

FAU Studien aus dem Maschinenbau 375

Timo Kordaß

Lasergestütztes Verfahren zur selektiven Metallisierung von epoxidharzbasierten Duromeren zur Steigerung der Integrationsdichte für dreidimensionale mechatronische Package-Baugruppen



Kordaß, Timo

Lasergestütztes Verfahren zur selektiven Metallisierung von epoxidharzbasierten Duromeren zur Steigerung der Integrationsdichte für dreidimensionale mechatronische Package-Baugruppen

FAU Studien aus dem Maschinenbau

Band 375

Herausgeber der Reihe: Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke Prof. Dr.-Ing. Nico Hanenkamp Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Hausotte Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack Timo Kordaß

Lasergestütztes Verfahren zur selektiven Metallisierung von epoxidharzbasierten Duromeren zur Steigerung der Integrationsdichte für dreidimensionale mechatronische Package-Baugruppen

Dissertation aus dem Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktssystematik (FAPS) Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Erlangen FAU University Press 2021 Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek: Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Bitte zitieren als Kordaß, Timo. 2021. Lasergestütztes Verfahren zur selektiven Metallisierung von epoxidharzbasierten Duromeren zur Steigerung der Integrationsdichte für dreidimensionale mechatronische Package-Baugruppen. FAU Studien aus dem Maschinenbau Band 375. Erlangen: FAU University Press. DOI: 10.25593/ 978-3-96147-444-8

Das Werk, einschließlich seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt. Die Rechte an allen Inhalten liegen bei ihren jeweiligen Autoren. Sie sind nutzbar unter der Creative-Commons-Lizenz BY-NC.

Der vollständige Inhalt des Buchs ist als PDF über den OPUS-Server der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg abrufbar: https://opus4.kobv.de/opus4-fau/home

Verlag und Auslieferung: FAU University Press, Universitätsstraße 4, 91054 Erlangen

Druck: docupoint GmbH

ISBN: 978-3-96147-443-1 (Druckausgabe) eISBN: 978-3-96147-444-8 (Online-Ausgabe) ISSN: 2625-9974 DOI: 10.25593/978-3-96147-444-8 Lasergestütztes Verfahren mit selektiver Metallisierung von epoxidharzbasierten Duromeren zur Steigerung der Integrationsdichte für dreidimensionale, mechatronische Package-Baugruppen

> Der Technischen Fakultät der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

zur Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

> vorgelegt von Timo Dirk Marcel Kordaß aus Köngen

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

Tag der mündlichen Prüfung:

23. Oktober 2020

Vorsitzender des Promotionsorgans:

Prof. Dr.-Ing. habil. Andreas Paul Fröba Universität Erlangen-Nürnberg

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke Universität Erlangen-Nürnberg

Prof. Dr.-Ing. André Zimmermann Universität Stuttgart

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS) an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Sie beruht neben der Forschungsarbeit auf Erfahrungen meiner Industrietätigkeit aus der Entwicklung mechatronischer Serienanwendungen in der Automobiltechnik, durch die ich entscheidende Ansätze zur Forschung gewinnen konnte.

An dieser Stelle möchte ich den folgenden Personen, die zur Entstehung dieser Arbeit mit beigetragen haben; meinen Dank aussprechen:

- Herrn Professor Dr.-Ing. Jörg Franke danke ich für die Chance und das Vertrauen als wissenschaftlicher Mitarbeiter des Lehrstuhls meinem Forschungsinteresse für mechatronische Systeme nachgehen zu können. Durch die Schaffung großer Freiräume ermöglichte er mir darüber hinaus eine Vielzahl spannender Projekte und Themen zu bearbeiten, die mich über die Jahre der Promotion nachhaltig geprägt haben.
- Herrn Professor Dr.-Ing. André Zimmermann danke ich für die Übernahme des Zweitgutachtens. Herrn Professor Dr. Nahum Travitzky danke ich für die Teilnahme an meiner Verteidigung als fachfremder Prüfer.
- Bei allen Mitarbeitern des Lehrstuhl FAPS bedanke ich mich f
 ür die großartige Zeit der Zusammenarbeit.
- Mein besonderer Dank geht an Robert Süß-Wolf, der mich über viele Jahre begleitet hat und mich schon von der Idee zur Promotion an immer unterstützte.
- Großen Dank möchte ich Li Wang und Ralf Merkl aussprechen, die über viele Jahre mit unzähligen fachlichen und privaten Diskussionen einen wichtigen Beitrag zur Fertigstellung dieser Arbeit beigetragen haben.
- Yanyu Qiu danke ich, da sie mir gezeigt hat wie man mit Ruhe, Kraft und Ausgeglichenheit große Ziele erreichen kann, wenn man an den eigenen Erfolg glaubt.

- Ich bedanke mich bei meiner Familie: Christiana und Naomi, mich während des Verfassens dieser Arbeit immer wieder mit Verständnis und Motivation unterstützt zu haben.
- Zu guter Letzt möchte ich mich bei meinen beiden Eltern bedanken, die in mir die Begeisterung für Bildung und von klein auf das Interesse für Technik und Naturwissenschaften geweckt haben.

Nürnberg, im Oktober 2020 Timo Kordaß "Wir irren uns empor" Prof. Dr. Dr. Gerhard Vollmer

Inhaltsverzeichnis

Bildy	verz	eichn	isxi
Tabe	ellen	verze	ichnisxv
Abki	irzu	ngsve	rzeichnisxvii
1	Ein	leitur	ו <u>ק</u> 1
	1.1	Motiv	vation und Hintergrund1
	1.2	Zielse	etzung
	1.3	Vorge	hensweise und Aufbau der Arbeit4
2	2 Hochintegrierte mechatronische Systeme - Technologien und Trends für die Zukunft		egrierte mechatronische Systeme - Technologien Ids für die Zukunft7
	2.1	Branc Syster	henspezifische Trends für das Packaging mechatronischer me
	2.2	Trenc	lentwicklungen am Beispiel der Automobilelektronik
		2.2.1	Mechatronische Anwendungen in Automobilen 20
		2.2.2	Anforderungen an die Zuverlässigkeit in Automobilen22
	2.3	Hoch – Ein	integrierte dreidimensionale Packages mit MEMS-Sensoren Anwendungsfeld für die 3D-MID-Technik
		2.3.1	Anwendungs- und Einsatzbereiche24
		2.3.2	Steigerung der Integrationsdichte anhand von Funktionsintegration26
	2.4	Zusar Schal	nmenfassung der Potentiale für miniaturisierte 3D-MID- tungsträger
3	Me Sch	tallisi altun	erung dreidimensionaler mechatronischer gsträger
	3.1	Die a	ktuell verfügbaren Verfahren im technologischen Vergleich 34
	3.2	Laser elekti	gestützte MID-Verfahren mit chemisch-reduktiver und rochemischer Metallisierung
		3.2.1	Verfahren der außenstromlosen Abscheidung von Metallschichten40
		3.2.2	Die außenstromlose Kupferabscheidung45
		3.2.3	Prozesstechnik der außenstromlosen Kupferabscheidung 47
		3.2.4	Die elektrochemische Metallabscheidung49

		3.2.5	Verfahren der elektrochemischen Kupferabscheidung 50
		3.2.6	Weitere additive Beschichtungen zur Endveredelung53
		3.2.7	Selektive Aktivierungs- und Metallisierungsmethoden
	3.3	Zusar	nmenfassung und Handlungsbedarf57
4	Voi me Anv	runte chatr wend	rsuchungen über spritzgegossene onische Schaltungsträger für Fine-Pitch ungen zur Erstellung von Packaging Systemen61
	4.1	Anfor	rderungen an MIDs mit Fine-Pitch-Funktionsschichten
		4.1.1	Fehlerbilder bei mechatronisch integrierten Baugruppen 63
		4.1.2	Morphologische Eigenschaften der Funktionsschichten64
		4.1.3	Mechanische Voruntersuchungen an den metallischen Funktionsschichten68
	4.2	Chara	akterisierung und Auswahl geeigneter Polymerwerkstoffe72
		4.2.1	Untersuchung des Absorptionsverhaltens der Werkstoffe 74
		4.2.2	Thermomechanische Spannungen in den Multimaterialverbunden76
		4.2.3	Epoxidharzbasierte Duromere als alternative Substratmaterialien83
		4.2.4	Die Verarbeitungsverfahren von epoxidharzbasierten Duromeren
	4.3	Zusar	nmenfassung der Voruntersuchungen89
5	Las Sul	erbea ostrat	rbeitung von duroplastischen materialien zur selektiven Metallisierung93
	5.1	Grun addit	dlagen der Laserbearbeitung zur Materialablation für die ive Metallisierung
	5.2	Einge	setzte Laseranlagen zur Oberflächenbearbeitung100
	5.3	Entw Aktiv	icklung der optimalen Laserparameter zur selektiven ierung von epoxidharzbasierten Duromeren
		5.3.1	Parameterstudie auf ausgewählten duroplastischen Testsubstraten103
		5.3.2	Laserstrukturierung für Fine-Pitch-Leiterbahnen104
		5.3.3	Modell der Oberflächenrauheit in Abhängigkeit der Laserparameter109
		5.3.4	Zielkonflikte zwischen der Rauheit, der Haftfestigkeit und der Oberflächenqualität111

		5.3.5	Laserparameter in Abhängigkeit der abgeschiedenen Kupferschichtdicke
	5.4	Laser einge	bohren als Verfahren zur elektrischen Anbindung betteter Systeme in duroplastischen Substratmaterialien120
6	Sel Fin	ektive e-Pito	e, lasergestützte Palladium-aktivierung für ein h-Leiterbahnlayout im Tauchbadprozess125
	6.1	Forsc Ober (SIPA	hungshypothese zur selektiven flächenkonditionierung mit ionogener Palladiumlösung Verfahren)
	6.2	Pallac	lium als Katalysator zur Aktivierung127
	6.3	Ansät	ze zur selektiven Palladiumaktivierung129
	6.4	Defin	ition chemischer Lösungen130
	6.5	Prinz Verfa	ip der komplexen Palladiumaktivierung (kolloidales hren)131
		6.5.1	Palladiumaktivator mit kolloidalem Pd-Sn-Komplex nach LISA
		6.5.2	Metallisierung von Duroplasten mit kolloidaler Palladiumbekeimung134
	6.6	Verfa	hren mit ionogener Palladiumaktivierung136
		6.6.1	Prozess der ionogenen Palladiumbekeimung
		6.6.2	Versuchsplanung zur Bestimmung der Badzusammensetzung des ionogenen Palladiumaktivators140
		6.6.3	Der ionogene Palladiumaktivator (SIPA-Verfahren) in der Anwendung144
7	Un sele ein	tersuo ektive em Ta	chung der Benetzungsmechanismen zur en Bekeimung von duroplastischen Substraten in auchbadverfahren149
	7.1	Adhä	sion durch mechanische Verankerung151
	7.2	Theor	rie der Benetzungsfähigkeit153
	7.3	Gonio (Kont	ometrische Messung der Benetzung von Polymersubstraten taktwinkelmessung)155
	7.4	Unter	rsuchung der Haftfestigkeit160
	7·5	Zusar Verfa	nmenfassung der Wirkzusammenhänge des SIPA- hrens162

Inhaltsverzeichnis

8	Zuverlässigkeitsuntersuchungen165	
	8.1	Das Insitu-Löttestverfahren zur Detektierung von Mikrorissen in Leiterbahnen
	8.2	Zuverlässigkeit im Umwelttest durch Temperaturschockprüfung 167
9	Zus	ammenfassung und Ausblick173
10	Summary and Outlook 177	
Literaturverzeichnis		
Anhang		

Bildverzeichnis

Bild 1:	Kondratieff-Zyklen; "Irrational Exuberance", Princeton-University [3]	7
Bild 2:	Treiber und Hauptelemente des Internet of Things [9]	8
Bild 3:	Wachstum der Elektronikindustrie nach Sparten [1]	11
Bild 4:	Schwerpunkte der Elektronikbranchen auf dem Weltmarkt [13]	14
Bild 5:	Systemebenen verschiedener MID-Verfahren [1] [8]	16
Bild 6:	Entwicklung Leiterbahndimensionen aus iNEMI Roadmap 2015 [1]	17
Bild 7:	Globale Entwicklung des assistierten Fahrens bis 2050 [15]	18
Bild 8:	Marktentwicklung nach Sensortypen und ihren Anwendungsgebieten [28]	19
Bild 9:	Segmentunterteilung der Automobilelektronik; Stand 2015 [1] [31] [S1]	21
Bild 10:	Thermischer Ausdehnungskoeffizient ausgewählter Materialien	24
Bild 11:	Markt- und Technologiestudie der 3D-MID e.V. [17]	26
Bild 12:	Potentiale von spritzgegossenen MID-Multipackage-Systemen [42]	28
Bild 13:	Integrationsverdichtung durch mechatronisches Multilevelpackage	29
Bild 14:	LDS°-Prozesskette des 3D-MID Demonstrators "MIDster" (3D-MID e.V.)	33
Bild 15:	Das SIPA-Verfahren neben den lasergestützten MID-Verfahren [50]	34
Bild 16:	Entwicklung der Leiterbahnbreiten [8] [12] [54] [55]	38
Bild 17:	Chemisch-reduktive Abscheidung einer Metallschicht [63]	42
Bild 18:	Chemisch-reduktiv abscheidbare Metalle im Periodensystem [61] [64] [63]	44
Bild 19:	Aufbau einer Gleichstrom Elektrolysezelle	49
Bild20:	Vergleich elektrochemisch und chemisch-reduktive Metallisierung [63]	51
Bild 21:	Die geometrieabhängige Verteilung der Stromdichte [63]	52
Bild 22:	Schliffbild chemisch-reduktiver MID-Schichtaufbau [8]	54
Bild 23:	Blockdiagramm der lasergestützten MID-Metallisierung	56
Bild 24:	Handlungsbedarf unterteilt in Anforderungen und Befähiger	59
Bild 25:	Anforderungen an die metallischen Funktionsschichten [42]	63
Bild 26:	Darstellung der Herausforderungen bei 3D-MIDs [8] [80]	64
Bild 27:	Gitterbaufehler chemisch-reduktiv und elektrogalvanisch [63]	66
Bild 28:	REM-Aufnahmen chemisch Kupfer [Bildquelle: FAU Lehrstuhl WW3]	67
Bild 29:	REM-Aufnahme galvanisch Kupfer [FAU-Lehrstuhl WW3]	68
Bild 30:	Zugversuche am FAU-Lehrstuhl für Polymerwerkstoffe (LSP)	70
Bild 31:	Zugversuche chemische und galvanische Kupferschichten [64]	71
Bild 32:	Auswahlkriterien für technische Polymerwerkstoffe [42]	72
Bild 33:	Zweidimensionale Projektion der Polymerhauptgruppen [86] [87]	73
Bild 34:	Elastizitätsmodul-Temperatur-Kurve verschiedener Polymere [87]	74
Bild 35:	Strahlungsverhalten in einem Medium	75
Bild 36:	Diagramm der Absorptionsspektroskopie [FAU-Lehrstuhl LPT]	76
Bild 37:	Thermische Ausdehnung MID-Multimaterialverbund [42] [86] [96] [97]	78
Bild 38:	Ausdehnung und Wasseraufnahme [8] [101] [102] [103] [104] [105] [106]	80
Bild 39:	Längenausdehnungen im Multimaterialverbund	82
Bild 40:	Spritzgießen, Spritzpressen und Fließpressen im Vergleich [109]	88
Bild 41:	Zusammenfassung über Lösungsansätze und Vorteile	91
Bild 42:	Übersicht der selektiven lasergestützten Metallisierungsverfahren	94

Bild 43:	Der minimale Taillenradius W ₀ im Gaußstrahl [118] [119]	97
Bild 44:	Schaubild gepulster Laser (links); Laserparameter (rechts) [89] [120]	98
Bild 45:	Energiebilanz Wechselwirkungszone (links); Wirkleistung (rechts) [89]	99
Bild 46:	Leistungsdiagramme des ND: YAG Laser (Fusion 1100)	101
Bild 47:	DOE-Studie für Laserparameter (Mitte) und Metallisierung (rechts)	104
Bild 48:	Strukturierungsprofil thermoplastischer Polymerwerkstoffe [122] [122]	105
Bild 49:	Tiefenprofil und Vermessung eines Leiterbahnprofils (EP3581T-1)	105
Bild 50:	Ausprägung der mikroporösen Struktur durch die Laserbearbeitung	107
Bild 51:	Materialabhängige Charakteristika der Leiterbahnprofile im Querschnitt	108
Bild 52:	Randgeometrie nach Laserprozess und Metallisierung [Lehrstuhl WW3]	109
Bild 53	Messung des Oberflächenrauheit [126]	110
Bild 54:	Zielkonflikt zwischen Rauheit, Haftfestigkeit und Oberflächenqualität	111
Bild 55:	Aufnahmen des laserstrukturierten Substrates Typ C [S4]	112
Bild 56:	Modell Oberflächenrauheit (links); Rauheit nach Metallisierung (rechts)	113
Bild 57:	Laserscanmikroskop (links) Röntgenfluoreszenzmessung (rechts)	115
Bild 58:	Schichtdickenmessung eines Querschliffs im Lichtmikroskop	116
Bild 59:	Fotos der fünf Metallisierungsproben zur Schichtdickenmessung	117
Bild 60:	Flächenmodell der Wirkzusammenhänge	119
Bild 61:	Schematische Darstellung der vier Laserbohrstrategien [2][S1]	120
Bild 62:	Schliffbild: Lasergebohrte Vias eines eingebetteten MEMS-Chips [S1]	123
Bild 63:	Wirkungszusammenhänge der Prozesskette des SIPA-Verfahrens	127
Bild 64:	Differenzen der Standardpotentiale der eingesetzten Metallschichten [65]	128
Bild 65:	Einteilung der Lösungen nach Teilchengröße des gelösten Stoffes [65]	130
Bild 66:	Darstellung eines Palladium-Kolloids umhüllt von Zinn(II) [64] [137][S3]	132
Bild 67:	Palladiumaktivator nach LISA-Verfahren [49]	133
Bild 68:	Schematische Prozessdarstellung der kolloidalen Palladiumaktivierung	134
Bild 69:	Metallisierte Proben mit kolloidaler Zinn-Palladiumbekeimung [S4]	136
Bild 70:	(links) Reduktion von Palladium(II); (rechts) Reduktion auf Substrat [S3]	138
Bild 71:	Ansatz des ionogenen Palladiumaktivators (SIPA-Verfahren)	139
Bild 72:	Schematische Darstellung des ionogenen Aktivierungsprozesses	140
Bild 73:	Auswertung des DOEs zur Prozessentwicklung des Palladiumaktivators [S3]	143
Bild 74:	Wachstumsverhalten der Kupfermetallisierung mit SIPA-Verfahren	145
Bild 75:	Testträger mit Leiterbahnlayout auf dem Substrat B (NU505)	147
Bild 76:	Testträger mit Leiterbahnlayout auf dem Material C (EP3581T1)	148
Bild 77:	Adhäsion und grenzflächenenergetische Wechselwirkung [63] [144][S3]	149
Bild 78:	Übersicht und Gliederung der wichtigsten Adhäsionsmodelle [144]	150
Bild 79:	Mechanischen Verankerung zwischen Adhäsiv und Adhärens [146]	152
Bild 80:	Benetzung durch liegenden Tropfen auf fester Oberfläche [63] [61]	154
Bild 81:	Klassifizierung des Kontaktwinkels	155
Bild 82:	Benetzungsfähigkeit (links und Mitte) Testkörpers Parameterstudie (rechts)	156
Bild 83:	Messung der Benetzung des Materials C (EP3581T-1) über 10 Minuten [S9]	157
Bild 84:	Statistische Korrelationen zwischen ausgewählten Messreihen	159
Bild 85:	Korrelation Haftfestigkeitsuntersuchung	161
Bild 86:	Haftfestigkeitsmesswerte Duroplast (SIPA); Thermoplasten (LDS®) [19][S11]	162
Bild 87:	Wirkmechanismen der Laserstrukturierung	163

Bild 88:	Zusammenfassung der Wirkungskette	164
Bild 89:	Dampfphasen Löttest	166
Bild 90:	Proben der Temperaturschockprüfung nach DIN EN 60068-2-14	168
Bild 91:	Ausschnitt aus der Temperaturwechselprüfung	169
Bild 92:	Messung der Eingangs- und Ausgangswiderstände	170

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Marktsegmente der Elektronikindustrie [1]	11
Tabelle 2:	Marktsegmente und Einsatzbedingungen [1] [6] [7]	13
Tabelle 3:	Die maßgeblichen Entwicklungstreiber der Elektronikindustrie [1]	15
Tabelle 4:	Anwendungsgebiete von MEMS-Sensoren [1]	25
Tabelle 5:	3D-MID-Verfahren und ihre Eigenschaften im Vergleich [8] [52]	35
Tabelle 6:	3D-MID-Serienanwendungen aus dem Automobilbereich [17]	37
Tabelle 7:	Die lasergestützten 3D-MID-Verfahren im Vergleich	39
Tabelle 8:	Die für das LDS°-Verfahren aktuell verfügbaren Polymertypen [60]	40
Tabelle 9:	Eigenschaften der abzuscheidenden Metalle [61] [70]	45
Tabelle 10:	Komponenten des Kupferelektrolyten [64]	48
Tabelle 11:	Prozessparameter des Kupferelektrolyten [72]	48
Tabelle 12:	Prozessparameter des galvanischen Kupferelektrolyten [73]	53
Tabelle 13:	Charakterisierung der Metallisierungsschicht und des Substrats	62
Tabelle 14:	Eigenschaften der MID-Funktionsschichten [52] [64] [63] [80] [81] [82]	65
Tabelle 15:	Gitterbaufehler [63]	66
Tabelle 16:	Duromere und ihre Eigenschaften [8] [85] [95] [102]	86
Tabelle 17:	Eigenschaften der Materialien [101] [102] [110] [111] [112] [113]	87
Tabelle 18:	Die eingesetzten Laseranlagen zur Strukturierung [120]	101
Tabelle 19:	Statistische Versuchsplanung (DOE) der Laserparameter	103
Tabelle 20:	Schichtdickenmessung (rot: Schichtdicke min.; grün Schichtdicke max.)	117
Tabelle 21:	Statistischer Versuchsplan für Palladiumaktivierungsprozess [S3][S7]	142
Tabelle 22:	Fine-Pitch-Leiterbahnen mit dem SIPA-Verfahren	146
Tabelle 23:	Zusammenfassung über Rauheit, Benetzung und Schichtdicke [S9]	158
Tabelle 24:	Temperaturschockprüfung nach DIN EN 60068-2-14	169

Abkürzungsverzeichnis

3D-MID	Mechatronic Integrated Device or Molded Interconnected Device
ADAS	Advanced Driver Assistant Systems
Ag	Silber
ASIC	Application Specific Integrated Circuit
Au	Gold
CAGR	Compound Annual Growth Rate
Cu	Kupfer
Die	Siliciumchip
DOE	Design of Experiments (Statistische Versuchsplanung)
ED-RFA	Energiedispersive Röntgenfluoreszenzanalyse
EDTA	Ethylendiamintetraessigsäure
EP	Epoxidharz
EP	Epoxidharzbasiertes Duroplast
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
f	Frequenz
g	Gramm
GF	Glasfaser
h	Stunde
K	Kelvin
ICP	Liquid Crystal Polymer
LCI	Laser-Direkt-Strukturierung
Ling/Space	Laiterbahnbroite und Abetand
	Leaser Inducted Selective Activation
LISA	Labratubl für Dolymonyorketoffe
LSP	Miero Electrical Mechanical System
	Micro Electrical Mechanical System
min	Minute Militä
moi	Molekul
Na	Natrium
Nd: YAG	Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat-Laser
ND-Plasma	Niederdruckplasma
N1	Nickel
Р	Leistung
PA	Polyamid
PC	Polycarbonat
Pd	Palladium
PE	Polyethylen
PEEK	Polyetheretherketon
PEI	Polyetherimid
PF	Phenol-Formaldehyd Harz
Ra	Mittenrauwert (Integral)
REM	Rasterelektronenmikroskop
Rz	Mittelwert aus Einzelrautiefen
Si	Silizium
SIPA	Selektive-Ionogene-Palladiumaktivierung
SMD	Surface-mounted device
SMT	Surface Mount Technology

Abkürzungsverzeichnis

Sn	Zinn
UF	Harnstoff-Formaldehyd Harz
UP	Ungesättigtes Polyester Harz
V	Volumen
VE-Wasser	vollentsalztes/demineralisiertes Wasser
WW3	Lehrstuhl für Werkstoffwissenschaften 3 (Glas und Keramik)
θ	Kontaktwinkel
ν	Geschwindigkeit
ρ	Dichte
σ	Oberflächenspannung
σd	Dispersiver Anteil der Oberflächenspannung
σL	Oberflächenspannung der Flüssigkeit
σр	Polarer Anteil der Oberflächenspannung
σS	Oberflächenenergie des Feststoffs (Substratmaterial)

1 Einleitung

Der übergeordnete Titel der vorliegenden Dissertation beschreibt die Steigerung der Integrationsdichte durch Miniaturisierung der Leiterbahnen auf dreidimensionalen, spritzgegossenen Schaltungsträgern unter Verwendung epoxidharzbasierter Duromere, strukturiert mit einem lasergestützten Verfahren und selektiv-additiver Metallisierung. Der erste Forschungsansatz ist dabei die Untersuchung der Erweiterungsmöglichkeiten der thermomechanischen Eigenschaften dreidimensionaler, mechatronisch integrierter Baugruppen (3D-MID) durch den Einsatz alternativer Substratmaterialien. Der zweite Schwerpunkt ist die Entwicklung eines lasergestützten Metallisierungskonzeptes zur Herstellung von Fine-Pitch-Leiterbahnen. Dabei werden die Funktionsmechanismen der Bekeimung und Adhäsion untersucht und anhand von theoretisch-ingenieurwissenschaftlichen Ansätzen erklärt. Im dritten Teil erfolgt eine qualitative Evaluierung von erstellten Testbaugruppen, die einen Vergleich zu bereits etablierten Verfahren zulassen.

1.1 Motivation und Hintergrund

Die Informationsgesellschaft konnte durch neue elektronische Kommunikationssysteme Länder und Kulturen enger zusammenführen und ein globales Bewusstsein schaffen im Vergleich zur vorherigen durch Landesgrenzen geprägten Weltanschauung. Diese Phase ist dabei überzugehen in einen bewussteren Einsatz von Ressourcen und Technologien, die einen nachhaltigeren Umgang mit der Umwelt und dem eigenen Organismus fördern soll. Hier werden Technologiezweige in Bereichen wie der Medizintechnik, Unterhaltungselektronik, Smart Automotive und Umwelttechnik in zunehmendem Maße an Bedeutung gewinnen. Besonders das Anwendungsfeld der Sensorik, anhand dessen sich Zustände von Systemen, Umweltbedingungen und die körperliche Konstitution überwachen lassen, wird durch den Drang nach mehr Komfort, Sicherheit, nachhaltiger Gesundheit und Unabhängigkeit in allen Altersgruppen in einem deutlich steigenden Maß in fast alle Bereiche des täglichen Lebens Einzug finden. Demzufolge wird das Netz aus Sensoren in vielen zukünftigen Produkten zur Wahrnehmung von Umwelt- und Umgebungsbedingungen immer dichter gespannt. In Produktionsumgebungen wird mit Entfaltung der Themen Industrie 4.0 und Big-Data ein enormer Bedarf von Überwachungssystemen benötigt werden, die es Fertigungsanlagen erlauben, hoch automatisiert, anhand von in Echtzeit gesammelten Informationen in Verbindung mit einer Datenauswertung über Algorithmen mehr eigene Entscheidungsgewalt über den Fertigungsablauf zu erlangen. Technologiestudien prognostizieren beispielsweise zukünftigen Anwendungen um das Thema "Internet of Things" ein durchschnittliches, jährliches Wachstum von bis zu 20 % bis in das Jahr 2027. [1]

Das Vordringen und Etablieren dieser Systeme in das alltägliche Leben, mit teilweise ganz neuen Applikationsfeldern bedeutet, dass die Anforderungen an die Widerstandsfähigkeit von elektronischen Baugruppen gegenüber Umwelteinflüssen, wie Temperatur, Feuchtigkeit und aggressive Medien, ebenfalls stetig wachsen. [2] Dies beschleunigt die Reduzierung der für die Systemintegration zur Verfügung stehenden Bauraumvolumina bei gleichzeitig steigender Funktionalität. Dazu kommt, dass die Gewichtsund Kostenreduktion sowie die Funktionssicherheit neben einer erhöhten Materialvielfalt weitere Herausforderungen sind, die es zukünftig in Produktionsprozessabläufen zu bewerkstelligen gilt. Hier bieten spritzgegossene, dreidimensionale, mechatronische Schaltungsträger einen innovativen Ansatz, um elektrische Funktionen auf Oberflächen von Polymerwerkstoffen aufzubringen, ohne weitere Bauteile in Form von Leiterplatten oder flexiblen Flachleiterbaugruppen mit einbinden zu müssen.

Besonders Sensoren, die sich in der Regel an Systemgrenzen befinden, um Daten aus der Umgebung zu erfassen, stellen einen profitierenden Anwendungsbereich dar, um elektrische Funktionen und deren Anbindungen direkt unter der Gehäuseoberfläche zu platzieren. Kritisch zu betrachten ist dabei die exponierte Lage am Gehäuserand, die stärkeren mechanischen, umweltbedingen Kräften ausgesetzt ist.

Eine besondere Herausforderung hinsichtlich der Zuverlässigkeit einer Baugruppe stellen die häufig sehr unterschiedlichen thermischen und physikalischen Eigenschaften der miteinander kombinierten Materialien dar. Im Vergleich zur Leiterplatte steht bei 3D-MIDs aufgrund der eingeschränkten Multilayerfähigkeit weniger Fläche und Entflechtungsmöglichkeit für die elektrischen Funktionsleitungen zur Verfügung, daher müssen die Leiterbahnbreiten und Abstände in vielen Fällen auf ein Minimum reduziert werden sowie Verfahren wie das Einbetten, Stapeln und Umspritzen von Chips häufiger eingesetzt werden, um die geforderte Bauraumreduzierung zu ermöglichen.

Zur Herstellung von 3D-MIDs gibt es seit etwa vier Jahrzehnten unterschiedliche technologische Ansätze und eine Vielzahl verfügbarer Verfahren. Davon hat bisher nur ein kleiner Teil den Entwicklungssprung in erfolgreiche Serienanwendungen geschafft. Das Heißprägen, der Zweikomponentenspritzguss und nicht zuletzt die Laserdirektstrukturierung (LDS^{*}) haben die Vorteile der Kombination von elektrischen und mechanischen Funktionen in einem Bauteil unter Serienbedingungen zwar zeigen können, jedoch sind an einigen Beispielen auch deutliche Grenzen offenbart worden, die eine Nachhaltigkeit in Form von Folgeprodukten häufig nicht mehr erzielen konnten.

Zu den Einschränkungen gehörten in erster Linie qualitative Schwächen aufgrund von bisher nicht ausreichend beherrschten und unvollständig verstandenen Fertigungsprozessen. Aktuell können MIDs im Vergleich zur Leiterplatte mit den bisher zur Verfügung stehenden Materialien und Fertigungsverfahren nicht den gleichen thermomechanischen Belastungen, hervorgerufen durch Umwelteinflüsse, widerstehen. Außerdem bestehen wirtschaftliche Hürden, bedingt durch vergleichsweise höhere Materialund Prozesskosten.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit einem innovativen lasergestützten Verfahren zur selektiven Metallisierung von Leiterbahnen, mit einer Breite und Abstand von jeweils kleiner 50 µm, die zusätzlich hohen thermischen Umweltanforderungen widerstehen können.

1.2 Zielsetzung

Zielsetzung dieser Arbeit ist es Methoden, Prozesse und Materialien zu erforschen, die eine vorteilhafte Steigerung der Einsatzgrenzen von 3D-MIDs und deren Miniaturisierung zur Herstellung von MID-Packages ermöglichen sowie dafür bereits etablierte Fertigungsketten so gering wie möglich abzuändern.

Vorrangiges Ziel ist die Erforschung der Verwendung von epoxidharzbasierten Duromeren als alternative Substratmaterialien zu den bisher fast ausschließlich eingesetzten thermoplastischen Substraten für die Erstellung von dreidimensionalen Basisträgern. Durch den Einsatz von Duromeren kann eine Steigerung der thermomechanischen Einsatzbeschränkungen erzielt werden, die es ermöglicht, die Leiterbahngeometrie in der Breite und dem Abstand zueinander deutlich zu verringern. Als Herstellungsverfahren wird hierbei ein laserbasiertes Verfahren zur selektiven Indizierung der Leiterbahnen eingesetzt. Im Vergleich zu dem Laser-Direkt-Strukturierungs-Verfahren (LDS[®]), welches spezielle Additive in den Substraten benötigt, konzentriert sich in diesem Fall die Forschung auf die Entwicklung eines Prozesses, der mit einer selektiven Metallisierung auf Duromeren ohne Additive funktioniert. Für das LDS[®]-Verfahren gibt es zum aktuellen Zeitpunkt keine am Markt verfügbaren Substrate auf Duromerbasis. Verschiedene Polymerhersteller betreiben aktuell hierzu jedoch Forschung und Entwicklung.

Zentrale Forschungsschwerpunkte stellen dabei die Untersuchungen der Wechselwirkungen zwischen Laserbearbeitung, der chemischen Aktivierung durch Palladium-Tauchprozesse und der Metallisierung der Funktionsschichten dar. Es werden Hypothesen über die Benetzungs- und Haftmechanismen der Palladiumbekeimung auf selektiv laserbearbeiteten Oberflächen erforscht und mit entsprechenden Testmethoden untersucht und evaluiert. Damit soll ein Prozess entwickelt werden, mit dem ein Fine-Pitch-Leiterbahnlayout erfolgreich auf Duromeren mit chemischen Kupferelektrolyten metallisiert werden kann. Bisher können Leiterbahnstrukturen mit Breiten von unter 80 µm nur durch die Leiterplatte zuverlässig abgebildet werden.

Gleichzeitig wird neben bereits etablierten MID-Metallisierungen der additive elektrogalvanische Kupfermetallisierungsprozess für die selektive Abscheidung untersucht. Hierdurch kann eine Steigerung der Einsatzgrenzen und Widerstandsfähigkeit gegenüber Umwelteinflüssen geboten werden und darüber hinaus aufgrund der dichteren molekularen Metallstruktur Verbesserungen für Anwendungsfelder der Hochfrequenztechnik sowie Leistungselektronik erreicht werden.

Im Rahmen der Untersuchungen wird stets der Vergleich zum etablierten LDS-Prozess und den qualitativen Unterschieden gezogen, um Vorteile im Prozess herauszustellen.

1.3 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit

Zu Beginn der Arbeit werden in Kapitel 2 einschlägige Markt- und Technologiestudien hinsichtlich der Trends für hochintegrierte mechatronische Sensor-Packages untersucht. In diesem Zusammenhang werden aktuelle branchenbezogene Entwicklungen am Markt aufgezeigt, die die zukünftigen Trends für mechatronische Anwendungen bezogen auf die Leiterbahndimensionen für die kommenden Jahre prognostizieren.

Ein besonderer Fokus liegt dabei auf den Anwendungsbereichen und deren jeweiligen Anforderungsprofilen, wie beispielsweise der benötigte Fine-Pitch der Leiterbahnen, geforderte Temperatur und Umweltbedingung sowie mechanische und elektrische Eigenschaften. Hier wird skizziert, welche Voraussetzungen ein erfolgreiches spritzgegossenes, dreidimensionales Bauteil zukünftig erfüllen können muss und in welchen Anwendungsgebieten diese zu finden sind.

Im Kapitel 3 werden der aktuelle Stand der Technik für MID-Baugruppen vorgestellt und für die Eignung zur Herstellung von mechatronischen Packages miteinander verglichen. Eine wichtige Voraussetzung für eine wesentliche Weiterentwicklung von MID-Applikationen ist dabei die grundlegende Kenntnis der physikalischen Eigenschaften der miteinander kombinierten Materialien und ein Verständnis über die Prozesse der Herstellung.

Es werden Lösungsansätze zu Zielkonflikten, die durch Wechselwirkungen der einzelnen Fertigungsschritte und Parameter zueinander entstehen, aufgezeigt. Die Untersuchungen die angestellt werden, sollen dazu geeignete Lösungsansätze bieten können, um Abhilfemaßnahmen für zukünftige Entwicklungen zu konzipieren.

Die Reduzierung der Leiterbahnbreiten stellt hohe Anforderungen an die Ausprägung der Selektivität, der Randgeometrie und der Oberflächenrauheit zwischen Leiterbahnen und Werkstoffoberfläche. In Kapitel 4 werden die Wechselwirkungen zwischen Substrat, Palladiumaktivierung und Metallisierung während des Laserprozesses erforscht. Hierbei gilt es, die optimale Kombination aus Oberflächenqualität, Prozessfähigkeit und Funktionssicherheit zu gewährleisten. Dazu wird eine exakte Betrachtung über die Wirkmechanismen der verschiedenen Laserparameter auf die Substratmaterialien angestellt. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Erforschung eines geeigneten Bekeimungsprozesses, der es ermöglicht, auf epoxidharzbasierten Duromeren mit einer präzisen Selektivität erfolgreich mit Kupfer zu metallisieren.

Ein vielversprechender Ansatz zur Bekeimung ist die Beschichtung der laserbearbeiteten Oberfläche mit Palladium für eine Indikationsmetallisierung zur Erzeugung eines elektrochemischen Potentials für chemische Kupferelektrolyten. Entsprechende Verfahren sind aus der vollflächigen Beschichtungsindustrie bereits seit einigen Jahrzehnten bekannt und etabliert. Für die selektive Polymermetallisierung mit dem besonderen Anspruch an hohe Oberflächenqualitäten und geringe Leiterbahnbreiten müssen diese Systeme weiterentwickelt und auf die vorgelagerten sowie nachfolgenden Prozesse abgestimmt werden.

Ein kennzeichnender Ansatz, die Integrationsdichte von elektromechanischen Bauteilen zu erhöhen, ist die Reduzierung der Größe des Schaltungsträgers (Package) und damit die Verringerung der Baugröße. Das Zusammenpacken mehrerer Bauteile mit elektrischen Schaltungen wie beispielsweise gestapelte Siliziumchips aber auch gestapelte Platinen um erheblichen Bauraum einzusparen, wird auch als Multipackage bezeichnet. Die erfolgreiche elektrische Ankontaktierung dieser Systeme spielt dabei eine zentrale Rolle.

In Kapitel 5 werden lasergebohrte Vias in duroplastische Substraten zur Erzeugung von elektrischen Durchkontaktierungen untersucht, sowie entsprechende Strategien des Laserbohrens miteinander verglichen. In Kapitel 6 werden qualitative Betrachtungen der zuvor erstellten Demonstratoren angestellt, um Aussagen der über die Zuverlässigkeit treffen zu können. Das beinhaltet die Untersuchung des Verhaltens der duroplastischen MID-Baugruppen in standardisierten Tests für elektronische Anwendungen, wie beispielsweise feuchte Wärme-, Temperaturschockprüfungen, sowie im Reflow-Lötprozess.

