Die Additiv-Metallisierung nach dem AMEG-Prozeß - eine neue Variante zur Herstellung kleberfreier metallisierter flexibler Schaltungsträger; in: Tagungsband zu Galvanotechnik '93, 31. Jahrestagung der DGO 1993
- /106/ Merricks, D.: Use Of Electrodepositable Photoresist XP91147 On Phillips CFT Samples, Shipley Technical Memorandum, 3. June 1992
- /107/ Moran, P.: Ageing Studies on Three Dimensional Metallized PPS; in: Proceedings 2. International Congress Molded Interconnect Devices, Erlangen 1996, Meisenbach Verlag Bamberg, S. 207
- /108/ Mort, J.; Jansen, F.: Plasma Deposited Thin Films; CRC Press, Boca Raton 1986
- /109/ Müller, K.-P.: Praktische Oberflächentechnik, 2. Auflage, Vieweg Verlag, Braunschweig 1996
- /110/ Münstedt, H.: Hochtemperaturbeständige Folien für flexible Schaltungsträger und Komponenten in der Elektronikproduktion; in: Sonderforschungsbereich 356, Produktionssysteme in der Elektronikproduktion, Erlangen 1999, S. 159 ff.
- /111/ N.N.: ANSI/IPC-MF-150F, Metal Foil for Printed Wiring Applications; IPC Standard 1991, Lincolnwood, IL, USA
- /112/ N.N.: D907-70, American Society for Testing Materials (ASTM)
- /113/ N.N.: Datenblatt der Fa. CMC Klebetechnik
- /114/ N.N.: Datenblatt der Fa. Polytec
- /115/ N.N.: Datenblatt Klebstoff HTK Ultra-Bond 100, Fa. HTK, Hamburg
- /116/ N.N.: Der Große Brockhaus, Brockhaus Verlag, Kornwestheim 1996
- /117/ N.N.: Der Laser schreibt die Schaltung in das Gehäuse; in: VDI Nachrichten Nr.8, 26. Februar 1999, S. 16
- /118/ N.N.: Deutsche Normen, DIN 53 494, Prüfung von galvanisierten Kunststoffteilen, Bestimmung der Abzugskraft, Mai 1984

- /119/ N.N.: Deutsche Normen, DIN 53 504, Normstab S3
- /120/ N.N.: Deutsche Normen, DIN 66217, Koordinatenachsen und Bewegungsrichtungen für numerisch gesteuerte Arbeitsmaschinen, Dezember 1975
- /121/ N.N.: Deutsche Normen, DIN EN 53 1515, Gitterschnittprüfung, Entwurf Juli 1990
- /122/ N.N.: Deutsche Normen, DIN EN 582, Mai 1993
- /123/ N.N.: Deutsche Normen, DIN EN 60249
- /124/ N.N.: Deutsche Normen, DIN IEC 326
- /125/ N.N.: Deutsche Star, Katalog und Datenblätter Kugelbuchsenführungen, Schweinfurt
- /126/ N.N.: Engineer's Fact File, Primary Imaging Photoresists; in: Electronic Packaging & Production, July 1997/31
- /127/ N.N.: Electrodeposited Copper Foil NT-TO; Circuit Foil Data Sheet, Circuit Foil Luxembourg
- /128/ N.N.: Fabricating Flexible Circuits, in: Electronic Packaging and Production, Mai 1992
- /129/ N.N.: Festo, Pneumatik-Gesamtkatalog, Esslingen 26. Auflage
- /130/ N.N.: Firmenschrift Haver & Boecker; Haver-Metall-Gaze/ Stahlgewebe für den Siebdruck, 1997
- /131/ N.N.: Flexibel in der Nische; Leiterplatten; in: Elektronik Produktion München, Band 43 (1994), Heft 17, S. 47 ff.
- /132/ N.N.: Flexible Circuit Design Guide; Lenthor Engineering, Milpitas, USA, 1996
- /133/ N.N.: Galvanisiergerechtes Konstruieren, Galvanotechnik, 1999
- /134/ N.N.: Handbuch Klebstoffe 1996/1997, Industrieverband Klebstoffe e.V., Verlag Vieweg, Braunschweig 1996
- /135/ N.N.: <http://www.fbv.fh-frankfurt.sw/mhwww/KUT/21KENNWE.html>
- /136/ N.N.: Informationsblatt zum Kupferbad CP-78 Electroless Copper, Shipley GmbH
- /137/ N.N.: Informationsbroschüre 3-D MID e.V. Forschungsvereinigung Räumliche Baugruppen (3-D MID) e.V.
- /138/ N.N.: Internationale elektrotechnische Kommission, IEC 326
- /139/ N.N.: IPC-D-330, Section Seven Flexible Printed Circuit Design, IPC Standard June 1992, Lincolnwood, IL, USA