2 Hochintegrierte mechatronische Systeme -Technologien und Trends f ür die Zukunft

Für die Entwicklung des Wachstums der globalen Wirtschaft existieren Modelle, die regelmäßige zyklische Gesetzmäßigkeiten beschreiben. In den vergangenen beiden Jahrhunderten sind in den periodischen Aufschwüngen zukunftsweisende Technologien entwickelt und etabliert worden, die das Leben der Menschen nachhaltig gestaltet und immer wieder verändert haben. So beschreibt beispielsweise das Modell von Kondratieff, wie in Bild 1 dargestellt, einen wiederkehrenden Ablauf von innovationsinduzierten Investitionen. [3] Vereinfacht dargestellt wird ein Aufschwung durch große Investitionen in trendbestimmende Technologien bewirkt, bis sich durch eine allgemeine Verbreitung (Marktsättigung) allmählich ein Abschwung einstellt und in der Regel eine Verdrängung durch eine neue Technologie stattfindet. Im aktuellen Zeitalter spricht man demnach von dem fünften und sechsten Zyklus. Diese Phase läutet das Zeitalter der Etablierung und Einbettung der zuvor entwickelten Informationstechnologien in den Lebensalltag ein. Das zukünftige Leben wird in zunehmendem Maß auf Handlungsableitungen der gesammelten Informationen basieren, die einen entsprechenden Mehrwert für das eigene Leben erzeugen sollen. Die wichtigsten Attribute sind in diesem Zusammenhang: Sicherheit, Komfort, Gesundheit, Nachhaltigkeit und Zeitersparnis. [4] [5]



Bild 1: Kondratieff-Zyklen; "Irrational Exuberance", Princeton-University [3]

2 Hochintegrierte mechatronische Systeme - Technologien und Trends für die Zukunft

Trendbestimmende Themen wie Industrie 4.0, Big Data, Internet of Things (IoT) und künstliche Intelligenz werden zukünftig durch ihre vernetzte Nutzung neue Umgangsformen mit der Erfassung, Speicherung und der Bereitstellung neu interpretierter Daten schaffen, die das gesellschaftliche Zusammenleben nachhaltig verändern. Sensoren in alltäglichen Anwendungen werden zukünftig Daten nicht nur auf Anwendungsfälle bezogen erfassen, sondern vielmehr fortwährend, um diese in cloudbasierten Dienstleistungssystemen allen anderen Menschen bereitzustellen. So können beispielsweise im Automobilbereich Sensoren zur Einparkhilfe dazu genutzt werden, permanent Parklücken am Straßenrand zu vermessen und diese Daten über ein webbasiertes Dienstleistungssystem anderen Nutzern kostenpflichtig zur Verfügung zu stellen. [6] [7] Der Trend des Internet of Things wird daher in den nächsten Jahren zunehmend mehr Anwendungen erfassen und deren erfasste Daten für eine breitere Masse zugänglich machen. Viele alltägliche elektronische Systeme, die bisher noch nicht vom "Smartboom" erfasst wurden, werden in den nächsten Jahren um zusätzliche Funktionen erweitert werden. Naheliegende Applikationsfelder sind dabei elektrische Werkzeuge wie beispielsweise Bohrmaschinen aber auch Fahrräder/ E-Bikes, Sportartikel, Kleidung und Haushaltsgeräte wie Küchenmaschinen. [4]

Eine konsequente Erweiterung stellen dabei MEMS-Sensoren dar, die in bestehende elektronische Schaltungen integriert werden können. Mit ihnen lassen sich zusätzliche Informationen über den Systemzustand oder aus der Umgebung erfassen, die sich in einem digital vernetzten Alltag für einen Informationsmehrwert und Sicherheitszugewinn weiterverarbeiten lassen. Dazu werden Fertigungstechnologien wie die 3D-MID-Technik benötigt, die mechanische und elektrische Aufgaben miteinander kombinieren können. [8]



Bild 2: Treiber und Hauptelemente des Internet of Things [9]

2 Hochintegrierte mechatronische Systeme – Technologien und Trends für die Zukunft

Wie in Bild 2 dargestellt, werden die Anwendungen durch Integrationserhöhung, Leistungssteigerung und der Datenvernetzung von Sensoren "intelligenter". Das Gesetz des exponentiellen Wachstums von Moore über die Steigerung der Anzahl von Transistoren und Nielsens Feststellungen über die Bandbreitensteigerung im digitalen Datenverkehr haben somit weiterhin ihre Gültigkeit; sie werden vielmehr zukünftig miteinander kombiniert. [10] [11]

Zur Erstellung von Wachstumsprognosen über die zukünftige Entwicklung von mechatronischen Anwendungen ist eine Vielzahl unterschiedlicher Markt- und Technologiestudien verfügbar. Forschungsinstitute und Technologievereine haben durch ihre Netzwerke direkten Zugang zu spezifischen Industriebereichen und können damit eine umfassende Datenverdichtung über technologische Trends vornehmen, um verlässliche Prognosen zu treffen. Im Rahmen dieser Arbeit sind dafür folgende Technologiestudien herangezogen worden:

- International Technology Roadmap for Electronic Interconnects (IPC), 2015 [7]
- International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS), 2015 [6]
- International Electronics Manufacturing Initiative (iNEMI), 2015, 2017 [1] [12]
- Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie (ZVEI), 2015, 2016, 2017 [4] [13]
- Power Packaging Technology Trends and Market Expectations, Report by Yole Development, 2015 [14] [15]
- Abschlussberichte von Forschungsprojekten, Marktbarometer und Fachjournale [16] [17] [18] [19]

2 Hochintegrierte mechatronische Systeme - Technologien und Trends für die Zukunft

2.1 Branchenspezifische Trends für das Packaging mechatronischer Systeme

Im Jahr 2016 wurde der Gesamtwert der globalen Elektronikindustrie von dem amerikanischen Beratungsunternehmen Prismark & Partners LLC auf über 800 Milliarden Euro geschätzt. Die iNEMI (International Electronics Manufacturing Initiative) prognostiziert dabei für den Zeitraum 2016 bis 2019 ein moderates aber kontinuierliches Wachstum von jährlich 3,5 % hinweg über alle Branchen. Die hervorzuhebenden Wachstumstreiber sind die Automobilindustrie und konsumelektronische Anwendungen aus dem schnell wachsenden Bereich Internet of Things (IoT). [12]

Für Deutschland gibt der Zentralverband der Elektronikindustrie (ZVEI) einen Umsatz von 178,5 Milliarden Euro für das Jahr 2016 an und eine Vorhersage über ein durchschnittliches Wachstum bis 2019 von jährlich 3,6 %. Gegenüber dem Vorjahr konnte die Produktion im Jahr 2017 mit insgesamt 864.000 Beschäftigten im Inland um 2,5 % gesteigert werden. [20] [21] [4] Diesen Angaben folgt die iNEMI mit vergleichbaren Voraussagen. Die globale Verknüpfung und Beschleunigung von elektronischen Inhalten in Verbindung mit einem starken Wachstum auf dem Automobilsektor und einem Anstieg bei Elektrofahrzeugen wird dem Markt für Automobilelektronik in den nächsten sechs Jahren ein jährliches Wachstum von über 5 % vorausgesagt. Dabei wird angenommen, dass sich der IoT-Sektor verdoppeln wird. In den nächsten zehn Jahren wird demzufolge das Wachstum sowohl bei intelligenter Kleidung (Wearables) als auch bei industriellen IoT-Anwendungen stark zunehmen. [7] In Bild 3 sind die von der iNEMI Technologie Roadmap erwarteten Wachstumsraten der Elektronikindustrie, aufgeteilt nach Branchen, von 2014 bis in das Jahr 2027 dargestellt und die jeweilige durchschnittliche Wachstumsrate (CAGR) angeben. Die umsatzstärkste Branche ist dabei die der tragbaren Geräte. Dazu zählen vornehmlich Smartphones, aber auch Tablets, Smartwatches und weitere transportable multimediale Systeme aus dem Bereich der Unterhaltungselektronik, die einen zunehmenden digitalen Vernetzungsgrad aufweisen werden. [1]

Wie es in technologisch getriebenen Branchen üblich ist, erfahren neue Produkte und Technologien ein erhebliches Wachstum bei gleichzeitig abschwellender Nachfrage nach Produkten von gestern. [1]



Prognostiziertes weltweites Wachstum der Elektronikindustrie nach Sparten bis 2027

Bild 3: Wachstum der Elektronikindustrie nach Sparten [1]

Technologische Trends in der Systemintegration von mechatronischen Baugruppen werden durch die jeweiligen Anwendungsbereiche und deren Anforderungsprofil beeinflusst.

Die Anwendungsgebiete unterscheiden sich wie in Tabelle 1 dargestellt, hinsichtlich ihrer Produktlebenszyklen und Einsatzgrenzen der Umgebungsbedingungen für die die jeweiligen Produkte bei der Entwicklung ausgelegt werden. Dieser Untergliederung folgen die meisten Marktstudien in analoger Weise, um anwendungsspezifisch technologische Trends nach Anforderungen in den Branchen zu charakterisieren. Die individuelle Preissensitivität stellt in Verbindung mit den Qualitätsanforderungen einen wichtigen Gesichtspunkt in Bezug auf die Geschwindigkeit der Umsetzung eines vom Markt geforderten Merkmals dar.

Branche	Beschreibung
Konsumelektronik	Angetrieben von der Notwendigkeit für maximale Leistung über eine weite Kostenbandbreite bei gleichzeitig hohem Kostendruck; Sehr kurzer Produktlebenszyklus
Automobilelektronik	Produkte, die den hohen qualitativen Anforderungen in Automobilen gerecht werden müssen und in sicherheitsrelevanten Systemen einge- setzt werden bei gleichzeitig starkem Kostendruck
Luft- und Raumfahrtech- nik	Produkte, die in extremen Umgebungsbedingungen zuverlässig über einen langen Zeitraum funktionieren müssen

Tabelle 1: Marktsegmente der Elektronikindustrie [1]

2 Hochintegrierte mechatronische Systeme - Technologien und Trends für die Zukunft

Industrieelektronik	Produkte, die industriell in Hochleistungscomputern, Servern, Netz- werken und Telekommunikationssystemen eingesetzt werden wie Automatisierungstechnik und Verkehrstechnik
Medizintechnik	Produkte, die sehr zuverlässig mit geringem Bedienungsaufwand ein- gesetzt werden müssen; Häufig gibt es besondere Anforderungen an die eingesetzten Materialien hinsichtlich der Humanverträglichkeit und Säurebeständigkeit
Leistungs- und Kommu- nikationselektronik	Produkte im Bereich der Energiegewinnung und für Kommunikati- onsnetze; Zuverlässigkeit bei hohen Strömen und extremen Umwelt- bedingungen
Militärische Anwendun- gen	Sichere und zuverlässige Systeme mit höchsten Anforderungen an Materialien, wie extreme Temperaturbeständigkeit, robuste und kom- pakte Bauweise für eine lange Lebensdauer

Jeder dieser Anwendungsbereiche hat bezogen auf seine Zielgruppe und Einsatzbedingungen individuelle Anforderungen an die Zuverlässigkeit und Qualität. Ausschlaggebend sind dabei die Anzahl der integrierten Funktionen, der Produktlebenszyklus in Gebrauchsjahren und die Umweltbedingungen, maßgeblich bestimmt durch den Temperaturbereich, in dem das System garantiert funktionieren muss. In Verbindung mit der in der jeweiligen Branche vorherrschenden Preiselastizität ergeben sich daraus Chancen, aber auch Einschränkungen, bestimmte Fertigungstechnologien, Materialien, Design- und Konstruktionsvarianten zu verwenden oder auf einfachere, günstigere Verfahren zurückzugreifen. [12] [22] Tabelle 2 trägt charakteristische Merkmale der sieben Produktsparten zusammen. Besonders hervorzuheben ist dabei die Anzahl der integrierten Komponenten in Form von aktiven und passiven Bauteilen. Die durchschnittliche Anzahl der Die's geben eine Indikation, wie viele MEMS- bzw. Sensorfunktionen in den jeweiligen Anwendungen verbaut werden. Der vermehrte Einsatz dieser Bauformen bedingt logischerweise die Miniaturisierung der Anschlussraster von Lotballs bei Interposern, Steckverbindungssystemen und Leiterbahngeometrien, um diese Systeme an die restliche Schaltungselektronik anbinden zu können. [1] [7] [23]
		Konsum-	Kommunikations-	Industrie-	Automotive-	Medizin-	Luftfahrt-	Militär-
		elektronik	elektronik	elektronik	elektronik	technik	technik	technik
he	T(min)	o °C	-40 °C	-55 ℃	-55 ℃	o °C	-55 ℃	-55 ℃
e []	T(max)	+60 °C	+85 ℃	+95 °C	+125 °C	+60 °C	+95 ℃	+95 ℃
Charakteristi Merkmal	Typische Lebensdauer	1-2 Jahre	1-20 Jahre	10-25 Jahre	15 Jahre	1-40 Jahre	20-30 Jahre	10-30 Jahre
te	Typische Pitch-	400 - 200	200 - 200	200 - 200	200 - 200	200 - 200	200 - 200	200 - 200
)) (e	Breite (µm)	400 - 200	300 - 200	300 - 200	300 - 200	300 - 200	300 - 200	300 - 200
Pitch-B (201	Minimaler Steckverbinder -abstand (µm)	400-300	500 - 300	500 - 300	Keine Angabe	400 - 300	1000 - 800	Keine Angabe
(біс	Max. I/O Dichte (I/O/cm²)	700 - 1200	600 - 1200	500 - 1000	140 - 200	625 - 1000	500 - 1000	700 - 1200
Package (201 7 1 1	Max. Komponen- ten/cm²	70 - 95	2,4 - 2,8	2,6 - 3,6	3,4 - 4	14 - 16	3,4 - 4	2,6 - 3,6
	Number of Die in SiP	6 - 12	5 - 8	7 - 12	Keine Angabe	10	7 - 12	Keine Angabe
n (2019)	Ø FR4 Montage Kosten (€/Einheit)	0,01 €/Stk.	Keine Angabe	o,45 €/Stk.	0,33 €/Stk.	0,13 €/Stk.	Keine Angabe	Keine Angabe
Kost	Ø Kosten (€/Einheit)	0,83 €/Stk.	1,28 €/Stk.	500 €/Stk.	Keine Angabe	4,26 €/Stk.	700 €/Stk.	Keine Angabe

Tabelle 2: Marktsegmente und Einsatzbedingungen [1] [6] [7]

Global betrachtet verteilen sich die Marktsegmente hinsichtlich ihrer schwerpunktmäßigen Fertigungsstandorte unterschiedlich nach Regionen. Der asiatische Raum erfährt weiterhin ein starkes Wachstum im Massenmarkt mit der zusätzlichen Erschließung von neuen technologischen Feldern im High-End Bereich, die aus Europa und Amerika abwandern.

Das Land China wird hierbei seinen Standpunkt weiter ausbauen und eine immer größere Wertschöpfungstiefe in innovativen Bereichen wie Kommunikationselektronik, elektrische Automobile, IoT- Anwendungen aber auch erneuerbare Energien durch chinesische Firmen etablieren können, um die vollständige Prozesskette von der Entwicklung beginnend abzubilden. Die strategische Herangehensweise der Regierung mit Hilfe von wirtschaftspolitischen, über Jahrzehnte ausgerichteten Plänen, wie "Made in China 2025", wird im Gegensatz zu den etablierten, wirtschaftlich situativ handelnden Exportnationen erfolgreich Schlüsseltechnologien mit einer hohen Marktmacht im eigenen Land aufbauen und langfristig durch protektionistisches Agieren binden können. [24]

In Bild 4 ist der Schwerpunkt im Bereich der Konsumelektronik für Kommunikationssysteme im Raum Asien/Pazifik deutlich erkennbar. Die Regionen Japan, Europa, Südamerika zeigen mit 63 % eine besondere Ausprägung in der Automobiltechnik.



2 Hochintegrierte mechatronische Systeme - Technologien und Trends für die Zukunft

Bild 4: Schwerpunkte der Elektronikbranchen auf dem Weltmarkt [13]

Die durch die Marktstudien identifizierten Entwicklungstreiber, die zukünftige Trends in der Elektronikindustrie über alle Branchen hinweg bestimmen, sind in den Tabelle 2 und 3 zusammengefasst. Wichtige Faktoren sind die Bauraumreduzierung und die daraus folgende Verringerung der Leiterbahnen und Anschlussrastermaße. Gleichzeitig nehmen dabei die zu integrierenden Funktionen und Datenraten auf Speicher und Signalebenen zu, die somit neue Lösungen für das Wärmeenergiemanagement erfordern. Das wiederum wird zur Treibkraft neue Substratmaterialien bei der Entwicklung in Betracht zu ziehen, wie beispielsweise Keramiken sowie hochentwickelte Thermo- und Duroplasten, die sich durch ihre thermomechanischen Eigenschaften besonders exponieren. [25] [S8]

Auf der Bauelementebene	Auf der Anwendungsebene
Bauformen (Package-Bauformen)	Funktionalität
Leiterbahnbreiten und Abstand (Fine-Pitch)	Datenraten
Anschlussraster (Pitch)	Baugröße
Anschlusszahlen (I/Os)	Energieverbrauch
Funktionalität	Gewicht
Anzahl der Multilayer	Komplexität
Wärmeenergiemanagement	Zeiteffizienz
	Kosten

Tabelle 3: Die maßgeblichen Entwicklungstreiber der Elektronikindustrie [1]

Ein wichtiger Indikator für die voranschreitende Miniaturisierung sind die Leiterbahndimensionen. Eine Differenzierung der verschiedenen Schaltungsträgertechnologien findet neben anderen Kriterien, bei der jeweils geringsten möglichen Leiterbahnbreite und dem geringsten Abstand zwischen zwei Leiterbahnen statt, die unter verfahrenstechnischen und wirtschaftlichen Aspekten möglich sind. [26]

Elektronische Anwendungen lassen sich in drei Systemebenen untergliedern. Silizium-Halbleiterbauteile, die auf Wafer hergestellt werden, haben Strukturbreiten von üblicherweise 1000 nm bis aktuell < 10 nm. Der Bereich der Mikrosysteme stellt den volumenmäßig größten Teil dar und umfasst Strukturdimensionen von mehreren Millimetern bis < 50 µm. Hier ist seit Jahrzehnten die Leiterplatte technologisch und wirtschaftlich der etablierte Schaltungsträger. Der Makrobereich beschreibt die Ebene der Anwendungen, wie beispielsweise Gehäuse oder mechanische Trägerelemente. Hier können Antennen und Heizwendelstrukturen Flächenbereiche bis in den Zentimeterbereich umfassen. [4]

Im Fall der Gehäuse sind deren Flächen auf der Innenseite bisher wenig genutzt, abgesehen von mechanischen Verstrebungen, Stützstrukturen oder Befestigungselementen zur Aufnahme von beispielsweise Leiterplatten. Hier steht potentiell mehr Fläche und Bauraum zur Verfügung, um weitere Funktionen wie Leiterbahnen und elektrische Steckverbindungsysteme zukünftig zu integrieren. Verfahren auf der Mesoebene dienen als Bindeglied und müssen die beiden angrenzenden Bereiche miteinander technologisch kombinieren können, wie in Bild 5 dargestellt. Daraus folgt, dass die Mikrosystemtechnik sowohl sehr feine Leiterbahnen im zweistelligen Mikrometerbereich als auch sehr großflächige Strukturen, wie Hoch-

2 Hochintegrierte mechatronische Systeme - Technologien und Trends für die Zukunft

frequenzantennen, bis in den Millimeter und Zentimeterbereich verfahrenstechnisch abbilden können muss, um die beiden angrenzenden Technologieebenen miteinander zu verbinden. Die klassische FR4-Leiterplatte deckt sowohl große Strukturgrößen als auch sehr feine bis zu kleiner 20 μ m ab und ist daher weiterhin die Referenz unter den Verdrahtungstechnologien. Die MID-Verfahren kommen bedingt durch den jüngeren technologischen Stand aus der Makro- und Mikrosystemtechnik und decken hier einen großen Bereich ab. Die lasergestützten MID-Verfahren bieten durch den flexiblen Prozess auch zukünftig hohes Entwicklungspotential zur Miniaturisierung, da durch den Einsatz anderer Laserquellen die Strahlfokussierung deutlich verringert werden kann.



Bild 5: Systemebenen verschiedener MID-Verfahren [1] [8]

Besonders im Segment der Automobilindustrie ist ein starker Trend zur weiteren Miniaturisierung der Leiterbahndimensionen zu verzeichnen, was sich auf die zunehmende Elektrifizierung von ursprünglich rein mechanischen Systemen, sowie die wachsende sensorische Überwachung für automatisiertes Fahren zurückführen lässt. In Bild 6 ist die zukünftige Entwicklung der Leiterbahnbreiten bis 2027 in vier verschiedenen Anwendungsbereichen untergliedert dargestellt.

Der begrenzt zur Verfügung stehende Bauraum bedingt, dass die entsprechenden Fertigungsverfahren technologisch mit der Miniaturisierung der Geometrien schritthalten können müssen, um die elektrischen Strukturen zuverlässig abbilden zu können. Der Begriff Fine-Pitch ist keine feststehende Bezeichnung. Er wird vielmehr abhängig vom technologischen Verfahren als allgemeine Definition für sehr kleine Leiterbahnbreiten und Abstände verwendet. Bei einigen elektronischen Packages spricht man bereits ab 1 mm Abstand zwischen zwei Leiterbahnmittelpunkten von Fine-Pitch, bei anderen erst ab einem Rastermaß von 625 µm (0,025 Inch) und kleiner. [27] [28]

Zur Beschreibung der Leiterbahndimensionen gibt es, wie in der Skizze in Bild 6 dargestellt, zwei gängige Definitionen. Mit dem Leiterbahnpitch wird der Abstand, gemessen zwischen den Mitten zweier aneinander angrenzenden Leiterbahnen, bezeichnet. Elektrische Strukturen mit einer Breite und einem Abstand von jeweils 50 µm ergeben somit rechnerisch einen Pitch von 100 µm. Daneben gibt es die Bezeichnung Line/Space, über die die realen Dimensionen der Leiterbahnbreiten und Abstände beschrieben werden. [1] [29]

In der fortlaufenden Ausarbeitung werden die Strukturdimensionen über die Breite und den Abstand beschrieben, da durch das Metallisierungsverfahren Isolationsabstände gegebenenfalls größer dimensioniert werden müssen als die Leiterbahnbreite.



Bild 6: Entwicklung Leiterbahndimensionen aus iNEMI Roadmap 2015 [1]

2 Hochintegrierte mechatronische Systeme - Technologien und Trends für die Zukunft

2.2 Trendentwicklungen am Beispiel der Automobilelektronik

In der Art und Weise des Nutzungsprofils von Automobilen zeichnet sich seit den letzten zehn Jahren eine grundlegende Änderung ab. Die zunehmende Ausstattung der Fahrzeuge mit Advanced Driver Assistent Systems (ADAS) wird mittelfristig von dem selbstgeführten Fahrzeug abgelöst und langfristig in vollständig automatisierten Automobilen münden. Das Diagramm in Bild 7 zeigt die wellenförmige Technologieentwicklung der fünf Grade des assistierten Fahrens, die gegenseitig voneinander abgelöst werden und jeweils eine zunehmende Fusion der Informationen aller an Bord erfassten Daten erfordern. [15]

Dem Gebiet der Sensorik kommt in diesem Zuge in heutigen und zukünftigen Automobilen eine Schlüsselrolle zu, die die verbauten mechatronischen Systeme deutlich komplexer und deren Anzahl werden anwachsen lassen. [17]



Bild 7: Globale Entwicklung des assistierten Fahrens bis 2050 [15]

Fahrzeugtechnische Entwicklungen wie die Elektromobilität und das automatisierte Fahren erfordernd immer genauere und robustere Sensorinformationen, auf die sich Menschen unter Sicherheitsaspekten vollständig verlassen werden. Aktuell bewegt sich die Anzahl von verbauten Sensoren in einem Fahrzeug, Länder- und Ausstattungsspezifisch zwischen 30 bis über 150 Stück. [28] [P1]

Gleichzeitig geht eine wachsende multimediale Ausstattung in den aktuellen Fahrzeuggenerationen einher. Besonders der Fahrgastraum wird zu einem rollenden Büro und Wohnraum erweitert, in dem eine Anbindung an alle gewohnten Kommunikationswege (E-Mail, Internet, Mobiltelefonnetze) und die Vernetzung mit weiteren elektronischen Endgeräten des täglichen Lebens für die Insassen gewährleistet wird. [4] Das erfordert speziell für den Fahrer durchdachte Steuerungs- und Kommunikationsschnittstellen, die ohne signifikante Beeinträchtigung der Wahrnehmung des Fahrgeschehens, während der Fahrt verstanden und bedient werden können. Spracherkennung, Gestiksteuerung, projizierende Displays, multifunktionale und berührungssensitive Displays, sowie letzten Endes das vollständig automatisierte Fahren, sind Technologien, die in ausgewählten Modellen und Fahrzeugklassen bereits den Einzug in die Serie geschafft haben. Für diese Mensch-Computer-Schnittstellen wird eine Vielzahl Sensoren benötigt, die Bewegungen, Druck, und Distanzen über Kameras, Radar- und Lasermessungen die Umgebung wahrnehmen können, um daraus über Steuerprogramme Handlungen abzuleiten. [1] [7]

Nach einer Studie von IHS Markit erreichte der Automobil-Sensor-Markt, bezogen auf die Einnahmen für Sensorsysteme und Sensorelemente im Jahr 2017 einen Wert von ca. 4 Milliarden Euro. [28] Insbesondere MEMS-Sensoren sind heute überwiegenden die Systeme, die auch zukünftig in bedeutendem Umfang eingesetzt werden, wie den Diagrammen in Bild 8 zu entnehmen ist. Das Diagramm auf der rechten Seite veranschaulicht, dass Anwendungen in dem Bereich ADAS zukünftig durch die zunehmende Automatisierung des Fahrens einen erhöhten Bedarf an Sensoren generieren.



Bild 8: Marktentwicklung nach Sensortypen und ihren Anwendungsgebieten [28]

Erschwert wird die Integration neuer Systeme in das Automobil durch den nur begrenzt zur Verfügung stehenden Bauraum sowie Umwelteinflüssen an exponierten Stellen. Zwar sind nach einer Studie des ADAC die Fahrzeuge zwischen 1975 und 2013 durchschnittlich über alle Fahrzeugklassen um 11 % pro Kategorie gewachsen, [30] trotzdem ergibt sich ein zunehmen-

2 Hochintegrierte mechatronische Systeme - Technologien und Trends für die Zukunft

der Konflikt mit dem zur Verfügung stehenden Volumen durch die außerordentlich schnelle Erweiterung der mechatronischen Systeme in Fahrzeugen. Diese Tatsache bedingt folglich auch in diesem Bereich das Bedürfnis hin zu mehr Miniaturisierung und System- und Funktionsintegration, um Bauraum so effizient wie möglich zu nutzen. [26]

Für die Automobilelektronik wird in den nächsten 10 Jahren ein stetiges Wachstum der benötigten Elektronik und Halbleiterkomponenten prognostiziert. Mit rund 148 Milliarden Euro Umsatz liegt der Anteil der Automobilelektronik an der weltweiten Elektronikindustrie im Jahr 2015 bei rund 10 %. Wie aus dem Diagramm in Bild 3 hervorgeht, wird das Wachstum in diesem Bereich im Zeitraum 2014-2027 voraussichtlich eine jährliche Zunahme von rund 5,3 % erfahren. [12]

Zu den wichtigsten zukünftigen, gesetzgeber- und nachfragegetriebenen Trends in der Automobilelektronik zählen: [1] [7]

- Kontinuierlich strengere Kraftstoffverbrauchs- und Emissionsraten
- Gesetzliche Anforderungen an moderne Sicherheitssysteme
- Nachfrage von Seiten der Verbraucher nach höheren Wirkungsgraden hinsichtlich Motor und dem gesamten Antriebsstrang (Verbrennungsmotor) sowie LED-Beleuchtung im Innenraum und im Bereich der Hauptscheinwerfer.
- Nachfrage der Verbraucher nach mehr Unterhaltungs- und Komfortfunktionen
- ADAS Erweiterte Fahrerassistenzsysteme
- Connected Car, Car to Car Kommunikation, Vernetzung mit allen anderen digitalen Systemen des alltäglichen Gebrauchs. (Smartphone, Laptop, Smarthome)
- Wachstum bei Hybrid und Elektrofahrzeugen durch einen zunehmenden politischen Druck
- Gewichtsreduzierung durch vermehrte Verwendung von Polymerbauteilen statt Metallkonstruktionen
- Gefühlt wahrgenommene ökologische Nachhaltigkeit

2.2.1 Mechatronische Anwendungen in Automobilen

Die mechatronischen Anwendungen der Automobiltechnik lassen sich, wie in Bild 9 dargestellt, in sechs Hauptkategorien unterteilen:

 Antriebsstrang-Elektronik wie Motorsteuerungen, Getriebesteuerungen, Spannungsregler und andere Systeme, die den Motor oder den Antriebsstrang des Fahrzeugs steuern

- Unterhaltungselektronik wie FM-, DAB-Radios, bis hin zu On-Board-Video-Entertainment-Systemen mit Satellitenempfängern und Internet-Streamingdiensten.
- Sicherheits- und Bequemlichkeitssysteme wie Airbag-Sensoren, Klimaanlagen, Sicherheits- und Zugangskontrollen und Antiblockiersysteme.
- Fahrzeug- und Karosseriesteuerung, die bestimmte Fahrzeugfunktionen wie Aufhängung, Traktion und Servolenkung steuern.
- In-Cabin-Informationssysteme wie Instrumentencluster und Reisecomputer
- Nicht eingebettete Sensoren wie Geschwindigkeits- und Distanzsensoren, Temperatur- und Drucksensoren verbunden über den Bordnetzkabelsatz.



Bild 9: Segmentunterteilung der Automobilelektronik; Stand 2015 [1] [31] [S1]

Alle elektronischen Systeme sind an einem zusammenhängenden Kabelsatz über Steckersysteme angeschlossen, der vergleichbar wie ein biologisches Nervensystem alle Systeme miteinander verbindet. [32] Im Zuge der Elektromobilität wird sich der Kabelsatz langfristig durch den Wegfall der Elektrik des Verbrennungsmotors und damit nicht mehr benötigter elektromechanischer Systeme deutlich verändern und verkleinern. Gleichzeitig werden Anforderungen an die Qualität, Zuverlässigkeit und Stromtragfähigkeit der eingesetzten Stecksysteme und die verwendeten Materialien in der Hochvolt- und Batterietechnik stark zunehmen, um Ströme im Bereich von 250 Ampere Gleichspannung und 300 Ampere Wechselspannung in

2 Hochintegrierte mechatronische Systeme - Technologien und Trends für die Zukunft

Kleinwagen bzw. 500 Ampere Gleichspannung und 1000 Ampere Wechselspannung in der Luxus- und Sportwagenklasse um Spannungen bis 800 Volt sicher zu tragen. [33] [34] Der Kabelsatz wird demnach in seiner Gesamtlänge deutlich verringert, während Funktionserweiterungen und Leitungsquerschnitte in exponierten Teilbereichen zunehmen werden.

Hervorzuheben ist jedoch die Übergangsphase der Hybridfahrzeuge, die durch die Integration von elektrischem und auf Verbrennung basiertem Antriebskonzept, den Kabelsatz noch einmal deutlich komplexer werden lässt. [S2]

2.2.2 Anforderungen an die Zuverlässigkeit in Automobilen

In der Automobiltechnik werden hohe Ansprüche an die Zuverlässigkeit der einzelnen Komponenten gestellt. Neben hohen und niedrigen Temperaturen stellen Vibrationen, Schock, Einwirkung von Schmutz und Verunreinigungen, Feuchtigkeit, Chemikalien, Strahlung und Gase, elektromagnetische Störungen, Abschirmung gegen internes und externes Rauschen sowie elektrostatische Aufladung kritische Faktoren dar. [1]

Besonders die extremen Temperaturanforderungen (-40/-55 °C bis +125/+150 °C) sind für die eingesetzten Materialien bei mechatronischen Baugruppen die in der Regel größten Herausforderungen. [8] Immer dann, wenn durch die Miniaturisierung und steigende Packungsdichte die Temperaturdifferenzen in den eingesetzten Materialien zunehmen, müssen die Strukturen diese ohne zu versagen aushalten können. Dadurch wird das passive thermische Management bei gestiegener Leistungsdichte zunehmen, da aktive oder erzwungene Kühlung nur in Ausnahmefällen verfügbar, bzw. aufwendig und kostspielig sind. [35]

Automobilanwendungen sind aufgrund der hohen Serienstückzahlen zwischen 100.000 und 3 Million Einheiten pro Jahr extrem kostensensibel und erfordern daher Preisstrukturen ähnlich wie bei der Unterhaltungselektronik. Um die Kosten bei hohen Stückzahlen zu decken, ist für Zulieferbauteile und Montageanwendungen die Ausbeute bei Fertigungs- und Montagearbeiten äußerst wichtig. Null-Fehler-Toleranz, hohe Auslastungen auf modernsten Produktionslinien, Materialrückverfolgbarkeit und ein großer Automatisierungsgrad in der Produktion sind erforderlich, um diese Kostenanforderungen zu erfüllen. [21]

2.3 Hochintegrierte dreidimensionale Packages mit MEMS-Sensoren – Ein Anwendungsfeld für die 3D-MID-Technik

Die Veröffentlichung der Nintendo Wii[®] im November 2006 kann als Beginn der tragbaren MEMS-Anwendungen im Bereich der Unterhaltungselektronik betrachtet werden. Die kabellose Hand-Bedieneinheit enthält einen 3-achsigen-MEMS-Beschleunigungs-sensor, dessen Technologie ursprünglich für automatische Raketenlenksysteme in der Militärtechnik entwickelt wurde und der Bewegungen exakt bestimmen kann. Die Fernbedienung ermöglicht dem Benutzer die Interaktion mit der Konsole durch Gesten und das Zeigen auf den Bildschirm. [6] Heutzutage werden damit den Spieleanwendungen, Smartphones und Wearables zusätzliche Erfahrungsdimensionen verliehen. In Automobilen werden Beschleunigungssensoren spätestens seit serienmäßiger Einführung des elektronischen Stabilitätssystems (ESP) im Jahr 1995 von Daimler-Benz in der A-Klasse in großer Stückzahl eingesetzt. Mit ihrer Hilfe werden die Bewegungsvektoren des Fahrzeuges mit den Brems- und Lenkbewegungen des Fahrers verglichen und daraus Informationen über das Fahrverhalten abgleitet. Dabei werden von der Software gezielte stabilisierende Maßnahmen durch aktives Eingreifen in das Bremssystem vorgenommen. [36]

Die Preisentwicklung dieser und vergleichbarer hochtechnologischer Anwendungen erfahren ab dem Eintritt in die Konsumgüterelektronik innerhalb von wenigen Jahrzehnten einen drastischen Preisverfall, z.T. um das hundert- bis tausendfache, durch die enorme Verbreitungsdichte in alltäglichen Geräten. Gleichzeitig wird der einst benötigte Bauraum innerhalb kürzester Zeit reduziert durch neue Fertigungstechnologien und geringer anvisierte Produktlebenszyklen.

Kfz-Sensoren haben eine Kostenstruktur, die für eine vergleichsweise wenig platzsparende, dafür aber robuste Bauweise bestimmt sind. Die Anforderungen an die Entkoppelung von mechanischen und thermischen Spannungen sind in Fahrwerks- und Motorraumnähe hoch. Zum Einsatz kommen in der Regel keramische-, in der Elektronik halbleiterbasierte Materialien und für Gehäuse typisch Polymerwerkstoffe. Wie in Bild 10 dargestellt unterscheiden sich die thermomechanischen Eigenschaften hinsichtlich ihrer Ausdehnungskoeffizienten teilweise erheblich voneinander. Die dabei auftretenden Spannungen müssen konstruktiv kompensiert werden können.

2 Hochintegrierte mechatronische Systeme - Technologien und Trends für die Zukunft



Bild 10: Thermischer Ausdehnungskoeffizient ausgewählter Materialien

Fertigungstechnologien im Bereich der Unterhaltungselektronik sind deutlich einfacher und kostengünstiger aufgebaut da bisher längere Produktlebenszyklen mit hohen Zuverlässigkeitsanforderungen als nicht notwendig erachtet werden.

Dies führt zu Verfahren, MEMS-Bauteile deutlich kostengünstiger mit technischen Polymeren wie Polyamide und flüssig kristalline Polymere zu umspritzen, bzw. einzubetten und anschließend mit ätz- oder lasergestützten Verfahren elektrisch zu kontaktieren. Dabei ist gleichzeitig, aufgrund des vergleichsweise geringer zur Verfügung stehenden Bauraums, die Packungsdichte durch Funktionsintegration zu erhöhen. [12]

Die technologischen Verfahren der MID-Technik bieten eine ideale Kombination von mechanischen und elektronischen Aufgaben. Die Basis eines spritzgegossenen Schaltungsträgers ermöglicht es bereits vorhandene mechanische Polymerbauteile durch eine Weiterentwicklung zusätzlich elektrisch zu funktionalisieren. Ein interessantes Anwendungsfeld ist dabei, durch das flexible Spritzgießen Elektronik einzubetten und auf diese Weise mechatronische Multipackages herzustellen. [37]

Die hohe Relevanz des Themas MID-Packaging mit lasergestützten Verfahren zeigt die Vielzahl an abgeschlossenen und aktuell laufende Forschungsprojekte wie beispielweise die AiF-Projekte "MID-Einhausung" [18] oder "Slimdup" [38] die sich damit beschäftigen MID-Bauteile zu umspritzen bzw. MEMS-Chips in den MID-Spritzguss einzubetten und mittels Laserbohren und chemischer Metallisierung elektrisch zu kontaktieren.

2.3.1 Anwendungs- und Einsatzbereiche

Der heutige primäre Treiber für MEMS-Sensor-Anwendungen ist vor allem die Unterhaltungsindustrie, mit dem Wunsch mehr Funktionsmöglichkeiten zu integrieren und dabei Kosten und Bauraum zu reduzieren. Diese Umstände werden in Zukunft dazu führen, dass mehr alltägliche Gegenstände in einem steigenden Maß mit zusätzlichen sensorischen Funktionen ausgestattet werden.

Die Anwendungsbereiche und Funktionen von MEMS Anwendungen sind in Tabelle 4 zusammengefasst und lassen die Vielfältigkeit der Einsatzmöglichkeiten erkennbar werden. Neben klassischen sensorischen Messfunktionen für Druck und Feuchtigkeit können zukünftig Mikrofon-, Kameraund Lautsprecherfunktionen auf integrierte Schaltungen gebracht werden. [1] [6]

Marktsegment	Automobiltechnik	Smartphone	Wearables	Medizintechnik	Industrie
Integrierte Sensoren, inertiale Messeinheiten	Unfallsensor, Bewegung- und Positionsbestimmung	Neigung, Bewegung, Positions- bestimmung	Neigung, Bewegung	Bewegung- und Positionsbestimmung	Neigung, Bewegung, Positions- bestimmung
Mikrofon	Freihand- Kommunikation	Sprache, Ultraschall	Sprache, Ultraschall	Sprache, Herzfrequenz	
Drucksensor	Reifendruck, Unterdruck, Höhe, Dampfdruck	Höhe, Barometer	Blutdruck	Blutdruck	Pneumatische Systeme, Aktorik
Leitfähigkeit	Sicherheitstechnik Kabelsatz		Transpiration	Transpiration	Qualitätsprüfung, Prozesssteuerung
Feuchtigkeit	Umweltbedingung, Sicherheitstechnik	Umweltbedingungen	Umgebungs- und Umweltbedingungen	Patienten- überwachung	Umgebungs- bedingungen Prozesssteuerung

Tabelle 4: Anwendungsgebiete von MEMS-Sensoren [1]

Marktstudien, die explizit auf die MID-Technologie zugeschnitten sind, gibt es bisher nur in geringem Umfang. Die Markt- und Technologieanalyse des 3D-MID e.V. aus dem Jahr 2011 bei der 51 ausgewählte Unternehmen entlang der Wertschöpfungskette berücksichtigt wurden, zeigt jedoch hinsichtlich Anwendungspotentiale und relevante Branchen einen deutlichen Schwerpunkt für sensorische Anwendungen in der Automobilbranche, wie in Bild 11 dargestellt. [17]

Der zweitgrößte Nutzungsbereich ist die Medizintechnik. In Verbindung mit Wearables und der Unterhaltungselektronik wie Smartphones generiert dieser Bereich Wachstum für sogenannten Body- und Health-Monitoring Systeme. Hier ist in den letzten Jahren ein Markt für Produkte entstanden, die zwischen medizinischen Anwendungen, wie beispielsweise Kontinenztrainer [39] und Lifestyleprodukten, wie Fitnessuhren [40] angesiedelt sind.

2 Hochintegrierte mechatronische Systeme - Technologien und Trends für die Zukunft





Bild 11: Markt- und Technologiestudie der 3D-MID e.V. [17]

Neue Entwicklungen in der MEMS-Mikrofluidik wie Lab-on-a-chip-devices (LOC) ermöglichen die Funktionalität eines makroskopischen Labors auf einem einzigen Chip, der in beliebigen Polymergehäusen untergebracht werden kann. Die Miniaturisierung kann die medizinische Erstversorgung und Diagnostik durch die Analyse von Blut und anderen flüssigen Lösungen in kleinen Mengen in Gebieten außerhalb von Arztpraxen, Krisengebieten und besiedelten Gebieten der Erde mit gering ausgebauter Infrastruktur verbessern. [1]

Die hohen Anforderungen an eine designbestimmte, gesundheitlich- und körperverträgliche Integration mechanischer und elektrischer Funktionen in bestehende Umgebungen bieten für die 3D-MID-Technologie die Möglichkeit, die Potentiale der Designfreiheit zu verwenden.

2.3.2 Steigerung der Integrationsdichte anhand von Funktionsintegration

Die Studien der Marktentwicklung zeigen, dass auch zukünftig die Miniaturisierung auf allen technologischen Bauebenen von mechatronischen Anwendungen weiter vorangetrieben wird. Für die MID-Verfahren bedeutet das einen weiteren Schritt hin zu Packaging Lösungen, um Halbleiter über Interposerpackages oder System-in-Packages mit Strukturen zwischen 20-100 µm mit integrieren zu können. Aktuell stellt die Multilayerleiterplatte in Verbindung mit Interposern aus Polimiden und Keramik technologisch das dafür am weitesten verbreitete Verdrahtungssystem dar, welches diesen breiten Bereich zwischen feinen und weiten Leiterbahnbreiten zuverlässig miteinander verbinden kann. [1] [S5] Sie benötigt jedoch weiterhin eine tragende Einhausung. Da Sensoren und andere MEMS-Anwendungen wie Kameras, Mikrofone, Sende- und Empfangssysteme einen direkten Zugang zur Außenwelt benötigen, bietet sich hier an, die Elektronik in mechatronische Kunststoffträgersysteme zu integrieren. Die Trägersysteme ermöglichen auf der Außenseite eine ästhetische Oberflächengestaltung und auf der Innenseite Nutzungsflächen als elektronischer Schaltungsträger und für Kommunikationsantennen. [S5]

Auf diese Weise können unterschiedliche, separat voneinander hergestellte Bauteile und Komponenten wie Einzelchips, passive und aktive Komponenten, Antennenstrukturen auf Flachleitern, mechanischen Trägerbauteilen, z.B. Gehäusen, durch eine heterogene Integration (HI) zu einem neuen Bauteil auf höherer Ebene zusammengefasst werden. Die ITRS (International Technology Roadmap for Semiconductors 2015) prognostiziert, dass sich die Anforderungen bis 2030 zukünftiger mechatronischer Anwendungen durch den Ansatz der heterogenen Integration zunehmend besser lösen lassen. [6] [41]

Die primäre Integrationstechnologie für HI-Systeme sind somit komplexe 3D-System-in-Package-Architekturen, sogenannte 3D-SiPs. Ein mechatronisches Trägersystem umfasst dabei mehrere wieder in sich gepackte Subsysteme, verbindet sie elektrisch miteinander und enthält weitere aktive sowie passive Bauelemente. MIDs können auf diese Weise als spritzgegossene Multipackageträgersysteme zusätzlich mechanische Funktionen übernehmen, wie in Bild 12 dargestellt. Beispielsweise können mechanische Steck-Verrastungen und elektrisch funktionale Kontaktierungspins im Spritzguss mit ausgeführt und somit zu einem Schaltungsträger zusammengefasst werden. Für Antennenanwendungen bietet sich der Vorteile, dass geometrische Formen, die über eine Computersimulation an einen entsprechenden Frequenzbereich angepasst sind, als Schaltungsträgerform verwendet werden können und mit weiterer Elektronik bestückt werden können, ohne deren Form für ein Fertigungsverfahren vereinfachen zu müssen.