- /140/ N.N.: ISOSCOPE MP3-Cu Leiterplatten mit definierter Kupferschicht, Informationsblatt der Fa. Helmut Fischer GmbH & Co., 09/92
- /141/ N.N.: Kontinuierliche Herstellung elektronischer Schaltungen - Leiterplatten von der Rolle -, EPP Elektronik Produktion & Prüftechnik, Konradin Verlag Robert Kohlhammer GmbH März 1996, S. 16
- /142/ N.N.: Kunststoff-Metallisierung - Handbuch für Theorie und Praxis; Schriftenreihe Galvanotechnik und Oberflächenbehandlung; Eugen G. Leuze Verlag, Saulgau/Württ. 1991
- /143/ N.N.: Kunststoff-Metallisierung, Handbuch für Theorie und Praxis, Eugen Leuze Verlag, Saulgau 1991
- /144/ N.N.: Laboratorium für WZM und Betriebslehre der RWTH Aachen, Studie Beschichtung der gleit- und wälzlagerbeanspruchten Oberflächen in Wälzlagern und hydrodynamischen Gleitlagern, Aachen Juni 1989, S. 20 ff.
- /145/ N.N.: MIDIS-Datenbank; 3-D MID e.V. Forschungsvereinigung Räumliche Baugruppen (3-D MID) e.V.
- /146/ N.N.: Printed Circuit Board Molding System; in: Meiki News No. 134-E, Kitasaki-Cho, Japan
- /147/ N.N.: Prüfen dünner Schichten, VDI Verlag, Düsseldorf
- /148/ N.N.: Pyralux, DuPont Informationsbroschüre
- /149/ N.N.: Reelmount Technology, Philips Electronic Manufacturing Technology, Informationsblatt
- /150/ N.N.: Saechting Kunststoff-Taschenbuch, 26. Ausgabe, Carl Hanser Verlag, München 1995
- /151/ N.N.: Schriftenreihe Galvanotechnik und Oberflächenbehandlung: Kunststoff-Metallisierung - Handbuch für Theorie und Praxis, Eugen G. Leuze Verlag, Saulgau/Württ. 1991
- /152/ N.N.: Veränderung und Veredelung von Glasoberflächen, Hüttentechnische Vereinigung der deutschen Glasindustrie, HVD, Frankfurt, 1989
- /153/ N.N.: [www.bayern.de/LFU/luft/ku-braende/kunststoff2.htm](http://www.bayern.de/LFU/luft/ku-braende/kunststoff2.htm)
- /154/ Neumaier, P.; Staib, W.: Messen von Schichten auf unbestückten Leiterplatten; in: mo metalloberfläche Beschichten von Metall und Kunststoff, 11/93 47. Jahrgang, Carl Hanser Verlag, München 1993
- /155/ Olbrich, W.: Haftfeste Metallisierung von Polyimidfolien; in: Statusseminar Oberflächen- und Schichttechnologien, Mainz, 29.-31. Mai 1995, VDI Technologiezentrum Physikalische Technologien, Düsseldorf 1995, S. 163 ff.
- /156/ Orthmann, K., et al.: Kleben in der Elektronik, Expert Verlag, Berlin 1990