2 Hochintegrierte mechatronische Systeme - Technologien und Trends für die Zukunft

Bild 12: Potentiale von spritzgegossenen MID-Multipackage-Systemen [42]

Mit der MID-Technologie können durch die Verbindung von mechanischen und elektronischen Funktionen innovative Vorteile bei Reduzierung der Gehäusevolumina dargestellt werden. Allerdings stehen hier die im Vergleich zur Leiterplatte deutlich höheren Herstellungskosten für neue Prozesse und Materialien negativ gegenüber. Das bedingt eine durchdachte Kostenoptimierung auf der Anwendungsebene. Schon bei der Entwicklung von MIDs muss daher die gesamte Zielgebietsumgebung der Anwendung mitbetrachtet werden, um weitere Aufgaben und Funktionen heranzuholen und durch eine einzige neue MID-Applikation zu ersetzen. Zu nennen wären hier mechanischen Trägerstrukturen, Sende- und Empfangsantennensysteme, Entwärmungskonzepte und Steckverbindungslösungen deren Funktionen in einem einzigen MID-Bauteil integriert werden. [43]

Lasergestützte MID-Verfahren bieten darüber hinaus gegenüber der Leiterplatte den Vorteil gleiche polymerische Trägerbauteile mit variierenden Leiterbahnlayouts zu strukturieren, um ein flexibles Variantenmanagement zu realisieren, welches die Herstellkosten senkt. Dazu muss lediglich das Programm im Laser ausgetauscht werden, alle weiteren Prozessschritte zur Erstellung des mechatronischen Trägers bleiben unberührt. 2.3 Hochintegrierte dreidimensionale Packages mit MEMS-Sensoren – Ein Anwendungsfeld für die 3D-MID-Technik



Bild 13: Integrationsverdichtung durch mechatronisches Multilevelpackage

Bild 13 a) veranschaulicht eine klassische FR4-Multilevel-Trägerplatine mit aktiven und passiven Bauteilen bestückt auf der Oberfläche und über mehrere Ebenen miteinander verdrahtet. Ein Gehäuse, in der Regel aus einem Polymerwerkstoff, dient als mechanischer Träger, umfasst die Elektronik, schützt vor äußeren Einflüssen und bietet auf der Außenfläche haptische und ästhetische Designaspekte.

Bild 13 b) Mehrere kleinere FR4-Platinen mit aktiven und passiven Bauteilen bestückt auf der Oberfläche sind in ein Gehäuse integriert und miteinander elektrisch über Fachleiter und Stecksysteme verbunden. Es gibt vereinzelt Kombinationen aus eingebetteten System- und Packaging Lösungen, die sich in die Geometrie des Gehäuses einfügen. Als Kontaktierungslösungen werden klassische SMD-, Wirebonding- und Flipchip- Technologien in Mischbestückung eingesetzt.

Bild 13 c) Verschiedenste Technologien und Fertigungsverfahren werden miteinander kombinert, um aktive und passive Bauelemente auf Leiterplatten oder über Interposer direkt auf die Innenseite des Gehäuses der Anwendung miteinander zu kombinieren. Damit wird eine Aufspaltung von System-in-Packages (SiP) durch Integration in Gehäusewände realisiert hin

2 Hochintegrierte mechatronische Systeme - Technologien und Trends für die Zukunft

zu Funktion-Integrated-Packages. Das Gehäuse wird zu einem elektromechanischen Schaltungsträger. Elektrische Leiterbahnen sind dabei mit selektiven Metallisierungsverfahren aufgebracht und können verschiedene Systemebenen miteinander verbinden. Dadurch kann die Packungsdichte erhöht werden und Bauraum wird eingespart. MEMS-Sensor-Chips können in die Gehäusewände eingebettet bzw. umspritzt werden. Sie werden über lasergebohrte Vias elektrisch angebunden. Elektromechanische Steckersysteme können direkt im Spritzguss ausgeführt werden, um mehr Funktionen aus der Umgebung des zu entwickelnden Bauteils in einem Bauteil zu vereinen.

Bild 13 d) Zukunftsvision: die klassische Multilaverplatine kann gänzlich ersetzt und noch mehr Bauraum eingespart werden, in dem das Siliciumchip-Systeme mit Interposergehäusen direkt auf den Polymerträger aufgebracht werden können. Elektrische Schaltungen werden auf bestehende geometrische Lösungen aufgebracht. Das ermöglicht beispielsweise die Übernahme eines Hochfrequenzdesigns aus der Simulation ohne fertigungstechnische Kompromisse in der Geometrie eingehen zu müssen. Komplexe Schaltungen und Sensorfunktionen sind dabei vollständig in Siliciumchips integriert und miteinander elektrisch über die Metallisierung beziehungsweise über Funkantennen verbunden. Die Innenseite von einem Gehäuse kann somit vollständig als Schaltungsträger mitgenutzt werden, wodurch die Außenseite aufgrund der Spritzgussverarbeitung frei an die Umgebung angepasst werden kann. Durch die Umspritzung der Kavitäten kann eine neue Packaging-Ebene ermöglicht werden, deren Strukturen elektrisch oder thermisch anhand von LDS-lasergebohrten Vias mit der darunterliegenden Ebene verbunden werden können. [44]

2.4 Zusammenfassung der Potentiale für miniaturisierte 3D-MID-Schaltungsträger

Intelligente, sensorische Funktionen spielen eine zentrale Rolle in der Vernetzung der Produktion bei der vierten industriellen Revolution, alltäglichen smarten Anwendungen und zukünftigen vollautomatisierten Automobilen. Sie stellen die Schnittstelle zwischen Maschinen, Steuerungen und Datenverarbeitungsanlagen und bieten einen Zugewinn an Funktionalität durch einen zuverlässigen Informationsaustausch.

Die Untersuchung der zukünftigen Marktentwicklung und Potentiale zeigt einen stetigen Drang nach schlanken, multifunktionalen Lösungen, in die immer mehr Funktionalität integriert werden kann, bei gleichzeitiger Reduzierung des Bauraums. Dadurch findet aktuell eine Verdichtung auf allen Systemebenen statt mit dem Resultat, dass alle verfügbaren Ebenen miteinander in einem High-Integrated-Systempackage (HIS) kombiniert werden müssen. Das führt zu einem Bedarf nach Lösungen die verschiedenen Systemtechniken auf der Nano-, Mikro-, und Makroebene in komplexen 3D-Packages mit weiteren mechanischen Funktionen miteinander zu verbinden. [45]

Insbesondere Technologien, die MEMS-Sensoren direkt in Gehäuse oder mechanische Trägersysteme integrieren können und diese zu komplexen mechatronischen Multipackages erweitern können, werden zukünftig gefragt sein. [1]

Die Automobilbranche bietet neben der Medizintechnik weiterhin ein großes Anwendungsfeld für räumlich mechatronische Schaltungsträger mit einem feinen Leiterbahnlayout. Bild 13 zeigt das breite Einsatzspektrum von mechatronischen Schaltungsträgern in Abhängigkeit der jeweiligen Möglichkeit zur Erzeugung eines funktionsfähigen Leiterbahnlayouts.

Nachteilig bei vielen MID-Verfahren ist die eingeschränkte Fähigkeit eine möglichst feine Leiterbahn mit einer geringen Breite und Abstand herzustellen. Hier konnte die Marktstudie zeigen, dass ein zukunftssicheres Verfahren Dimensionsbreiten von unter 50 µm zuverlässig erzeugen können muss. Dafür kommt unter serientauglichen Gesichtspunkten bisher nur die Laser-Direkt-Strukturierung (LDS) und das MIPTEC-Verfahren in Betracht. [46]

Die Verwendung von thermoplastischen Materialien mit hohen Füllstoffgehalten und ungleichen thermomechanischen Eigenschaften stellen in diesem Fall jedoch aktuell eine untere Grenze dar.

Für lasergestützte 3D-MID-Verfahren bedeutet dieser Schritt eine Erweiterung der Einsatzmöglichkeiten aus der Makro- und Mikrosystemtechnik hin zur Einbindung von Nanosystemtechniken, um dort im Bereich der First- und Second-Level-Packaging Ebene mechanische Funktionalität mit zu integrieren. Lasergestützte MID-Verfahren bieten in diesem Bereich eine hohe Flexibilität durch ein mögliches Variantenmanagement im Leiterbahnlayout und dem Laserbohren von elektrischen Vias. Durch diese Erweiterung der bisherigen Einsatzgrenzen müssen entsprechende technologische und prozessbedingte Herausforderungen auf der Seite der Materialien, Laserbearbeitung und Metallisierungsprozesse verbessert werden, um den qualitativen Anforderungen gerecht zu werden.

3 Metallisierung dreidimensionaler mechatronischer Schaltungsträger

Unter 3D-MID (3-Dimensional Moulded Interconnected Device oder 3-Dimensional Mechatronic Integrated Device) versteht man dreidimensionale, nahezu beliebig geformte, spritzgegossene Schaltungsträger, die im klassischen Sinne die Kombination von elektrischen und mechanischen Funktionen in einem Bauteil vereinen können. [8] Sie bieten damit die Möglichkeit, die Integrationsdichte von Anwendungen zu steigern. In Bild 14 ist beispielhaft die Kombination eines elektrischen Leiterbahnlayouts auf einem spritzgegossenen Träger dargestellt. Aktuell gibt es mehr als zehn verschiedene fertigungstechnologische Verfahren, um ein Leiterbahnlayout auf einen dreidimensionalen Träger aus einem polymerischen Werkstoff, aber auch aus Keramik aufzubringen. Die Verfahren, die anhand von produktspezifischen aber auch ökonomischen Kriterien für einen Einsatz auszuwählen sind, unterscheiden sich maßgeblich dadurch, ob die Leiterbahnen additiv oder subtraktiv, bzw. durch serielle oder parallele Prozesse aufgebraucht werden. [25] [47]



Bild 14: LDS°-Prozesskette des 3D-MID Demonstrators "MIDster" (3D-MID e.V.)

Die Potentiale der MID-Technologie ergeben sich durch das Spritzgießen von Polymeren, dass eine einfache Methode zur Gestaltung von Schaltungsträgern bietet. Durch die Möglichkeit, Leiterbahnen selektiv dreidimensional aufzubringen, ergeben sich je nach Verfahren hohe Freiheitsgrade im Design. [48]

Die Übersicht der Forschungsvereinigung 3D-MID e.V. fasst in Bild 15 die aktuell verfügbaren MID-Verfahren, eingeteilt nach Herstellungsverfahren des Schaltungs-trägers, der Methode zum selektiven Anlegen des Leiterbahnlayouts und dem Verfahren für die Beschichtung der elektrischen Funktionssschichten zusammen. Der Bereich der lasergestützten Verfahren, der bisher durch das LDS[°]-Verfahren alleinig geprägt wurde, ist in jüngster Zeit durch neue, einfachere und universellere Verfahren erweitert worden. Die Forschungsbemühungen der letzten Jahre zeigen, dass eine lasergestützte, selektive Metallisierung auch ohne spezielle Additive in Thermoplasten auskommen kann, wie durch das LISA-Verfahren (Laser Inducted Selektive Aktivation) in Verbindung mit komplexen Palladium-Aktivierungsbädern bewiesen wurde. [49] In der hier vorliegenden Forschungsarbeit wird das SIPA-Verfahren (Selektive Ionogene Palladiumaktivierung) vorgestellt, dass ein weiterentwickeltes Verfahren darstellt, mit dem insbesondere Fine-Pitch-Leiterbahnen auf duroplastischen Substraten metallisiert werden können. Es basiert im Gegensatz zu dem LISA-Verfahren nicht auf Palladium-Zinn-Komplexen, sondern auf einer ionogenen Palladiumsulfatlösung.



Bild 15: Das SIPA-Verfahren stellt neben dem LDS- und dem LISA-Verfahren eine neue Technologie unter den lasergestützten MID-Verfahren dar. [50]

3.1 Die aktuell verfügbaren Verfahren im technologischen Vergleich

Bereits seit den 1970er Jahren sind erste Überlegungen vor allem in den USA von Firmen wie AT&T Bell Labs, Union Carbide und General Electric Plastics angestellt worden, ein dreidimensionales Schaltungslayout auf einen Polymerträger aufzubringen. [8] Die Verfahren der ersten Stunde waren beispielsweise die Heißprägetechnik und der Zweikomponentenspritzguss. In den letzten 20 Jahren ist die Vielfalt und Diversität an entwickelten Verfahren stark angestiegen. Hierbei sind Drucktechnologien wie das Aerosol Jetting und Piezo Jetting zu nennen. Daneben gibt es kaltaktive Atmosphärendruckplasma basierte Sprühverfahren, die je nach Anwendungsfall mit Maskierungen arbeiten. [47] [51]

Das Patent des LDS^{*}-Verfahrens wurde von der Firma LPKF im Jahr 2006 gekauft und wird mit eigenen Lasermaschinen seither vertrieben. [8] Tabelle 5 führt die bekanntesten Verfahren mit einigen ihrer spezifischen Kenndaten auf. Im Zusammenhang mit Packaging-Anwendungen mit Fine-Pitch-Anforderungen sind die kleinsten erzeugbaren Leiterbahnbreiten der maßgeblich bestimmende Faktor neben einer bereits erfolgten industriellen Umsetzung, die für eine etablierte Markterfahrung sprechen. Zur Erstellung eines Fine-Pitch-Leiterbahnlayouts bieten das Aerosoljetting, und die lasergestützten Verfahren wie das MIPTEC^{*}- und das LDS^{*}-Verfahren aktuell am ehesten das technologische Potential die Leiterbahndimensionen zukünftig weiter zu reduzieren.

Verfahren	Industrielle Anwendung	geringste Leiterbahnbreite in Serienanwendung [µm]	geringste Leiterbahnbreite in der Forschung [µm]	Schicht- dicke [µm]	Spezifischer Widerstand [Ωm/mm²]
Lasergestützte Metallisierung					
Additiv (LPKF-LDS®)	ja	50	< 50	15	35,7± 19,4
ohne Additiv (LISA)	nein	-	ca. 150	15	35,7± 19,4
ohne Additiv (SIPA)	nein	-	< 40	15	35,7± 19,4
MIPTEC®	ja	50	50	15-20	52,0 ± 4,9
Druckverfahren					
Piezo-Jetting	nein	-	ca. 40	5	25 ± 5,0
Aerosol-Jet®	ja	75	ca. 40	5	19,2± 4,2
Flammspritzverfahren					
Flamecon®	nein	-	150	5-100	19,2 ±2,3
Plasmadust [®]	nein	-	150	5-100	19,2 ±2,3
PI Plasmacoat®	nein	-	150	5-100	19,2 ±2,3
Andere					
Two-Shot	ja	200	175	15	35,7± 19,4
Heißprägen	ja	250	200	15-30	52,0 ± 4,9
Stanzbiegetechnik	ja	200	150	100 - 500	52,0 ± 4,9

Tabelle 5: 3D-MID-Verfahren und ihre wichtigsten Eigenschaften im Vergleich [8] [52]

Aus den in Tabelle 5 ausgewählten Varianten haben bisher das Laser-Direkt-Strukturieren, das Heißprägen und der Zweikomponentenspritzguss den Sprung in erfolgreiche Serienanwendungen geschafft. [53] Aber auch diese Technologien konnten vor allem in Europa bisher wenig Nachhaltigkeit in Form von entsprechenden Folgeprodukten aufweisen. In Tabelle 6 sind fünf verschiedene 3D-MID-Serienanwendungen aus dem automotiven Sektor mit ihren Eckdaten zusammengefasst. Der ESP-Drucksensor der Bosch GmbH und der Radar-Positionssensor der Continental AG sind aktuell in Serienfertigung. Die drei übrigen MID-Anwendungen sind in den letzten Jahren anhand alternativer Technologien ersetzt worden.

Insbesondere durch vergleichsweise neue und weniger etablierte Fertigungsprozesse sind in manchen Beispielen Schwierigkeiten in der Qualitätsabsicherung aufgetreten, die letzten Endes ungeplante Mehrkosten bei der Herstellung während der Produktlaufzeit verursacht haben.

In Asien dagegen kann das LDS[®]-Verfahren einen bereits seit zwei Jahrzehnten andauernden und etablierten Einsatz im Bereich der Antennentechnik für Smartphones, Tablets, Laptops und anderen Handheldcomputern aufweisen. Das ist auf zwei Gründe rückführbar: Zum einen ist dort der Kostendruck für die Produktion insbesondere der chemischen Beschichtungsindustrie bisher vergleichsweise niedriger. Auch durch beispielsweise geringere umwelttechnische Auflagen als in Europa insbesondere für die Wiederaufbereitung der verwendeten Chemikalien aus den Beschichtungsprozessen können Herstellungskosten reduziert werden. Zum anderen sind die qualitätstechnischen Anforderungen an präzise geführte Beschichtungsprozesse von großflächigen Hochfrequenzstrukturen deutlich geringer, als für ein sehr präzises Leiterbahnlayout mit zusätzlich komplexer 3D-SMD-Bestückung.

Der Lötprozess, für die Aufbau- und Verbindungtechnik ein standardisiertes Verfahren, stellt eine erhebliche thermomechanische Belastung dar, die zu Spannungsrissen in den Leiterbahnen aufgrund sich stärker ausdehnende Poylmerwerkstoff führen können. Das Thema Mikrorisse in Leiterbahnen ist seit vielen Jahren in der Forschungsvereinigung 3D-MID e.V. ein fortwährend präsentes Thema, insbesondere auf der Seite der industriellen Anwender. Aktuell und in der Vergangenheit sind hierzu bereits eine Vielzahl von öffentlich geförderten Forschungsprojekten, wie das AiF-Projekt "LDS-MIDCHAMP", durchgeführt worden, um ein besseres Verständnis der Ursachen sowie entsprechende Prüfverfahren und Abstellmaßnahmen zu erarbeiten. [19] Bei großflächigen Antennenstrukturen tritt das Thema der Rissbildung in den Funktionsschichten in deutlich geringerem Ausmaß für einen Funktionsausfall auf, da die grundlegende Funktion in der Regel nicht vollständig versagt, wenn Teilbereiche der HF-Struktur nicht oder eingeschränkt elektrisch kontaktiert sind.

Sonnensensor	Lenkradschalter	Drucksensor	Positionssensor	Lenkradschalter
Hella	BMW	Bosch	Continental	BMW
2K-Spritzguss	LDS	2K-Spritzguss	LDS	LDS
LCP/LCP	PET + PBT	LCP/LCP	LCP	PA6
5 Komponenten	13 Komponenten	16 Kontakte zu FR4	5 Komponenten	25 Komponenten
2005-2014	2009-2012	SOP 2009	SOP 2008	2006-2013
1,5 mio. p.a	60.000 Paare p.a.	> 5 mio. p.a.	150.000 p.a.	100.000 p.a.

Tabelle 6: 3D-MID-Serienanwendungen aus dem Automobilbereich [17]

Speziell der Vergleich mit der etablierten und in nahezu jede Bauraumsituation integrierbaren Leiterplattentechnologie machen einen wirtschaftlichen Vorteil mit dem Einsatz von alternativen Verfahren schwer, zumal die Leiterplatte mit Line/Space-Geometrien von kleiner 20 µm mit bereits seit Jahrzehnten etablierten Prozessen in industrieller Anwendung befindet und damit geringere Breiten und Abstände ermöglicht als alle 3D-MID-Verfahren. Außerdem ist die Leiterplattentechnologie in der Signal- und Digitaltechnik gleichwie in der Leistungselektronik eine konventionelle Verdrahtungstechnologie.

Aktuell liegt die prozesstechnisch zuverlässig darstellbare Untergrenze für Leiterbahnbreiten bei dem Aerosoljetverfahren bei etwa 50 µm und bei dem LPKF-LDS[®]-Verfahren bei etwa 70 µm. In beiden Fällen ist für eine beherrschbare Umsetzung unter den Bedingungen einer Serienfertigung ein noch erheblicher prozesstechnischer Sprung notwendig. Das LDS[®]-Verfahren ist zwar in der Serie erfolgreich erprobt, stellt aber noch Herausforderungen bei zunehmender Miniaturisierung durch die thermische Diskrepanz zwischen den aktuell verfügbaren Substratmaterialien und den metallisierten Funktionsschichten dar.

3 Metallisierung dreidimensionaler mechatronischer Schaltungsträger



Bild 16: Entwicklung der Leiterbahnbreiten: MID-Serienanwendung und Forschung im Vergleich zur FR4-Leiterplatte [8] [12] [54] [55]

Gegenwärtig können Anwender und Entwickler bei dem LDS^{*}-Verfahren mit > 100 µm Leiterbahnbreite und dem Zweikomponentenspritzguss mit > 250 µm Breite auf eine entsprechend gute Markterfahrung im Bereich der Zulieferkette zurückgreifen. Insbesondere die Automobilprojekte wie der ESP-Drucksensor von Bosch, den Anwendungen von TRW, 2E-Mechatronik, Harting und Kromberg&Schubert haben seit etwa 2006 eine Knowhow Entwicklung in Deutschland bei Kunststoffherstellern und Verarbeitern sowie den Beschichtungsexperten am Markt generieren können, auf die nun zurückgegriffen werden kann.

3.2 Lasergestützte MID-Verfahren mit chemischreduktiver und elektrochemischer Metallisierung

Aktuell stellt das Laser-Direkt-Strukturierungsverfahren, dessen Patente sich im Besitz der Firma LPKF aus Garbsen befinden, das einzige am Markt verfügbare lasergestützte MID-Verfahren dar, das sich erfolgreich in der Serienproduktion behaupten kann. Zwar gibt es alternative verwandte Technologien wie in Tabelle 7 zusammengefasst, wie beispielsweise das MIPTEC-Verfahren [46] und das LISA-Verfahren [49], jedoch können diese bisher nur thermoplastische Substrate beschichten oder befinden sich noch in Forschung und Entwicklung.

	Chemische Metallisierung	MIPTEC® Microscopic Integrated Processing Technology	LDS® Laser-Direkt- Strukturierung	LISA Laser Inducted Selective Activation	SIPA Selektive Ionogene Palladium Aktivierung
Hersteller/ Entwickler		Panasonic	LPKF AG	Technische Universität Dänemark	Friedrich-Alexander- Universität FAPS
Industrielle Anwendung	ja	ja	ja	nein	nein
min. Leiterbahn	200 µm	50 µm	50 µm	150 µm	< 40 µm
Substrate	ABS, PP, Teflon, PC, PA, PPO, LCP, PES	PPA, LCP, Aluminium	LCP, PPA, PA6, PA10, PET, PC-ABS, PBT, etc.	PE, PP, PS, PC, ABS, PBT/PET, PEI, PA66	Epoxid Duroplast, LCP, PA6
Vorbehandlung	Laserabtragen, 2K- Spritzguss mit Pd Dotierung	Plasma- und PVD- Verfahren	Additiv	Laser-Strukturierung	Laser-Strukturierung
Laser-Typ	Spezielle Laserwellenlänge, um die Metallschicht zu entfernen	Spezielle Laserwellenlänge, um die Metallschicht zu entfernen	Spezielle Wellenlänge, um chemische Verbindung zu öffnen	Standard- Industrielaser UV- Laser, Nd:YAG Laser	Standard- Industrielaser Nd:YAG Laser
Metallisierung	Ätzen und chemische Metallisierung	Additive und Subtraktive Laserbearbeitung und galvanische Metallisierung	Aktivator im Substrat und chemische Metallisierung	chemische Aktivierung (Zinn- Palladium-Komplex) und chemische Metallisierung	chemische Aktivierung (ionogene Palladium Lösung) und chemische Metallisierung

Tabelle 7: Die lasergestützten 3D-MID-Verfahren im Vergleich

Das LDS[®]-Verfahren hat im Vergleich zu anderen MID-Technologien einen Marktanteil von über 50 %. [8] In Verbindung mit einer chemischen Kupfermetallisierung ist es dabei möglich, selektiv Leiterbahnen auf zuvor mit dem Laser bearbeiteten Polymeren aufzubringen. Das Funktionsprinzip ist dabei ein spezielles Additiv, welches durch Compoundierung dem Kunststoffgranulat beim Extrusionsprozess gleichmäßig hinzugemischt wird. [42] [56]

Die Granulate können fertig compoundiert von verschiedenen Herstellern für den thermoplastischen Spritzgussprozess bezogen werden. Die Kosten liegen dabei etwa um den Faktor 1,5 über den der vergleichbaren nicht-LDS^{*}-fähigen Granulatvarianten. In Tabelle 8 sind die zum Stand 2016 verfügbaren Polymersubstrattypen aufgeführt. Die flüssig-kristallinen Polymere und die Polyamide sind in Deutschland für LDS^{*}-MID-Anwendungen die am weitesten verbreiteten Werkstofftypen. In Asien bei der Antennenfertigung kommen verstärkt Polycarbonat-Blends zum Einsatz. Duroplastische epoxidharzbasierte Substratmaterialien sind bisher keine verfügbar. [57] [58] [59]

Substrat 7	Typ Anzah	l Typische MID-Einsatzgebiete	Thermische Ausdehnung	Preis ca.
РС	8	Antennen	hoch (ca. 40-90 ppm/K)	5-10 €/Kg
PC/ABS	17	Antennen	hoch (ca. 35-60 ppm/K)	5-10 €/Kg
РВТ	4	Antennen, Schaltungsträger	hoch (ca. 30-80 ppm/K)	10-25 €/Kg
PA	12	Antennen, Schaltungsträger	moderat-hoch (ca. 25-70 ppm/K)	15-25 €/Kg
LCP	4	Schaltungsträger, Sensoranwendungen	gering-moderat (ca. 20-35 ppm/k)	25-40 €/Kg
PEEK	1	Schaltungsträger, Sensoranwendungen	gering-moderat (ca. 20-30 ppm/k)	40-70 €/Kg
Andere	8			-

Tabelle 8: Die für das LDS°-Verfahren aktuell verfügbaren Polymertypen [60]

Der Laserprozess dient dazu, die Oberfläche des fertigen Spritzlings selektiv zu bearbeiten. Dabei wird das Additiv durch die Laserbearbeitung an den entsprechenden Stellen, die für das Leiterbahnlayout vorgesehen sind, aktiviert. Es handelt sich bei dem LDS^{*}-Aktivator um ein Additiv aus einer pulverisierten Kupfer-Aluminiumoxid-Spinellverbindung, welches in Partikelgrößen von ca. 800-1200 nm vorliegt. [56] [58]

Durch die Energie des Lasers wird diese Verbindung aufgebrochen, sodass das Kupferoxid um die Sauerstoffatome reduziert wird und in einen reaktionsfähigen Zustand gehoben wird. [58] In einem anschließenden chemisch-elektrolytisch reaktiven Kupfer-Tauchbadprozess können nun Kupferionen auf der aktivierten Oberfläche abgeschieden werden. Die durch den Laser zusätzlich erzeugte definierte mikroporöse Rauheit erleichtert den Prozess durch Steigerung der Oberflächenenergie und ermöglicht eine bessere Adhäsion der Kupfermetalle in der Oberfläche. [61]

Für die selektive Metallisierung von duroplastischen Substraten müssen andere Verfahren angewandt werden, um eine Reaktionsfähigkeit für die chemische Verkupferung zu erzielen.

3.2.1 Verfahren der außenstromlosen Abscheidung von Metallschichten

Unter der außenstromlosen Metallabscheidung versteht man Beschichtungsverfahren, die ohne äußere Stromquelle ablaufen. Die für die Metallabscheidung notwendigen freien Elektronen müssen daher dem Elektrolyten über ein Reduktionsmittel hinzugefügt werden, welches die Metallionen zum Metallatom reduziert. [62]

Mithilfe von Stabilisatoren in der Lösung wird das Reduktionsverhalten des Elektrolyten auf die zuvor durch, zum Beispiel einen Laser selektiv aufgerauten, zu metallisierenden Bereiche der Substratoberfläche begrenzt. [62] Das Aufrauen steigert die Oberflächenenergie und katalysiert damit den Austausch zwischen den Elektronen des Reduktionsmittels und den Kationen des abzuscheidenden Metalls. Die entsprechende mechanische oder chemische Konditionierung der Oberfläche ermöglicht es auch elektrisch nichtleitende Materialien wie Polymere, Glas und Keramik zu beschichten. [63]

Prinzipiell lassen sich zwei Verfahren der chemisch-reduktiven Abscheidung anhand der Herkunft der freien Elektronen voneinander unterscheiden. Über das sogenannte Ionenaustauschverfahren können Metallatome abgeschieden werden, wenn das zu beschichtende Grundmetall ein negativeres Standardpotential (unedler) besitzt als die in der Lösung befindlichen Metallionen. Dabei gibt das edlere Metall Elektronen in den Elektrolyten ab, die das zweite Metall bei der Reduzierung aufnimmt. [61]

Mit diesem Verfahren werden typischerweise in der industriellen Serienproduktion Metalle wie Gold, Silber und Zinn abgeschieden. Die dabei erzielbaren Schichtdicken liegen bei 0,1 – 1 µm. Sie lassen sich ohne zusätzliches Reduktionsmittel nicht beliebig steigern, weil die Reaktion durch die erste Beschichtung zum Erliegen kommt, da das Potential aufgebraucht ist. Diese Methode wird z.B. für die Korrosionsbeschichtung von MIDs mit einem Sud-Gold Prozess angewendet. Für die Abscheidung von Kupfer im großen Stil direkt auf elektrisch nichtleitende Polymere ist dieser Vorgang aufgrund des niedrigen Potentials von Kupfer (+0,35 v) nicht möglich. [61] In Tabelle 9 auf der Seite 45 sind die Normalpotentiale der in der MID-Technik eingesetzten Metallbeschichtungen aufgeführt. [64]

Reicht die Potentialdifferenz für eine Metallabscheidung nicht aus, können Katalysatoren eingesetzt werden oder es werden die benötigten freien Elektronen über den Reduktor in das Bad eingebracht. Für die Kupferabscheidung werden dabei als Reduktionsmittel in der Regel Hypophosphit, Formaldehyd, Hydrazin oder Borhydrid verwendet. [61]

Bei fast allen Formen der chemischen Metallabscheidung ist eine Vorbehandlung der Oberfläche notwendig, um ein späteres Anhaften einer Metallschicht am Substrat zu ermöglichen. [65] [66] Diese vollflächige oder selektive Konditionierung der Oberfläche bewirkt weitere grenzflächenenergetische Effekte, die für eine Metallabscheidung erforderlich sind und in den nachfolgenden Kapiteln näher beschrieben werden.

Im Allgemeinen können die Vorgänge der chemischen Reduktion von Metallen auf einer Substratoberfläche anhand zweier Reaktionsgleichungen beschrieben werden. Zum einen handelt es sich um die Oxidation des Reduktionsmittels wie in Bild 17 a) dargestellt, zum anderen um die Reduktion der Metallionen b) in Form einer Entladung. [63]

Das Diagramm c) zeigt das Verhältnis der Zunahme der Schichtdicke in Abhängigkeit der Zeit, welches sich unter Voraussetzung gleichbleibender Bedingungen der chemischen Reaktionen im Elektrolyten, unabhängig von der geometrischen Form weitgehen gleichmäßig-linear verhält. Ausnahmen stellen sehr tiefe Kavitäten dar, die sich vom Elektrolyten ungünstig umspülen lassen und daher schwierig vollständig zu metallisieren sind. Die über die Zeit durchschnittliche abgeschiedene Schichtdicke lässt sich über die Temperatur und den pH-Wert des Elektrolyten stark beeinflussen. Ihre Erhöhung verbessert die Leitfähigkeit des Elektrolyten und die Reaktionsgeschwindigkeit, aber auch die Gefahr der unkontrollierten Abscheidung (Ausfällung des Metalls). [63]



Bild 17: Chemisch-reduktive Abscheidung einer Metallschicht [63]

Das nachfolgende Beispiel zeigt analog zu Bild 17 a und b die allgemeine Redox-Reaktion eines chemisch abgeschiedenen Metalls, die sich aus der Summe der beiden Reaktionsgleichungen ergibt: [63]

a) Beschreibt die Oxidation des Reduktionsmittels und die Abgabe der

Elektronen an die Substratoberfläche:

$$R^{n+} \to R^{(n+Z)+} + z * e^{-}$$
 (3.1)

b) Beschreibt die Reduktion der Metallionen durch Aufnahme der auf der Substratoberfläche befindlichen Elektronen:

$$Me^{z+} + z * e^{-} \to Me \tag{3.2}$$

a + b) Gesamte Redoxreaktion:

$$R^{n+} + Me^{z+} \to R^{(n+z)+} + Me$$
 (3.3)

3.2 Lasergestützte MID-Verfahren mit chemisch-reduktiver und elektrochemischer Metallisierung

\mathbb{R}^{n+}	Reduktionsmittel
$R^{(n+z)+}$	oxidiertes Reduktionsmittel
Z	Anzahl der Elektronen
e	freie Elektronen
Me ^{z+}	Kationen des abzuscheidenden Metalls
Me	elektrisch neutrales Metallatom

Die allgemeine Redox-Reaktion zeigt, dass das Reduktionsmittel Rⁿ⁺ durch Abgabe von Z Elektronen zu R^{(n+z)+} oxidiert wird. Dabei freiwerdende Elektronen e⁻ reduzieren die Kationen Me^{z+} des abzuscheidenden Metalls zu elektrisch neutralen Metallionen (Me), welche sich dann in Form einer metallischen Schicht auf der Substratoberfläche niederschlagen. [63] Beim Elektronenaustausch zwischen dem Reduktionsmittel und den Kationen des abzuscheidenden Metalls spielt das Substrat eine wichtige Rolle. Elektronen des Katalysators werden an die Substratoberfläche abgegeben, die von den anhaftenden Metallionen aufgenommen werden. Das Substrat dient somit als elektronenübertragendes Medium und beeinflusst den Vorgang katalytisch, wodurch eine Abscheidung nur dann möglich wird, wenn eine kontrollierte chemische Reduktion auf der Werkstoffoberfläche stattfindet. [63] [67]

Hat die Bekeimung der Oberfläche erst einmal begonnen, wird sie durch die sich bildende Metallschicht weiter aufrechterhalten. Der Begriff der Autokatalyse bedeutet, dass für den weiteren Schichtaufbau die sich absetzenden Metallionen weiterhin katalytisch bleiben müssen. [63] Der Prozess kann dabei solange laufen, wie das katalytische Gleichgewicht durch die chemische Zusammensetzung im Bad nicht gestört oder verbraucht wird, und sich damit das Fortlaufen des Abscheideprozesses beendet. [61] [63] Gegenüber der elektrolytischen Metallabscheidung bietet die chemische, außenstromlose Metallabscheidung folgende Vorteile: [P2]

- Mit der chemischen Metallisierung lassen sich Nichtleiter selektiv metallisieren. Voraussetzung ist dabei eine Vorbehandlungsmethode, die sich partiell auf das Werkstück anwenden lässt (Laserbearbeitung, Plasmabehandlung, Sandstrahlen oder Einbetten von Additiven). [63]
- Die abgeschiedene Schichtdicke ist im Vergleich zum elektrogalvanischen Verfahren auf der ganzen Oberfläche des Werkstücks relativ Gleichmäßig. Voraussetzung ist hierbei allerdings, dass die Stellen gut vom Elektrolyten umspült werden können.
- Es können sehr feine Schichten von wenigen Mikrometern Schichtdicke abgeschieden werden.

- Die einzelnen Leiterbahnsegmente müssen nicht wie bei der galvanischen Metallisierung an einem Punkt elektrisch zusammengeführt werden.
- Sehr kleine Bauteile lassen sich in rotierenden Trommeln mit einer vergleichsweise sehr hohen Stückzahl (mehrere tausend Teile) in einem Prozessschritt parallel metallisieren.

Die bisher besprochenen Zusammenhänge beziehen sich auf die allgemeine Funktionsweise, anhand der metallische Stoffe abgeschieden werden können. Grundsätzlich sind 32 Metalle aus dem Periodensystem chemisch-reduktiv abscheidbar. Die vorliegende Forschungsarbeit bezieht sich jedoch ausschließlich auf die selektive Abscheidung von Palladium (Pd), Zinn (Sn), Kupfer (Cu), Nickel (Ni), und Gold (Au), wie in Bild 18 dargestellt. Dabei sind die Abscheidevorgänge von Kupfer und Palladium die zentralen Prozessschritte, da Kupfer die eigentliche elektrische Funktionsschicht für das Leiterbahnlayout darstellt und die Kupferabscheidung das Vorhandensein von metallischem Palladium bedingt. [61] [63] [68]

						_			_			_			_			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
P1	1 H																1 H	2 He
P2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
P3	12 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
P4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
P5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
P6	55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 Af	86 Rn
P7	87 Fr	88 Ra	89 Ac	104 Ku														



chemisch-reduktiv abscheidbare Metalle und Metalloide

in der Galvanotechnik breit angewandt eingesetzt im Zusammenhang dieser Forschungsarbeit

wird ständig mitabgeschieden

Bild 18: Chemisch-reduktiv abscheidbare Metalle im Periodensystem [61] [64] [63]

Anzumerken zu den chemisch abgeschiedenen Schichten ist, dass diese Metallschichten in ihren physikalischen Eigenschaften teilweise deutlich von ihren reinen Metallvarianten divergieren. Dies wird beispielsweise durch die Einlagerung von Sauerstoff und anderen Fremdstoffen aus den chemischen Prozessbädern, die sich in die abgeschiedene Gitternetzstruktur der Metalle einlagern, hervorgerufen. Das bewirkt, dass die exakten Eigenschaften wie Bruchdehnung, E-Modul und thermisches Ausdehnungsverhalten annäherungsweise oder bisher nur experimentell im Versuch näher bestimmt werden können. Das genaue Reaktionsverhalten der anorganischen Chemie in den Elektrolyten ist ständigen Schwankungen unterworfen, die die molekulare Struktur der wachsenden Metallschichten beeinflussen, da nicht zu jedem Zeit- und Raum-Punkt in der Großgalvanik (> 1000 Liter) ein einheitliches chemisches Gleichgewicht eingehalten werden kann, was zur Folge hat, dass der jeweilige morphologische Schichtaufbau von Los zu Los Abweichungen aufweist. [54] Selbst in ein und derselben Losgröße, über lange Prozesszeiten hinweg, wie beispielsweise in der chemischen Kupfermetallisierung (2-4 Stunden), ist mit geringen Schwankungen des Metallschichtaufbaus zu rechnen. Bisher ist die Schichtdickenmessung prozessbegleitend nur über das regelmäßige Entnehmen von Testbauteilen möglich, die durch Röntgenfluoreszenz, Schliffbildanalysen oder Laserscanmessmethoden parallel, während des Prozesses außerhalb des Bades durchgeführt wird. [69]

Tabelle 9: Chemische und physikalische Eigenschaften der abzuscheidenden Metalle [61] [70]

	Kupfer	Nickel	Gold	Palladium	Zinn
Kurzz. und Ordnungszahl	(Cu) 29	(Ni) 28	(Au) 79	(Pd) 46	(Sn) 50
Elektronenkonfiguration	2/8/18/1	2/8/16/2	2/8/18/32/18/1	2/8/18/18	2/8/18/18/4
Atomradius [pm]	145	135	174	169	145
Van-der-Waals Radius [pm]	140	163	166	163	217
Atommasse [u]	64	59	197	106	119
Standardpotential [v]	+0,35	-0,23	+1,5	+0,85	-0,14
Elektr. Leitf. [S*m/mm ²]	58,5	13,9	45,5	9,3	8,7
Ausdehnungskoef. [ppm/K]	16,5	13,4	14,2	11	22
E-Modul [N/mm ²]	130.000	214.000	70.000	121.000	40.000
Bruchdehnung	25-40 %	0-30 %	40-50 %	20-30 %	40-50 %

3.2.2 Die außenstromlose Kupferabscheidung

Chemische Kupferbäder sind thermodynamisch instabile Systeme und müssen deshalb durch Hinzufügen von Stabilisatoren, Komplexbildnern und pH-Regulatoren in einem für die prozesssichere Abscheidung geeigneten Gleichgewicht gehalten werden, die das unkontrollierte Ausfallen von Kupferhydroxid verhindern, andererseits den Reaktionsablauf aufrechterhalten und diesen nicht vollständig zum Erliegen bringen.