- /157/ Ostwald, R.: Metallisierung von Hochleistungspolymerwerkstoffen, InfoPhysTech Nr. 14/ Juli 1997, VDI Technologiezentrum Physikalische Technologien, Düsseldorf 1997
- /158/ Paatsch, M.: Metallisierung von Kunststoffen durch galvanotechnische und plasmatechnische Vorbehandlung; in: Wey, K. (fachl. Konzeption): Statusseminar Oberflächen und Schichttechnologien, Band 1, Würzburg 9. - 11.06.1997, VDI Technologiezentrum Physikalische Technologien, Düsseldorf 1997, S. 5 ff.
- /159/ Pochner, K.; Beil, S.; Horn, H.: Photochemische Vorbehandlung und Grundmetallisierung durch UV-Excimer-Bestrahlung; in: Statusseminar Oberflächen- und Schichttechnologien, Würzburg 9.-11.06.1997, VDI Technologiezentrum Physikalische Technologien, Düsseldorf 1997
- /160/ Prinz, E.: Plasmabehandlung von Polymeren vor der stromlosen Metallisierung; in: Stromlose Beschichtung von Metall, Kunststoff, Glas und Keramik, Berichtsband über das 10. Ulmer Gespräch am 5. Und 6. Mai 1988 in Neuulm (Donau), Eugen G. Leuze Verlag, Saugau/Württ. 1988
- /161/ Riedel, W.: Zur Galvanisierung von ABS-Pfropfpolymerisaten, in: Galvanotechnik Band 57, September 1966, Heft 9/1966, Seite 579 ff.
- /162/ Rinne H.: Statistische Methoden der Qualitätssicherung, Carl Hanser Verlag, München 1991
- /163/ Rödder, W.: Planungs- und Entscheidungstechniken; Vorlesungsskript der Fernuniversität Hagen, Hagen 10/97
- /164/ Römer, M.: Überblick über lötbare thermoplastische Kunststoffe für MID-Anwendungen; in: Proceedings 1. International Congress Molded Interconnect Devices, Erlangen 1994, Meisenbach Verlag München 1994
- /165/ Roth, A.: Kunststoffe mit Excimer-UV-Strahlung vorbehandeln; in: metalloberflächen mo 50 (1996), S. 258 ff.
- /166/ Roth, H.-K.; Baumann, R.; Bargon, J.; Schrödner, M.: Laser Induced Electrical Conductivity in Thin Layers of Poly(bisethylthioacetylene); in: Progr.Colloid PolymSci. 85 (1991), S. 157 ff.
- /167/ Roth, H.-K.; Eidner, K.; Roth, H.: Laser Recording of Circuit Structures from Conducting Polymers in Insulating Polymer Layers; in: Proceedings 1. Int. Congress Molded Interconnect Devices, Erlangen 1994, Meisenbach Verlag, Bamberg 1994 S. 211 ff.
- /168/ Schaaf, H.; Faller, H.; Zwick, U.: Dreidimensionale Leiterplatten; in: F&M Feinwerktechnik & Messtechnik 97, Carl Hanser Verlag München (1989) 5
- /169/ Schammler, G.; Springer, J.: Chemische, physikalische und mechanische Bildungscharakteristiken, in: Stromlose Beschichtung von Metall, Kunststoff, Glas und Keramik, Berichtsband über das 10. Ulmer Gespräch am 5. Und 6. Mai 1988 in Neuulm (Donau), Eugen G. Leuze Verlag, Saugau/Württ. 1988

- /170/ Schiller, S.; Heisig, U.: Bedampfungstechnik, Verfahren - Einrichtungen - Anwendungen; in: VEB, Technik Verlag, Berlin 1975
- /171/ Schrüfer, W.; Feldmann, K.; Beiting, G.: Erforschung strukturierter metallisierter Kunststoffe; in: Statusseminar Oberflächen und Schichttechnologien Band 2, Würzburg 9. - 11.06.1997, VDI Technologiezentrum Physikalische Technologien, Düsseldorf 1997, S. 323 ff.
- /172/ Schwab, H.: Elektrophoretische Abscheidung von Photoresisten - Eine Antwort auf die heutigen Anforderungen: Höhere Leiterzugdichte bei reduzierten Prozeßkosten; Galvanotechnik März und August 1993, Carl Hanser Verlag, München 1993
- /173/ Seraphim, D.P.; et al. (Editors): Principles of Electronic Packaging, McGraw-Hill Book Company, New York 1989
- /174/ Sigusch, R.: Verfahren zur Herstellung einer strukturierten Schicht auf einem Substrat; Patentschrift DE 2636351 C2, Deutsches Patentamt 1984
- /175/ Simon, H.; Thoma, M.: Angewandte Oberflächentechnik für metallische Werkstoffe, Carl Hauser Verlag, München 1989
- /176/ Simon, J.: Die steigende Bedeutung flexibler Schaltungsträger in der Mikroelektronik, in: VTE 3/94, Seite 136 ff.
- /177/ Srinivasan, R.V.: Ablative Photodecomposition of Films by Pulsed Far-Ultraviolet (193 nm) Laser Radiation Journal of Polymer Science: Polymer Chemistry Edition Vol. 2, 1984
- /178/ Staib, W.; Neumaier, P.: Schichtdicke, Legierungsanteile, Mikrohärt; in: Kontrolle, Heft 11/1991
- /179/ Stampfer, S.; Ehrenstein, G. W.: Properties of Hot Stamped Molded Interconnection Devices; in: Proceedings 2. Int. Congress Molded Interconnect Devices, Erlangen 1996, Meisenbach Verlag Bamberg 1996, S. 227 ff.
- /180/ Stampfer, S.; Hallschmid, N.; Ehrenstein, G. W.: Metallization of Plastics for MID-Applications; in: Proceedings 3. Int. Congress Molded Interconnect Devices, Erlangen 1998, Meisenbach Verlag, Bamberg 1996 S. 177 ff.
- /181/ Suhr, L. Meredith: MIDIA and the MID Industry; in: Proceedings 2. Int. Congress Molded Interconnect Devices, Erlangen 1996, Meisenbach Verlag, Bamberg 1996 S. 19 ff.
- /182/ Süllau A.: Laserdirektbelichtung eröffnet neue Perspektiven; in: productronic 12/97, S. 33 ff.
- /183/ Taylor, R. S., Leopold K. E., et alt.: J. Applied Physics Letters 64, 1988
- /184/ Timpe, H.-J.: Photopolymere - Prinzipien und Anwendungen; VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1988