Kupfer hat ein Standardpotential von +0,35 V. Die Reduktion von zweiwertigem Kupfer zu einwertigem Kupfer erfolgt bei -0,08 V wogegen die Reduktion zu metallischem Kupfer erst bei -0,22 V möglich wird. Damit eine elektrolytische Reaktion stattfindet, muss folglich ein starkes Reduktionsmittel zur Potentialverschiebung angewendet werden. [64] Das Kupfer wird gewöhnlich in Form von Kupfersulfat oder aber direkt als Komplexbildnerverbindung eingesetzt. Als Reduktionsmittel wird eine 37 %-ige wässrige Lösung von Formaldehyd eingesetzt. Alternativ werden Hypophosphit oder Borhydride als Reduktionslösung verwendet. Heutzutage sind alle Kupferelektrolyten alkalisch, dazu dient Natronlauge in einer Konzentration, sodass sich ein Arbeits-pH-Wert zwischen 11,0 und 13.0 einstellt. Als Komplexbildner werden, je nach Hersteller und Typ des Bades, hauptsächlich EDTA (Ethylendiamintetraessigsäure) oder Quadrol (Ethylendiamintetra-2-Hydroxypropan) angewendet. [64] [63]

Die Reaktionsvorgänge in chemischen Kupferelektrolyten sind sehr komplex und durch Neben- und Konkurrenzreaktionen gekennzeichnet, die bis heute Gegenstand aktueller Forschung sind. Die Reaktionsmechanismen verlaufen nicht parallel, sondern vielmehr in mehreren Stufen aufeinander folgend ab. Die Hauptreaktion kann formal wie in (3.4) beschrieben werden: [64] [63] [71]

1. Stufe:

 $CU^{++} + 3 OH^{-} + HCHO \rightarrow CU^{0} + HCOO^{-} + 2H_2O$ (3.4)

CU++	Kupfersulfat
OH-	Hydroxidion
НСНО	Formaldehyd
CUº	Kupferoxid
HCOO ⁻	Methansäure
H₂O	Sauerstoff

2. Stufe:

 $Cu^{2+} + 2e^- \rightarrow Cu$

(3.5)

CU^{2+}	zweiwertiges Kupfer
2e	negativ geladene Elektronen
CU	metallisches Kupfer

In der zweiten Stufe wird durch die Austauschreaktion die Abscheidung von metallischem Kupfer ermöglicht. Sie beschreibt die Umwandlung von Kupferionen in Kupfersulfat, die durch die von der Natronlauge zur Verfügung gestellten Elektronen zu metallischen Kupferatomen abgeschieden werden. Die Abscheidung läuft in Abhängigkeit der Konzentration von alkalischer Natronlauge und des Formaldehyds bei zunehmender Temperatur umso schneller ab. Bei hohen Temperaturen und insbesondere hohen pH-Werten (> 13) steigt zunehmend die Zersetzung des Bades. Bei pH-Werten von kleiner 10,5 kommt die Reaktion praktisch zum Erliegen und stellt somit die Untergrenze der reaktiven Abscheidung dar. [64] [63]

3.2.3 Prozesstechnik der außenstromlosen Kupferabscheidung

Die Steuerung des chemischen Kupfermetallisierungsprozesses erfolgt über das Gleichgewicht der chemischen Komponenten, die über die Betriebszeit nachdosiert werden. Diese Eigenschaft stellt hohe Anforderungen an die Prozessführung und Anlagentechnik. Einer besonderen Beachtung im industriellen Großanlagenbetrieb gilt hierbei die Sicherstellung des präzise geführten Temperaturgleichgewichts im Behälter, der Badumwälzung und der Filtration über die gesamte Prozesszeit. Weitere zentrale Einflussfaktoren sind die Badanalyse und Nachdosierungstechnik, die heutzutage in der Regel über automatische Titriersysteme in Echtzeit gelöst werden. Dabei wird versucht, das ideale Gleichgewicht der sich unterschiedlich schnell verbrauchenden chemischen Komponenten, aus denen das Bad zusammengesetzt ist, über die gesamte Prozesszeit so gleichmäßig wie möglich durch ständige (online) Analyse und Nachdosierung stabil zu halten. Wichtig ist ebenfalls das Einblasen von Luft, da der in der Luft enthaltene Sauerstoff eine stabilisierende Wirkung auf das Bad hat und die Abscheiderate damit verlangsamt. [64] [63] [72]

In der Praxis werden Badgrößen, angefangen von 100 Liter im Kleinserienund prototypischen Bereich und Badvolumen von bis über 3000 Liter im Großserienbereich eingesetzt. Im Labormaßstab hat sich ein typisches Badvolumen von fünf Litern in Laborbechergläsern mit manueller Analyse und Nachdosierung als praktikable Lösung erwiesen, Versuchs- und Musterbauteile einfach zu metallisieren. Allgemein sind industriell eingesetzte Kupferelektrolyten aus den folgenden fünf Komponenten zusammengesetzt: [64] [65]

Komponete	Aufgabe	Verwendete Substanzen
Metallsalz	Metall zur Metallabscheidung	Kupfersulfat, Kupferacetat, Kupfercarbonat, Kupferformiat, Kupfernitrat
Reduktionsmittel	Stellt die zur Reaktion nötigen Elektronen bereit	Formiat, Formaldehyd, Dimethylaminboran, Natriumhypophosphit, Hydrazinsulfat
Komplexbildner	Bindet die Metallionen in einer Komplexverbindung	Kalium-Natrium-Tartrat, Ethylendiamentetraessigsäure (EDTA), Ammoniumhydroxid,
Inhibator	Stabilisiert den Elektrolyten, sodass die Reaktion nicht von selbst stattfindet	Thioglycolsäure, Mercaptobenzthiazol, Thioharnstoff, Cyanid, Vanadiumoxid, Pyridin-3-Sulfonsäure
pH-Regulator	Zur Steuerung der Reaktions- geschwindigkeit in dem Elektrolyten	Salzsäure, Schwefelsäure, Natriumhydroxid, Kaliumhydroxid

Tabelle 10: Komponenten des Kupferelektrolyten [64]

Für den chemischen Metallisierungsprozess wird für diese Forschungsarbeit der Elektrolyt der Firma DOW, (ehem. Rohm&Haas) *Circuposit 4500* verwendet, dessen Zusammensetzung und Prozessparameter in Tabelle 11 zusammengefasst sind. Die Metallisierung findet in einem Labor mit chemischer Grundausstattung, unter einem Abzug in 5 Liter-Bechergläsern auf temperaturgeführten Heizplatten statt.

Tabelle 11: Zusammensetzung und Prozessparameter des chemischen Kupferelektrolyten Circuposit 4500 (DOW Rohm&Haas) [73]

Bezeichnung	Parameter
Ansatz	
VE-Wasser	700 ml/l
Circuposit 4500 M	120 ml/l
Circuposit 4500 A	60 ml/l
Circuposit 4500 B	120 ml/l
Bestandteile	
Kupfergehalt	2,5 g/l
Natriumhydroxid (Katalysator)	9,0 g/l
Formaldehyd (Reduktor)	4.5 g/l
EDTA (Stabilisator)	31,0 g/l
Prozessparameter	
Abscheidegeschwindigkeit	8-10 μm/h
Temperatur	50-55 ℃
Filtration	5-10 μm Filtereinheit
Umwälzung	3-4 mal /h
Dichte	1,14
pH-Wert	< 1
3.2.4 Die elektrochemische Metallabscheidung

Wie bereits erläutert, grenzen sich elektrochemische und chemischreduktive Metallisierungsverfahren durch die Herkunft der für die Metallabscheidung benötigten Elektronen voneinander ab. Bei dem elektrochemischen Verfahren werden die Elektronen über die Katode durch das Anlegen einer externen Spannungsquelle in das Bad eingeleitet. Dabei findet eine Metallauflösung an der Anode statt. Positiv geladene Ionen (Kationen) verlassen hierbei das Metallgitter und wandern in der Elektrolytlösung zur Kathode. Aufgrund dieser anodischen Metallauflösung entsteht ein Überschuss an Metallionen in der Umgebung der Elektrode, wodurch gleichzeitig ein negativer Ladungsüberschuss an der Metallelektrode durch die zurückgelassenen Elektronen eintritt. Als Folge wird eine elektrostatische Anziehungskraft auf die Metallionen in der Lösung ausgeübt, wodurch diese auf der Kathodenseite der Elektrodenoberfläche abgeschieden werden (kathodische Metallabscheidung). Es stellt sich folgender reversibler Gleichgewichtszustand ein: [63]

$$Me \leftrightarrow Me^{z+} + z * e^{-} \tag{3.6}$$

Metallionen
Metallatom
abgegebene Elektronen
freie Elektronen



Bild 19: Aufbau einer Gleichstrom-Elektrolysezelle

Elektrochemische Bäder bzw. galvanische Bäder (Elektrolyte) sind i. d. R. wässrige Lösungen, die die abzuscheidenden Metalle in Form von Ionen enthalten. Daneben besitzen die Elektrolyte verfahrensbedingt einen gewissen Anteil nichtmetallischer Fremdstoffe, insbesondere organische Badzusätze. Während des Abscheidungsprozesses werden diese Stoffe auf der Kathodenoberfläche physikalisch absorbiert und in die abgeschiedene Schicht eingebaut. Art und Menge dieser Fremdstoffe hängen von der Elektrolytzusammensetzung sowie den Abscheidungsbedingungen ab. Durch den Einbau dieser Fremdstoffe werden sowohl Schichteigenschaften sowie die Größe der Korngrenzen, das Glanzverhalten und damit auch die elektrischen und mechanischen Eigenschaften mitbeeinflusst. [64] [65] Kupferelektrolyten können in zwei Hauptgruppen nach der Art des metallischen abgeschiedenen Kupfers unterteilt werden:

Cyanidische Kupferelektrolyte scheiden aus einwertigen Kupferionen ab.

$$Cu^{+} + e^{-} \to Cu \tag{3.7}$$

Sie zeichnen sich durch eine besonders ausgeprägte Makrostreufähigkeit aus, durch die sie einen annähernd einheitlichen Schichtdickenaufbau über die gesamte Oberfläche des Werkstücks erzeugen können. [64] Die schwefelsauren Kupferelektrolyte scheiden zweiwertige Kupferverbindungen ab und können daher bei gleicher Stromdichte in etwa das doppelte Schichtwachstum erzielen. [64]

$$Cu^{2+} + 2e^{-} \to Cu \tag{3.8}$$

Die besondere Eigenschaft dieser Elektrolyte ist die Mikrostreufähigkeit, wodurch sie dafür verwendet werden, um eine gezielte Einebnung zu erreichen, wenn Kavitäten, Poren oder Risse zu beschichten sind. Für die MID-Metallisierung eignen sie sich daher besonders, um die vergleichsweise raue Oberfläche der chemischen Kupfermetallisierung besser einebnen zu können oder um lasergebohrte Durchkontaktierungen gezielter in den Kavitäten zu beschichten bzw. teilweise zu füllen. [64] [63]

3.2.5 Verfahren der elektrochemischen Kupferabscheidung

Die Prozesssteuerung von elektrolytischen (galvanischen) Kupferelektrolyten ist im Vergleich zur chemischen Abscheidung deutlich einfacher, stabiler und mit einem vielfach schnelleren Schichtwachstum zu bewerkstelligen, da die Abscheidung maßgeblich über den angelegten Strom gesteuert wird. Die Balance der chemischen Zusammensetzung und die Temperatur sind dabei vergleichsweise weniger bedeutsame Parameter.

Im Gegensatz zu rein chemischen, scheiden die galvanischen Elektrolyten nicht mit einer gleichmäßigen Schichtdicke ab wie in Bild 20 a) und b) gegenübergestellt. Die Steuerung erfolgt über die Stromdichte, die nach dem Ohmschen Gesetz durch das elektrische Feld bestimmt wird. Die Verteilung des elektrischen Feldes wird von den geometrischen Verhältnissen des Aufbaus in Form und Größe des Elektrolytbehälters, die Form und Anordnung der Anode und Kathode, sowie dem Abstand zwischen den beiden Polen bestimmt. [63] Sie wird in Relation zu der zu beschichtenden Fläche berechnet, wobei als grundsätzliche Orientierung ein Verhältnis von 1A/dm² in der Galvanotechnik herangezogen wird. Hohe Stromdichten erzeugen eine sehr starke und schnelle Beschichtung, die nachteilig allerdings von einem grobkörnigen Metallwachstum mit großen Korngrenzen geprägt sind. Für sehr feine Strukturen wie Leiterbahnen auf 3D-MIDs muss in der praktischen Anwendung das Stromdichtenverhältnis auf 800-1000 mA/dm² korrigiert werden, um eine möglichst hohe Oberflächenqualität mit geringer Rauheit zu erzielen.



Elektrochemische Metallisierung:

Der Schichtaufbau (grün) wird über die Stromdichteverteilung des elektrischen Feldes zwischen Kathode (Werkstück) und Anode beeinflusst.

Chemisch-reduktive Metallisierung:

Der Schichtaufbau (grün) ist grundsätzlich sehr gleichmäßig und wird über die Durchflutbarkeit bzw. Anströmung des Werkstücks mit dem Elektrolyten bestimmt.

Bild 20: Vergleich des charakteristischen Schichtwachstums zwischen dem elektrochemischen und dem chemisch-reduktiven Metallisierungsverfahren. [63]

Die Skizzen in Bild 21 a) und b) veranschaulichen die Konzentration der elektrischen Feldlinien an den Ecken, Kanten und Vertiefungen des Werkstücks (Kathode), die damit eine höhere Stromdichte und Abscheidung verursachen. Daher muss das elektrische Feld in entsprechenden Fällen durch geschickte Anordnung der Anoden für die zu metallisierende Bauteilgeometrie entsprechend angepasst werden. [63] In den hier durchgeführten Metallisierungen im Labormaßstab werden zur Verbesserung der gleichmäßigen Streuung Körbe mit Kupferkugeln, die jeweils einen Durchmesser von 10 mm haben, als Anoden eingesetzt. Eine permanente Werkstück Bewegung mit etwa 1 m/min. ist während der Prozessdauer für ein gleichmäßiges Schichtwachstum unablässig, genauso wie die Einbringung von Sauerstoff und die stetige Umwälzung des Elektrolyten.



Bild 21: Die geometrieabhängige Verteilung der Stromdichte [63]

Auf MID-Trägern sind grundsätzlich mit der galvanischen Abscheidung Schichtdicken zwischen 20-100 µm innerhalb von 30 - 60 Minuten problemlos möglich. Vorteilhaft ist dabei die Prozesszeitverkürzung durch das schnelle Schichtwachstum. Das Verfahren baut auf der chemischen Metallisierung auf, mit der zuvor eine indikative, leitfähige Kupferschicht selektiv aufgebracht wird. Hierfür ist eine Dauer von 20 - 30 Minuten ausreichend. Dabei ergibt sich eine Einsparung der Prozesszeit von 30 - 60 Minuten gegenüber dem reinen chemischen Verfahren.

Das Layout muss eine elektrische Zusammenführung aller Leiterbahnzüge zur Kontaktierung in der Galvanik an einem Punkt vorsehen. Dieser "Kurzschluss" ist bauteilseitig so zu konstruieren, dass ein einfaches Auftrennen oder Unterbrechen nach der Metallisierung durchführbar ist.

In diesem Forschungszusammenhang wird ein schwefelsaurer Kupferelektrolyt (Typ Bez. *Cupracid BL R Atotech*) verwendet, der aus der Leiterplattenfertigung stammt und durch seine Mikrostreufähigkeit gut für die Metallisierung von Durchkontaktierungen geeignet ist. Der Elektrolyt wird bei Raumtemperatur betrieben, wie in Tabelle 12 in der Zusammenfassung der wichtigsten Parameter aufgeführt. [74]

3.2 Lasergestützte MID-Verfahren mit chemisch-reduktiver und elektrochemischer Metallisierung

Bezeichnung	Parameter	
Ansatz		
VE-Wasser	660 ml/l	
Kupfer(II)-Sulfat-5-hydrat		
Schwefelsäure (50%)	328 ml/l	
Cupracid BL Glanzzusatz	o,8 ml/l	
Cupracid BL R Einebner	9 ml/l	
Natriumchlorid		
Cupracid Starter	2 ml/l	
Prozessparameter		
Stromdichte	1-3 A/dm ³	
Spannung	1-6 V	
Abscheidegeschwindigkeit	0,43 μm/min. bei 2 A/dm ²	
Temperatur	20-30 °C	
Filtration	5-10 μm Filtereinheit	
Umwälzung	3-4 */h	
Dichte	1,15	
Werkstückbewegung	0,6-1,2 m/min. (20-50 mm)	
Anoden-/ Kathodenverhältnis	2:1 - 1:1	

Tabelle 12: Zusammensetzung und Prozessparameter des galvanischen Kupferelektrolyten Cupracid BL R (Atotech) [74]

3.2.6 Weitere additive Beschichtungen zur Endveredelung

Die Kupferbeschichtung stellt bei den lasergestützten MID-Verfahren die eigentliche Funktionsschicht dar, die als elektrischer Leiter dient. Dabei ist die chemische Metallisierung die Startbeschichtung, die gegebenenfalls additiv im Anschluss mit einer elektrogalvanischen Beschichtung deutlich verstärkt werden kann. Die Metalloberflächen können aufgrund des Korrosionsverhaltens nicht im offenen Austausch mit der Atmosphäre belassen werden. Aus der Leiterplattentechnik ist der klassische Kupfer-, Nickelund Gold-Schichtaufbau durch seine gute Lötbarkeit und den Schutz vor Korrosion bekannt und wird in der LDS[®]-MID-Technik fast ausschließlich zur Endveredelung eingesetzt. Für das Goldfinish kommen typischerweise chemische Sudgold-Prozesse zum Einsatz, die jedoch nur sehr dünne Metallschichten abscheiden. [8]

Damit eine chemische Diffusion zwischen der Kupfer- und Goldschicht unterbunden werden kann, wird zur galvanischen Trennung eine ebenfalls chemisch-reduktive Nickelschicht mit ca. 3-5 µm Schichtdicke notwendig. Für die chemische Nickelmetallisierung kommt gewöhnlich Natriumhypophosphit als Reduktionsmittel zum Einsatz, dass für die selektive Abscheidung zusätzlich eine Verstärkung des elektrochemischen Potentials benötigt. [61] Dafür werden ebenso nasschemische kolloidale bzw. ionogene Palladiumbadprozesse eingesetzt. Bild 22 zeigt ein Schliffbild mit dem chemisch-reduktiven Schichtaufbau, der bei der lasergestützten MID-Metallisierung etabliert ist.



Bild 22: Schliffbild chemisch-reduktiver MID-Schichtaufbau [8]

Aufgrund der Tatsache, dass in dem Dreischichtverbund Kupfer, Nickel und Gold das Nickel die Schicht mit den geringsten duktilen Fähigkeiten ist, wurde in den letzten Jahren die MID-Serienmetallisierung verstärkt auf höher phosphorhaltige Nickelelektrolyte umgestellt, um eine Metallschicht mit geringerer Dichte zu erhalten. [75]

Die Grundlage des Abscheidemechanismus von Gold, ist die Ionenaustauschreaktion, die über die elektrochemische Spannungsreihe bestimmt wird. Hierbei geht das unedlere Metall in Lösung und das edlere wird aufgrund der Potentialdifferenz auf diesem abgeschieden. [64]

Voraussetzung dafür ist, dass das abzuscheidende Metall ein höheres Potenzial besitzt als das Metall des Grundwerkstoffes. Der Ladungsaustausch wird mit wachsender Schichtdicke zunehmend erschwert. Die Reaktion kommt schließlich zum Erliegen, sobald die Oberfläche des unedleren Grundmaterials mit dem edleren Metall vollständig bedeckt ist. Theoretisch betrachtet ist dabei die erzielbare Schichtdicke nur einen Metallatomradius stark. Praktisch können derartige Schichtdicken zwischen o,oi – 0,5 µm dick werden. [61] [65]

3.2.7 Selektive Aktivierungs- und Metallisierungsmethoden

Die chemischen und elektrochemischen Metallisierungsverfahren haben ihre Ursprünge in der vollflächigen Beschichtungsindustrie in Form von dekorativen oder vor Korrosion schützenden Überzügen von Polymerbauteilen aller Art zur Steigerung der gefühlten Wertigkeit und Widerstandsfähigkeit gegenüber von Umwelteinflüssen. [63] Im Fall von 3D-MIDs bekommen die abgeschiedenen Metallschichten jedoch die funktionstragende Aufgabe elektrische Ströme und Signale zuverlässig zu leiten.

Für die Erstellung eines elektrischen Leiterbahnlayouts ist eine selektive Beschichtung mit dazwischenliegenden isolierenden Freiflächen auf der Oberfläche von Polymeren gewünscht. Das bedeutet in diesem Anwendungsfall, dass durch eine entsprechende Vorkonditionierung das Potential der Substratoberfläche für eine erfolgreiche selektive Metallisierung an exponierten Bereichen erhöht werden muss. Die etablierte Prozesskette des LDS[®]-Verfahrens stellt aktuell am Markt unter den lasergestützten Verfahren, die unter Bedingungen der Serienfertigung erfolgreich erprobte Referenz dar. Anhand der Reduzierung des Additivs durch die Energie des Lasers kann partiell eine autokatalytische Abscheidung von Kupfer erfolgen.

Für die selektive Metallisierung von duroplastischen Substraten, die ohne diese Additive vorliegen, wird die Prozesskette um eine lasergestützte Palladiumaktivierung erweitert. Grundsätzlich soll der bestehende vor- und nachgelagerte Prozessablauf dabei so gering wie möglich verändert werden, um damit eine spätere unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten mögliche Anwendung leichter etablieren zu können.

In Bild 23 sind die Prozessabläufe der lasergestützten chemischen und galvanischen Metallisierung mit den Varianten des LDS^{*}-, LISA- und dem SIPA-Verfahren in einem Blockprozessdiagramm dargestellt. Dabei bieten die Verfahren ohne spezielle Additive in den Werkstoffen den Vorteil das Spektrum der Auswahl von Substratwerkstoffe deutlich zu erweitern.

Die Laserbearbeitung und die Palladiumaktivierung sind dabei die entscheidenden Prozessschritte, die für eine spätere erfolgreiche selektive Beschichtung mit Kupfer verantwortlich sind. Hier muss die Prozessführung in einem zuvor auf das Substrat und die Metallisierung abgestimmten und eng definierten Fenster eingehalten werden können, sodass die Metallisierung auf die gewünschten Stellen begrenzt werden kann.

Die Forschungsarbeit über das LISA-Verfahren von Yang Zhang [49] zeigt, dass ein funktionierender Prozess, der eine lasergestützte, selektive Metallisierung von thermoplastischen Substraten ermöglicht, durch die Verwendung einer komplexen Zinn-Palladiumverbindung durchführbar ist.

3 Metallisierung dreidimensionaler mechatronischer Schaltungsträger



Bild 23: Blockdiagramm der lasergestützten MID-Metallisierung; Die wertschöpfenden Beschichtungsschritte sind farblich hervorgehoben.

Die maßgeblichen Effekte der Palladiumbekeimung sind nach ihrem Erkenntnisstand die Adhäsion, unter Steigerung der Oberflächenenergie, durch die Laserbearbeitung, sowie elektrochemische Interdependenzen zwischen der chemischen Verbindung des Substrats und der Aktivatorlösung. [76] Die damit erzeugte Aktivierung gewährleistet eine vergleichsweise starke Kupfermetallisierung, die mit einer Vielzahl an Substraten gut funktioniert. Für die Metallisierung von sehr feinen Strukturen eignet sich das Verfahren aber bisher nicht, da isolierende Stellen mit geringem Abstand zwischen zwei Leiterbahnen leicht übermetallisiert werden und somit ein Kurzschluss entstehen kann. Das Verfahren ist in ihrer Arbeit bisher nur auf thermoplastischen Polymeren erforscht worden. Eigene Versuche, das Verfahren für die Metallisierung von duroplastischen Materialien zu verwenden zeigen auch hier erfolgreiche Ergebnisse. Grundsätzlich besteht jedoch die Problematik der sehr starken, fast vollflächigen Aktivierung, die mit einem aktiven Spülprozess im Anschluss auf die gewünschten Stellen begrenzt werden muss. Daher eignet sich das Verfahren nur bedingt für sehr geringe Leiterbahnisolationsabstände von kleiner 200 µm. Den LPKF[®]-Aktivator auch in duroplastischen Substraten zu verwenden, ist ein alternativer Ansatz, der zum aktuellen Zeitpunkt noch Gegenstand der Forschung und Entwicklung.

3.3 Zusammenfassung und Handlungsbedarf

Basierend auf ihren vorteilhaften Eigenschaften hinsichtlich der Kombination von mechanischen und elektronischen Funktionen ermöglichen dreidimensionale mechatronische Bauteile, mehr Funktionalität in einem einzelnen Bauteil zu vereinen und somit die Integrationsdichte zu steigern. Im Serieneinsatz erfolgreich haben sich bisher die Verfahren LDS^{*}, Zweikomponentenspritzguss, MIPTEC^{*} und die Heißprägetechnik gezeigt. Weiterhin muss man die Verfahren unterteilen entsprechend ihrer Eignung entweder für die Bild eines komplexen Fine-Pitch-Leiterbahnlayouts oder für die großflächige Beschichtung in der Regel in Verbindung mit einem hohen Materialauftrag.

Die Spritzgussverarbeitung ermöglicht es, einen Schaltungsträger in einer nahezu beliebigen Geometrie zu erstellen, der zusätzliche mechanische Aufgaben erfüllen kann. Weiterhin besteht die Möglichkeit, integrierte Schaltungen und MEMS-Chips im Spritzgussprozess durch das Einbetten und Umspritzen zu integrieren. [77]

Aus den Erkenntnissen der vorangegangenen Marktstudie und der Zusammenfassung des aktuellen technologischen Stands der 3D-MID-Anwendungen, lässt sich ein Handlungsbedarf ableiten der nachfolgend in sechs Punkten beschrieben ist.

A1) Flexibilität und 3D-Packaging-Fähigkeit: Elektronische Anwendungen werden heute und zukünftig in eine wachsende Anzahl alltäglicher Gegenständen integriert. Der zur Verfügung stehende Bauraum ist begrenzt, daraus ergibt sich die Chance, durch die Vereinigung von elektrischen und mechanischen Funktionen in einem einzigen dreidimensionalen Bauteil die Funktionsintegration zu erhöhen.

Zukünftig können beispielweise MEMS-Sensorpackages im Spritzguss in MID-Träger integriert und anschließend durch den Laserprozess und die chemische Metallisierung elektrisch ankontaktiert werden. Die Realisierung eines Variantenmanagements bei mechatronischen Schaltungsträgern ermöglicht es ein und dasselbe Grundbauteil für ähnliche Einsatzzwecke bzw. verschiedenen Modellvarianten häufiger einzusetzen. Dabei können je nach Funktion und Situation unterschiedliche elektrische Schaltbilder aufgebracht werden. Das ermöglicht Produktionsabläufe flexibler zu gestalten und ein bestimmtes Bauteil in größerem Umfang für eine Vielzahl von Anwendungen einzusetzen.

A2) Miniaturisierung durch Reduzierung der Leiterbahnen: Der Trend der Miniaturisierung erfordert eine zunehmende Verringerung der

Baugruppengröße. Daraus folgt eine Verknappung der zur Verfügung stehenden Fläche für Leiterbahnen auf 3D-MIDs, deren Fläche im Vergleich zur Leiterplatte ohnehin begrenzt ist aufgrund der nicht vorhandenen Multilayerfähigkeit. Ein für zukünftige Packaging-Anwendungen geeignetes MID-Verfahren sollte Leiterbahnbreiten von 50 µm und kleiner prozesssicher erzeugen können. Dabei sollte das Verfahren über Potentiale verfügen, um mit der Art des Auftrages der metallischen Funktionsschichten und den verfügbaren Substratmaterialien die Leiterstrukturen zukünftig weiter reduzieren zu können.

A3) Verbesserung der thermomechanischen Anpassung: Einer weiteren Miniaturisierung von LDS[®]-MID-Baugruppen stehen unangepasste CTE-Eigenschaften zwischen den thermoplastischen Substraten und den metallischen Funktionsschichten bei den aktuell kommerziell verfügbaren Substraten im Wege. Leiterbahnbreiten unter 50 µm werden die Situation weiter verschärfen. Alternative Substratmaterialien wie Epoxid-Duroplaste lassen eine geeignetere Angleichung zu und ermöglichen die Kombination mit Halbleiter-Bauelementen.

A4) Erweiterung der Einsatzgrenzen in schwierigen Umweltbedingungen: Mechatronische Schaltungsträger sind neben mechanischen Beanspruchungen weiteren Anforderungen wie extremen Einsatztemperaturen und aggressiven Medien ausgesetzt. Die Einsatzgrenzen dieser Anwendungen werden maßgeblich durch die verwendeten thermoplastischen Substrate, aber auch durch die sehr dünnen chemisch metallisierten Leiterbahnen definiert. Aufgrund des steigenden Einsatzes von Sensorik in mehr alltäglichen Anwendungen nehmen auch die Anforderungen an die Widerstandsfähigkeit von Schaltungsträgern zu. Epoxidduroplaste können durch ihre physikalischen Eigenschaften die Einsatzfähigkeiten von MIDs in harschen Umweltbedingungen erweitern.

A5) Hohe Kosten als Hemmschwelle für MID-Technologie: In vorangegangenen MID-Serienprojekten sind die erhöhten Kosten im Vergleich zur Leiterplatte häufig eine ökonomische Herausforderung. Neben hohen Prozesskosten für die Metallisierung sind die etwa 1,5-fach höheren Substratmaterialpreise bei dem LDS[®]- und Zweikomponentenspritzgussverfahren ein nicht unerheblicher Kostentreiber. Epoxidharzbasierte Duroplaste ohne LDS[®]-Additive kosten mit 8 - 20 € pro Kilogramm häufig weniger als die Hälfte im Vergleich zu den gängigen technischen Thermoplasten PA6, PET/PBT und LCP. [78] A6) Selektive lasergestützte Metallisierung für Duroplaste sind nicht verfügbar: Zum aktuellen Zeitpunkt gibt es keine unter Serienbedingungen erprobten duroplastischen Materialien, die mit einem lasergestützten Verfahren selektiv metallisierbar sind. Zur LDS^{*}-Technologie alternative MID-Verfahren, die ohne spezielle Additive in den Substraten auskommen, sind bisher nicht ausreichend in der Prozesstechnik erforscht oder technologisch nicht fähig, ein sehr feines Leiterbahnlayout darzustellen. In Bild 24 ist der Handlungsbedarf bezüglich Anforderungen und Befähigter schematisch zusammengefasst. Der thermomechanischen Anpassung der kombinierten Materialien kommt eine zentrale Bedeutung zu, sodass deren werkstoffwissenschaftliche Struktur und Charakteristik tiefergehend im folgenden Kapitel 4 "Voruntersuchungen über spritzgegossene mechatronische Schaltungsträger für Fine-Pitch Anwendungen zur Erstellung von Packaging Systemen" untersucht werden.



Bild 24: Handlungsbedarf unterteilt in Anforderungen und Befähiger

Um die Einsatzmöglichkeiten von 3D-MIDs für hochintegrierte Packaging-Anwendungen zu untersuchen, sind zu Beginn Betrachtungen hinsichtlich der Einsatzgrenzen und den damit entstehenden Herausforderungen notwendig. Für eine weitere Integrierung von Funktionen und einer gesteigerten Bauraumreduzierung müssen die Fähigkeiten der Fertigungstechnologien zur Verringerung der Größe des Spritzgussbauteils, der Wandstärken und daraus folgend die Reduzierung der Leiterbahnbreiten untersucht werden. Die vorangegangene Marktstudie hat gezeigt, dass nur Verfahren, die eine entsprechende Miniaturisierung fertigungstechnisch zulassen, für langfristig erfolgreiche Serienanwendungen in Frage kommen.

Metallisierte Kunststoffe sind als Verbundwerkstoffe zu betrachten, deren Eigenschaften sich in vielen Aspekten von denen der reinen Metalle und Polymere unterscheiden. [61]

Die Einsatzgrenzen und die Zuverlässigkeit eines metallisierten Polymerträgers werden durch das Verhalten des durch die Beschichtung geschaffenen Verbunds, aus metallisierter Oberfläche, einschließlich technologisch bedingter Zwischenschichten und dem Polymersubstrat selbst bestimmt. Dieser Materialverbund, auch als Materialmix bezeichnet, ergibt ein komplexes Wechselspiel der Eigenschaften der einzelnen Teile des Verbundes untereinander und muss unter Zuverlässigkeitsaspekten als Ganzes betrachtet werden. [61] Die wesentlichen Eigenschaften der einzelnen Teile des Verbundes sind:

Tabelle 13: Charakterisierung der Metallisierungsschicht und des Substrats

Charakterisierung der Oberfläche (Metallschicht):

- Thermisches Ausdehnungsverhalten der Metallschichten
- Bruchdehnung und Härte
- Korrosionsbeständigkeit gegenüber Feuchtigkeit und aggressiven Medien
- Haftfestigkeit auf dem Substrat
- Oberflächenrauheit in Abhängigkeit der Metallschicht und ihrer Schichtdicke
- Spezifischer Widerstand und Leitfähigkeit des Leitermaterials
- Dimensionierung und Führung des Leiterbahnlayouts

Charakterisierung des Grundmaterials (Kunststoffsubstrat):

- Thermisches Ausdehnungsverhalten
- Wasseraufnahme
- Bruchdehnung und Zähigkeit
- Wärmeformbeständigkeit
- Beständigkeit gegenüber aggressiven Medien
- Isolationsverhalten
- Geometrie des Kunststoffträgers
- Werkzeugtrennkanten und Werkzeugfüllcharakteristik im Spritzgussprozess

Die Qualität eines metallisierten Polymerbauteils kann nicht als ein feststehendes Kriterium angesehen werden. Für jeden spezifischen Anwendungsfall sind die entsprechenden Qualitätsmerkmale und Parameter bei der Entwicklung zu überdenken und neu festzulegen.

4.1 Anforderungen an MIDs mit Fine-Pitch-Funktionsschichten

Die lokale Anpassung der physikalisch-mechanischen Eigenschaften unter steigenden Temperaturdifferenzen verlangt ein besonderes Augenmerk und stellt eine der häufigsten Versagensursachen von mechatronischen Baugruppen dar. [29]

In Bild 25 sind die wichtigsten Anforderungen an die elektrischen Leiterbahnen zusammengefasst. Neben den elektrischen Eigenschaften haben die morphologische und thermische Charakteristik einen erheblichen Einfluss auf die mechanische Zuverlässigkeit von Fine-Pitch-Leiterbahnen. Sie haben in den meisten Fällen einen direkten oder indirekten Einfluss auf verschiedene in der Serienproduktion regelmäßig auftretende Fehlerbilder.



Bild 25: Anforderungen an die metallischen Funktionsschichten [42]

4.1.1 Fehlerbilder bei mechatronisch integrierten Baugruppen

Bei 3D-MIDs treten je nach angewendeten Verfahren eigene in ihrer Häufigkeit individuell gelagerte Fehlerbilder auf. Die nachfolgend beschriebenen Fehlerbilder in Bild 26 sind auf die lasergestützten Verfahren und den Zweikomponentenspritzguss bezogen, da beide Technologien den chemischen Metallisierungsprozess für die Funktionsschichten aus Kupfer, Nickel und Gold verwenden. Die schwerwiegendsten qualitativen Mängel sind dabei die Übermetallisierung und die Entstehung von Mikrorissen. Diese Thematik wird neben der charakteristischen Gitternetzstruktur vor allem durch die schwierige Anpassung der thermomechanischen Interdependenzen zwischen Substrat und den Metallfunktionsschichten hervorgerufen und kann zu elektrischen Ausfällen führen, wenn Leiterbahnen durch Spannungen reißen. Dieser Effekt kann insbesondere durch stark ausgeprägte Fließgrenzen im gespritzten Polymerbauteil verstärkt werden. [79] [80]



Bild 26: Darstellung der Herausforderungen bei 3D-MIDs [8] [80]

4.1.2 Morphologische Eigenschaften der Funktionsschichten

Als Funktionsschichten werden bei MIDs die Schichten bezeichnet, die als elektrischer Leiter beziehungsweise als Korrosionsschutzschicht verwendet werden. Für das Zweikomponentenspritzgießen und das LDS°-Verfahren sind dies typischerweise Kupfer als Leiterbahn und eine Schicht Sudgold als Korrosionsschutz gegen Umwelteinflüsse. Die Nickelbeschichtung dient als Sperrschicht zur galvanischen Trennung zwischen Kupfer und Gold, um eine Diffusion zu unterbinden. Zur Auslegung einer MID-Baugruppe, müssen die physikalischen Materialeigenschaften in Interdependenz mit dem Trägersubstrat betrachtet werden. Dabei gilt es zu beachten, dass die hier eingesetzten metallischen Schichten durch autokatalytische Reduktionsverfahren abgeschieden werden. Die einzige Ausnahme stellt das elektrogalvanische Nachverstärken der Kupferschicht dar. Die physikalischen Eigenschaften wie die Bruchdehnung, E-modul und die thermische Ausdehnung der chemisch abgeschiedenen Metalle weichen teilweise erheblich durch ihren differierenden morphologischen Aufbau von den bekannten Werten der reinen, natürlichen Metallvarianten ab. [61]

In der Tabelle 14 sind die für die Entwicklung von mechatronischen Baugruppen relevanten Kennwerte der hier eingesetzten Leitermaterialen aufgeführt. Dabei ist anzumerken, dass insbesondere für die chemisch abgeschiedenen Metallvarianten bisher nicht alle Werte allgemein spezifiziert sind oder nur in groben Bereichen bekannt, bzw. nur auf spezielle Anwendungsfälle bislang untersucht sind.

Material	Zustand	Elektrische Leitfähigkeit	Thermischer Ausdehnungs- koeffizient	Bruchdehnung	Härte
		(MS/m) in Abh.v.T.	(ppm/K)	(%) in Abh.v.T	(HV) in Abh.v.T
Kupfer	rein	59,9	16,5	30-45	35-110
Kupfer	galvanisch	40-55	5-15	10-30	35-80
Kupfer	chemisch	30-40	-	0,6-3,6	-
Nickel	rein	14,6	13,0	10-35	450-600
Nickel (kristallin)	chemisch	-	13,0	0,5	650-700
Nickel (amorph)	chemisch	-	11,0	~1,5	500-550
Silber	rein	63,0	19,7	20-40	30-90
Silber	chemisch	-	-	-	-
Gold	rein	45,7	14,2	50	20-70
Gold	chemisch	~35,0	-	-	-
Palladium	rein	9,5	11,8	-	40-110

Tabelle 14: Eigenschaften der MID-Funktionsschichten [52] [64] [63] [81] [82] [83]

Durch Veränderungen in den Badzusammensetzungen lassen sich die einzelnen Eigenschaften für bestimmte Anwendungsfälle teilweise begünstigend anpassen. Für die chemische Nickelschicht haben sich hochphosphorhaltige Elektrolyte in der industriellen Praxis durchgesetzt. Durch die Einlagerung der Phosphoratome soll die sonst kristalline Ordnung in eine amorphe Metallstruktur mit geringerer Dichte überführt und die mechanischen Eigenschaften besser angepasst werden. [52]

Dadurch wird versucht, die Rissanfälligkeit der Leiterbahnen, ausgehend von der Nickelschicht, zu reduzieren. Kristallines Nickel ist im MID-Materialverbund das Metall mit der niedrigsten prozentualen Bruchdehnung und steht im Verdacht Spannungsrisse leichter zu induzieren. [52] Kupfer in seiner reinen Form besitzt ein kubisch-flächenzentriertes Kristallgitter. Dabei gilt es zu beachten, dass ideal aufgebaute Kristalle geometrische Fiktionen sind. In der Praxis trifft man Realkristalle an, die mit verschiedenen Defekten behaftet sind. Diese Abweichungen von der regelmäßigen Atomanordnung in einem perfekten Kristallgitter werden als Gitterbaufehler bezeichnet. Man unterscheidet vier Unvollständigkeiten: Leerstellen, Fremdatome, Versetzungen und Korngrenzen. In Bild 27 ist schematisch ein Vergleich zwischen einer Idealkristallstruktur (links) und verschiedenen Gitterbaufehlern (Mitte und rechts) abstrahiert. [63]



Bild 27: Gitterbaufehler chemisch-reduktiv und elektrogalvanisch [63]

Bei elektrogalvanisch und chemisch metallisierten Kupferschichten ist prozessbedingt mit entsprechenden Defekten zu rechnen, die sich lediglich zu einem geringen Grad abstellen lassen. Insbesondere die chemisch abgeschiedenen Kupferschichten weisen einen deutlich abweichenden Gitterstrukturaufbau auf. Hier häufen sich Fehler wie Gitterverzerrungen und Verschiebungen aufgrund des unregelmäßigen, molekularen Wachstums, die während der Abscheidung auftreten und durch Einlagerungen von Sauerstoff sowie weiteren Bestandteilen des Elektrolyten verstärkt werden. Die morphologische Struktur der Metallisierung mit ihrer Ausprägung an Gitterdefekten haben einen weitgehenden Einfluss auf die elektrischen und mechanischen Eigenschaften der Funktionsschichten. In Tabelle 15 sind vereinfacht Gitterbaufehler und ihre Auswirkungen auf die physikalischen Eigenschaften der Kupferschicht zusammengefasst und gegenübergestellt, wie sie auch von Nasser Kanani in Galvanotechnik beschrieben sind. [63]

Tabelle 15: Gitterbaufehler und ihre Auswirkungen auf die elektrischen und mechanischen Eigenschaften der Metalle [63]

Gitterbaufehler	Einfluss auf
Leerstellen, Zwischengitteratome	elektrische und thermische Leitfähigkeit
 Versetzungen 	 mechanische Eigenschaften, Festigkeit, Duktilität und Härte
 Großwinkelkorngrenzen 	Kriechverhalten und Korrosionsbeständigkeit
 Blasen, Poren und Risse 	 mechanische Eigenschaften, Festigkeit und Duktilität

Bei der chemischen Metallisierung beeinflusst die Abscheiderate des Elektrolyten maßgeblich die Qualität des Gitteraufbaues dadurch, dass entweder sehr große oder sehr fein wachsenden Kristalle abgeschieden werden. Eine sehr grob-kristalline Abscheidung kann zu einer gering homogen zusammengewachsenen Kupferschicht mit großen Freiräumen an den Korngrenzen führen. Ein sehr feines Kornwachstum bedingt eine sehr geringe (< 4 μ m/h) durchschnittliche Abscheiderate des Elektrolyten, die eine Erhöhung der Prozesszeit auf 3-4 Stunden erfordert, um die gewünschte Kupferschichtdicke von 8 - 12 μ m aufzubauen. [84]

Im Rasterelektronenmikroskop zeigen die chemisch abgeschiedenen Kupferschichten an ihren Korngrenzen Freiräume zwischen den Kristalliten, deren Gestalt selbst von porös-körnigem und ungleichmäßigem Wachstum geprägt ist. In Bild 28 sind REM-Aufnahmen in der Draufsicht auf metallisierte Kupferschichten abgebildet, die am Lehrstuhl für Keramik (WW3) an der FAU durchgeführt wurden. Für diese Metallisierung wurde eine durchschnittliche Abscheiderate von 5-6 µm/h angewendet. Gut erkennbar sind in der 250-fachen Vergrößerung in der Bild auf der linken Seite die diagonalen Linien der Bahnen, die durch die Laserbearbeitung erzeugt werden und in der Strukturierung der Metallisierung sich widerspiegeln. Hier ist auf dem linken Bild mit 250-facher Vergrößerung veranschaulicht, dass sich durch die Winkelstellung der Bahnen des Lasers, anhand der die Flächengeometrien gefüllt werden (Hatching), die mechanischen Eigenschaften der Metallschichten bei der chemischen Metallisierung mitbeeinflussen lassen.