- /185/ Tönshoff, H.K.; Bütje, R., et al.: Materialbearbeitung mit Excimer-Laser, Abtragende Bearbeitung thermisch empfindlicher Werkstoffe unter besonderer Berücksichtigung der Bauteilbeeinflussung, Abschlußbericht BMFT-Verbund 1992, S. 10
- /186/ Uhlmann, E.: Verfahren zur Herstellung von spritzgegossenen dreidimensionalen Leiterformkörpern, sogenannte 3-D MID, Patentnummer: EP 0784417 A2, Fela Holding AG
- /187/ Waibel, B.; Ganz, J.; Hesse, K.; Kühnle, A.: Herstellung feiner Leiterstrukturen mit Hilfe der laserunterstützten Beschichtung (LAD), DVS Berichte, Band 141, 1992
- /188/ Weber, A.: Chemical Vapour Deposition - Eine Übersicht; in: Spektrum der Wissenschaft, April 1996, S. 86 ff.
- /189/ Weber, A.: Plasmaunterstützte Vorbehandlung und Metallisierung von Kunststoffen; in: Wey, K. (fachl. Konzeption): Statusseminar Oberflächen und Schichttechnologien, Band 2, Würzburg 9. - 11.06.1997, VDI Technologiezentrum Physikalische Technologien, Düsseldorf 1997 S. 309 ff.
- /190/ Weckenmann A.: Grundlagen der Statistik, Umdruck zur Vorlesung Qualitätssicherung am Lehrstuhl für Qualitätsmanagement und Fertigungsmeßtechnik
- /191/ Wehner, M.: Werkstoffbearbeitung mit Excimer-Laserstrahlung, Dissertation an der Technischen Hochschule Aachen, 1991 Verlag der Augustinus-Buchhandlung, Aachen 1991
- /192/ Winghofer, R.: A „Green TV“ Performed in MID; in: Proceedings 3. Int. Congress Molded Interconnect Devices, Erlangen 1998, Meisenbach Verlag, Bamberg 1998 S. 93 ff.
- /193/ Winterott, G.: Chips verlangen High-Tech-Boards, in: VDI Nachrichten Nr. 28, 12. Juli 1996, S. 14.
- /194/ Wolf, G.D.: Flexible Printed Circuits - Based on a new technology (Baymetec); in: Productronica 97, 11 - 13 November, 1997, FAPS: Innovative Production of Electronic Systems, Documentation, S. 3 ff.
- /195/ Wolf, G.D.; Giesecke, H.: Neues Verfahren zur ganzflächigen und partiellen Metallisierung von Kunststoffen; in: Galvanotechnik, 7 (84), 1993
- /196/ Wu, S.: Polymer Interface and Adhesion, Marcel Dekker Inc., New York 1982
- /197/ Yates, E.: Electrodeposited Copper Foil for Printed Circuits; Foil Technology Development Corporation; Bordertown New Jersey, USA
- /198/ Zaderej, V.; Mettler, J.; Johnson, W.; Strickland, W.: Three dimensional plating or etching process and mask therefor, US-Patent 1991, USPS 4985116, Mint-Pac, USA

- /199/ Zahradnik, F.: Hochtemperatur-Thermoplaste, Aufbau - Eigenschaften - Anwendungen, VDI Verlag, Düsseldorf 1993
- /200/ Zahradnik, F.: Properties of Blends with Poly(arylene ether ketones) and their Applicability as Materials for Molded Interconnect Devices; in: Proceedings 2. International Congress Molded Interconnect Devices, Erlangen 1996, Meisenbach Verlag, Bamberg 1996, S. 175 ff.
- /201/ Ziegler, W.; Kleinschmidt, J.: Ein Excimerlaser strukturiert metallbedampfte Folien; in: F& M (Mikrotechnik) 101 (1993) 5, Carl Hanser Verlag, München 1993, S. 189



## Lebenslauf

Gunter Beitinger

geboren am 17.03.1968 in Neumarkt/i.d.Opf.

verheiratet mit Corina Saucedo-Beitinger, geb. Saucedo Nieto

- 1975 - 1977 Grundschule Neumarkt/i.d.Opf.
- 1977 - 1979 Grundschule Holzheim, Neumarkt/i.d.Opf.
- 1979 - 1984 Willibald-Gluck-Gymnasium Neumarkt/i.d.Opf.
- 1984 - 1989 Helene-Lange-Gymnasium Fürth
- 1989 - 1994 Studium der Fertigungstechnik an der  
Universität Erlangen-Nürnberg  
Abschluß 12/1994: Dipl.-Ing. (Univ.)
- 1992 - 1998 Betriebswirtschaftliches Zusatzstudium für Ingenieure an der  
Fernuniversität Hagen  
Abschluß 09/1998: Dipl.-Wirt. Ing. (Univ.)
- 1994 - 1999 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für  
Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik an der  
Universität Erlangen-Nürnberg.  
Leiter: Prof. Dr.-Ing. Klaus Feldmann



# Reihe Fertigungstechnik Erlangen

Band 1

Andreas Hemberger

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

208 Seiten, 107 Bilder. 1988. Kartoniert.

Band 2

Detlef Classe

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

194 Seiten, 70 Bilder. 1988. Kartoniert.

Band 3

Friedrich-Wilhelm Nolting

**Projektiertung von Montagesystemen**

201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tabelle. 1989.

Kartoniert.