Chemische Kupferabscheidung; 250-fache Vergrößerung

Chemische Kupferabscheidung; 1000-fache Vergrößerung

Chemische Kupferabscheidung; 5000-fache Vergrößerung

Bild 28: REM-Aufnahmen chemisch Kupfer [Bildquelle: FAU Lehrstuhl WW3]

Im Vergleich dazu zeigt die anschließend durchgeführte galvanische Metallisierung einen deutlich divergierenden strukturellen Schichtaufbau, wie in den REM-Aufnahmen in Bild 29 veranschaulicht. In der 1000- und 5000-

fachen Vergrößerung sind die eng zusammengewachsenen Korngrenzen gut zu erkennen, die auf eine vergleichsweise morphologisch homogen gewachsene Metallstruktur schließen lassen. Dabei werden die sehr rauen, mit Fehlstellen besetzten chemischen Metallstrukturen eingeebnet und die mechanischen sowie elektrischen Eigenschaften deutlich verbessert.



Galvanische Kupferabscheidung 250-fache Vergrößerung

Galvanischen Kupferabscheidung 1000-fache Vergrößerung

Galvanische Kupferabscheidung 5000-fache Vergrößerung

Bild 29: REM-Aufnahme galvanisch Kupfer [FAU-Lehrstuhl WW3]

4.1.3 Mechanische Voruntersuchungen an den metallischen Funktionsschichten

Wie im vorangegangenen Kapitel bereits festgestellt, sind durch die morphologische Charakteristik der chemisch abgeschiedenen Kupferschichten andere mechanische Eigenschaften, insbesondere in Bezug auf die Bruchdehnung in % und das E-Modul in N/mm² zu erwarten, als sie von den reinen Metallvarianten bekannt sind. Diese Überlegungen müssen in die Entscheidungen bei der Auslegung von mechatronischen Schaltungsträgern und deren Leiterbahnen einfließen. Neben den Anforderungen an die Funktionsschichten, Ströme und Signale zuverlässig unter den gegebenen Umweltbedingungen zu übertragen, sind die Haftfestigkeit und die thermische Beständigkeit wichtige Aspekte, die berücksichtigt werden müssen. [85]

Bisher gibt es nur wenige Quellen, die eine detaillierte mechanische Betrachtung von chemisch abgeschiedenen Metallschichten im Vergleich zu reinen Metallen beschreiben. Nasser Kanani konnte in der Schriftenreihe "Kupferschichten" [64] Metallabscheidungen aus verschiedenen chemischen Kupferelektrolyten miteinander in einem Wölbungstest vergleichen. Die Ergebnisse zeigen ein sehr geringes Dehnungsverhalten zwischen o,6 -3,6 %, abhängig von den unterschiedlichen Badzusammensetzungen die untersucht wurden. [64] Die zu betrachtenden Schichten sind, wie in Abschnitt 4.1 (Fehlerbilder) bereits dargestellt, mit 8 - 12 µm Kupferschichtdicke sehr dünn, stark zerklüftet und inhomogen. Infolgedessen ist die Probenerstellung und ihre vom Substrat isolierte Darreichungsform aufwendig und fragil. Nicht alle klassischen mechanischen Messverfahren aus dem Bereich der Metallkunde sind somit für Untersuchungen durchführbar. Die Prüfung im Zugversuch nach DIN EN 10002 ist ein klassisches Standardverfahren, über welches das elastische Verhalten von Werkstoffen durch eine äußere Kraft, die senkrecht zum Probenquerschnitt anliegt, untersucht wird. Auf diese Weise kann das einachsige Auseinanderziehen der Kupferschicht unter thermomechanischen Spannungen durch das Polymersubstrat im MID-Multimaterialverbund simuliert werden. Die Zugproben müssen im Versuch dazu in definierter Form und Abmessung unter der Wirkung der Normalkraft gleichmäßig auf Zug beansprucht werden.

Der Ausgangsquerschnitt der Zugprobe A_o wird mit einer Zugkraft F, der Nennspannung beaufschlagt. Die Zugfestigkeit R_m wird in Kraft pro Fläche (N/mm²) ausgedrückt. [63]

$$R_m = \frac{F}{A_0} \tag{4.1}$$

Die relative Längenänderung der Zugprobe unter Einwirkung der Kraft F ist die Dehnung ε und wird in % angegeben. [63]

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} \tag{4.2}$$

Die hier zu erwartenden Kräfte sind sehr gering und müssen mit einer entsprechend sensitiven Mikromessdose zur Dokumentation der Kraftwerte aufgenommen werden.

Im Rahmen dieser Untersuchungen wird ein Verfahren entwickelt, um die Schichten mit sehr geringem mechanischem Stress vom Substrat zu isolieren. Bei diesem Vorgang wird chemisches Kupfer im Elektrolyten auf ein zuvor nicht aufgerautes Substrat abgeschieden, das zu Beginn mit einer starken Palladium-Zinn Komplexverbindung im Tauchprozess beschichtet wurde. Damit kann eine gute vollflächige chemische Kupferbeschichtung mit einer gesamten Schichtdicke von etwa 12 μ m erzeugt werden, die sich sehr leicht ohne Beschädigung vom Substrat trennen lässt und in geeignete Messstreifen für Zugversuche zerschnitten werden kann. Diese Messtreifen

sind in Bild 30 auf dem linken Foto dargestellt. Am Lehrstuhl für Polymerwerkstoffe (LSP) der FAU konnten damit reproduzierbare Zugversuche mit Hilfe einer Mikromessdose durchgeführt werden.



Probe chemisch Kupfer

Zugversuch mit Mikromessdose

Probe nach Zugversuch

Bild 30: Zugversuche am FAU-Lehrstuhl für Polymerwerkstoffe (LSP)

Die Ergebnisse der Zugversuche an chemisch abgeschiedenen Metallschichten zeigen starke Schwankungen, wie in dem Diagramm in Bild 31 zu erkennen ist. Besonders hervorzuheben sind dabei die Werte der Bruchdehnung, die zwischen 3-5 % liegen, bei einer Spannung zwischen 25-55 N/mm². Im Vergleich dazu hat reines Kupfer eine Bruchdehnung von 30-40 %, abhängig vom Grad der Reinheit und der Temperaturbeaufschlagung. Chemisch abgeschiedenes Kupfer ist wie die Messungen zeigen deutlich spröder und kann hinsichtlich der mechanischen Belastbarkeit bei weitem nicht mit üblichen Kupferwerkstoffen verglichen werden. Dieser Umstand muss bei der Auslegung der Leiterbahnen und des MID-Trägers unbedingt berücksichtigt werden.

Die ermittelten Messwerte der durchgeführten Zug-Versuche werden zur Referenz (REF.) mit den Ergebnissen aus der Literatur von Nasser Kanani "Kupferschichten" [64] verglichen. Seine Messungen wurden ebenfalls mithilfe des Zugversuchs und alternativ mit einem hydraulischen Wölbungstest durchgeführt, wobei er sogar die Duktilität der chemischen Kupferschichten, hergestellt mit verschiedenen Elektrolyten, miteinander vergleichen konnte. In Bild 31 zeigt die Kurve "REF." eine Messung aus dem Wölbungstest, die eine vergleichbare Bruchdehnung (3,6 %) aufweist und somit die hier durchgeführten Messergebnisse bestätigt. Auch seine Messungen weißen starke Schwankungen bei der Messwiederholung auf, welche er ebenfalls auf Schwankungen in den morphologischen Schichteigenschaften der autokatalytischen Kupferabscheidung zurückführt.



Bild 31: Zugversuche chemische und galvanische Kupferschichten [64]

Die Kurve 9 in Bild 31 zeigt die Messwerte aus dem Zugversuch einer additiv, elektrogalvanisch metallisierten Probe. In diesem Fall wurde die ca. 12 µm starke chemische Kupferschicht im Anschluss in einem galvanischen Elektrolyten auf etwa 28 µm Kupfer verstärkt und dann vom Substrat abgelöst. Hier zeigt die Kurve eine deutlich höhere Spannung von 88,2 N/mm² als bei den chemisch metallisierten Proben. Im Vergleich dazu ist die Bruchdehnung mit 8,7 % jedoch lediglich um den doppelten Betrag angestiegen. Daraus lässt sich Schlussfolgern, dass die Nachverstärkung der MID-Leiterbahnen mit elektrogalvanischen Kupfer die Belastbarkeit und Zuverlässigkeit steigern kann. Darüber hinaus bietet das Verfahren in Verbindung mit höheren Schichtdicken von 50-80 µm weiteres Potential, die Einsatzgrenzen von mechatronischen Schaltungsträgern zukünftig zu erweitern.

Zu diesen Untersuchungen ist Anzumerken, dass die Zugversuchsprüfungen nur an chemischen und galvanischen Kupferschichten durchgeführt wurden, und der typische Schichtaufbau der lasergestützten additiven MID-Fertigung in der Regel zusätzlich Gold und Nickel als Korrosionsschutz umfasst. Die Kupferschicht stellt jedoch die eigentliche elektrische Funktionsschicht dar und ihre mechanischen Eigenschaften bestimmen letztlich die Funktionsfähigkeit der gefertigten Leiterbahnen.

4.2 Charakterisierung und Auswahl geeigneter Polymerwerkstoffe

Polymere sind vergleichsweise junge Werkstoffe, die seit ihrer Entdeckung vor etwa 100 Jahren viele Anwendungsbereiche erobert haben und die klassischen Werkstoffe wie Holz, Keramik und Metall zunehmend ersetzen. Durch ihr Anwendungsprofil konnten sie beispielsweise im Automobilbau in der Vergangenheit als ein guter alternativer Werkstoff für Außenspiegel, Stoßfänger, Armaturentafeln, Griffe, Ansaugkrümmer und viele weitere Teile im Motor und Innenraum verwendet werden. [86]

Heute gibt es technische Polymere in einem breiten Auswahlspektrum. Ihre einsatzgerechte Auswahl entscheidet über die Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit der jeweiligen Anwendung. Ihre wirtschaftlichen, physikalischen und elektrischen Eigenschaften müssen zum jeweiligen Anwendungsprofil passen. In Bild 32 sind die bedeutendsten Auswahlkriterien für mechatronische Systeme zusammengefasst. [8] Für das hier beschriebene lasergestützte MID-Verfahren werden im Nachfolgenden die thermomechanischen und morphologischen Eigenschaften näher betrachtet, da sie einen maßgeblichen Einfluss auf Multimaterialverbundsysteme mit Fine-Pitch-Leiterbahnen haben.

Thermomechanische Spannungen sind in der Elektronikbranche seit je her ein ständig präsentes Thema, welches durch die voranschreitende Miniaturisierung an Bedeutung gewinnt und in der Zukunft durch den Einsatz von immer leistungsfähigeren Materialien geprägt sein wird.

Die weit verbreiteten thermoplastischen Polymere werden durch mineralische Additive wie Talkum, Quarze, Glasfasern und mithilfe von nachträglichen Vernetzungsvorgängen durch hoch-energetische Bestrahlung an Ihre Zielbedingungen angepasst.



Bild 32: Auswahlkriterien für technische Polymerwerkstoffe [42]

Polymere lassen sich als Fäden, bestehend aus C-Atomen, die als fortlaufende bzw. verzweigte Ketten miteinander durch einfache Atombindungen verknüpft sind, beschreiben. Sie können anhand ihrer makromolekularen Vernetzungsstruktur in vier Hauptgruppen unterteilt werden, wie in Bild 33 dargestellt. So wird grundsätzlich unterschieden zwischen unvernetzten (Thermoplasten) und vernetzten Duroplasten.

Die unvernetzten Polymere haben die Eigenschaft, dass unter Erwärmung eine plastische Formgebung mehrmals möglich ist. Im Gegensatz dazu haben Duroplaste die Eigenschaft nach einmaliger Vernetzung ihre Form irreversibel bis zur Zersetzungstemperatur beizubehalten.

Thermoplaste werden nach dem Zustand ihrer makromolekularen Ordnung unterschieden, dem amorphen, ungeordneten und dem teilkristallinen, teilweise geordneten und vernetzten Zustand. Dadurch kann der Gebrauchstemperaturbereich, in dem der Kunststoff Formstabil bleibt, gesteigert werden. Elastomere haben die Eigenschaft, dass sich ihre Glasübergangstemperatur unterhalb der Raumtemperatur befindet, wodurch sie in diesem Temperaturbereich ein permanent elastisches Verhalten aufweisen, dass sich unter Zuführung von Wärmeenergie deutlich steigern lässt. [86]

Vergleicht man die Elastizitätsmodul-Temperatur-Kurve von thermoplastischen und duroplastischen Substratmaterialien, wie in Bild 34 aufgetragen, so zeigen sich Unterschiede in den Gebrauchstemperaturbereichen. Duroplaste haben einen sehr geringen bis keinen Glasübergangstemperaturbereich (T_G) und verfügen somit über keinen elastischen Bereich.



Bild 33: Schematische, zweidimensionale Projektion der Polymerhauptgruppen [86] [87]

Ihre thermomechanischen Eigenschaften werden durch Additive wie Quarze, Wollastonite und Glasfasern, ähnlich wie bei den Thermoplasten erheblich gesteigert, wodurch sie über einen weiten Temperaturumfang bis über 200 °C dauerhaft formstabil bleiben können. Der Anwendungstemperaturbereich von Duroplasten mit bis zu 250 °C ist insgesamt höher als bei Thermoplasten. Ab dem Temperaturbereich (T_Z) über 300 °C setzt die chemisch-thermische Zersetzung ein und das Material beginnt zu verdampfen. [87]

Die molekulare Vernetzung der Duroplaste besteht aus hohen Hauptvalenzbindungskräften zwischen den Molekülen. Folglich verfügen Duroplaste über eine hohe Steifigkeit, Festigkeit und Härte, die mit steigendem Vernetzungsgrad zunimmt.

Eine zu starke Vernetzung wirkt sich allerdings nachteilig auf die mechanische Stabilität der Polymere aus, da eine Versprödung einsetzt. [88] Eine plastische Formgebung ist nur mit den noch unvernetzten Vorprodukten möglich.



Bild 34: Elastizitätsmodul-Temperatur-Kurve verschiedener Polymere [87]

4.2.1 Untersuchung des Absorptionsverhaltens der Werkstoffe

Unter Absorption versteht man im physikalischen Zusammenhang die Fähigkeit von Substanzen elektromagnetische Wellen aufzunehmen. Die effektive Wirkleistung zur Bearbeitung von Substraten wird neben der Leistung des Lasers ebenfalls durch deren Materialbeschaffenheit bestimmt. Neben den zusätzlichen Füllstoffen im Material beeinflusst diese individuelle, wellenlängenabhängige Charakteristik die Wirkleistung und somit die Auswahl der geeigneten Laserparameter. Daraus wird gefolgert, dass für jedes Material und bei abweichenden Bearbeitungswinkeln entsprechend angepasste Parameter definiert werden müssen. Strahlung, die auf eine Oberfläche trifft, kann reflektiert, transmittiert oder absorbiert werden und ist immer aus einem Verhältnis dieser drei Eigenschaften zusammengesetzt. [89]

Bild 35 zeigt schematisch das Verhalten zur Einkopplung von Strahlung in einen Körper. Die Formel 4.3 stellt die Beziehung der drei Größen zueinander her. Trifft ein Laserstrahl mit der Leistung P auf eine Werkstückoberfläche, so wird dabei ein Teil reflektiert. In das Werkstück dringt die Differenz aus Leistung und Reflexion ρ ein und wird dort zu einem Teil α r absorbiert und in Wärme umgewandelt. Bei transparenten Substraten wird ein Teil der Leistung transmittiert τ .



Bild 35: Strahlungsverhalten in einem Medium

Formel 4.3 stellt einen Teil der Leistungs- bzw. Energiebilanz der Lasereinkopplung in der Wechselwirkungszone dar. Für die Laserbearbeitung gilt, je mehr Lichtphotonen von dem verwendeten Substrat aufgenommen (absorbiert) werden können, desto mehr Leistung kann in das Material eingetragen werden. Dabei gibt es zwei Grenzfälle. Bei vollständiger Absorption gilt [$\alpha_r = 1$] und bei [$\alpha_r = 0$] kann die ganze Strahlungsenergie durch Reflexion vollständig emittiert werden. Man spricht hierbei von idealen schwarzen bzw. idealen weißen Körpern. [89]

$$\rho + \alpha_r + \tau = 1$$

$$\rho \qquad \text{Reflexionsgrad}$$

$$\alpha_r \qquad \text{Absorptionsfähigkeit}$$

$$\tau \qquad \text{Transmissionsgrad}$$

$$(4.3)$$

Um das Einkopplungsverhalten einer Nd:YAG-Laser-Quelle mit 1064 nm Wellenlänge genauer zu untersuchen, werden am Lehrstuhl für Photonik

(LPT) der FAU die verwendeten duroplastischen Substrate untersucht und mit LDS[®]-zertifizierten (Vectra LCP E840i LDS, PA6T/X Vestamid, PEEK LDS3980) verglichen, wie in Bild 36 dargestellt. Insbesondere Farbgebung, Additive und die Oberflächenrauheit beeinflussen dieses Verhalten maßgeblich. Es zeigt sich, dass die schwarzen, mit Ruß gefärbten Epoxidharzmaterialien (EP3581T-1, EP3581X, EP3582) einen Absorptionsanteil von etwa 95 % aufweisen. Sie können daher sehr gut die eingekoppelte Leistung des Lasers aufnehmen, da der Anteil der Reflexion gering ist.



Bild 36: Diagramm der Absorptionsspektroskopie [FAU-Lehrstuhl LPT]

4.2.2 Thermomechanische Spannungen in den Multimaterialverbunden

Thermomechanische Spannungen werden durch das Einwirken von Temperaturdifferenzen hervorgerufen. Dabei wird zwischen kurzzeitiger Temperatureinwirkung, wie in DIN EN ISO 75-1,-2 (Vorläufer DIN 53461) beschrieben, und der Langzeittemperatureinwirkung, also der Alterung ohne Belastung, die nach DIN EN ISO 2578 mittels Temperaturindizes bestimmt wird. [8]

Für die MID-Technik gibt es bisher keine eigenen Normen zur Bauteilprüfung, daher werden in der Regel die gleichen Verfahren für Alterungstests und Umweltsimulationen angewendet wie in der Leiterplattentechnik. Aktuell befinden sich Untersuchungen zur Entwicklung eigener MID-Normen in der Erforschungs- und Entwicklungsphase durch AiF-Forschungsprojekte, wie beispielsweise "LDS-MIDCHAMP" und Nachfolgeprojekte. [19] Die Charakterisierung von technischen Polymerwerkstoffen wird im Wesentlichen von ihrem thermomechanischen Verhalten, dem Wärmeausdehnungskoeffizienten (CTE, Coefficient of Thermal Expansion), Glasübergangstemperatur, Wasseraufnahme, Schmelzpunkt und dem E-Modul bestimmt.

Besondere Beachtung finden im Hinblick auf die weitere Aufbau- und Verbindungstechnik die CTE's bei der Substratauswahl, die angeben, wie stark sich ein Material bei Erwärmung in alle drei Raumrichtungen ausdehnt.

Die mechanische Fixierung und elektrische Kontaktierung erfolgt bei MIDs wie in der Leiterplattentechnik, wenn möglich über Löten, Leitkleben und Bonden. Speziell der Lötprozess stellt dabei für die polymerbasierten MID-Träger mit ihren metallenen Leiterbahnen die größte thermomechanische Belastung dar. [90]

In der MID-Technik werden je nach Verfahren sehr dünne Metallschichtdicken kleiner 20 µm als elektrische Leiter aufgebracht. Für die Zuverlässigkeit des Schichtverbundes aus Substrat und Leiterbahnstruktur ist es von großer Bedeutung, dass alle verwendeten Materialien einen, wenn möglich, ähnlichen Ausdehnungskoeffizienten besitzen. Da das Ausdehnungsverhalten von Metallen deutlich geringer ist als das von Polymerverbindugen, entstehen leicht thermomechanische Spannungsverhältnisse bei Temperaturwechsel, die zu Rissen und Delaminationen der Leiterbahnen führen können. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von einem Temperatur-"Mismatch". [91] Es wird unterschieden zwischen der Langzeittemperaturwechselbeaufschlagung, die über die gesamte Gebrauchszeit einer Anwendung aufgrund der Umweltbedingungen einwirkt und kurzzeitigen, in der Regel deutlich extremeren Wärmespannungen, die beispielsweise während des Lötprozesses auf Basis bleifreier Zinn-, Silber-, Kupfer-Lote mit hohen Temperaturprofilen auftreten können. [92] [93]

Um Belastungen so gering wie möglich zu halten, wird in der industriellen MID-Serienfertigung häufig auf den schonenderen aber prozesstechnisch aufwendigeren Dampfphasenlötprozess zurückgegriffen, häufig in Verbindung mit teuren, niedrigschmelzenden, bleifreien Zinn, Bismut Loten. In Bild 37 sind die thermischen Ausdehnungskoeffizienten des MID-Multimaterialverbundes und der Aufbau- und Verbindungstechnik schematisch zusammengefasst. [94] [95]



Bild 37: Thermische Ausdehnung (CTE) des MID-Multimaterialverbundes [42] [86] [96] [97]

Im Vergleich zur FR4-Leiterplatte ist die thermomechanische Fehlanpassung bei 3D-MIDs auf den klassischen thermoplastischen LDS[®]-Substraten, charakterisiert durch den CTE-Wert in ppm/K, deutlich größer.

Im Automobilbereich beispielsweise müssen Bauteile im Motorraum in einem Dauergebrauchstemperaturbereich zwischen -40 °C bis +150 °C zuverlässig funktionieren. Die dabei auftretenden starken Zug- und Druckspannungen können in den Metallschichten leichter zu Rissen und damit zur Erhöhung des elektrischen Widerstandes und in Extremfällen zum kompletten Versagen der Leiterbahn führen. In der Vergangenheit haben derartige Ausfälle in der Produktion von MID-Serienbauteilen und ebenfalls im späteren Feldeinsatz zu Rissen in den Kupferleiterbahnen geführt. Definiert ist dieses Verhalten über den thermischen Längenausdehnungskoeffizienten und die Wärmeleitfähigkeit. [8][S9]

Der stoffspezifische Längenausdehnungskoeffizient α eines Festkörpers mit der Länge L ist die Proportionalitätskonstante zwischen der Temperaturänderung Δ T und der relativen Längenänderung. Er beschreibt die relative Längenänderung bei einer Temperaturänderung und hat die Einheit K^{-1} . [98]

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L * \Delta T} \tag{4.4}$$

Die Wärmeleitfähigkeit λ beschreibt, wie schnell die eingebrachte Wärme (z.B. der Lötprozess) durch das Material geleitet werden kann und somit

Schäden durch Spannungsrisse an der Oberfläche vermieden werden können. Sie errechnet sich aus der Dichte ρ , der stoffspezifischen Wärmekapazität cp und der Temperaturleitfähigkeit a, wie in (4.5) dargestellt. Sie findet Beachtung bei Anwendungen, wenn kurzzeitig sehr hohe Temperaturen entstehen und zuverlässig über das Material abgeführt werden müssen. [81] [99] [S8]

$$\lambda = \rho * cp * a \tag{4.5}$$

Wie stark die Differenzen in dem thermischen Ausdehnungsverhalten des MID-Multimaterialverbundes sind, ist in ppm/K, in dem Diagramm in Bild 38 veranschaulicht. In diesem Zusammenhang ist festzustellen, dass das Ausdehnungsverhalten von Polymeren erheblich durch die Einspritzrichtung während der Werkzeugbefüllung im Spritzgussprozess mitbeeinflusst wird.

Technische thermoplastische Polymere werden in ihrer Dimensionsstabilität in der Regel durch Beimengung von Glasfasern- und Mineralfüllstoffen erhöht. Dadurch können die mechanischen Eigenschaften verbessert und die thermische Längenausdehnung reduziert werden. Beim Spritzgießen spritzrichtungsabhängiges Orientierungsprofil entsteht jedoch ein wodurch die Anisotropie und damit die Divergenz der CTE-Werte (parallel/quer) zunehmen. Mit der Reduzierung der Wandstärke und zunehmenden Fließweglängen wird dieser Effekt weiter verstärkt. [86] [100] In den Datenblättern der Hersteller werden daher in der Regel zwei CTE- Werte angegeben. Es gelten quer zur Spritzrichtung größere spezifische Ausdehnungen als parallel. Bei komplex geformten dreidimensionalen Geometrien ergeben sich im Spritzguss in der Regel unzureichend vorher simulierbare und beeinflussbare individuelle Füllcharakteristiken. Sie erzeugen aufgrund der strömungsinduzierten Orientierung der Füllstoffe eine Inhomogenität des thermischen Ausdehnungsverhaltens, die ein schwer berechenbares, sprunghaftes mechanisches Verhalten unter starken Temperaturbelastungen hervorrufen kann. Hinzu kommt, dass bei der MID-Bauteilentwicklung der exakte Verlauf der elektrischen Funktionsschichten häufig nur mit Kompromissen auf die begrenzt zur Verfügung stehende Oberfläche abstimmbar ist. [86] Aus diesen Überlegungen lässt sich schlussfolgern, dass in den meisten Anwendungsfällen mit dem ungünstigsten CTE-Wert des verwendeten Polymertypus kalkuliert werden muss. Flüssigkristalline Polymere (LCP) bieten bei den LDS[®]-Materialien das vergleichsweise geringste Ausdehnungsverhalten im Vergleich zu anderen typischen Substraten wie Polyamiden (PA), Polyethylenterephthalat (PET), Polybutylenterephthalat (PBT) oder gar Polycarbonat-Varianten (PC).

Duroplastische Substrate bieten dagegen deutlich niedrigere CTE-Werte, die in etwa auf dem Niveau von Kupfer liegen, wie das die hier dargestellten Materialien NU6110 mit 17 ppm/K⁻⁶ und das EP3581T-1 mit 18 ppm/K⁻⁶ zeigen. Vorteilhaft ist ebenfalls die nur sehr geringe Abhängigkeit der Spritzorientierung. Die Verwendung von Duromeren auf Epoxidharzbasis als Substratwerkstoff ist in der konventionellen Elektronikproduktion bereits durch die FR4-Leiterplatte als Standard etabliert. Die Leiterplatte besteht aus einer sehr dünnen ca. 35 µm starken Kupferfolie und Glasfasergewebematten, die in Epoxidharz eingebettet werden, womit sich das Gestaltungspotential in der Regel auf ebene planare Geometrien beschränkt. Duroplastische Substrate bieten für MID-Anwendungen, ideal angepasste CTE-Werte, die im Bereich der metallischen Funktionsschichten liegen. Aus thermomechanischer Sicht ist dieser Multimaterialverbund vergleichbar mit der FR4-Leiterplatte, der darüber hinaus durch die Verarbeitung im Spritzgussprozess eine hohe gestalterische Freiheit bietet. [86] [96] [100]



Bild 38: Diagramm über die thermische Ausdehnung und die Wasseraufnahme des MID-Multimaterialverbunds. [8] [101] [102] [103] [104] [105] [106]

Kunststoffe können in ihrer Matrix je nach Typus unterschiedlich stark Wasser einlagern und dadurch Veränderungen der mechanischen und elektrischen Eigenschaften bekommen. Sie neigen beispielsweise zum Aufquellen unter Aufnahme von Feuchtigkeit aus der umgebenden Atmosphäre. [8] Im Vergleich zur thermischen Ausdehnung hat die Migration bei den meisten technischen Polymerwerkstoffen einen untergeordneten Einfluss, jedoch kann auch dieser Effekt unter bestimmten Umwelteinflüssen in Verbindung mit ungünstig ausgewählten Materialien zu einer für elektrische Leiterbahnen kritischen Expansion des Bauteils beitragen, die delaminieren und Risse bilden können. In Bild <u>38</u> ist die Wasseraufnahme aus den Datenblättern der betrachteten Werkstoffe aufgeführt. Die epoxidharzbasierten Materialien zeigen aufgrund ihrer dichteren morphologischen Matrix im Vergleich zu den Thermoplasten eine deutlich geringere Aufnahme von Feuchtigkeit und damit ein geringeres davon abhängiges Expansionsverhalten. [8] [86]

Wie groß die Beträge der temperaturabhängigen Spannungsdifferenzen in MID-Multimaterialverbindungen sein können, zeigen die rechnerischen Ausführungen in dem Diagramm in Bild 39. Es sind die Streckenausdehnung von Kupfer und drei alternativen Substraten (LCP, PA6 und Duroplast) in µm dargestellt. Als Beispiel ist in diesem Zusammenhang die Temperaturbelastung durch einen Lötprozess gewählt worden. Die mechanische Ausdehnung von Kupfer und Duroplast sind in diesem Bereich nur sehr gering temperaturabhängig, wurde aber in der Berechnung entsprechend berücksichtigt. Auch bei den beiden thermoplastischen Substraten ist davon auszugehen, dass das Ausdehnungsverhalten temperaturabhängig ist, es liegen dazu in den jeweiligen Herstellerdatenblättern jedoch nur Mittelwerte vor.

Der Schnittpunkt der Temperaturkurven ist bei 55 °C gewählt, da dies der Temperaturbereich des Kupferelektrolyten ist, in dem die Kupferschicht auf das Substrat aufgebracht wird. Genauer betrachtet befindet sich somit die Kupferschicht je nach eingesetztem Substratmaterial, bei 20 °C Raumtemperatur, bereits unter einer leichten Druckbelastung. Wird nun der Materialverbund von 55 °C "Fügetemperatur" auf 220 °C Löttemperatur aufgeheizt, können sich kurzzeitig zwischen dem hier ausgewählten LCP mit 28 ppm/K spezifischer Ausdehnung (CTE) und Kupfer mit 17 ppm/K (CTE) bereits Differenzen in der Längenänderung von 18,2 µm aufbauen. Im Fall des PA6 können kurzzeitig noch größere Spannungen auftreten, wie die Kurve des Materials mit einem CTE von 48 ppm/K zeigt. Zwischen der Kupferschicht und dem Polyamid-Substrat tritt rechnerisch eine Streckendifferenz von 51,2 µm auf.

In diesem Beispiel schneiden die hier untersuchten epoxidharzbasierten Duroplaste mit einem CTE von 14-19 ppm/K, (zwischen 55 °C und 220 °C) mit einer Streckendifferenz zur Kupferschicht von 4,1 µm deutlich besser ab, da das theoretische Ausdehnungsverhalten nahezu ideal zu der Funktionsschicht aus Kupfer passt. Diese Form der Multimaterialkombination

bietet für 3D-MID-Applikationen ein noch erheblich größeres Potential für extremere thermische Belastungen. Bei vielen epoxidharzbasierten Duroplasten liegt die Zersetzungstemperatur erst bei über 300 °C.

Die hier angestellten Betrachtungen sind theoretischer Natur. Praktisch werden die Einflüsse auf Spannungsdifferenzen zusätzlich durch die Rauheit, Füllstoffverteilung und durch die Qualität der chemischen Metallisierung mitbeeinflusst. [64]

Die morphologische Struktur von chemisch abgeschiedenem Kupfer erscheint aufgrund von Fremdstoffeinlagerungen qualitativ im Vergleich zu reinem Kupfer deutlich poröser. Es ist in diesem Fall von einem abweichenden (höheren) thermischen Ausdehnungsverhalten auszugehen, als das für die Berechnungen hier aufgeführte "ideale" Kupfer. [64] [99]

Genaue Messwerte, die das temperaturabhängige Ausdehnungsverhalten von chemisch abgeschiedenen Kupfer beschreiben, sind bisher nicht bekannt und sind aufgrund der Reaktionsschwankungen des Kupferelektrolyten schwer prozesssicher zu ermitteln. Weiterhin berücksichtigen die angestellten Berechnungen keine Haft- und Gleitreibung zwischen der Kupferschicht und dem Polymersubstrat. Praktisch ist jedoch damit zu rechnen, das die mechanische Haftfestigkeit der Kupferschicht abhängig vom Substrat zwischen 5 N/mm² und 35 N/mm² schwanken, wie eigene Versuche zeigen. [19]



Bild 39: Längenausdehnungen im Multimaterialverbund

Grundsätzlich kann durch diese Untersuchung aufgezeigt werden, dass kritische thermomechanische Spannungen durch den richtigen Einsatz von Substraten deutlich reduziert werden können. Für die weitere Verringerung der Leiterbahndimensionen, speziell in dem Bereich zwischen 80-40 µm und darunter, wird eine bessere CTE-Anpassung zwischen Trägersubstrat und metallischer Funktionsschicht durch alternative Substrate wie beispielsweise Epoxidduroplaste unausweichlich.

4.2.3 Epoxidharzbasierte Duromere als alternative Substratmaterialien

Die gängige Bezeichnung Duroplast für epoxidharzbasierte Duromere ist nicht vollständig korrekt, da im Gegensatz zu dem Endprodukt nur die Vorprodukte plastisch verformbar sind. Im englischsprachigen Raum gibt es den Begriff Thermoset für Duroplaste. Dieser Begriff stellt deutlicher heraus, dass es sich um ein temperaturgesteuerten "Setzvorgang" (bzw. Vernetzungsvorgang) handelt. Präziser wären im deutschen somit die Begriffe "Thermodur" bzw. für die epoxidharzbasierten Varianten "gehärtetes Kunstharz". [93]

Verglichen mit Thermoplasten haben duroplastische Materialien traditionell ihren Einsatzschwerpunkt bei großvolumigen Verbundwerkstoffen für Anwendungen mit hohen thermischen und mechanischen Anforderungsprofilen. Ihr heutiger Marktanteil für filigrane Bauteile ist weit geringer als der von Thermoplasten, die etwa 50 % des Kunststoffmarktes abdecken. [107] Der maßgebliche Grund dafür sind die in der Vergangenheit aufwendige und zeitintensivere Press- und Aushärteprozesse sowie die schlechte Recycelbarkeit. [86]

In der Elektronikindustrie wird das Ummanteln mit Epoxid-Duromeren von integrierten Schaltungen (ICs) und Bauteile für die SMT- und THT-Montage wie beispielsweise für Transistoren seit vielen Jahrzenten erfolgreich angewendet. Typisch für diese Anwendungsfälle ist hierfür das Umspritzen im Transferspritzgussverfahren. [96] [108]

Die Verarbeitung von Epoxid-Duromeren ermöglichen die Herstellung sehr dünnwandiger Bauteile bei gleichzeitig hoher mechanischer Stabilität. Der Herstellungsprozess erfordert jedoch viel Erfahrung, da das Material aufgrund der vergleichsweise langsamen Verarbeitungsgeschwindigkeit zu vorzeitigem Abkühlen neigt, wodurch die Fließbewegung gestört wird und Schwachstellen in der Materialhomogenität entstehen können. [78] [96]

Epoxidharze sind hochwertige Materialien, die in ihrer Grundstruktur als kettenförmige, unvernetzte, zähflüssige oder fest-schmelzbare Verbindun-

gen vorliegen. Erst durch das Hinzufügen von Härtern, die als Reaktionspartner in das Makromolekül eingelagert werden, können diese Prepolymere in einer Kettenreaktion oder Stufenreaktion zu einer harten, engmaschigen Struktur unter Atmosphärendruck polymerisiert werden. Die Reaktion kann bei Raumtemperatur oder unter Warmhärtung zwischen 120 – 180 °C ausgelöst werden. [86] [109]

Anders als die thermoplastischen Substrate bilden Duromere während der Verarbeitung ein engmaschiges, chemisches Raumnetzwerk aus, welches nachträglich irreversibel ist, da sie aus harten, amorphen, unlöslichen Polymerverbindungen bestehen. [86] [110] Die zur Vernetzung notwendige chemische Reaktion ist in erster Linie temperaturabhängig. Zu Beginn ist der Zustand bei niedrigen Temperaturen plastisch und formbar. Wird die Formmasse auf die für die Aktivierungsenergie notwendige Temperatur von etwa 140 °C – 160 °C gehoben, beginnt die Vernetzungsreaktion und der Werkstoff verliert seine Plastizität fast vollständig. [96] [109]

Duromere haben daher keinen, bzw. einen nur sehr gering ausgeprägten Glasübergangstemperaturbereich, da Ihre Makromoleküle über kovalente Bindungen sehr engmaschig vernetzt sind. Werden sie über die Formbeständigkeitstemperatur von 250-280 °C langfristig erhitzt, beginnen sie sich zu zersetzen. Duromere sind vergleichsweise spröde Werkstoffe, die unter mechanischem Stress mit Rissen und Sprüngen reagieren, daher sind sie nur spanhebend zu bearbeiten. [86]

Duroplastische Formmassen können ähnlich wie bei den Thermoplasten mit verschiedensten Füllstoffen wie Glasfasern, Glaskugeln und Mineralstoffen zusätzlich compoundiert werden, um ihre Eigenschaften an die jeweiligen Anforderungen entsprechend anzupassen. Versuche im Rahmen von Forschungsprojekten wie beispielsweise dem AiF-Slimdup, duroplastische Materialien, die mit dem LDS[®]-Additiv compoundiert wurden, zeigten bisher Schwierigkeiten bei der Vernetzung und der schlechten Entformbarkeit aus der Werkzeugform, nach dem Erkalten. [38]

Im Vergleich zu den typischen technischen Thermoplasten (PA, PET/PBT und LCP) zeigen reaktionsharzvernetzte Duromere insgesamt folgende Eigenschaftsunterschiede: [86]

Vorteile:

- Sie besitzen eine vergleichsweise hohe Maßgenauigkeit, Steifigkeit und Härte sowie geringere Verformungsneigung (Kriechen) unter Langzeitbelastung.
- Ihre Einsatzmöglichkeiten bei höheren Temperaturen sind sehr günstig, vor allem im Bereich von 80 bis 200 °C. Vereinzelt gibt es
Sondervarianten die für dauerhafte Einsatztemperaturen bis über 300 °C konzipiert sind.

- Sie besitzen ein geringes Wärmeausdehnungsverhalten (15-25 ppm/K).
- Es sind farblose, durchsichtige Teile aus beispielsweise UP-Harzen herstellbar.
- Sie zeigen keine Spannungsrissbildung und besitzen eine hohe Dichtigkeit für Geruchs- und Geschmacksstoffe.
- Sie haben nach der Aushärtung eine sehr gute Beständigkeit gegenüber Säuren, Laugen, Treibstoffen, Alkoholen, Fetten und Ölen und können nur durch konzentrierte Säuren, Laugen und Halogen-Kohlenwasserstoffe gelöst werden.
- Die Kosten pro Kilogramm Rohgranulat sind häufig um etwa 50 % geringer als bei den üblichen thermoplastischen Polymeren.

Nachteile:

- Pheno- und aminoplastische Verbindungen haben vergleichsweise schlechtere dielektrische Eigenschaften (ε_r), die eine Verwendung für HF-Anwendungen erschweren können.
- Sie sind schlagempfindlicher, außer mit Verstärkungen wie Gewebeeinlagen oder bei entsprechenden Modifizierungen in Verbindung mit Elastomeren.
- Ihr Fertigungsprozess ist zeitaufwendiger als der von Thermoplasten.
- Wenn die Verarbeitung formbedingt nicht im Spritzgießen möglich ist, gibt es Einschränkungen in der dreidimensionalen Designfreiheit (z.B. Hinterschneidungen, aber auch kritische Wandstärken).
- Die Brennbarkeit hängt stark von der chemischen Zusammensetzung ab, d.h. teilweise brennen die EP-Substrate nach Entzündung weiter. Es gibt aber auch Varianten, die sich kaum entzünden lassen.

In Tabelle 16 sind die technisch verwendeten Varianten von Duromeren und einige ihrer wichtigen Eigenschaften zusammengefasst. Besonders hervorzuheben sind die geringe Längenausdehnung und die vergleichsweise hohen Formbeständigkeitstemperaturen für den Dauergebrauchseinsatz.

4 Voruntersuchungen über spritzgegossene mechatronische Schaltungsträger für Fine-Pitch Anwendungen zur Erstellung von Packaging Systemen

Polymertyp Kurz- bezeichnung		Beispielanwendungen	Längenaus- dehnung	Formbeständigkeitstemperatur		
			ISO 11359-1/-2	ISC) 75-2	
				HDT-A	HDT-B	
				(1,8 N/mm ²)	(8,0 N/mm ²)	
			[10^-6/K]	[°C]	[°C]	
Phenolharz	PF	Gleitelemente, Zahnräder, Pumpenelemente	16-24	> 250	160-180	
Epoxidharz	EP	Spulenkörperumspritzung, Leiterplatten	15-25	> 250	170-200	
Ungesättigte Polyesterharze	UP	Elektronikbauteile (Lampengehäuse)	10-20	> 250	> 200	
Diallylphthalat- harz	DAP	Elektronikbauteile, Sensoren	10-20	> 250	> 200	

Tabelle 16: Duromere und ihre Eigenschaften [8] [86] [96] [103]

Die in diesem Forschungszusammenhang eingesetzten Substrate sind in der nachfolgenden Tabelle 17 mit ihren physikalischen Eigenschaften aufgelistet. Sie bestehen aus reaktiven Epoxidharzverbindungen, ähnlich denen, die bei der FR4-Leiterplatte eingesetzt werden.