Band 4

Karsten Schlüter

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

177 Seiten, 97 Bilder. 1989. Kartoniert.

Band 5

Shir-Kuan Lin

**Aufbau von Modellen zur Lageregelung von Industrierobotern**

168 Seiten, 46 Bilder. 1989. Kartoniert.

Band 6

Rudolf Nuss

**Untersuchungen zur Bearbeitungsqualität im Fertigungssystem**

**Laserstrahlschneiden**

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

Band 7

Wolfgang Scholz

**Modell zur datenbankgestützten Planung automatisierter**

**Montageanlagen**

194 Seiten, 89 Bilder. 1989. Kartoniert.

Band 8

Hans-Jürgen Wißmeier

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

**Fließpreßmatrizen**

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

Band 9

Rainer Eisele

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

183 Seiten, 86 Bilder. 1990. Kartoniert.

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

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

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

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

Band 14  
Stephan Biermann  
**Untersuchungen zur Anlagen- und Prozeßdiagnostik für das Schneiden mit CO<sub>2</sub>-Hochleistungslasern**  
VIII + 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tabellen. 1991. Kartoniert.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Band 26  
Roland Müller  
**CO<sub>2</sub>-Laserstrahlschneiden von kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen**  
141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tabellen. 1992. Kartoniert.

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

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

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

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

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

Band 32

Brigitte Bärmreuther

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

Band 33

Joachim Hutfless

**Laserstrahlregelung und Optikiagnostik in der Strahlführung  
einer CO<sub>2</sub>-Hochleistungslaseranlage**  
175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tabellen. 1993. Kartoniert.

Band 34

Uwe Günzel

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

Band 35

Bertram Ehmann

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

Band 36

Harald Kolléra

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

Band 37

Stephanie Abels

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

Band 38

Robert Schmidt-Hebbel

**Laserstrahlbohren durchflußbestimmender  
Durchgangslöcher**  
145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tabellen. 1993. Kartoniert.

Band 39

Norbert Lutz

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

Band 40

Konrad Grampp

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

Band 41

Martin Koch

**Wissensbasierte Unterstützung der Angebotsbearbeitung  
in der Investitionsgüterindustrie**  
169 Seiten, 68 Bilder. 1995. Kartoniert.

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

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

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

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

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

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

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

Band 49  
Wolfgang Greska  
**Wissensbasierte Analyse und Klassifizierung von Blechteilen**  
144 Seiten, 96 Bilder. 1995. Kartonierte.

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

Band 51  
Franz-Josef Zeller  
**Sensorplanung und schnelle Sensorregelung für Industrieroboter**  
190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tabellen. 1995. Kartonierte.

Band 52  
Michael Solvie  
**Zeitbehandlung und Multimedia-Unterstützung in Feldkommunikationssystemen**  
200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tabellen. 1996. Kartonierte.

Band 53

Robert Hopperdietzel

**Reengineering in der Elektro- und Elektronikindustrie**

180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tabelle. 1996. Kartoniert.

Band 54

Thomas Rebhan

**Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung mit Excimerlasern –  
Systemkomponenten und Verfahrensoptimierungen**

148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tabellen. 1996. Kartoniert.

Band 55

Henning Hanebuth

**Laserstrahlhartlöten mit Zweistrahltechnik**

157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tabellen. 1996. Kartoniert.

Band 56

Uwe Schönherr

**Steuerung und Sensordatenintegration für flexible Fertigungszellen  
mit kooperierenden Robotern**

188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tabellen. 1996. Kartoniert.

Band 57

Stefan Holzer

**Berührungslose Formgebung mit Laserstrahlung**

162 Seiten, 69 Bilder, 11 Tabellen. 1996. Kartoniert.

Band 58

Markus Schultz

**Fertigungsqualität beim 3D-Laserstrahlschweißen von Blechformteilen**

165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Band 59

Thomas Krebs

**Integration elektromechanischer CA-Anwendungen über einem STEP-  
Produktmodell**

198 Seiten, 58 Bilder, 8 Tabellen. 1996. Kartoniert.

Band 60

Jürgen Sturm

**Prozeßintegrierte Qualitätssicherung  
in der Elektronikproduktion**

167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Band 61

Andreas Brand

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

182 Seiten, 100 Bilder. 1997. Kartoniert

Band 62

Michael Kauf

**Regelung der Laserstrahlleistung und der Fokusparameter einer  
CO<sub>2</sub>-Hochleistungslaseranlage**

140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tabellen. 1997. Kartoniert

Band 63

Peter Steinwasser

**Modulares Informationsmanagement in der integrierten  
Produkt- und Prozeßplanung**

190 Seiten, 87 Bilder. 1997. Kartoniert.

Band 64  
Georg Liedl  
**Integriertes Automatisierungskonzept für den flexiblen Materialfluß  
in der Elektronikproduktion**  
196 Seiten, 96 Bilder, 3 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Band 65  
Andreas Otto  
**Transiente Prozesse beim Laserstrahlschweißen**  
132 Seiten, 62 Bilder, 1 Tabelle. 1997. Kartoniert

Band 66  
Wolfgang Blöchl  
**Erweiterte Informationsbereitstellung an offenen CNC–Steuerungen  
zur Prozeß– und Programmoptimierung**  
168 Seiten, 96 Bilder. 1997. Kartoniert.

Band 67  
Klaus–Uwe Wolf  
**Verbesserte Prozeßführung und Prozeßplanung zur Leistungs– und  
Qualitätssteigerung beim Spulenwickeln.**  
186 Seiten, 125 Bilder. 1997. Kartoniert.

Band 68  
Frank Backes  
**Technologieorientierte Bahnplanung für die 3D–Laserstrahlbearbeitung**  
138 Seiten, 71 Bilder, 2 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Band 69  
Jürgen Kraus  
**Laserstrahlumformen von Profilen**  
137 Seiten, 72 Bilder, 8 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Band 70  
Norbert Neubauer  
**Adaptive Strahlführungen für CO<sub>2</sub>–Laseranlagen**  
120 Seiten, 50 Bilder, 3 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Band 71  
Michael Steber  
**Prozeßoptimierter Betrieb flexibler Schraubstationen  
in der automatisierten Montage**  
168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Band 72  
Pfeistorf, Markus  
**Funktionale 3D–Oberflächenkenngrößen in der Umformtechnik**  
162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Band 73  
Volker Franke  
**Integrierte Planung und Konstruktion von Werkzeugen  
für die Biegebearbeitung**  
143 Seiten, 81 Bilder. 1998. Kartoniert.

Band 74  
Herbert Scheller  
**Automatisierte Demontagesysteme und recyclinggerechte  
Produktgestaltung elektronischer Baugruppen**  
184 Seiten, 104 Bilder, 17 Tabellen. 1998. Kartoniert.

Band 75

Arthur Meißner

**Kaltmassivumformung metallischer Kleinstteile  
– Werkstoffverhalten, Wirkflächenreibung, Prozeßauslegung –**  
164 Seiten, 92 Bilder, 14 Tabellen. 1998. Kartonierte.

Band 76

Mathias Glasmacher

**Prozeß- und Systemtechnik zum Laserstrahl-Mikroschweißen**  
184 Seiten, 104 Bilder, 12 Tabellen. 1998. Kartonierte.

Band 77

Michael Schwind

**Zerstörungsfreie Ermittlung mechanischer Eigenschaften von  
Feinblechen mit dem Wirbelstromverfahren**  
124 Seiten, 68 Bilder, 8 Tabellen. 1998. Kartonierte.

Band 78

Manfred Gerhard

**Qualitätssteigerung in der Elektronikproduktion durch Optimierung  
der Prozeßführung beim Löten komplexer Baugruppen**  
179 Seiten, 113 Bilder, 7 Tabellen. 1998. Kartonierte.

Band 79

Elke Rauh

**Methodische Einbindung der Simulation in die betrieblichen Planungs-  
und Entscheidungsabläufe**  
192 Seiten, 114 Bilder, 4 Tabellen. 1998. Kartonierte.