Die hier betrachteten Substrate sind alle als rieselfähige Ausgangsmaterialien erhältlich und fähig im Spritzgussprozess verarbeitet zu werden. Tabelle 17: Eigenschaften der in diesem Forschungszusammenhang eingesetzten duroplastischen Materialien [102] [103] [111] [112] [113] [114]

Bezeichnung	Material A	Material B	Material C	Material D	Material E	Material F
Bezeichnung Hersteller	NU 6110	NU 505	EP 3581T-1	EP 3581X	EP 3582	EP 3681
Hersteller	Duresco GmbH	Duresco GmbH	Raschig GmbH	Raschig GmbH	Raschig GmbH	Raschig GmbH
Charakteristik	Glasfaser-verstärkte Formmasse für Hochtemperatur- Anwendungen	Mineralisch gefüllte Formmasse mit hoher Temperatur- festigkeit und sehr guter Dimensions- stabilität.	Glasfaser verstärkte, anorganisch Harzgefüllte Epoxyharz- Formmasse	Anorganische Harzgefüllte Epoxidharz- Formmasse	Anorganische Harzgefüllte Glasfaser verstärkte Epoxidharz- Formmasse	Anorganische Harzgefüllte Glasfaser verstärkte Epoxidharz- Formmasse
Anwendungs- gebiete	Umhüllung von elektrischen Bauteilen, z.B. Magnetspulen, Sensoren, Elektronik	Präzisionsteile für die Automobil- und Elektroindustrie sowie für den Maschinenbau	Umhüllung von Sensoren im Automobilbereich	Mediendichte Umhüllung von Sensoren im Automobilbereich	Universell einsetzbare Formmasse	Mediendichte Umhüllung von Sensoren
Verarbeitung	Spritzpressen Spritzgießen	Pressen, Spritzpressen und Spritzgießen	Spritzgießen, Pressen, Spritzpressen	Spritzgießen, Spritzpressen	Spritzgiessen, Pressen, Spritzpressen	Spritzgießen, Spritzpressen
Lagerfähigkeit	6 Monate	12 Monate	6 Monate	6 Monate	6 Monate	6 Monate
Zugfestigkeit	80 MPA	45 MPA	70-90 MPA	60-80 MPA	60-80 MPA	60-80 MPA
E-Modul	18000 MPA	15000 Mpa	15000-18000	10000-12000	15000-18000	12000-14000
Kerbschlag- zähigkeit	3,8 kJ/ m ²	2 kJ/ m²	2,0-4,0 kJ/ m ²	2,0-4,0 kJ/ m ²	4,0-7,0 kJ/ m ²	2,0-4,0 kJ/ m ²
Wasseraufnahme	0,30%	0,05%	<10 , <0,1 %	<10 , <0,1 %	<10 , <0,1 %	<10 , <0,1 %
Lin. Wärme- ausdehnkoeff. [x10^-6]	18 ppm/K	18 ppm/K	15-20 ppm/K	25-30 ppm/K	15-20 ppm/K	15-20 ppm/K
Max. Temperatur (20 000 h)	180 °C	175 °C	180 °C	180 °C	180 °C	180 °C

Duromere haben im Vergleich zu den thermoplastischen Substraten weitere ökonomische Vorteile durch ihre deutlich geringeren Materialpreise. Phenolharzformmassen sind beispielsweise für einen Preis von teilweise unter 5€/kg erhältlich. [8] Die in Tabelle 17 zusammengefassten Materialien sind in einem Preisbereich von 8-20 Euro/kg kommerziell verfügbar. Sie sind aufgrund der geringeren Abhängigkeit von Rohölpreisen geringeren preislichen Schwankungen unterworfen und zählen zu den kostengünstigeren Polymeren. Grundsätzlich ist ihre Bedeutung im technischen Bereich aufgrund ihrer exzellenten mechanischen Eigenschaften nach wie vor sehr hoch. [86]

Ihre Eignung als 3D-MID-Trägersubstrat ist für hohe Zuverlässigkeitsanforderungen unter harten Umweltbedingungen geradezu ideal, da sie in Verbindung mit den metallisierten Leiterbahnen einen mit der FR4-Leiterplatte vergleichbaren CTE-Multimaterialverbund darstellen. 4 Voruntersuchungen über spritzgegossene mechatronische Schaltungsträger für Fine-Pitch Anwendungen zur Erstellung von Packaging Systemen

4.2.4 Die Verarbeitungsverfahren von epoxidharzbasierten Duromeren

Für die Verarbeitung von vernetzten Polymeren gibt es die Methoden des Fließpressens, des Spritzpressens und das Spritzgießen. In Bild 40 sind die Prozessabläufe der drei verschiedenen Formgebungsvarianten schematisch dargestellt.

Bei dem reinen Fließpressen wird die Duroplastformmasse in Pulverform oder in Tablettenform in ein beheiztes Werkzeug eingelegt. Nach dem Schließen des Werkzeuges unter Druck- und Wärmeeinwirkung ist der Hohlraum in der Werkzeugform vollständig ausgefüllt und wird für die Härtung im Anschluss weiterhin einige Sekunden geschlossen gehalten, um eine optimale Vernetzung zu ermöglichen. [86]

SpritzgießenSpritzpressenFließpressen1. Werkzeug schließen bis Prägespalt1. Einlegen der FormmasseImage: Image: Immage: Image: Image:

Bild 40: Die Polymerverarbeitungsprozesse Spritzgießen, Spritzpressen und Fließpressen im Vergleich [109]

Beim Spritzpressen oder auch Transferpressen genannt, wird das Substrat zuerst in einer speziellen Druckkammer unter Druck und Wärmezuführung plastisch erweicht und im zweiten Schritt durch einen oder mehrere Angusskanäle in die Form des beheizten, geschlossenen Werkzeugs gepresst. Während einer definierten Haltezeit findet die Vernetzung und Aushärtung statt. [86]

Das Spritzgießen von Duroplasten erfordert sowohl maschinen- als auch verfahrenstechnische Anpassungen. Ein wesentlicher Unterschied zum Spritzgießen von Thermoplasten liegt in der notwendigen Reaktionsfähigkeit der Epoxidharz-Formmassen, die eine präzise Temperaturführung erfordern. Die Vernetzungsprozesse benötigen in der Regel zusätzliche Wärme, die durch beheizte Werkzeugformen realisiert wird. Gleichzeitig verläuft die Reaktion der Formmasse exotherm und gibt daher zusätzlich Wärme ab. Erschwerend kommt hinzu, dass durch die Vernetzungsreaktion meist eine drastische Viskositätsänderung (Härten) eintritt. [86]

Vergleicht man die Prozesszeit des Spritzgießens mit dem des Spritzpressens, dann fällt zunächst der vergleichsweise lange Prozess der Vernetzung und Aushärtung bei der Duroplastbearbeitung auf. Grundsätzlich liegen beide Prozesse bei etwa 60 Sekunden und haben kürzere Taktzeiten als die Fließpressverarbeitung. Im Anschluss müssen die duroplastischen Bauteile beim Spritzpressen noch entgratet werden, was je nach Ausprägung zusätzliche Arbeitsschritte nach sich zieht und folglich mehr Prozesszeit benötigt.

Das Spritzgießen hat sich für die Herstellung von duroplastischen Bauteilen im Großserienmaßstab aufgrund seiner hohen Gestaltungsfreiheit, hohen Genauigkeit und Wirtschaftlichkeit in den letzten Jahren etablieren können. [8]

4.3 Zusammenfassung der Voruntersuchungen

Durch Miniaturisierung steigt die Integrationsdichte mechatronischer Baugruppen. Die Die 3D-MID-Technik ermöglicht es mechanische und elektrische Funktionen in dreidimensionalen Polymerbauteilen zusammengeführt und Bauraum einzusparen. Daraus ergibt sich das Erfordernis die zur Verfügung stehende Oberfläche effizienter auszunutzen und Leiterbahngeometrien und deren Isolationsabstände zu verringern.

Bisherige 3D-MID-LDS[®] Serienanwendungen zeigten Grenzen in der Zuverlässigkeit aufgrund von Mikrorissen in den Leiterbahnen durch thermomechanischer Spannungen.

Die Voruntersuchungen haben veranschaulicht, dass ein 3D-MID als ein Multimaterialverbund verstanden werden muss, bei dem die Eigenschaften der jeweiligen Materialien aufeinander abgestimmt sein müssen. Die physikalischen Eigenschaften der thermoplastischen Substrate lassen ein größeres Ausdehnungsverhalten erkennen, als die der Kupferschicht. Durch

4 Voruntersuchungen über spritzgegossene mechatronische Schaltungsträger für Fine-Pitch Anwendungen zur Erstellung von Packaging Systemen

die Verringerung der Leiterbahnbreiten werden Effekte wie Risse in Leiterbahnen durch die geringere Gegenkraft deutlich leichter auftreten können. Die FR4-Leiterplatte hat durch die verwendeten Materialien Epoxidharz, Glasfasermatten und Kupferfolie eine bessere thermomechanische Anpassung als bisherige MIDs. Unter diesem Aspekt eignet sie sich aktuell besser für ein Leiterbahnlayout mit Strukturen unter 50 μ m. Epoxidharzbasierte Duroplaste können heute gut im Spritzgussverfahren verarbeitet werden. Sie bieten für 3D-MIDs einen neuen Ansatz, das thermomechanische Verhalten des Multimaterialverbunds entsprechend besser aufeinander anzupassen. Zudem zeigen sie erheblich geringere spritzrichtungsabhängige Divergenzen im Ausdehnungsbereiche mit hohen Temperaturunterschieden eine ideale Ergänzung dar, um die aktuelle unter Zuverlässigkeitsaspekten betrachtete Mindestleiterbahnbreite von 80 μ m für lasergestützte Verfahren auf bis zu 50 μ m und darunter zu reduzieren.

Für das etablierte LDS^{*}-Verfahren stehen bisher keine duroplastischen Substrate mit dem LPKF-Additiv zur Verfügung. Daher muss in diesem Fall ein alternativer lasergestützter Aktivierungsprozess entwickelt werden, der es ermöglicht die etablierten chemischen und galvanischen Kupfermetallisierungsprozesse unverändert weiter zu verwenden.

Vorteilhaft ist dadurch die Unabhängigkeit von LDS^{*}- zertifizierten Substraten, sodass keine Metalloxid-Additive im Rohgranulat notwendig sind, die die Spritzgießverarbeitung und die mechanischen Eigenschaften des Polymerwerkstoffes negativ beeinflussen. Ein weiterer Vorteil ist, dass sich Epoxidharz-Duroplaste in vielen Anwendungsfällen mittlerweile sehr gut durch das Spritzgussverfahren verarbeiten lassen und somit einen vergleichbaren geometrischen Freiraum bieten. [78]

Die schematische Darstellung in Bild 41 fasst die Vorteile der Epoxidharz-Duroplaste zusammen, die jedoch eine weiterentwickelte Tauchbadaktivierung benötigen, die mit dem vorgelagertem Laserprozess und der nachfolgenden chemischen Metallisierung weiterhin kompatibel ist.

Die Voruntersuchungen zeigen darüber hinaus, dass die elektrische und mechanische Charakteristik der chemisch metallisierten Kupferschichten aufgrund ihrer unterschiedlichen molekularen Struktur grundsätzlich schlechtere Eigenschaften hinsichtlich der Leitfähigkeit, Bruchdehnung und der Duktilität erzielen als die bekannten Werte von reinem Kupfermaterial. Dieser Erkenntnis muss bei der Neuentwicklung von MID-Anwendungen mit chemischer und galvanischer Metallisierung Rechnung getragen werden.

Aus den bis zu diesem Punkt angestellten Untersuchungen lässt sich zusammenfassend schlussfolgern, dass die Einsatzgrenzen thermoplastischer Polymerwerkstoffe für MID-Packages mit Fine-Pitch-Leiterbahnstrukturen erreicht sind. Ein Wechsel auf Epoxidharzwerkstoffe, die mit einer präzisen selektiven Aktivierung und Metallisierung zu beschichten sind, zeigt sich als aussichtsreicher Ausweg die mechanische Belastungsfähigkeit in neue Bereiche zu erweitern.



Bild 41: Zusammenfassung über Lösungsansätze und Vorteile

In der traditionellen chemischen Oberflächenveredelungsindustrie werden zu beschichtende Bauteile in der Regel zuvor mit starken Oxidationsmitteln, wie Chromschwefelsäure behandelt, um die Oberflächen durch ein Beizverfahren aufzurauhen und damit zu vergrößern, sodass durch grenzflächenenergetische Effekte in den entstandenen mikroporösen Kavitäten später Metallkeime absorbiert werden können. [65] Gleichzeitig entsteht dabei eine mechanische Verankerung, durch die eine entsprechende Adhäsion der Metallschichten auf der Substratoberfläche erwirkt wird. [49] Dieses Verfahren eignet sich für die vollflächige Metallisierung von elektrisch nichtleitenden Polymerkörpern. Für eine selektive chemische

Beschichtung zur Erstellung von Leiterbahnen müssen jedoch Methoden angewendet werden die Metallisierungsreaktion partiell zu begrenzen.

Neben der maskierten Plasmabehandlung und alternativen Verfahren zur Aufrauhung bietet die Laserbearbeitung eine vergleichsweise gut steuerbare und flexible Methode den Werkstoff selektiv zu bearbeiten, sodass eine optimale Konditionierung der Oberfläche erzielt werden kann.

Grundsätzlich lassen sich die selektiven MID-Laserstrukturierungsverfahren in additive und subtraktive Verfahren einteilen, wie in Bild 42 dargestellt.

Bei den subtraktiven Verfahren wird zunächst die komplette Substratoberfläche chemisch und galvanisch verkupfert. Danach wird ein Ätzresist oder Photoresist aufgebracht, der mit dem Laser selektiv wieder entfernt werden kann. Die Kupferschicht wird nun an den Stellen ohne Resist bis zur Polymeroberfläche abgeätzt, sodass nur noch das Leiterbahnlayout übrigbleibt, welches in Folgeprozessen weiter veredelt werden kann. [42] [115]

Daneben gibt es die semi-additive Laserstrukturierung, bei der die Substratoberfläche vollständig aktiviert und mit einer Kupferschicht durch ein chemisches Kupferbad versehen wird. Ein anschließend vollflächig aufgebrachter Photoresist wird mit Hilfe eines Lasers so strukturiert, dass in einem galvanischen Metallisierungsverfahren nur die freigelegten Bereiche weiter metallisiert werden. Durch das Abätzen des Photoresists und der ersten chemischen Kupferschicht wird ein selektives Leiterbahnlayout generiert.



Bild 42: Übersicht der selektiven lasergestützten Metallisierungsverfahren

Bei den additiven lasergestützten MID-Verfahren wird der Laserprozess dazu verwendet eine selektive Bearbeitung der Oberfläche von Polymeren zu erzeugen, die die anschließende außenstromlose Metallisierung begünstigt. [P₃]

Eine Ausnahme stellt hier das weit verbreitete Laserdirektstrukturierungsverfahren (LDS[®]) von der Firma LPKF dar, bei dem zusätzlich ein in dem Substrat befindliches Additiv (Kupfer-Aluminiumoxid) selektiv durch die einwirkende Energie des Lasers reduziert wird und somit ein elektrochemisches Potential für die chemische Metallisierung entsteht.

Bei der Verwendung von Substraten, die nicht mit einem katalytisch wirkenden Additiv versetzt sind, wird über eine definierte Laseraufrauhung und anschließender katalytischen Tauchbadbeschichtung mit Palladium eine Aktivierung erzeugt. In diesem Zusammenhang hat die Forschungsarbeit von Zhang Yang [49] an der Technischen Universität in Dänemark bereits das LISA-Verfahren (Laser Inducted Selective Activation) für die Metallisierung von Thermoplasten erfolgreich entwickeln können. Das Verfahren basiert auf einer Bekeimung mit Palladium, um im darauffolgenden Prozessschritt Kupfer chemisch-reduktiv abzuscheiden. Grundsätzlich eignet sich dieses Verfahren auch für die selektive Beschichtung von epoxidharzbasierten Duromeren, wie erfolgreich durchgeführte Versuche am Lehrstuhl FAPS belegen. Es zeigt sich allerdings, dass dieses Verfahren nur für sehr großflächige Leiterstrukturen mit Isolationsabständen größer 150 um zwischen den Leiterbahnen einsetzbar ist. [P3] Die Prozesskette wird im Vergleich zum LDS[®]-Verfahren um einen Prozessschritt erweitert, anderseits bietet der Verzicht auf spezielle Additive große Potentiale in einer breiten Auswahl der Substrate und der von bestimmten Herstellern unabhängigen Auswahl der Laserguelle.

Der Vorteil der additiven Verfahren ist, dass die Metallstrukturen von vornherein selektiv aufgebracht werden und nicht wie im Fall der subtraktiven Methoden später durch einen Laser oder chemische Beizprozesse wieder entfernt werden müssen. Überschüssiger Materialeinsatz und aufwendige Wiedergewinnungsverfahren können in diesen Varianten eingespart werden. Die additiven Technologien haben dagegen die schwierige Herausforderung den Metallisierungsprozess möglichst präzise zu begrenzen, sodass in isolierenden Bereichen zwischen leitfähigen Metallstrukturen keine Kurzschlüsse entstehen. [P3] [P4] Im Weiteren werden die Effekte der Laserbearbeitung zur additiven, selektiven Metallisierung näher betrachtet.

5.1 Grundlagen der Laserbearbeitung zur Materialablation für die additive Metallisierung

Bei einem Laser handelt es sich um ein thermisches Strahlwerkzeug, bei dem die für den Bearbeitungsprozess notwendige Energie in Form von Wärme bereitgestellt wird. [89] Klassifiziert nach den Fertigungsverfahren (DIN 8580) wird der Laserprozess hier für das Bohren und Abtragen verwendet, um eine mikroporöse Beschaffenheit der Oberfläche von duroplastischen Substraten zu erzeugen. Dadurch soll die Hydrophilierung gesteigert werden und mehr nasschemischer Aktivator pro Zeiteinheit aufgenommen werden, sodass ein gesteigertes Metallisierungsverhalten in den Folgeprozessen erreicht wird.

Zur Bearbeitung der hier eingesetzten Polymersubstrate eignen sich kurzgepulste Neodym-dotierte Yttrium-Aluminium-Granat-Laser Nd³⁺: Y3Al5O12 (Nd:YAG) deren Strahlenemission im infraroten Wellenbereich (1064 nm) liegt und gut von Polymeren absorbiert werden kann. Mithilfe der fokussierten Laserenergie ist eine außerordentlich flexible Materialbearbeitung möglich, um Strukturen bis in den Mikrometerbereich mit hoher Präzision zu strukturieren. [89]

In realen Bearbeitungsprozessen kann die in das Substrat eingekoppelte Energie des Laserstrahls nicht mit den in der Laserquelle eingestellten Parametern erfolgen. Einflüsse der Prozessumgebung beeinträchtigen die Strahlungsenergie in ihrer Homogenität durch beispielweise Dampf und Materialablation in der unmittelbaren Wechselwirkungszone (WWZ) sowie durch die Vorschubbewegung und den Eintrittswinkel. Haupteinflussfaktoren sind jedoch die Wechselwirkungen mit dem Polymer-Substrat selbst. [116] Die Tabelle rechts in Bild 44 fasst die allgemeinen Einflussparameter für die industrielle Laserbearbeitung von Substratmaterialien zusammen. Die effektive Wirkleistung des Lasers wird bereits in der Anlage durch eine Vielzahl von Parametern beeinflusst.

Das eigentliche energetisch wirkende Werkzeug, der Laserstrahl, wird von der Strahlquelle mit Hilfe von Spiegeln oder flexiblen Glasfasern auf die

Bearbeitungszone geführt. Zur Erzielung einer bestimmten Fokussierung werden optische Linsen am Ende des Strahlenganges eingesetzt, über die die Strahlintensitätsverteilung im Spotdurchmesser beeinflusst wird.

In den meisten Fällen fertigungstechnischer Lasersysteme wird hier versucht die Strahlausbreitung einer rotationssymetrischen Gaußstrahl-Charakteristik anzugleichen. Die Breite des Strahls variiert längs zur Ausbreitungsachse und verjüngt sich in der Taille im Fokuspunkt W_0 mit dem Radius r.

Der minimale Radius des Fokuspunktes berechnet sich wie in (5.1) aus der Wellenlänge λ und der Rayleigh-Länge im Punkt z_0 , wie in Bild 43 grafisch dargestellt. Die Rayleigh-Länge in $\pm z_0$ ist die Position entlang der Z-Achse, vor und hinter der Fokusebene W_0 bei der die Fokusfläche $\sqrt{2} W_0$ entspricht und damit doppelt so groß ist. [117] [89]

$$W_0 = \sqrt{\frac{\lambda z_0}{\pi}} \tag{5.1}$$

Die im Zentrum eines radialen Laserspots eingeschlossene Intensität $I(w_o)$ in der Ebene z=o ergibt durch (5.2). Die Verteilung der Intensität im Spotzentrum hat dabei den maßgeblichen Einfluss hinsichtlich Geometrie und Dynamik auf dem Substrat in der Wechselwirkungszone. [89]

$$I(r,z) = I_0 * \left(\frac{w_0}{W(z)}\right)^2 * e^{-2\frac{r^2}{w^2(z)}}$$
(5.2)

Io	Intensität von r=o bis r=∞
r	Radius zur Strahlachse
W(z)	Gaußscher Radius der Intensität
	(1/e – Abfall)

Die eingeschlossene Intensität im Bereich r=o bis r=W(z) entspricht damit etwa 86,5% der gesamten Intensität I_o des Laserstrahls im Spotdurchmesser wie in Bild 45 auf Seite 91 rechts dargestellt. [89] [118] [119]

5.1 Grundlagen der Laserbearbeitung zur Materialablation für die additive Metallisierung



Bild 43: Der minimale Taillenradius Wo im Gaußstrahl [118] [119]

Die Bearbeitung des Werkstückes findet im Fokuspunkt W_o in der Z-Ebene auf der Höhe Null, ausgehend vom absoluten Maschinenkoordinatensystem statt. Die Bearbeitungsdosis eines gepulsten Lasersystems wird definiert durch die Menge der applizierten Strahlungsenergie in Bezug auf die bestrahlte Fläche über einen bestimmten Zeitraum in J/cm². [89] [119]

$$I = \psi_{avg.} * t * n \tag{5.3}$$

 $\Psi_{avg.}$ beschreibt die mittlere Leistungsdichte in W/cm², *t* die Gesamtbestrahlungszeit und *n* die Anzahl der Pulse in einem Intervall. Die Energiebzw. Energieflussdichte Φ [J/cm²] des gepulsten Laserstrahls wird über die Pulsenergie E_{Puls} und der Querschnittsfläche *A* des Spots definiert wie in Formel 5.4. [120]

$$\Phi = \frac{E_{Puls}}{A} \tag{5.4}$$

Die Intensität Ψ [W/cm²] in der Spotfläche wird durch die Pulsspitzenleistung P_{Puls} in Watt beschrieben. [120]

$$\Psi = \frac{P_{Puls}}{\pi * w_{0^2}} \tag{5.5}$$

Die Leistung eines gepulsten Lasersystems lässt sich mit der Strahlleistung einer Dauerstrichlaseranlage vergleichen, wobei die emittierte Gesamtenergie des Systems erhalten bleibt, wie in Bild 44 links veranschaulicht. [89] Durch Multiplikation der Energie E_{Puls} eines einzelnen Laserpulses mit der Frequenz *f* wird die mittlere Leistung P_{avg} . berechnet. [120]

$$P_{avg.} = E_{Puls} * f \tag{5.6}$$



Bild 44: Schaubild gepulster Laser (links); Laserparameter (rechts) [89] [120]

Im nächsten Schritt werden die Wechselwirkungen der Wärmeenergie des Lasers mit dem Substratmaterial betrachtet. Wie in Bild 45 links dargestellt, stehen der Prozessleistung P_p des Laserstrahls mehrere Größen gegenüber, die die effektive Wirkleistung reduzieren.

Der auf ein Werkstück eintreffende Laserstrahl wird abhängig von dem spezifischen Absorptionsverhalten des Substrates zu einem Teil P_R reflektiert. Die Wärmeabstrahlung P_r und die konvektive Kühlung P_K , durch beispielweise eine Absaugung stellen ebenfalls geringe Verlustleistungen in der Wechselwirkungszone (WWZ) dar. Der größte Wärmeverlust findet jedoch durch das individuelle Einkopplungsverhalten der Laserleistung in dem Substratmaterial selbst statt. [89]

Abhängig von der spezifischen Wärmeleitfähigkeit des verwendeten Substratmaterials kann die zugeführte Strahlungsenergie schneller oder langsamer abgeführt werden und muss für eine Bearbeitung in ihrer Intensität entsprechend individuell angepasst werden. 5.1 Grundlagen der Laserbearbeitung zur Materialablation für die additive Metallisierung



Bild 45: Darstellung der Energiebilanz in der Wechselwirkungszone (links); Verteilung der effektiven Wirkleistung eines optisch fokussierten Laserstrahls (rechts) [89]

Der Zusammenhang zwischen der Prozessleistung P_P des Lasers und den Verlustleistungen kann, wie in Bild 45 (links) schematisch dargestellt, durch die folgende Energiebilanz (5.7) ausgedrückt werden. [89]

$$P_P = P_R + P_k + P_r + P_V (5.7)$$

- *P_P* Prozessleistung
- P_R Reflexion
- *P_K* konvektive Kühlung (Absaugung)
- Pr Wärmeabstrahlung
- *P_V* Wärmeleitfähigkeit bzw. Transmission

Abhängig von der Leistungsdichte [W/cm²] können physikalische Veränderungen an der Oberfläche des Substrates erzielt werden, die in drei Phasen von der Erwärmung über das Schmelzen bis hin zur Materialablation und dem Verdampfen eingeteilt werden. [89] Für den Fall der Ablation gilt, dass der Energieeintrag in Form von Wärme nicht mehr schnell genug durch die Wärmeleitfähigkeit des Substrates abtransportiert wird. Durch den Wärmestau bildet sich in der Wärmeeinflusszone ein extrem hoher Druck, der abhängig vom Substratmaterial zum Auswurf der Schmelze bzw. Verdampfen führt und für den Materialabtrag bzw. zum Laserbohren von kreiszylindrischen Kavitäten eingesetzt werden kann. Für das Erzielen hoher Strukturgenauigkeiten ist für die Prozessführung von Vorteil, wenn

möglichst wenig Schmelze entsteht und das Material wie im Fall der Duromere schnell in die Dampfphase übergeht, sodass ein ungehinderter Abtrag möglich ist. [89][S8]

Durch die optische Fokussierung im Strahlengang des Lasers ist die Leistung in der radialen Spotfläche nicht gleichmäßig verteilt, sondern hat ihre größte Intensität im Zentrum und fällt zu den Rändern hin deutlich ab. Dieses Verhältnis ermöglicht es Strukturbreiten zu strukturieren, die kleiner sind als die des gesamten Durchmessers des Laserstrahls. Praxisuntersuchungen auf den Epoxidharzsubstraten zeigen, dass mit der Laseranlage Fusion 1100 von LPKF mit der optischen Fine-Fokus-Einheit Strukturbreiten von 40 μ m und darunter erstellbar sind, diese jedoch durch die Glasfaserfüllstoffe häufig unregelmäßig in der Randgeometrie ausfallen und die Metallisierungsqualität beeinträchtigen.

5.2 Eingesetzte Laseranlagen zur Oberflächenbearbeitung

Wie bereits in den Voruntersuchungen beobachtet, zeigen sich direkte Korrelationen zwischen der Oberflächenbeschaffenheit (Rauheit), die durch die effektive Wirkleistung des Lasers erzeugt wird, und der Beschichtung des Epoxidharzes mit Palladium und anschließend einer chemischen Kupfermetallisierung. Wie in Tabelle 18 aufgeführt, werden für die Versuche drei verschiedene, nanosekundengepulste, neodym-dotierte Yttrium-Aluminium-Granat (Nd:YAG-Festkörperlaser) verwendet, die eine Strahlung mit 1064 nm Wellenlänge emittieren. [121] Neben den beiden Maschinen von LPKF mit optischen 80 μ m und 50 μ m Strahlfokusierung kommt zum Vergleich auch ein Markierungslaser der Firma Trumpf (LaserMark Compact) mit einem Spotdurchmesser von 60 μ m zum Einsatz, um zu untersuchen, inwiefern die Laserquelle einen entsprechenden Einfluss auf die Ergebnisse hat.

Für die Erzeugung eines Fine-Pitch-MID-Leiterbahnlayouts ist insbesondere der Spotdurchmesser des durch die Fokussierung erzeugten Laserstrahls von besonderer Bedeutung.

Das Diagramm in Bild 46 zeigt die an den beiden Fusion 1100 Lasern abrufbaren Leistungen in Watt in Abhängigkeit der einstellbaren Intensität in Prozent und der möglichen Frequenzkombinationen.

	LPKF Fusion 1100	LPKF Fusion 1100 Fine-focus	Trumpf LaserMark Compact
Тур	Nd: YAG-Laser	Nd: YAG-Laser	Nd: YAG-Laser
Wellenlänge	1064 nm	1064 nm	1064 nm
Leistung	0-17 Watt	0-17 Watt	o-30 Watt
Frequenz	10-200 kHz	10-200 kHz	10-100 kHz
Vorschub	100-4000 mm/s	100-4000 mm/s	500-2000 mm/s
Puls Dauer	20 NS	20 NS	5-200 ns
Spot Ø (Optik)	80 μm	50 µm	60 µm
Pulsenergie	0,2 mJ	n/a	n/a

Tabelle 18: Die eingesetzten Laseranlagen zur Strukturierung [121]

Die Forschungsergebnisse von Bassim Bachy am Lehrstuhl FAPS über "Experimental Investigation, Modeling, Simulation and Optimization of Molded Interconnected Devices Based on Laser Direct Structuring" zeigen, dass die Laserparameter bei Thermoplasten mit einer chemischen Kupfermetallisierung aus drei entscheidenden Parametern zusammengesetzt sind. Seine Simulationsmodelle lassen erkennen, dass die eingestellte Leistung (in Watt) der einflussreichste Parameter ist, über den die effektive Intensität und damit die Erhöhung oder Verringerung der Oberflächenrauheit gesteuert werden kann. [P6]



Bild 46: Leistungsdiagramme des ND: YAG Laser (Fusion 1100)

Die Vorwärtsbewegung des Lasers (in mm/s) bestimmt zusammen mit der Pulsdauer und der Wiederholfrequenz die Anzahl an Energiepulsen, die in Abhängigkeit der Geschwindigkeit auf eine bestimmte Strecke bzw. Fläche aufgebracht werden können. Wird die Vorschubgeschwindigkeit erhöht, können weniger Pulse pro Zeit auf die zurückgelegte Strecke aufgebracht werden, wodurch das Energieniveau bezogen auf die betrachtete Fläche abnimmt. [122]

Die Frequenz (in kHz) bestimmt, wie viele Energiepulse pro Zeiteinheit von der Laserquelle abgegeben werden. Je weiter die Frequenz der Pulsausstöße erhöht wird, desto mehr Energie pro Zeit und Fläche wird in die Oberfläche des Werkstücks eingebracht. Da die Pulsdauer der LPKF-Laseranlagen nicht variabel ist, kann die Frequenz aufgrund der begrenzt emittierbaren Energie der Strahlenquelle nicht beliebig gesteigert werden. Das bedeutet, dass der Laser die maximale Energie bei 100 kHz abgeben kann. Im Frequenzbereich bis 200 kHz wird die Leistung in Watt entsprechend automatisch reduziert wie in Bild 46 grafisch veranschaulicht.

Die nachfolgenden Untersuchungen in Kapitel 5 sollen feststellen, inwiefern die von dem LDS[®]-Verfahren bereits bekannten und hier ebenfalls vermuteten Wirkmechanismen einen vergleichbaren Einfluss auf die Metallisierung haben. Die Forschungsergebnisse von Bassim Bachy beziehen sich auf die Materialien: *TECACOMP[®] PEEK* 3980 LDS und das Vectra LCP E840i LDS. Der Hersteller LPKF gibt analog dazu für jedes LDS[®] zertifizierte Material eine individuelle Einstellung aus diesen drei Parametern an.

5.3 Entwicklung der optimalen Laserparameter zur selektiven Aktivierung von epoxidharzbasierten Duromeren

Polymersubstrate verhalten sich unter der Einwirkung der Energie des Lasers sehr individuell in der resultierenden Charakteristik der Oberflächenbeschaffenheit. Die Vorgänge reichen von Schmelzen über Verbrennen bis Verdampfen. Kunstharze neigen im Vergleich zu Thermoplasten zur direkten Zersetzung durch Verdampfen, da sie keinen oder im Einzelfall nur einen sehr geringen Glasübergangstemperaturbereich besitzen. Wird die Zersetzungstemperatur der Epoxidsubstrate von 300-450°C überschritten findet nur noch ein Materialabtrag statt. Ein Vorteil gegenüber thermoplastischen Polymeren ist, dass bei Duromeren kaum Restmaterial im Bearbeitungsbereich übrigbleibt, abgesehen von Glasfaserfüllstoffen, die nicht mit den hier eingesetzten Laserleistungen zersetzt werden können.

5.3.1 Parameterstudie auf ausgewählten duroplastischen Testsubstraten

Die duroplastischen Substrate sollen durch die Laserbearbeitung optimal auf die nachfolgenden Beschichtungsprozesse vorbereitet werden. Die naßchemische Kupfer-, Nickel- und Goldmetallisierung wird analog wie bei dem LDS[®]-Verfahren verwendet. Daraus lässt sich ableiten, dass die Oberflächenbeschaffenheit der zu metallisierenden Flächen eine vergleichbare Laserkonditionierung bzw. Oberflächenrauheit aufweisen müssen wie die bekannten LDS[®]-Substrate.

Verschiedene wissenschaftliche Veröffentlichungen zur Strukturierung von Epoxidmaterialien mit ND: YAG-Laseranlagen zeigen ein vergleichbares Verhalten bei der Bearbeitung wie das der thermoplastischen Kunststoffe. [123] [38] [124]

Eigene Vorversuche mit Parametervorgaben von LPKF und anschließenden Rauheitsmessungen auf dem Substrat bestätigen diese Erkenntnis. [60]

Zur Optimierung dieser Vorgaben aus Leistung, Vorschub und Frequenz werden durch eine statistische Versuchsplanung die Laserparameter auf das Substrat und die Metallisierung weiter abgestimmt. Andere Parameter wie die Hatchingstrategie, der Abstand der einzelnen Linien des Lasers, die Randgeometrie und der Einfallwinkel bleiben unverändert bzw. werden in Anlehnung an das LDS[®]-Verfahren aus den Richtlinien von LPKF übernommen. Tabelle 19 zeigt die drei Versuchsreihen der Parameterstudie für die Lasereinstellungen.

Nr.	Winkel β	Hatchlinien- überlappung	Vorschub	Leistung	Frequenz
	[°]	[%]	[mm/s]	[Watt]	[kHz]
1	90°	0,3	1000	2	120
2	90°	0,3	1500	3	160
3	90°	0,3	2000	4	200

Tabelle 19: Statistische Versuchsplanung (DOE) der Laserparameter

In Bild 47 ist das Testlayout auf dem Material C (EP3581T-1) dargestellt. Die Fotos in der Mitte und rechts zeigen das Substrat nach dem Laserprozess und nach der chemischen Metallisierung mit Kupfer. Anhand der Graustufen der laserbearbeiteten Stellen lässt sich keine verlässliche Aussage über die ausreichende Bearbeitung und über die Metallisierbarkeit treffen. Quantitative Messmethoden zur Beurteilung stellen die Messung der Rauheit nach dem Laserprozess, ermittelt durch ein Laserscanmikroskop und

die Messung der Kupferschichtdicke nach dem chemischen Metallisierungsprozess dar. Die Schichtdicke des abgeschiedenen Kupfers wird über eine Röntgenfluoreszenzmessung ermittelt, die automatisiert Geometrien anfahren und Flächen ausmessen kann.



Bild 47: DOE-Studie für Laserparameter (Mitte) und Metallisierung (rechts)

Das in Bild 47 gezeigte Testlayout mit den gewählten Laserparametern ist für alle Untersuchungen (Laserparameterstudie, Haftfestigkeit, Benetzungsfähigkeit, Aktivierung und Metallisierbarkeit), die in diesem Forschungszusammenhang durchgeführt werden, gleich definiert und wird für alle Untersuchungen verwendet. Auf diese Weise lässt sich eine durchgängige Vergleichbarkeit der gegenseitigen Wechselwirkungen über alle Prozesse gewährleisten.

5.3.2 Laserstrukturierung für Fine-Pitch-Leiterbahnen

Die verschiedenen Polymerwerkstoffe in der lasergestützten MID-Technik zeigen ein unterschiedliches Verhalten nach der Laserbearbeitung. Die charakteristische Ausprägung der Randgeometrie, des Materialauswurfes und der Eindringtiefe des Laserstrahls entscheiden über die Qualität des Leiterbahnlayouts. Je feiner und enger die Leiterbahnen zueinander sind, desto präziser müssen die Laserparameter auf den Substratwerkstoff abgestimmt werden. In den Darstellungen in Bild 48 ist das typische Strukturierungsprofil einer Laserspur in einem thermoplastischen Werkstück zu erkennen. Abhängig vom Werkstofftyp schmilzt und verdampft ein Teil des

Material durch die Energieeinwirkung. Dabei wird ein Teil in Form heißer Partikel und Staub herausgeschleudert, die sich an den Rändern der Leiterbahn wieder ablegen.



a) Topografie der Strukturierung im 3D-Laserscan

b) Darstellung mit Beschreibung der Strukturierungsdimensionen

Bild 48: Strukturierungsprofil thermoplastischer Polymerwerkstoffe [122] [122]

Die duroplastischen Werkstoffe zeigen nach der Strukturierung einen deutlich geringeren Materialauswurf an den Leiterbahnrändern im Vergleich zu thermoplastischen Kunststoffen. Es ist erkennbar, dass die Leiterbahn im Querschnittprofil fast ausschließlich eine Vertiefung aufweist, da das Epoxid-Polymer durch die Energie des Lasers sofort verdampft und kaum Rückstände hinterlässt.



Zwei laserstrukturierte Leiterbahnen mit teilweise freigelegten Glasfasern

Eine Leiterbahn mit Tiefenprofil im konfokalem 3D-Laserscanning-Mikroskop

Querschnitt der Leiterbahn aus dem Bild rechts nebenan

Bild 49: Tiefenprofil und Vermessung eines Leiterbahnprofils (EP3581T-1)

Die Aufnahmen aus dem Laserscanmikroskop in Bild 49 zeigen die typische Charakteristik der gelaserten Leiterbahn, die alle untersuchten duroplastischen Substrate in ähnlicher Weise erkennen lassen. Diese charakteristische Eigenschaft bewirkt eine präzise ausgeprägte Randgeometrie, die

vorteilhaft für sehr geringe Leiterbahnabstände ist, da die chemische Kupfermetallisierung vornehmlich in der Kavität wächst und nicht über die Ränder hinaus.

In der linken Aufnahme in Bild 49 sind die Glasfasern in den Leiterbahnkavitäten sehr gut zu erkennen. Durch die Laserbearbeitung mit den hier angewendeten Leistungsparametern können diese nicht entfernt bzw. zersetzt werden, sodass sie teilweise freigelegt in der Kavität verbleiben.

Bei dem chemischen Kupferprozess werden die Glasfasern grundsätzlich mitmetallisiert. Proben, die bereits nach nur 15 Minuten Metallisierungsprozess unter dem Mikroskop untersucht werden, zeigen dabei sogar, dass an und in unmittelbarer Nähe der Glasfasern vornehmlich die erste punktuelle Kupferabscheidung stattfindet. Es wird angenommen, dass die Glasfasern aufgrund ihrer Aluminiumsilikat- und Siliziumverbindungen eine exponierte katalytische Wirkung auf das Abscheideverhalten des Elektrolyten an der Oberfläche bewirken und die Metallisierung begünstigen.

Trotzdem stellen Glasfasern in LDS®-MID-Kunststoffen eine strukturelle Ungleichmäßigkeit der metallenen Leiterbahn dar, die an exponierten Stellen zu Beeinträchtigungen der mechanischen und elektrischen Eigenschaften führen. Vergleichende Versuche zur Laserbearbeitung von Duroplasten, Polyamid-, Flüssigkristallinen- und Polycarbonatsubstraten zeigen, dass sich die Polymergruppen in der Charakteristik der laserbearbeiteten Leiterbahnen sehr unterscheiden können. Insbesondere das Schmelzverhalten des Materials bestimmt die Eindringtiefe, die Spurbreite und die Ausprägung des Materialauswurfs bzw. Ablagerung an den Rändern.

Die Versuche belegen, wie in den mikroskopischen Aufnahmen der Bild 50 dargestellt, dass das LCP-LDS[®] Material (Bild links) eine verknäulte mikroporöse Rauheit ausgebildet hat. Dadurch kann eine sehr gute Benetzung in den nasschemischen Bädern erzielt werden und die abgeschiedenen Metallschichten sind ausreichend mit dem Substrat verzahnt, sodass eine zufriedenstellende Haftfestigkeit gegeben ist. Das Höhenprofil zeigt neben den Vertiefungen auch topografische Erhöhungen in der Z-Achse von herausgeschleudertem und wieder verfestigtem Material.

Im Vergleich dazu zeigt die Aufnahme des PC-ABS Materials (rechts) ein Auf- und Umschmelzen, welches stark in Z-Richtung zugenommen hat. Es sind nur wenige und deutlich größere Kavitäten vorhanden. Das Material ist aufgrund des großen Glasübergangsbereichs nur aufgequollen und die Schmelze hat sich nach der Abkühlung wieder verfestigt. Metallisierungsversuche mit dem SIPA-Verfahren konnten hier auch über einen längeren Zeitraum nur eine sehr geringe Kupferabscheidung erzeugen. Durch das Umschmelzen werden kaum mikroporöse Kavitäten ausgebildet; die Mate-

rialoberfläche ist nach dem Erstarren wieder verschlossen, sodass der flüssige Palladiumaktivator in nur unzureichendem Maße von dem Substrat aufgenommen werden kann.