Band 80

Niederkorn Sorin

**Meßeinrichtung zur Untersuchung der Wirkflächenreibung bei  
umformtechnischen Prozessen**  
99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tabellen. 1998. Kartonierte.

Band 81

Stefan Schubert

**Regelung der Fokusslage beim Schweißen mit CO<sub>2</sub>-Hochleistungslasern  
unter Einsatz von adaptiven Optiken**  
140 Seiten, 64 Bilder, 3 Tabellen. 1998. Kartonierte.

Band 82

Armando Walter Colombo

**Development and Implementation of Hierarchical Control Structures  
of Flexible Production System Using High-Level Petri Nets**  
216 Seiten, 86 Bilder. 1998. Kartonierte.

Band 83

Otto Meedt

**Effizienzsteigerung bei Demontage und Recycling durch flexible  
Demontagetechnologien und optimierte Produktgestaltung**  
186 Seiten, 103 Bilder. 1998. Kartonierte.

Band 84

Knuth Götz

**Modelle und effiziente Modellbildung zur Qualitätssicherung  
in der Elektronikproduktion**  
212 Seiten, 129 Bilder, 24 Tabellen. 1998. Kartonierte.

Band 85

Ralf Luchs

**Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe zur zuverlässigen Kontaktierung  
elektronischer Bauelemente in der SMT**  
176 Seiten, 126 Bilder, 30 Tabellen. 1998. Kartonierte.

Band 86  
Frank Pöhlau  
**Entscheidungsgrundlagen zur Einführung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)**  
144 Seiten, 99 Bilder. 1999. Kartoniert.

Band 87  
Roland Kals  
**Fundamentals of the miniaturization of sheet metal working processes**  
128 Seiten, 58 Bilder, 11 Tabellen. 1999. Kartoniert.

Band 88  
Gerhard Luhn  
**Implizites Wissen und technisches Handeln am Beispiel der Elektronikproduktion.**  
253 Seiten, 61 Bilder, 1 Tabelle. 1999. Kartoniert.

Band 89  
Axel Sprenger  
**Adaptives Streckbiegen von Aluminium-Strangpreßprofilen**  
114 Seiten, 63 Bilder, 4 Tabellen. 1999. Kartoniert.

Band 90  
Hans-Jörg Pucher  
**Untersuchungen zur Prozeßfolge Umformen, Bestücken und Laserstrahllöten von Mikrokontakten**  
158 Seiten, 69 Bilder, 9 Tabellen. 1999. Kartoniert.

Band 91  
Horst Arnet  
**Profilbiegen mit kinematischer Gestalterzeugung**  
128 Seiten, 67 Bilder, 7 Tabellen. 1999. Kartoniert.

Band 92  
Doris Schubart  
**Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung beim Abtragen mit CO<sub>2</sub>-Laserstrahlung**  
133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tabellen. 1999. Kartoniert.

Band 93  
Adrianus L. P. Coremans  
**Laserstrahlsintern von Metallpulver – Prozeßmodellierung, Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahlgesinterter Metallkörper**  
184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tabellen. 1999. Kartoniert.

Band 94  
Hans-Martin Biehler  
**Optimierungskonzepte für Qualitätsdatenverarbeitung und Informationsbereitstellung in der Elektronikfertigung**  
199 Seiten, 105 Bilder. 1999. Kartoniert.

Band 95  
Wolfgang Becker  
**Oberflächenausbildung und tribologische Eigenschaften Excimerlaserstrahlbearbeiteter Hochleistungskeramiken**  
175 Seiten, 71 Bilder, 3 Tabellen. 1999. Kartoniert.

Band 96  
Philipp Hein  
**Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren: Modellierung, Prozeßauslegung und Prozeßführung**  
129 Seiten, 57 Bilder, 7 Tabellen. 1999. Kartoniert.

Band 97

Gunter Beitinger

**Herstellungs- und Prüfverfahren für  
thermoplastische Schaltungsträger**

176 Seiten, 92 Bilder, 20 Tabellen. 1999. Kartoniert.