Die beiden duroplastischen Materialien B und C zeigen hauptsächlich Vertiefungen, die sich unterhalb der Oberflächenebene befinden. Insbesondere zeigt das Substrat B keinen Materialauswurf an den Rändern und eine feinzerklüftete Kavität, die eine gute Flüssigkeitsaufnahme ermöglicht. Für eine Fine-Pitch-Metallisierung ist diese Charakteristik als nahezu ideal zu betrachten, da die Gefahr für Kurzschlüsse zwischen Leiterbahnen durch unerwünschte Übermetallisierung deutlich verringert ist.



Substrat: Liquid-Crystal-Polymer (LCP) Vectra E840i LDS Oben: Aufnahme im Lichtmikroskop einer laserstrukturierten Leiterbahn mit mikroporöser Struktur Unten: Aufnahme im Laserscanmikroscop mit Höhenprofil

Substrat: Duroplast EP 358 1-1 Oben: Aufnahme im Lichtmikroskop einer laserstrukturierten Leiterbahn mit mikroporöser Struktur Unten: Aufnahme im Laserscanmikroscop mit Höhenprofil; gut zu erkennen sind die Vertiefungen

Substrat: Duroplast NU 505 Oben: Aufnahme im Lichtmikroskop einer laserstrukturierten Leiterbahn mit mikroporöser Struktur Unten: Aufnahme im Laserscanmikroscop mit Höhenprofil; gut zu erkennen sind die Vertiefungen

Substrat: PC-ABS (nicht LDS) Oben: Aufnahme im Lichtmikroskop einer laserstrukturierten Leiterbahn mit aufgeschmolzener Struktur Unten: Aufnahme im Laserscanmikroscop mit Höhenprofil; keine gute mikroporöse Struktur

Bild 50: Die Ausprägung der mikroporösen Struktur durch die Laserbearbeitung ist für die Palladiumbekeimung und Kupfermetallisierung entscheidend. Beide Bildreihen zeigen Aufnahmen nach der Laserbearbeitung ohne Kupfermetallisierung.

Anhand von mikroskopischen Aufnahmen nach der Laserbearbeitung und nach der anschließenden Metallisierung lassen sich substratabhängige Charakteristika hinsichtlich des Leiterbahnprofils voneinander abgrenzen. Wie in Bild 51 dargestellt, folgt die chemische Kupfermetallisierung dem topografischen Profil der laserbearbeiteten Oberfläche. Eine Einebnung findet nur in einem begrenzten Umfang statt. Bei dem LDS[®]-Verfahren erfolgt die Metallisierung auf allen Materialbereichen, auf denen das Metalloxidadditiv durch die Energie des Lasers aktiviert werden konnte. Daher

neigen Partikel, die in heißem Zustand bei der Strukturierung aus den Kavitäten geschleudert werden und sich an anderen Stellen rund um die Bearbeitungszone ablagern, ebenfalls zur Metallisierung. Zur Reduzierung dieses Effektes verfügen die LPKF[®]-Laseranlagen über eine Absaugung in unmittelbarer Nähe der Wechselwirkungszone (WWZ).

Prinzipiell erfolgt das Schichtwachstum des chemischen Kupfer-Metallisierungsprozesses in allen Raumrichtungen gleichmäßig. Das bedeutet, dass das Leiterbahnwachstum an der Oberfläche auch in die horizontale Breite erfolgt, wenn Kavitäten in nur geringer Tiefe vorhanden sind. Die Bildung der Kavitäten bei den duroplastischen Substraten ist daher von Vorteil, insofern als eine Metallisierung in die Breite erst nach der Füllung der Kavität erfolgen kann.



Bild 51: Materialabhängige Charakteristika der Leiterbahnprofile im Querschnitt

Die Laserversuche auf den Duroplasten und dem PC-ABS in Verbindung mit der SIPA-Aktivierung und der chemischen Kupfermetallisierung zeigen einen direkten Zusammenhang zwischen der Oberflächencharakteristik nach der Laserbearbeitung sowie der Metallisierung und damit eine Eignung für ein feines Leiterbahnlayout. Während sich die Duroplaste aufgrund der Kavitätenbildung gut metallisieren lassen, funktioniert das Verfahren auf dem PC-ABS praktisch nicht. [P3]

Daraus lässt sich die wissenschaftliche These ableiten, dass für eine nasschemische Metallbeschichtung die Oberfläche durch die Laserenergie so bearbeitet werden muss, dass eine ausreichende Wasseraufnahme möglich ist. Dieser Zusammenhang wird durch die Untersuchung der Benetzungsfähigkeit (Kontaktwinkelmessung) in Abhängigkeit von der durch den Laser bewirkten mikroporösen Rauheit weiter untersucht.

In Bild 52 sind REM-Aufnahmen der Randgeometrie von Flächen nach dem Laserprozess und nach der galvanischen Metallisierung dargestellt. Durch den Laserprozess lässt sich das Leiterbahnlayout auf Duroplasten mit einer

sehr hohen Präzision, speziell im Randbereich, aufbringen. Die durch den Laser freigelegten Glasfaserobjekte führen vereinzelt jedoch zu einer Auswachsung des Kupfers im Randbereich. Bei den lasergestützten Verfahren mit chemischer Metallisierung ist in Abhängigkeit des Substrates daher mit Randunschärfen in einem Bereich von 10 - 20 μ m zu rechnen. Für eine zukünftige weitere Präzisierung, sind daher feinere Füllstoffe in den Substratematerialien erforderlich.



Bild 52: Ausprägung der Randgeometrie nach dem Laserprozess und nach der Metallisierung (REM-Aufnahmen am Lehrstuhl WW3 der FAU)

5.3.3 Modell der Oberflächenrauheit in Abhängigkeit der Laserparameter

Die Definierung der optimalen Oberflächenrauheit ist insofern von Bedeutung, als der Zusammenhang zwischen Oberflächenstruktur, Wasseraufnahme, Palladiumbekeimung und chemischer Kupfermetallisierung als eine Gesetzmäßigkeit erforscht werden kann. Sie setzt sich zusammen aus der Oberflächen Welligkeit, Verwölbung mit langen Amplituden und dem primären Rauheitsprofil. Die Normen DIN EN ISO 4287 und analog die JIS B-o601 definieren verschiedene Methoden zur Vermessung der Beschaffenheit von technischen Oberflächen. In breiter Anwendung befinden sich in der Forschung und Industrie die Angabe der gemittelten Rauhtiefe (Rz) und der arithmetische Mittelwert (Ra). [125] Definiert wird die gemittelte Rautiefe (Rz) über die Messung der maximalen Peakhöhe (Rp) und der maximalen Taltiefe (Rv) über eine bestimmte Messstrecke wie in Formel 5.8 beschrieben und in Bild 53 rechts oben dargestellt. Da bei diesem Messverfahren Maximalwerte verwendet werden, kann das Ergebnis signifikant

durch Spitzen und Riefen, sowie Kontaminierungen beeinflusst werden. [126]

$$\frac{1}{5}\sum_{i=1}^{5}R_{z}(i) = R_{z}$$
(5.8)

 R_z Gemittelte Rautiefe

Die Angabe des Mittenrauwertes Ra wie in Formel 5.9 und Bild 53 dargestellt gibt den arithmetischen Mittelwert aller Abweichungen des Rauheitsprofils von der mittleren Linie entlang einer definierten Bezugsstrecke an. Die Parameter werden hierbei nicht wesentlich durch Kratzer und Verschmutzungen beeinflusst, wodurch die Streuung gering ist und stabile Ergebnisse geliefert werden. [125] [126]

$$\frac{1}{Lr} \int_0^{Lr} |z(x)| \Delta x = R_a \tag{5.9}$$

- *R_a* Mittenrauwert
- *Lr* Messstrecke
- Δx Mittlere Tiefe über gesamte Messtrecke
- *x* Abstand der gemessenen Tiefe zur Mittellinie



Bild 53 Messung des Oberflächenrauheit [126]

Zur Messung der Rauheit in dieser Forschungsarbeit wird ein optisches konfokales 3D-Laserscanmikroskop verwendet und jedes strukturierte Feld auf dem Testträger einzeln vermessen.

Anhand der gemessenen Rauheit auf der Oberfläche wird ein dreidimensionales Flächenmodell erstellen, welches die Zusammenhänge zwischen Laserparameter (Leistung, Vorschub, Frequenz) und der erzeugten Strukturierung aufzeigt. Das 3D-Flächenmodell, dargestellt in Bild 56, veranschaulicht dass ab einer eingestellten Leistung von 3 Watt, einem Vorschub von kleiner 1400 mm/s und einer Frequenz kleiner 160 kHz die Rauheit signifikant ansteigt. Eine Sättigung der Rauheitszunahme unter Intensivierung der Wirkleistung tritt ab einer sehr niedrigen Frequenz und Vorschub bei 4 Watt Leistung ein.

5.3.4 Zielkonflikte zwischen der Rauheit, der Haftfestigkeit und der Oberflächenqualität

Für die Weiterverarbeitung in der Aufbau- und Verbindungstechnik Dispensen, Bestücken und Löten sind eine möglichst hohe und gleichmäßige Oberflächenqualität und Beschaffenheit notwendig. Aus dem Bereich der Leiterplatte sind Rauheitswerte von 0,1-2 μ m (Ra) eine gängige Forderung für Oberflächen von Leiterbahnen. [127] In der MID-Technik müssen daher vergleichbare Werte gewährleistet werden können. Das stellt laserbasierte, auf spezifische Rauheit ausgelegte, chemische Metallisierungsprozesse vor entsprechende Herausforderungen. Es ergibt sich folgender Zielkonflikt zwischen Rauheit, Haftfestigkeit und Qualität der Metallisierungsoberfläche, wie in Bild 54 dargestellt.



Bild 54: Zielkonflikt zwischen Rauheit, Haftfestigkeit und Oberflächenqualität

Eine hohe Wirkleistung des Lasers erzeugt eine hohe Oberflächenrauheit auf dem Substrat. Dadurch ist eine gute Verzahnung zwischen Polymerträger und Metallschicht möglich, was wiederum eine gute Haftfestigkeit garantiert. Eine geringe Wirkleistung gewährleistet eine geringe Oberflächenrauheit, durch die die Adhäsion reduziert wird, darauf abgeschiedenes chemisches Kupfer hat aber eine sehr gute Oberflächenqualität. In Bild 55 sind lichtmikroskopische Aufnahmen von laserbearbeiteten Oberflächen abgebildet. Die Einstellung (a) mit 2 Watt Leistung, 2000 mm/s Vorschub und der Frequenz mit 100 kHz zeigen einen nur punktuellen mechanischen Abtrag in der Oberfläche des Werkstücks. Mit zunehmender Leistung und

Verringerung des Vorschubs erhöht sich die Intensität und trägt deutlich mehr Material ab. Im Extrembereich (f) mit 3Watt, 2000 mm/s und 120 kHz sind einzelne Glasfasern an der Oberfläche fast komplett freigelegt, da das umgebende Epoxidharzmaterial nahezu vollständig verdampft ist.



Bilder a),c),e) zeigen die zunehmende Erosion des Substrates bei steigender Leistung und Frequenz der Laserquelle mit konstant schneller Vorschubbewegung

Bilder b),d),f) zeigen die zunehmende Erosion des Substrates durch Reduzierung der Vorschubbewegung und steigender Frequenz bei konstanter Leitung



Additive Füllstoffe wie Glasfasern zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften stellen eine Schwierigkeit dar. Sie erzeugen je nach geometrischer Orientierung eine abweichende Metallisierungstiefe und Randgeometrieausprägung auf Leiterbahnen unter 50 µm Gesamtbreite. Versuche mit Leistungen von über 4 Watt zeigen eine Oberflächenkondition, die nicht mehr für eine Metallisierung akzeptabel ist, da freigelegte Glasfasern an der Oberfläche ungeordnet verbleiben. [S4]

In Bild 56 sind die Ergebnisse aus den Rauheitsmessungen in Mathlab-Modellen dargestellt. Die Messungen werden in Abhängigkeit der Laserparameter Leistung, Frequenz und Vorschub auf den Testplatten gemessen (Modell links). Sie zeigen, dass die eingestellte Leitung den größten Effekt bei 3 Watt auf die erzeugte Rauheit hat. Die Flächendarstellung der 4 Watt Messwerte zeigen, dass die Vorschubbewegung des Lasers einen größeren Einfluss auf Rauheit hat als die Frequenz.

Das rechte Model veranschaulicht zum Vergleich den Effekt der Einebnung der Metallisierungsformen auf die Oberflächenrauheit. Die chemische Metallisierung mit einer Schichtdicke von 8 - 12 µm hat keinen nennenswerten einebnenden Effekt auf die laserstrukturierte Oberfläche. Die finale Rau-

heit der chemischen Metallisierung wird somit maßgeblich von der jeweiligen Laserintensität bestimmt. Die elektrogalvanische Metallisierung kann im Gegensatz dazu einen sehr positiven Effekt auf eine deutlich bessere Oberflächenqualität mit einer durchschnittlichen Rauheit von ca. 1 μ m (Ra) erzeugen, der unabhängig der Laserparameter durch das Abscheideverhalten des Elektrolyten bestimmt wird.



Bild 56: Modell über Rauheit in Abhängigkeit der Laserparameter (links); Vergleich der Rauheiten nach Laserprozess, nach chemischer Metallisierung und nach galvanischer Metallisierung (rechts)

5.3.5 Laserparameter in Abhängigkeit der abgeschiedenen Kupferschichtdicke

Die bereits in den Vorversuchen durchgeführten Metallisierungen auf den erstellten Testplatten zeigen einen direkten Zusammenhang zwischen den Laserparametern Leistung, Vorschub, Frequenz und der im chemischen Kupferelektrolyten über eine definierte Zeit abgeschiedenen Metallmenge. Über die Messung der Schichtdicke auf einer mit variiert kombinierten Einstellungen gelaserten Probe kann somit auf die optimalen Laserparameter zurückgeschlossen werden. Da alle zu untersuchenden Parameter auf einem Testträger aufgebracht werden und somit gleichzeitig im chemischen Kupferprozess metallisiert werden können, ist der Einfluss von Schwankungen in der Abscheidequalität des Elektrolyten zu vernachlässigen.

Die abgeschiedenen Metallschichten sind mit 8 - 12 µm Kupfer, 3-5 µm Nickel und 0,1 sehr dünn. [P5] Die Methoden zur Messung der Schichtdicke können in zerstörende und zerstörungsfreie Verfahren eingeteilt werden. Es haben sich hierzu drei Verfahren etabliert, die jeweils mit Vor- und Nachteilen verfahrensbedingt zu abweichenden Ergebnissen führen und

nachfolgend untereinander abgegrenzt werden. Grundsätzlich sollten in der MID-Technik Schichtdickenmesswerte immer nur aus einem Verfahren miteinander vergleichen werden.

5.3.5.1 Optisches Verfahren zur Messung der Schichtdicke mit dem Laserscanmikroskop

Für die optische Schichtdickenmessung durch die Laserscanmikroskopie müssen die Proben nicht zerstört werden. Die Probenoberfläche wird neben der x-y-Ebene auch in z-Richtung (Tiefe) durch einen Laser abgetastet. Damit können zusätzlich die Rauheit sowie hochauflösende topografische Bilder aufgenommen werden. In Bild 57 auf der linken Seite ist das Funktionsprinzip der Schichtdickenmessung mit der Laserabtastung dargestellt. Dabei wird die z-Lage der Substratoberfläche gemessen und der Höhenunterschied durch eine zweite Messung auf der Metallisierungsoberfläche ermittelt. Die auf diese Art gemessene Schichtdicke ist durch eine beliebig hohe Anzahl von Messpunkten sehr genau und mit vergleichsweise geringem Zeitaufwand durchzuführen. Es können Schichtdicken bis in den Millimeterbereich vermessen werden. Nachteilig bei diesem Verfahren ist die Missachtung der Metallisierung, die sich eventuell unterhalb des Niveaus der Substratoberfläche befindet. Dieser Effekt ist davon abhängig, wie stark sich das jeweilige Material unter der verwendeten Wirkleistung des Lasers bei der Strukturierung abtragen lässt.

5.3.5.2 Energiedispersives Verfahren zur Schichtdickenmessung durch Röntgenfluoreszenz

Bei der Messung im Röntgenfluoreszenzverfahren (ED-RFA) wird das Messobjekt energetischer Röntgenstrahlung ausgesetzt, die die Atome des spezifischen Stoffes anregt und Elektronen aus den inneren Schalen herauslöst. Die dadurch entstehenden Freiräume werden wieder von Elektronen aus äußeren Schalen aufgefüllt. Die dabei emittierte Fluoreszenzstrahlung ist für jedes Element individuell und gibt Aufschluss über die Zusammensetzung und die Menge des zu untersuchenden Stoffes. Ein besonderer Vorteil dieses nicht zerstörenden Prüfverfahrens ist es, die Schichtdicken von mehreren, aufeinanderliegenden Metallschichten in einem Messvorgang zu ermitteln. Die Messungen in diesem Zusammenhang werden an einem Fischerscope XDLM-C4 durchgeführt. Zu den Nachteilen dieser Methode zählen, dass Schichtdicken von größer 25 μ m aufgrund der geringen Eindringtiefe, nicht mehr zuverlässig gemessen werden können. Mit anderen Messmethoden vergleichende Praxisversuche zeigen außerdem eine entsprechende Abhängigkeit zwischen den Schichtdickenmesswerten und der Rauheit der Oberfläche des Testobjekts. Prinzipbedingt kann nicht die gesamte Rückstrahlung bei der Messung wieder erfasst werden, da ein Teil der Strahlung aufgrund von Reflektionen abgelenkt wird und somit nicht mehr im Detektor erfasst werden kann, was zu einem geringeren Messergebnis führt, wie in Bild 57 veranschaulicht. [128]

Grundsätzlich ist die ED-RFA Messmethode sehr von der Kalibrierung der mit zur Vergleichsschicht passenden Prüfnormalen abhängig. In ihrer molekularen Struktur divergierende Schichtsysteme können das Messergebnis in einem Bereich von ein bis zwei Mikrometern beeinflussen, was für die hier zu betrachtenden Schichten eine Abweichung von 10-20 % bedeutet.

Die Schichtdickenmessungen auf den Epoxidsubstraten werden mit der ED-RFA Methode durchgeführt. Bei Vergleichsmessungen wurde festgestellt, dass die Messergebnisse des Laserscanmikroskops systematisch geringer ausfallen als die der ED-RFA. Das Verhalten wird darauf zurückgeführt, dass aufgrund der Zersetzungseigenschaften und Kavitätenbildung der Epoxidsubstrate durch die Laserbearbeitung ein Teil der anschließenden Kupfermetallisierung unterhalb der Oberfläche (Höhe =Zo) liegt und somit in der vergleichenden Messung als Fehlbetrag nicht berücksichtigt werden kann.



Bild 57: Schematische Darstellung der Messprinzipien: Laserscanmikroskop (links) und energiedispersive Röntgenfluoreszenzmessung (rechts)

5.3.5.3 Ausmessen der Schichtdicke im Schliffbild

Die metallographische Schliffbildanalyse zählt zu den bewährten Analysemethoden in der Aufbau- und Verbindungstechnik. Untersuchungen im Querschnitt durch gesamte Aufbaugruppen bieten den Vorteil, dass Be-

trachtungen von Schichtsystemen möglich sind, wie beispielsweise die intermetallische Phase zwischen der Leiterbahn und dem Lot nach dem Lötprozess.

Dazu müssen Proben an den entsprechenden Stellen ausgesägt werden, in Epoxidharz eingebettet und anschließend an die betreffende Stelle herangeschliffen werden. Bei dem Verfahren wird die Probe jedoch zerstört. Für die chemische Metallisierung von MIDs hat dieses Verfahren den Vorteil, dass anhand der Querschliffe bei entsprechender Präparierung die Ausprägungen des Wachstumsverhalten der Kupferkristalle, aber auch die Verzahnung zwischen Polymer und Metallschicht gut qualitativ untersucht werden können. [P5] Nachteilig bei dieser Methode ist das manuelle, subjektive Setzen der Messpunkte in der grafischen Oberfläche. Bild 58 zeigt einen Querschliff durch eine im SIPA-Verfahren erstellte, chemisch und galvanisch metallisierte Leiterbahn auf dem duroplastischen Substrat. [8]



Darstellungen eines Querschliffs einer MID-Leiterbahn mit Schichtdickenmesspunkten der chemisch- und galvanisch metallisierten Probe. Substratmaterial: Duroplast Nu505 von Duresco. Chemische Kupfermetallisierung mit dem SIPA-Verfahren. Anschließend elektrogalvanisch mit Kupfer nachverstärkt auf ca. 30µm Schichtdicke.

Bild 58: Schichtdickenmessung eines Querschliffs im Lichtmikroskop

5.3.5.4 Modell der Kupferschichtdicke in Abhängigkeit der Laserparameter

Lasergestützte MID-Verfahren benötigen den Strukturierungsprozess neben der Aktivierung von Additiven zur selektiven Ablation und Modifizierung der Oberfläche. Dabei definiert die auf diese Weise erzeugte Oberflächenbeschaffenheit die Grundlage für die Folgeprozesse wie Palladium-

aktivierung und chemische Kupfermetallisierung. Als feste messbare Endgröße steht dabei die abgeschiedene Menge an Metallatomen auf der bearbeiteten Substratoberfläche. Der Versuch wird durchgeführt mit 24 verschiedenen Laserparameterkombinationen, auf jeweils fünf Polymerplatten und mit dem SIPA-Verfahren in einem fünf Liter-Kupferelektrolyten metallisiert. Aufgrund des begrenzten Volumens bei der Metallisierung im Labormaßstab muss der Umfang der Proben geringgehalten werden, sodass eine simultane Beschichtung aller Proben erfolgen kann, um Schwankungen in der Metallisierung auszuschließen. In Bild 59 sind die fünf Testträger, die auf dem Duroplast Typ B jeweils mit dem gleichem Strukturierungslayout versehen sind, abgebildet.



Auf den Proben sind die Felder mit einer guten Metallisierung durch eine intensive Kupferfarbe zu erkennen. Auf allen Feldern wird quantitative die Schichtdicke gemessen. Die fünf Proben zeigen ein sehr ähnliches Metallisierungsverhalten und bestätigen damit die Reproduzierbarkeit des Aktivierungs- und Metallisierungsverfahren.

Die Tabelle 20 listet die Ergebnisse nach der Schichtdickenmessung durch die Röntgenfluoreszenzmessung auf. Die Werte sind nach den Laserparametern sortiert und durch eine Farbskala zur besseren Veranschaulichung farblich analysiert. Durch das praktisch nicht vorhandene Abscheideverhalten im Bereich von 2 Watt und 2000 mm/s Vorschub wird diese Einstellungskombination für die weiteren Untersuchungen in diesem Forschungszusammenhang nicht mehr betrachtet.

Tabelle 20: Auswertung der Schichtdickenmessung sortiert nach Laserparametern (rot: Schichtdicke min.; grün Schichtdicke max.)

	Vor-	Fre-						
Watt	schub	quenz	P1	P2	P3	P4	P5	Mittelw.
[W]	[mm/s]	[kHz]	[µm]	[µm]	[µm]	[µm]	[µm]	[µm]
2	1000	120	8,72	7,57	3,94	9,72	4,85	6,96
2	1000	160	4,66	2,66	2,70	5,71	3,84	3,92
2	1000	200	1,05	0,45	2,14	3,39	2,31	1,87
2	1500	120	2,38	0,72	3,22	3,48	2,35	2,43
2	1500	160	0,05	0,02	0,44	2,34	1,89	0,95

Bild 59: Fotos der fünf Metallisierungsproben zur Schichtdickenmessung

5 Laserbearbeitung von duroplastischen Substratmaterialien zur selektiven
Metallisierung

2	1500	200	0,07	0,01	0,17	1,03	0,58	0,37
2	2000	120	0,05	0,00	0,10	0,40	0,10	0,13
2	2000	160	0,03	0,01	0,08	0,15	0,05	0,06
2	2000	200	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00
3	1000	120	8,78	12,15	12,42	11,88	10,44	11,13
3	1000	160	8,39	11,43	12,15	11,88	11,79	11,13
3	1000	200	8,69	11,07	12,06	11,25	10,49	10,71
3	1500	120	10,08	10,17	10,08	10,26	10,26	10,17
3	1500	160	8,90	8,91	9,00	9,90	7,34	8,81
3	1500	200	6,70	6,98	6,92	8,24	5,98	6,96
3	2000	120	8,42	8,72	5,42	9,72	7,63	7,98
3	2000	160	7,61	5,76	5,65	8,97	5,58	6,72
3	2000	200	4,93	3,83	3,83	7,48	4,23	4,86
4	1000	120	9,63	12,06	10,76	12,15	11,16	11,15
4	1000	160	10,35	12,06	10,62	11,25	11,34	11,12
4	1000	200	9,45	11,97	11,88	10,98	11,79	11,21
4	1500	120	10,62	11,43	11,88	12,24	12,33	11,70
4	1500	160	8,22	11,07	12,33	11,79	11,07	10,90
4	1500	200	7,05	11,16	13,32	11,43	10,08	10,61
4	2000	120	9,09	10,98	12,60	12,69	12,33	11,54
4	2000	160	8,50	9,54	11,70	10,44	10,08	10,05
4	2000	200	7,52	7,97	10,17	9,36	7,87	8,58

Anhand der gemessenen Daten kann ein dreidimensionales Flächenmodell mit Matlab erstellt werden, dass die Wirkzusammenhänge der Laserparameter besser abbilden kann (siehe Bild 60). Dabei sind die Laserparameter Leistung in Watt, Vorschub in mm/s und die Frequenz in kHz korrelierend zur gemessenen Schichtdicke aufgetragen. Folgende Aussagen lassen sich aus dem Modell ableiten:

- Die am Laser eingestellte Leistung in Watt hat neben der Vorschubgeschwindigkeit den maßgeblichen Einfluss auf die Schichtdicke der Metallisierung.
- Ab einer Leistung von 3 Watt ist der Einfluss des Vorschubs und der Frequenz nur noch von untergeordneter Relevanz.
- Eine Steigerung der Leistung über 4 Watt hinaus wird keine signifikante Steigerung der Metallisierung bewirken. Durch die mit der Leistungssteigerung verbundenen Zunahme der Oberflächenrauheit muss außerdem mit einer steigenden Verfälschung der Röntgenfluoreszenzmessung gerechnet werden.

- Die Geschwindigkeit von 1000 mm/s, 1500 mm/s und 2000 mm/s, mit der sich der Laser vorwärtsbewegt, hat nach der Leistung die zweite Relevanz auf die abgeschiedene Schichtdicke. Eine Zunahme der Geschwindigkeit bewirkt ein Absinken der Kupferschichtdicke, wie im Theorieteil bereits beschrieben.
- Die Frequenz hat zwischen 120 kHz und 200 kHz keinen signifikanten Einfluss auf die abgeschiedene Kupferschichtdicke.



Bild 60: Das Flächenmodell stellt die Wirkzusammenhänge der Laserparameter auf die metallisierte Schichtdicke dar.

Aus den durchgeführten Versuchen und der Auswertung der Messergebnisse ergeben sich für die Laserbearbeitung der Epoxidharzduroplaste und der Aktivierung durch das SIPA-Verfahren folgende optimale Laserparameterbereiche:

Leistung:	3,5-4 Watt
Vorschubbewegung:	1000-1500 mm/s
Frequenz:	120-150 kHz

Die Leistung ist mit 3 Watt am unteren Grenzbereich gewählt, um die Rauheit so gering wie möglich zu halten, sodass eine gute Oberflächenqualität nach der chemischen Kupfermetallisierung erzeugt werden kann. Es ist an-

zumerken, dass vergleichbar wie bei dem LDS[®]-Verfahren für weitere Substratmaterialien die Laserparameter für eine erfolgreiche Aktivierung und Metallisierung entsprechend angepasst werden müssen.

5.4 Laserbohren als Verfahren zur elektrischen Anbindung eingebetteter Systeme in duroplastischen Substratmaterialien

Für das Bohren von Microvias sind Laserbohrprozesse in der Leiterplattenfertigung ein weit verbreitetes Verfahren, da die klassischen mechanischen Bohrprozesse bei Durchmesserdimensionen von unter 100 µm an ihre Grenzen stoßen. [2] Für lasergestützte MID-Verfahren bietet das Laserbohren eine ideale Ergänzung, die für elektrische Leiterbahnen vergleichsweise begrenzt zur Verfügung stehenden Oberfläche effizient auszunutzen. Vias in laserstrukturierten MIDs können ohne eine zusätzliche Anlage im gleichen Prozessschritt erstellt werden. [54] Die Erzeugung von Blind-Vias zur elektrischen Ankontaktierung oder zur Entwärmung von umspritzten Bauteilen wie Sensorchips ist ein innovativer Ansatz, der die Funktionen von MIDs deutlich erweitert. Hierzu muss der Polymerwerkstoff bis in eine definierte Tiefe durch den Laser freigeräumt werden. Herausforderungen sind das exakte Treffen der Anschlusspads des eigebetteten Systems, die anschließende Metallisierung der gesamten zylindrischen Innenfläche des Bohrlochs und die Überbrückung von vorhandenen Spaltmaßen zwischen dem Chip und dem Polymer durch die Metallisierung. [129]



Bild 61: Schematische Darstellung der vier Laserbohrstrategien [2][S1]
Die hohe eingebrachte Energie des Lasers beim Bohren bewirkt, dass das Epoxidduroplast verdampft. Starke Druckunterschiede verursachen bei den eingesetzten Werkstoffen einen Austrieb, der einen ringförmigen Materialauswurf auf der Strahleintrittsseite zurücklässt. In der industriellen Anwendung wie beispielsweise der Bearbeitung von FR4-Leiterplatten sind vier verschiedene Laserbohrstrategien bekannt, die in Bild 61 schematisch abstrahiert sind und für den Anwendungsfall hier kurz beschrieben werden. [2]

Mit dem Einzelpulsbohren lassen sich durch einen einzelnen Puls mit hoher effektiver Energie sehr große Bohrungsdurchmesser mit bis zu zwei Millimeter Wandstärke fertigen. Die erzeugbaren Durchmesser liegen abhängig von dem eingesetzten Strahldurchmesser, Pulsdauer und Intensität zwischen 50-250 µm und können mit einer sehr hohen Bohrrate mit bis zu 100 Bohrungen je Sekunde hergestellt werden. Die Bohrqualität der Lochgeometrie ist bei diesem Verfahren vergleichsweise schlecht. [S6]

Das Perkussions-Bohren funktioniert über mehrere Einzelpulse, die die benötigte Gesamtenergie besser verteilen und somit materialschonender vorgehen. Charakteristisch ist die konische Geometrie der Bohrung, die sich durch die unterschiedlichen Abtragvorgänge der einzelnen Pulse erklären. Die Vielzahl der Pulse führt zu einer erhöhten Energieeinkopplung in das Substrat, die insbesondere an den Rändern eine Aufweitung der Lochgeometrie erzeugen. [S6]

Das Trepanierbohren ist eine Kombination aus Bohr- und Schneidprozess. Zuerst wird mithilfe des Einzel- oder des Perkussion-Bohren eine Durchgangsbohrung erzeugt, die Anschließend durch eine Kreisbewegung des Laserstrahls auf den gewünschten Endurchmesser geschnitten wird, sodass sich eine vergleichsweise gute Konzentrizität erzielt werden kann. [S6]

Das Spiralwendelbohren eignet sich auf MIDs insbesondere gut zur Erstellung von Microvias mit Durchmessern von kleiner 100 µm und Bohrtiefen zwischen 500-1500 µm. Durch die kreisförmige Bewegung des Laserstrahls entlang der Wendelkurve und dem langsamen Eindringen können sehr geringe Abtragraten erzielt werden. Dabei müssen die Laserparameter sehr genau auf das jeweilige Substratmaterial abgestimmt werden, da bei zunehmender Tiefe die Abtragrate stark zurückgeht und ein Plasmastau mit Abrasionsrückständen im Bohrkanal auftreten können. Für die Erstellung der Bohrungen in dieser Forschungsarbeit wird nach erfolgten Vorversuchen das Spiralwendelbohren verwendet, da dies nach [2] und [89] die besten Ergebnisse mit der höchsten Bohrqualität verspricht. [S6]

Für das MID-Laserbohren müssen, je nach angewendeter Strategie und eingesetztem Substrat, neue Laserparameter mit höherer Leistung verwendet

5 Laserbearbeitung von duroplastischen Substratmaterialien zur selektiven Metallisierung

werden. Alternativ wird die Anzahl der Überfahr-Wiederholungen gesteigert. Durch die schnelle Laserstrukturierung können bis zu 2000 Wiederholungen auf einer Stelle innerhalb von 120 Sekunden Taktzeit erfolgen und auf diese Weise Bohrtiefen bis zu 2 mm erreicht werden.

Die erreichbaren Bohrtiefen sind jedoch davon abhängig, wie gut sich das Material aus der Bohrung entfernen bzw. verdampfen lässt. In faserverstärkten Materialen können Glasfasern das Freiräumen stark beeinträchtigen.

Bei der späteren Metallisierung hemmt zurückbleibendes Material die Durchspülung der Kavität mit dem Elektrolyten und verhindert die vollständige Metallisierung.

Im Rahmen des hier beschriebenen Forschungsprojektes wird ein Chip-Embedding-Demonstrator konzipiert und aufgebaut, der als Funktion einen eingebetteten MEMS-Beschleunigungssensor verfügt und über lasergebohrte VIAs ankontaktiert wird. In dem Epoxid-Duroplast EP3581T-1 wird eine Tasche mit dem Maßen 2,3 x 2,3 x 1,5 mm (Breite x Länge x Tiefe) mit einem spanenden Verfahren gefertigt. In diese Tasche wird ein Land Grid Array (LGA) System in Package (SIP) MEMS-Sensor vom Typ LIS2DH von STMicroelectronics [130] mit Epoxidharz eingebettet. Das LGA-Bauteil hat die Außenmaße 2,0 x 2,0 x 0,75 mm (Breite x Länge x Tiefe) und das Anschluss-Pitch-Rastermaß von 350 µm. In dem darauffolgenden Schritt werden mit dem Laser die Durchkontaktierungen mit einem Durchmesser von ca. 100 µm und einer Tiefe von ca. 300 µm gebohrt. Dabei muss die Tiefe des Bohrlochs mit dem Laser genau eingehalten werden, um keine Beschädigung an dem darunterliegenden Chip zu verursachen. [S1]

Zur exakten Positionsbestimmung des Sensorchips in dem Duroplastträger wird zuvor ein 3D-Röntgenscan durchgeführt und das erstellte Bild über das Kamerasystem des Lasers gelegt, um die Lageabweichung zu korrigieren. Für die Bohrung wird das Spiralwendelverfahren angewendet, um möglichst parallele Bohrwände zu erzeugen. Das Laserbohren erfordert deutlich stärkere Parametereinstellungen, als für die reine Strukturierung angewendet werden. Für die hier zu erstellenden Vias hat sich eine Leistung von 16,5 Watt bei der Frequenz von 100 kHz, eine Strukturierungsgeschwindigkeit von 1500 mm/s und 25 Spiralwendel auf 100 µm Bohrtiefe als optimal bewährt. Die Dauer zur Erstellung aller 14 Bohrlöcher liegt bei etwa 20 Sekunden.

Bei der späteren Metallisierung ist auf eine möglichst optimale Umflutung der Bohrlöcher mit frischem Elektrolyten bei der Palladiumaktivierung und der Kupferbeschichtung zu achten, um die Aktivierung sowie das Kupferschichtwachstum auch in der Tiefe des Vias zu begünstigen. 5.4 Laserbohren als Verfahren zur elektrischen Anbindung eingebetteter Systeme in duroplastischen Substratmaterialien

Durch das Einbetten, wie in diesem Versuchsaufbau, können Spalte zwischen dem Kontaktpad des Chips und dem Bohrloch von 10-20 µm auftreten (Bild 62, Punkt 7). Diese Spalte müssen von der Metallisierung überbrückt werden können.

Für eine spätere industrielle Anwendung ist ein Einlege- und Umspritzprozess in der Werkzeugspritzgussform in Betracht zu ziehen. Die möglichst spaltfreie Grenzschicht zwischen den Kontaktpads des eingelegten Packages und der Vergussmasse stellen dabei eine Herausforderung dar, deren Verringerung weiter erforscht werden muss, um eine stabile elektrische Ankontaktierung zu garantieren.



Bild 62: Schliffbild: Lasergebohrte Vias für die elektrische Ankontaktierung eines eingebetteten MEMS-Chips [S1]

Die drei Ausschnitte A1, A2 und A3 in Bild 62 zeigen Aufnahmen bzw. Vergrößerungen des Schliffbildes, das durch den MID-Chip-Packaging-Demonstrator angefertigt wurde. Wie in A3 bei Punkt 7 zu erkennen ist, sind die Verbindungen zwischen Durchkontaktierung und dem Anschlusspad des MEMS-Chips erfolgreich ausgeführt worden, sodass eine elektrische Verbindung gegeben ist.

- Punkt 1 MEMS-Sensor SIP Typ LIS2DH von STMicro electronics
- Punkt 2 Epoxidharzmasse in die der Chip eingebettet ist
- Punkt 3 MID-Träger aus Duroplast EP3581T-1 mit gefräster Tasche zur Aufnahme des Chips

5 Laserbearbeitung von duroplastischen Substratmaterialien zur selektiven Metallisierung

- Punkt 4 Lasergebohrte und chemisch metallisierte elektri sche Durchkontaktierung (Via)
- Punkt 5 Anschlusspad des MEMS-Chips
- Punkt 6 Luftspalt (schwarz) zwischen Chip und MID-Träger
- Punkt 7 Zusammengewachsene Metallisierung zwischen der Durchkontaktierung und dem Anschlusspad des MEMS-Chips

Nasschemische Tauchbadelektrolyte sind Prozesse die zur Abscheidung von Metallen dienen. Elektrolyte sind gekennzeichnet durch das Vorhandensein von Ionen, durch die sie elektrische Ladungen transportieren können und somit leitfähig sind. [65]

Auf der Suche nach chemischen Verfahren, die als Katalysator eine elektrochemische Kupferabscheidung begünstigen können, ergibt die Literaturrecherche Informationen aus der klassischen vollflächigen Beschichtung von Polymeren. Industriell sind insbesondere Beizprozesse mit beispielsweise Chromschwefelsäure in Kombination mit ein- oder zweistufiger Palladium- und/oder Zinnbekeimung für die Erzeugung des elektrochemischen Potentials etablierte Verfahren, um elektrisch nicht leitfähige Substrate wie Polymere und Keramik vollflächig metallisch zu beschichten. [65] [63]

6.1 Forschungshypothese zur selektiven Oberflächenkonditionierung mit ionogener Palladiumlösung (SIPA-Verfahren)

Die lasergestützte selektive Kupfermetallisierung von Duroplasten mit Leiterbahnbreiten kleiner 50 μ m ist aktuell mit keinem MID-Verfahren prozesssicher möglich. Daraus ergibt sich der Ansporn, ein Verfahren zu entwickeln, mit dem die Vorteile der flexiblen Laserbearbeitung und die thermomechanischen Potentiale der Kombination eines duroplastischen Substrats mit Kupfer als elektrischer Funktionsleiter genutzt werden können, ohne einen verändernden Eingriff in die bestehende Prozesskette der chemischen Metallisierung vorzunehmen.

Die lasergestützte chemische Aktivierung durch ein kolloidales Palladiumtauchbad als Vorstufe zur chemischen Kupfermetallisierung von Thermoplasten ist bereits durch das LISA-Verfahren [49] erforscht. Es zeigen sich jedoch Schwierigkeiten in der Präzision der Selektivität, wie sie für ein Fine-Pitch-Leiterbahnlayout erforderlich ist.

Für die Entwicklung eines lasergestützten Aktivierungsprozesses, der Leiterbahnbreiten unter 50 μ m in der chemischen Metallisierung zuverlässig abbilden kann und mit Epoxidduroplasten kompatibel ist, wird ein neues

Verfahren (SIPA= Selektive Ionogene Palladium Aktivierung) erforscht. Die Prozesskette der etablierte Verfahren soll dabei weitgehend unverändert bleiben.

Über den Mechanismus der Aktivierung in dem Palladiumtauchbadverfahren können zwei Forschungshypothesen aufgestellt werden:

A1: Steigerung der Grenzflächenenergie durch den Laserprozess: Die in Kapitel 5 untersuchten Laserparameter haben einen bereits bewiesenen maßgeblichen Einfluss auf die abgeschiedene Schichtdicke und damit das Metallisierungsergebnis. Es wird angenommen, dass die Energie des Lasers eine grenzflächenenergetische Intensitätssteigerung erwirkt, wodurch die Aufnahme, Abscheidung und Anhaftung des Palladiums und des Kupfers im anschließenden Prozess bestimmt wird. Dieser Effekt soll durch die goniometrische Bestimmung der Flüssigkeitsaufnahme an der Substratoberfläche untersucht und quantitativ gemessen werden, um Wirkzusammenhänge zu erklären.

A2: Dispersionsgrad beeinflusst die Selektivität: Es wird angenommen, dass die Präzision der selektiven Palladiumaktivierung von dem Verteilungszustand und der Partikelgröße der Palladiummoleküle in der nasschemischen Lösung maßgeblich bestimmt wird. Diese Faktoren beeinflussen daher weitgehend die Qualität der anschließenden Metallisierung. Demzufolge wird nach einer katalytisch wirkenden Aktivatorlösung gesucht, die eine feine, Dispersion des Palladiums ermöglicht und über einen vorgelagerten Laserprozess steuerbar ist.

Die diskrete Verteilung des Palladiums auf der Oberfläche entscheidet über die Intensität der Bekeimung beschränkt auf die gewünschten Bereiche. Es wird angenommen, dass der Prozess über die Einwirkungsdauer und die Konzentration des Palladiumgehalts geregelt wird, sodass die anschließende Kupfermetallisierung gegenüber der des LDS®-Prozesses nicht verändert werden muss.

Daneben tragen die Eigenschaften des Epoxid-Duroplast-Substrats durch ihre Zusammensetzung aus Füllstoffen (Menge, Art und Partikelgröße) mit ihrer Grundrauheit, Wasseraufnahme und ihrem Zersetzungsverhalten durch die Laserbearbeitung zu dem gesamten Qualitätsergebnis bei. Ähnlich wie bei dem LDS[®]-Verfahren müssen die Parameter der Laserbearbeitung, der Reaktivität des Kupferelektrolyten und bei dem SIPA-Verfahren die Palladiumaktivierung später jeweils leicht an die einzelnen Substrate angepasst werden.

In Bild 63 sind die prognostizierten Wirkzusammenhänge des SIPA-Verfahrens mit Ihren Parametern und deren Auswirkungen auf das Prozessergebnis zusammengefasst.

	Substratmaterial	Laserprozess	Palladium- bekeimung	Kupfer- metallisierung
Parameter	 Grundrauheit Füllstoffe: (Quarze, Glaskugeln, Kurzfasern, Wollastonit, etc.) Zersetzungsverhalten Absorptionsgrad 	 Leistung Vorschub Frequenz Pulsdauer Fokus- durchmesser 	 Dauer Palladium- Konzentration Spülung 	 PH-Wert Temperatur Abscheiderate
Auswirkung	 Fine-Pitch-Eignung Eignung Laserbohren CTE-Eigenschaft 	 Erzeugt eine selektive, mikroporöse Rauheit Intensivierung der Grenzflächenenergetik Mechanischen Verankerung der Metalle (Haftung) 	 Erzeugt elektrochemisches Potential für Kupfermetallisierung Entscheidet über die Selektivität der Metallabscheidung 	 Schichtdicke Kupfer Leitfähigkeit Haftfestigkeit

Bild 63: Wirkungszusammenhänge der Prozesskette des SIPA-Verfahrens

6.2 Palladium als Katalysator zur Aktivierung

Palladium ist das chemisch aktivste Edelmetall und hat seit der Goldpreiserhöhung 1978 eine breite Anwendung in der industriellen Galvanotechnik für elektronische Bauteile gefunden. Infolgedessen lag zeitweise der Palladiumpreis über dem von Gold. [65] Palladium lässt sich unter Bildung von Pd $(NO_3)_2(OH)_2$ leicht in konzentrierter Salpetersäure lösen. [127] Um eine selektive Reduktion von Kupfer in einem nasschemischen Elektrolyten zu starten, müssen Edelmetallkeime als Katalysator an den entsprechenden Stellen vorhanden sein, die das metastabile Gleichgewicht des chemischen Bades so stören, dass ein Selbstzerfall des Kupferelektrolyten an der Oberfläche der Metallkeime beginnt. Als katalytische Stoffe eignen sich besonders Edelmetalle wie Palladium, Platin, Silber und Gold, die durch ihr Vorhandensein die notwendige Aktivierungsenergie herabsetzen und damit die Hauptreaktion auslösen bzw. deren Geschwindigkeit erhöhen können. Neben dem Katalysator kann die Erhöhung der Prozesstemperatur, wie im Fall des chemischen Kupferelektrolyten, ebenfalls die Reaktionsgeschwindigkeit erhöhen.

Aus der elektrochemischen Spannungsreihe ergeben sich Potentialdifferenzen bei der hier eingesetzten chemischen Kupfer-, Nickel- und Goldmetallisierung, die um den Reaktionsverlauf in Gang zu setzen, überbrückt werden müssen (Diagramm links und rechts in Bild 64). [65] [131]

Palladium ist in diesem Anwendungsfall das typischste Edelmetall, das zur Aktivierung industriell eingesetzt wird. [132] Dazu wird im Fall der vollflä-

chigen Beschichtung die Oberfläche in der Regel durch eine Chrom-Schwefelsäurebeize mikroporös aufgeraut, sodass sich in die erzeugten Kavitäten die Palladiumatome leichter verankern können. [61] [65]

Die Einleitung der Abscheidung von Kupfer auf dem Palladium bildet eine Austauschreaktion, indem sich Kupfermetall durch einen Ladungsaustausch auf dem Palladium absetzt und auf diesem dann die außenstromlose Kupferabscheidung weiterverläuft. Elektrolytisches Palladium hat die Eigenschaft, sehr schnell Wasserstoff zu bilden wodurch die benötigten Elektronen für eine Metallabscheidung bereitstellt werden. [64]



Bild 64: Differenzen der Standardpotentiale der eingesetzten Metallschichten; Darstellung des Verlaufes einer chemischen Reaktion mit und ohne Katalysator (rechts) [65]

Zur partiellen Aufrauhung für die Erstellung eines Leiterbahnlayouts kann alternativ zu einer Beizbehandlung ein Laserprozess vorgeschaltet werden, der eine gut steuerbare und sehr feingeometrische, selektive Aufrauhung der Substratoberfläche zulässt. Wie schon in Kapitel 5 beschrieben, spielen hierbei die Laserparameter zur definierten Aufrauhung eine wichtige Rolle. Der Laserprozess steht dabei in direkter Wechselwirkung zu dem Aktivierungsprozess. Das Palladiumbad muss daher in seiner Zusammensetzung und Behandlungsdauer auf die Laserparameter und das verwendete Substratmaterial abgestimmt werden, sodass sich genügend Palladiumkeime verankern können, um eine ausreichende Reaktion im Kupferelektrolyten zu erzielen. Es existieren seit mehr als vier Jahrzehnten zwei grundlegende Möglichkeiten einen Aktivator aus Palladium anzusetzen, ionogene- und kolloidale Lösungen. [65]

6.3 Ansätze zur selektiven Palladiumaktivierung

Zur lasergestützten, selektiven Metallisierung von MIDs mit Palladium als Aktivator und Kupfer als metallische Funktionsschicht zeigt die Forschungsarbeit von Yang Zhang jüngste Ergebnisse. [49] Durch ihr entwickeltes LISA-Verfahren, das auf einem zweistufigen Tauchbadprozess in einer Zinn-Palladium-Komplexverbindung basiert, lassen sich verschiedene Typen von Thermoplasten in Verbindung einer vorherigen definierten Laseraufrauhung erfolgreich metallisieren. Für die Metallisierung von Duroplasten eignet sich dieses Verfahren, wie eigene Voruntersuchungen zeigen, ebenfalls ausgezeichnet. Jedoch ist eine definiert selektive Metallisierung damit nur schwer zu erzielen, bzw. sehr geringe Isolationsabstände kleiner 100 µm zwischen den Leiterbahnen sind nicht realisierbar, da die dabei auftretende Fremdmetallisierung im chemischen Kupferprozess zu stark ist. [S4] Um die Ursachen für den Effekt der sehr starken und "ungewollten" Metallabscheidung zu identifizieren, müssen die vorliegenden Lösungsverhältnissen betrachtet und die Wirkmechanismen untersucht werden.

In einem ersten Ansatz wird versucht, den Palladiumanteil in der LISA-Lösung zu reduzieren, da das Vorhandensein der Edelmetallkeime maßgeblich für die spätere Abscheidung von Kupfer verantwortlich ist. Die Versuche werden basierend auf dem von Yang Zhang genannten "Pd-new"-Bad durchgeführt. Dabei wird der Palladiumanteil in der Lösung von 770 mg/L auf die Hälfte (385 mg/L) reduziert. Das Ergebnis offenbart eine schwächer ausgeprägte Kupfermetallisierung, jedoch treten auch hier unerwünschte Fremdabscheidungen auf. [S4]

Ein zweiter besonders vielversprechender Ansatz betrachtet die Teilchengröße des gelösten Stoffes selbst, da vermutet wird, dass die Palladium-Zinn-Komplexe zu groß und zu reaktiv für eine fein-selektive Kupfermetallisierung sind. Es wird angenommen, dass sie sich vereinzelt in den nicht laserbearbeiteten Zwischenräumen (Isolationsabstände zwischen den Leiterbahnen) verankern und somit eine "Brückenmetallisierung" des Kupfers auslösen können. Als Folgerung wird untersucht, wie sich Palladium in einer nassen Lösung feiner verteilen lässt. Dabei stößt man auf ionendispersen Lösungssysteme. Ionogene Palladiumbäder sind in den chemischen MID-Beschichtungs-prozessen bereits als Katalysator bei der Nickelbeschichtung auf Kupfer bekannt. Ihre Palladium-Konzentration ist jedoch 10-15-fach geringer, sodass sie keine ausreichende katalytische Wirkung für die Kupfermetallisierung erzielen können.

6.4 Definition chemischer Lösungen

Im weitesten Sinne können alle homogenen Gemische aus mindestens zwei Stoffen als Lösungen bezeichnet werden, die in den Aggregatzuständen fest, flüssig und gasförmig vorliegen können. Bei den wässrigen Lösungen unterscheidet man abhängig von der gelösten Teilchengröße zwischen echten Lösungen, sogenannten ionendispersen Systemen, Kolloid-Lösungen (leimartig) und Suspensionen, die schwebende Teilchen in der Flüssigkeit enthalten, wie in Bild 65 zusammengefasst. [65]



Bild 65: Einteilung der Lösungen nach Teilchengröße des gelösten Stoffes [65]

In ionogenen Lösungen sind ursprünglich feste Stoffe, idealerweise in Form von Einzelmolekülen oder Ionen, in Größenordnungen von kleiner 0,001 µm vollständig gelöst.

Im Gegensatz dazu sind die Teilchengrößen im kolloidalen Fall größer als der Durchmesser der Einzelmoleküle des Lösungsmittels. Man spricht hierbei von einer nicht vollständigen Lösung, da Partikel in Form von zusammenhängenden Agglomeraten (bzw. Cluster) in Größen zwischen o,oi und o,i µm vorliegen. Damit sind sie aufgrund ihrer Größe unterhalb der Wellenlänge des sichtbaren Lichts (o,4 bis o,8 µm) nicht unter dem Mikroskop erkennbar. Mit Hilfe einer Lichtstrahlanalyse (Tyndall-Effekt) kann anhand der Streuung in alle Richtungen, hervorgerufen durch die Partikel im Lichtstrahl, eine leichte Trübung der Lösung erkannt und von einer echten Lösung unterschieden werden. [61] [65] [68] [S3] Durch den leimartigen Zustand kann auf einen vergleichsweise geringen polaren Energieanteil bei diesen Lösungen geschlossen werden, was ihre bessere Anhaftung auf Polymersubstraten erklären kann.

In Suspensionen liegen Teilchengrößen von über 1 µm vor und sind daher in der Regel äußerlich durch eine Trübung gekennzeichnet.

6.5 Prinzip der komplexen Palladiumaktivierung (kolloidales Verfahren)

In der anorganischen Chemie werden Teilchenaggregate als komplexe Verbindung bezeichnet, die aus einem Zentralatom bzw. Ion bestehen und von einen oder mehreren Liganden (koordinierte Bindungen) umgeben sind. [68]

Das kolloidale Aktivierungsverfahren, basierend auf einer Komplexverbindung zwischen Palladium(II)-chlorid (PdCI₂) und Zinn(II)-chlorid, ist das heute am weitesten verbreitete Verfahren in der industriellen Anwendung zur vollflächigen Metallisierung von nichtleitenden Werkstoffen. [64] [133] Im Gegensatz zu Verfahren aus der Vergangenheit, bei denen in einer ersten Zinn(II)-chlorid-Lösung (SnCI₂) teilhydrolisiertes Zinnsalz auf die Oberfläche aufgebracht wird und in einer separaten Palladiumsalz-Lösung metallisches Palladium durch das niedrigere Redoxpotenzial des Zinns reduziert wird, funktionieren heutige Verfahren in einem Schritt. Dabei liegt das Palladium bereits in metallischer Form vor. Das führt zu einer dichteren und gleichmäßigeren Aktivierung durch die im Zinn(II)-Chlorid gelösten Palladium-Cluster. [61] [64] [134] [135]

Das Zinn(II)-Chlorid dient als Kolloidschutz und der Aufrechterhaltung der kolloidalen Verteilung in der salzsauren Lösung sowie dem Vorbeugen zur Bildung von Agglomeraten. Zudem bildet es eine negativ geladene Schutzhülle um das Palladium-Zinn-Cluster. Diese Hülle kann in Wechselwirkung mit den Dipolen der Wassermoleküle treten und hält dadurch die Metallcluster in Lösung. Dieser Zustand kann allerdings nur über einen begrenzten Zeitraum stabil gehalten werden. Durch Abbauprozesse entstehen Ungleichgewichte und somit ein Absinken des Zinn(II)-Gehaltes. Dadurch fallen die Pd/Sn-Kolloide spontan und irreversibel aus und es bilden sich große Agglomerate, die zu Boden sinken. [61]

In Bild 66 wird eine schematische Darstellung eines Palladium-Zinn-Komplexes gezeigt, dass in einer Zinnchlorid-Hülle Palladium-Cluster umschließt. Die Größe wird mit etwa 2-4 nm angegeben. [64] [132] [136]

Im Vergleich zur ionogenen Palladiumlösung ist die adsorbierte Palladiummenge auf der Substratoberfläche bei dem kolloidalen Ansatz erheblich größer. Grund hierfür ist das Anhaften von Clustern, die aus mehreren Atomen bestehen und somit ein stärkeres Potential für die weitere Metallisierung begünstigen.



Bild 66: Schematische Darstellung eines Palladium-Kolloids umhüllt von Zinn(II) [64] [137][S3]

Eine dunkelbraune Färbung ist charakteristisch für Pd/Sn-Lösungen. Die Arbeitstemperatur liegt normalerweise bei Raumtemperatur. Ab Temperaturen über 30 °C finden beschleunigt Abbauprozesse statt, die unter anderem zur Folge haben, dass der Zinn(II)-Gehalt absinkt und unterhalb eines kritischen Wertes (ca. < 1 g/l) spontan irreversibel agglomeriert und die Lösung unbrauchbar machen. Daraus folgt eine allgemeine, vergleichsweise kurze Standzeit von bis zu 48 Stunden. [49] [61]

Das hier beschriebene Bad ist in seiner Ausgangsform eine kolloidale Lösung. Beim Niederschlag des Palladiums auf die Substratoberfläche wird jedoch davon ausgegangen, dass eine Form der Sol-Gel-Umwandlung, hin zu einem gallertartigen Gel stattfindet, in dem Agglomerate von Kolloidclustern, die aus mehreren Atomen bestehen, den Prozessfortlauf weiter begünstigen. [65] [62] Daher ist im Falle der kolloidalen Aktivierung, bei der nicht vollflächigen Metallisierung, ein definierter, aktiver Spülprozess in verdünnter Salzsäure, zur Wiederherstellung der Selektivität unablässig. [138]

Dieser Umstand erklärt, warum dieses Verfahren ungünstig für 3D-MID-Fine-Pitch-Anwendungen ist, da Leiterbahnisolationsabstände kleiner als 100 µm mit dieser Sol-Gel-Verbindung in der Regel überwachsen, sich nur noch sehr schwer herausspülen lassen und bei der anschließenden chemischen Kupfermetallisierung als Fremdmetallisierung bzw. Kurzschluss mitbeschichtet werden. [61] [65] [139] [S3]

6.5.1 Palladiumaktivator mit kolloidalem Pd-Sn-Komplex nach LISA

Für die ersten Vorversuche zur selektiven Aktivierung der laserbearbeiteten duroplastischen Testplatten wurde der Ansatz aus der wissenschaftlichen Arbeit von Zhang Yang verwendet. In ihrer Dissertation konnte sie eine neue Lösung "New Palladium Activation Bath" entwickeln, die mit einem Palladium-Zinn Komplex zur Aktivierung von thermoplastischen Substraten gute Ergebnisse liefert. Die Lösung ist im Rahmen des LISA-Verfahrens *Laser Induced Selective Activation for Subsequent Autocatalytic Electroless Plating* entwickelt worden. [49] Der Vorteil liegt in der gesteigerten Abscheidungsgeschwindigkeit und Reaktivität sowie einem besseren Schichtwachstumsverhalten in der anschließenden Kupfermetallisierung. Der Ansatz der Badlösung ist in Bild 67 aufgeführt. Diese Aktivatorlösung erfordert für die selektive Metallisierung die Verbindung mit einem aktiven Spülprozess (z.B. Salzsäure), um die Selektivität wiederherzustellen. Sie wird nachfolgend beschrieben.



Kolloidale Palladium-Lösung Dunkelorange bis kristallin geruchlos ca. 48 Stunden stabil H,O 960 ml/L NaCI 100 g/L HCL 30 ml/L PdCl 770 mg/L CH₄N₂O 120 g/L SnCl, 25 g/L

Bild 67: Palladiumaktivator nach dem LISA-Verfahren mit kolloidaler Palladium-Zinn-Verbindung [49]

Die Versuche zeigen, dass auch auf laserbearbeiteten Duroplasten eine sehr gute Benetzung mit Palladium und ein qualitativ gutes Schichtwachstumsverhalten im chemischen Kupferelektrolyten erzielt werden kann. Nachteilig wirkt sich dieses starke Benetzungsverhalten durch eine schwierig zu steuernde selektive Abscheidung aus, wie in dem später folgenden Bild 69, links (a), gezeigt ist. Isolierende Leiterbahnzwischenräume werden bei geringen Abständen sehr leicht mitmetallisiert.

6.5.2 Metallisierung von Duroplasten mit kolloidaler Palladiumbekeimung

Der Arbeitsablauf bei dem kolloidalen Palladium-Zinn-Bad erfordert ein Bekeimungstauchbad mit einem anschließenden aktiven Spülbad. Beide Prozessschritte müssen folglich bezüglich ihrer Konzentration und Behandlungszeit aufeinander abgestimmt sein, um ein optimales Metallisierungsergebnis zu erzielen.

Auch die bei der Laserbearbeitung gewählten Parameter zur Erzeugung der mikrorauen Kavitäten müssen auf das Palladiumbad sowie das verwendete Substrat angepasst sein. In Bild 68 ist der schematische Prozessablauf für die kolloidale Aktivierung mit Palladium beschrieben.



Bild 68: Schematische Prozessdarstellung der kolloidalen Palladiumaktivierung

Durch die selektive Laserbearbeitung sind die Bereiche der Leiterbahnen auf der Polymeroberfläche definiert aufgeraut. Die Behandlungszeit und die Konzentration des Palladiumbades sind so abgestimmt, dass sich genügend Palladium-Zinn-Komplexe auf den bearbeiteten Bereichen der Oberfläche anhaften können. Mit Erhöhung der Behandlungsdauer und der Konzentration wird die Neigung zur unerwünschten Metallisierung stark erhöht. Die Probe in in Bild 69 (a) zeigt eine stark ausgeprägte Fremdabscheidung auf der Oberfläche des Polymers. Damit die Palladiumkeime die anschließende Metallisierung in Gang setzen können, erfolgt zunächst die Zerstörung des überschüssigen Schutzkolloides aus Zinnsäure bei gleichzeitiger Adsorption von metallischem Palladium auf der Substratoberfläche. Als Haftzentren für die Palladiumkeime auf dem Substrat dienen die durch die Vorkonditionierung erzeugten Kavernen in der mikroporösen Oberfläche des Substrates. Durch gezielte Versuche, die im Rahmen der hier beschriebenen Forschung durchgeführt wurden, konnten dabei folgende Mechanismen analysiert werden. Die Palladiumkeime schlagen sich bei diesem Prozess nicht nur auf den laserbearbeiteten Stellen nieder, sondern vereinzelt auch auf der restlichen Oberfläche des Polymerträgers. Die Grundrauheit der Substratoberfläche, bestimmt durch die Korngrenzen und Füllstoffe wie Glasfasern, Additive und Mineralstoffe, hat hierbei einen entscheidenden Einfluss. Daher muss in einem zweiten separaten Prozessschritt die Selektivität durch einen auf Salzsäure basierenden Spülprozess wiederhergestellt werden, der das Palladium an den unerwünschten Stellen auflöst und abspült. [S3]

Dieser Prozess muss von der Konzentration und Dauer so angepasst sein, dass Palladiumkeime nur noch in den Kavernen der laserbearbeiteten Oberfläche zurückbleiben und nicht mehr auf der restlichen Substratoberfläche. Verbleibende Palladiumkeime an unerwünschten Stellen des Substrats erzeugen dort sonst im folgenden Metallisierungsschritt ebenfalls eine Fremdabscheidung des Kupfers. In den Versuchen dieser Forschungsarbeit konnten gute Ergebnisse in einem VE-Spülbad mit 10-15-prozentiger Salzsäure erzielt werden.

Da das Palladiumbad verdünnte Schwefelsäure enthält, findet dieser Prozess teilweise bereits in dem Bad statt. Dieser Umstand bedingt auch die relativ kurze Standzeit von etwa 48 Stunden, bis das Bad unbrauchbar wird, da sich die Komplexverbindungen vermutlich langsam abbauen.

6 Selektive, lasergestützte Palladium-aktivierung für ein Fine-Pitch-Leiterbahnlayout im Tauchbadprozess





Metallisierte Probe (a) mit kolloidaler Pd.-Bekeimung; ohne aktive Spülung

Metallisierte Probe (b) mit kolloidaler Pd.-Bekeimung; Spüldauer zu lang (30 sek.)



Metallisierte Probe (c) mit kolloidaler Pd.-Bekeimung; leichte Fremdmetallisierung



Metallisierte Probe (d) mit kolloidaler Pd.-Bekeimung; viele Fehlstellen vorhanden

Bild 69: Metallisierte Proben mit kolloidaler Zinn-Palladiumbekeimung [S4]

6.6 Verfahren mit ionogener Palladiumaktivierung

Historisch betrachtet, werden ionogene Palladiumbäder bereits seit Mitte des 20. Jahrhunderts in großtechnischen Anlagen in der Serienfertigung zur Oberflächenkonditionierung eingesetzt. Sie sind aber im Laufe der Zeit aus wirtschaftlichen Gründen durch die bei der vollflächigen Metallisierung effektivere, zinn-kolloidbasierte Methode verdrängt worden. [61]

Bei dem hier betrachteten ionogenen Verfahren liegt das Palladium in weitgehen gelöster Form (Pd²⁺-Ionen) in einer sauren, katalytischen Lösung vor. Man bezeichnet es als ein molekulares und ionendispersives System, in dem die Ionen vereinzelt und nicht in größeren, zusammenhängenden Agglomeraten auftreten.

Bei der Bekeimung mit Palladium entstehen an der Substratoberfläche in Abhängigkeit der Rauheit, in Verbindung mit Wasser fest haftende Sol-Gel-Verbindung aus Zinnoxidhydrat, in die sich die Edelmetallkeime (Palladium) einbetten. [61]

Das Palladium liegt als elektrisch positiv geladenes Molekül (Kation) vor. Bedingt durch den Elektronenmangel ist es bestrebt weitere Elektronen aufzunehmen. Zur Ausbildung von Metallatomen auf dem Substrat ist eine Reduktion der Palladiumionen durch die Aufnahme von weiteren Elektronen auf der Substratoberfläche notwendig. Vereinfacht lässt sich die Reduktion anhand der Formel 6.1 beschreiben: [65] [62]

(6.1)

 $Pd^{2+} + 2e^- \rightarrow Pd$

- Pd²⁺ Palladium-Ion mit positiver Ladung
- e⁻ negativ geladenes Elektron (Negatron)
- Pd Palladiumatom (metallisches Palladium)

In Bild 70 ist die Reduktion eines Palladium(II)-Ions (Pd²⁺) zu einem metallischen Palladiumatom nach dem Bohr'schen Atommodell veranschaulicht. Als Reduktionsmittel werden der Lösung 46 g/l Harnstoff (CH4N2O) beigemischt. Daneben ist mit weiteren Effekten zu rechnen, die an der Reaktion beteiligt sind. Durch die Laserbearbeitung der duroplastischen Substratoberfläche verbleibt durch die Verbrennung katalytisch wirkender Kohlenstoff auf den bearbeiteten Stellen, der teilweise eine Abscheidung zu metallischem Palladium auch ohne den Harnstoff möglich macht, wie eigene Versuche zeigen können.

Eine weitere Theorie ist, dass das Formaldehyd, welches als Reduktionsmittel in dem chemischen Kupferelektrolyten enthalten ist, die Umwandlung zu metallischem Palladium erwirkt und erst anschließend das Kupfer reduziert wird. Exakte Untersuchungen hierzu sind kompliziert anzustellen, da die abgeschiedene Menge des metallischen Palladiums, die man vor dem Kupferprozess messen muss, auf geringe atomare Mengen beschränkt ist. Messungen mit einem hochsensiblen energiedispersiven Röntgenspektroskopie-Messgerät (EDX) oder alternativ eine Transmissionselektronenmikroskopische (TEM) Untersuchung können hierzu gegebenenfalls weiter Aufschluss bieten.

Im Vergleich zum kolloidalen Verfahren ist die adsorbierte Menge an Palladium auf der Substratoberfläche geringer, feiner verteilt und nicht in Form von Agglomeraten vorhanden. Das erklärt ein deutlich schwächeres und selektiveres Abscheideverhalten, wodurch es sich insbesondere für Fine-Pitch-Anwendungen auszeichnet, da diese Aktivierungslösung bei der anschließenden Kupfermetallisierung eher zur Bildung von Fehlstellen neigt als zur Übermetallisierung. Für eine ausreichende Belegung aller gewünschten Stellen auf dem Substrat ist in diesem Fall die exakte Dauer der Bekeimung eine der maßgeblichen Größen. Ein weiterer Vorteil dieser Elektrolytlösung ist, dass sie chemisch sehr stabil ist und vergleichsweise unempfindlich gegenüber metallischen Verunreinigungen. Eine hohe Standzeit der Lösung ist daher gewährleistet.

6 Selektive, lasergestützte Palladium-aktivierung für ein Fine-Pitch-Leiterbahnlayout im Tauchbadprozess



Bild 70: (links) Bohr 'sche Darstellung der Reduktion von Palladium(II) zu metallischem Palladium; (rechts) Palladiumreduktion auf Substratoberfläche [S3]

6.6.1 Prozess der ionogenen Palladiumbekeimung

Ionogene Palladiumbäder gibt es in breiter industrieller Anwendung und sind kommerziell beispielsweise von den Firmen Atotech, Mac Dermid-Enthone und Dow Chemical erhältlich. Sie werden neben anderen Beschichtungsanwendungen für die Erzeugung des elektrochemischen Potentials bei der chemischen Vernickelung im MID-LDS[®] und Zweikomponentenspritzgussprozess eingesetzt und verfügen in der Regel über einen geringeren Palladiumgehalt als der des kolloidalen Verfahrens mit 770 mg/L, die Yang Zhang untersucht hat. [49] [140]

Voruntersuchungen auf laserbearbeiteten Duroplasten zur Aktivierung wurden mit den Palladiumlösungen *MID Activator Ni* von Atotech und dem *Ronamerse SMT Catalyst CF* von Dow Chemical durchgeführt. Sie zeigen ein sehr gering bis gar nicht ausgeprägtes Metallisierungsverhalten im anschließenden elektrolytischen Kupferprozess. Hier ist die vorliegende Palladiumkonzentration in der Zusammensetzung für die Abscheidung von Kupfer nicht ausreichend hoch genug. Zur Anwendung als Aktivator von duroplastischen Substraten wird daher ein eigener Ansatz aus Schwefelsäure und Palladiumsulfat gewählt und über eine statistische Versuchsplanung die optimale Parametrisierung untersucht.

Die gewählte Konzentration von 300 ml Palladium orientiert sich an den Patenten von C.R. Shipley [141] [142], an dem sich auch das LISA-Verfahren mit einem untersuchten Bereich zwischen 100 – 800 ml/l anlehnt. Als Reduktionsmittel werden ebenfalls 46 g/l Harnstoff hinzugefügt. Die Lösung wird in entionisiertem Wasser angesetzt, sodass sich ein Arbeits-pH-Wert zwischen 1,7 und 2,2 einstellt. Die Arbeitstemperatur wird zwischen 20 °C und 40 °C gewählt. Der Ansatz der Lösung erfolgt in diesem Fall mit Schwefelsäure, alternativ sind Natrium- und Kaliumhydroxid bekannt.

Schwefelsäure besitzt im Gegensatz zu anderen Zusätzen eine hohe Leitfähigkeit und neigt selbst nicht zur Reduktion. Die Behandlungsdauer wird im Tauchvorgang unter ständiger Bewegung der Probe im Bad für eine Verweildauer von 30-60 Sekunden durchgeführt. In Bild 71 sind die Eigenschaften des ionogenen Palladiumaktivators zusammengefasst.

Contraction of the second seco	Bad Bezeichnung Farbe	ionogene Palladium-Lösung hell. gelblich. kristallin	
Ya	Geruch	geruchlos	
SCHOTT- DUK	Stabilität Ansatz (1000 ml)	unbegrenzt (nicht bestimmt	
	VE Wasser	H ₂ O 340 m	1/1
INCLOSED TO THE TOP	Schwefelsäure (96 %)	H ₂ SO ₄ 360 m	1/1
	Pd (99.95%) in 3% HNO ₃	Pd ² + 2e- 300 mg	g/l
	Harnstoff	CH ₄ N ₂ O 46 g	g/l

Bild 71: Ansatz des ionogenen Palladiumaktivators (SIPA-Verfahren)

Der Prozessablauf der Aktivierung ist in Bild 72 schematisch beschrieben und umfasst die wertschöpfenden Prozessschritte: Laserbearbeitung des Spritzlings, Aktivierung mit dem Katalysator und anschließende Metallisierung in dem Kupferelektrolyten. Die in der Literatur beschriebene Reduzierung des PD2+ zu metallischem Palladium, mit einem anschließenden aktiven Tauchspülprozess, mit beispielsweise Natriumhypophosphit (NaH2PO2), ist in diesem Anwendungsfall nicht notwendig wie die Untersuchungen zeigen. [64] [52]

Die Bekeimung verhält sich von vornherein selektiv auf die laserbearbeiteten Oberflächen, dass auf Mechanismen der grenzflächenenergetischen Wechselwirkungen hindeutet Ein einfacher Spülvorgang mit entionisiertem Wasser zur Vermeidung von Verschleppungen und Kontaminierung des Folgeprozesses ist ausreichend. Bei einem ideal eingestellten chemischen Kupfermetallisierungsprozess neigt diese Palladiumlösung zu keinem ausgeprägten Fremd- oder Übermetallisierungseffekt, was sie als idealen Aktivator für ein feines Leiterbahnlayout hervorhebt.



Bild 72: Schematische Darstellung des ionogenen Aktivierungsprozesses

6.6.2 Versuchsplanung zur Bestimmung der Badzusammensetzung des ionogenen Palladiumaktivators

Der Palladiumkatalysator ist der zentrale Prozessschritt zur Aktivierung des laserbearbeiteten Duroplasts. Die Präzision der Selektivität der anschließenden Kupfermetallisierung hängt hiervon maßgeblich ab. Zur Definierung der exakten Zusammensetzung des nasschemischen Prozesses durch eine ionogene Palladiumlösung, wird eine statistische Versuchsplanung (DOE) durchgeführt. Anhand dessen können ausgesuchte Parameter variiert werden und deren Einflussgröße auf das Prozessergebnis festgestellt werden.

Die Konzentration der Lösung wird angelehnt an das Patent von Charles R. Shipley aus dem Jahr 1961 [141] in den Stufen 100 mg/l, 400 mg/l und 800 mg/l variiert, um zu prüfen, ob eine Erhöhung des Palladiumsulfats gegenüber dem des LISA-Verfahrens [49] eine Intensivierung der Kupferabscheidung bewirken kann. Die Parameterbereiche für die Temperatur und die Behandlungsdauer im Palladium sind in Größenordnungen gewählt worden, die bei vergleichbaren Prozessen in der industriellen Beschichtung üblich sind und aus den Hersteller-Datenblättern entsprechender Produkte entnommen wurden. [140]

Die Konzentration der Schwefelsäure wird in dem Bereich 120 bis 960 ml/l variiert und ist ebenfalls im Grundverhältnis angelehnt an die kommerziell verfügbaren Palladiumaktivatoren. Die Behandlungsdauer bzw. Tauchzeit in der Katalysatorlösung wird von den üblichen 60 Sekunden mit der halben Zeit verglichen. Bei höheren Behandlungszeiten ist mit zunehmender Fremdmetallisierung zu rechnen. Übliche ionogene Palladiumaktivatoren sind zwischen 20 °C und 45 °C zu betreiben, daher werden bei der Elektrolyttemperatur diese beiden Extreme untersucht. [143]

Ein einfacher Spülprozess mit entionisiertem Wasser bleibt bei dem ionogenen Verfahren notwendig, um Verschleppungen, die den Kupferelektrolyten kontaminieren, zu verringern. Für die katalytische Wirksamkeit der Aktivierung ist jedoch eine Mindestmenge Palladium notwendig. Inwiefern der Spülprozess hier einen Einfluss auf die abgeschiedene Kupferschichtdicke hat, soll mit dem Wechsel der Spülzeit von 10 und 20 Sekunden überprüft werden. [S3]

Die Teststrukturen des DOE werden jeweils mit zwei verschiedenen Nd-YAG Laserquellen, mit 80 µm und 50 µm Spotdurchmesser bearbeitet.

Als Ausgangsgröße bzw. Qualitätsmerkmal wird ebenfalls die Messung der Kupferschichtdicke nach 120 Minuten Prozesszeit angewendet. Die Messung wird mit dem Röntgenfluoreszenzmessgerät Fischerscope XDLM C4 automatisiert mit Hilfe einer Mappingfunktion der Software durchgeführt. Wie bereits beschrieben, ist der Kupfermetallisierungsprozess durch Schwankungen in seiner Metallabscheidegeschwindigkeit geprägt. Somit ist es erforderlich, alle Proben des DOEs im möglichst gleichen Zeitraum zu metallisieren, um den Einfluss unterschiedlicher reaktiver Elektrolytzustände auf die Schichtdicke auszuschließen. Aufgrund dieser Bedingung ist die Anzahl der Probekörper und daher die DOE-Varianten begrenzt. Wie in Tabelle 21 zusammengefasst, werden 24 Testplatten als Probekörper mit dem bereits in den vorhergehenden Untersuchungen verwendetem und etabliertem Testlayout strukturiert.

Proben- nummer	Laser 1	Laser 2	Konz. Palladium [mg/l]	Konz. Schwefel- säure [ml/l]	Verweildauer Pd. [s]	Temperatur Pd. [°C]	VE-Spüldauer [s]
Proben- nummer 1 2 3 3 4 5 6 7 8 8 9 10 11 12	- Laser 1 L 	Laser 2 Nd:YAG 1064nm 60µm Lasermark	Konz, Palladium [mg/l] 100 100 100 100 100 100 100 100 400 400	Konz. Schwefel- säure [ml/l] 120 480	Verweildauer Pd. [s] 60 60 60 60 30 30 30 30 30 60 60 60 60 60 70 70	Temperatur Pd. [°C] 23 23 45 45 45 45 45 23 23 23 23 23 45 45	VE-Spüldauer [s] 10 20 10 20 10 20 10 20 10 20 10 20 10 20
11 12 13 14			400 400 400 400	480	60 60 30 30	45 45 45 45	10 20 10 20
15 16 17			400 400 800		30 30 60	23 23 23	10 20 10
18 19 20			800 800 800		60 60 60	23 45 45	20 10 20
21 22 23 24			800 800 800 800		30 30 30 30	45 45 23 23	10 20 10 20

Tabelle 21: Statistischer Versuchsplan für den Palladiumaktivierungsprozess [S3][S7]

Das Layout mit jeweils 24 einzelnen Feldern wird auf 3 x 6 cm großen Trägerplatten auf dem Substrat C (EP3581T-1) mit der Fusion 1100 von LPKF mit einem Spotdurchmesser von 50 μ m und auf der rückwärtigen Seite mit ebenfalls 24 Feldern mit dem Lasermark von Trumpf (60 μ m Spotdurchmesser) strukturiert.

Nach dem Versuch werden alle metallisierten Felder mit dem Fischerscope vermessen. Somit ergeben sich für die Merkmale mit zwei Varianten 288 Schichtdickenmesswerte und über die Merkmale mit 3 Variationen 192 hinterlegte Messwerte. Über jede Variation wird der Mittelwert der Messwerte gebildet. Die unterschiedlichen Laserparameter werden einzeln nicht ausgewertet, da sie ein vergleichbares Bild wie die bereits durchgeführten Untersuchungen aufzeigen.

Das Diagramm in Bild 73 veranschaulicht die Ergebnisse des DOEs anhand der gemessenen Schichtdickenwerte. Die Messwerte der Proben, die mit dem Trumpf Lasermark strukturiert wurden, zeigen über fast alle Versuchsvarianten eine höhere Kupferschichtdicke. Erklären lässt sich dieses Ergebnis mit dem unterschiedlichen Spotdurchmesser, der über alle Laserparameter hinweg ein abweichendes Verhalten der Oberflächencharakteristik erzeugt. Dieser Effekt kann erstens die Aktivierung und Metallisierung beeinflussen und zweitens kann das Prinzip der Röntgenflureszenzmessung durch die abweichende Oberflächenbeschaffenheit aufgrund des Rückstrahlverhaltens mit beeinflusst werden.

Der Einfluss der Temperatur auf das Aktivierungsverhalten zeigt ein gegenteiliges Ergebnis als sich aus dem zu erwartenden Verhalten von chemischen Prozesse vermuten lässt. Die Erhöhung der Temperatur von 23 °C Raumtemperatur auf 45 °C hat eine deutliche Abnahme der Schichtdicke zur Folge. Die Erhöhung der Zeit des Palladiumbekeimungsprozesses bzw. die Dauer in der der Katalysator Einwirken kann, hat ebenfalls einen signifikanten positiven Einfluss auf die abgeschiedene Kupferschichtdicke.



Bild 73: Auswertung des DOEs zur Prozessentwicklung des Palladiumaktivators [S3]

Die aussagekräftigste Erkenntnis der statistischen Versuchsplanung ist die über die Konzentration des Palladiums und der Schwefelsäure in der Aktivatorlösung. Teilt man die vier untersuchten Maßnahmen in ihrer Wirksamkeit ein so ergibt sich die Rangfolge C, A, B, D. Daraus folgt, dass die Konzentration (C) den größten Einfluss erwirkt. Hier deuten die Messergebnisse auf ein Sättigungsverhalten hin. Es zeigt sich, dass bei einer Erhöhung der Palladiummenge über 100 mg/l hinaus die abgeschiedenen Kupferschichtdicke abnimmt. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass das Verhältnis zwischen dem Reduktor als Lieferant der freien Elektronen und dem Palladium nicht linear verläuft. Das bedeutet, dass mit zunehmender Palladium-Konzentration mehr freie Elektronen durch den Harnstoff benötigt werden, um eine Effektivitätssteigerung der Palladiumbekeimung zu erwirken.

Die Variation der Dauer der Spülung zwischen Palladium- und Kupferbekeimung bestätigt ein bereits zu erwartendes Ergebnis. Mit Steigerung der Spülzeit in einem raumtemperierten VE-Wasserbad werden zunehmend die Palladiummoleküle aus den Verankerungen herausgespült und damit die katalytische Wirkung herabgesetzt. Dieser Prozessschritt muss somit auf den Aktivator, die Oberflächenrauheit und das Substrat abgestimmt werden.

6.6.3 Der ionogene Palladiumaktivator (SIPA-Verfahren) in der Anwendung

Das Kupferwachstumsverhalten bei der ionogenen Palladiumaktivierung hat eine eigene Charakteristik, welche von einem langsamen Inselwachstum geprägt ist. Im Vergleich zur kolloidalen Palladiumbekeimung, die in den ersten Minuten nach dem Eintauchen in den Kupferelektrolyten ein rasches Wachstum erzeugt, beginnt die Kupferbekeimung bei Verwendung der ionogenen Aktivierungslösung deutlich langsamer. Nach 15 Minuten Prozesszeit zeigen sich vereinzelt erste abgeschiedene metallische Kupferagglomerate auf der Oberfläche, wie in Bild 74 gut zu erkennen ist. Die Verteilung auf der Fläche ist in diesem Stadium von geringer Homogenität. Die ersten Inseln schließen sich langsam nach etwa 30 Minuten Behandlungsdauer zusammen, bis nach 90 – 120 Minuten eine vollflächige Beschichtung vorhanden ist. Mit deutlich reaktiveren Kupferelektrolyten, sogenannten Strike-Bädern, die eine durchschnittliche Abscheiderate von bis zu 10 μ m/h Schichtdicke erzielen können, ist hierbei aufgrund des starken Reaktionspotentials mit schnelleren Ergebnissen zu rechnen. [64]

Entsprechende Bäder werden bei dem Zweikomponenten-Spritzguss-Prozess eingesetzt. Dabei ist bereits das Rohgranulat einer der beiden Kunststoffkomponenten vor den Spritzgießen mit Palladium bedampft. Um diese Komponente anschließend mit chemischem Kupfer zu metallisieren, bedarf es in der ersten Stufe eines hochreaktiven Kupferelektrolyten zur Anlage einer ersten initialen Kupferschicht. In einem zweiten Aufbaubad wird dann die finale Schichtdicke metallisiert. [P5]

Das Wachstumsverhalten weist, abgesehen von der Langsamkeit, Analogien zu dem LDS[®]-Verfahren auf. Es wird angenommen, dass die in dem LDS[®]-Polymer verteilten und aktivierten Metallionen ebenfalls ein vergleichbares "Inselpotential" für den Elektronenaustausch bei der Reduktion erzeugen. Für die Metallisierungsversuche mit der ionogenen Palladiumbekeimung wurden im Laufe der Forschungsarbeit verschiedene Varianten mit Mäanderstrukturen entworfen, um diese auf die unterschiedlichen Geometrien der zur Verfügung stehenden Substrate anzupassen.



Bild 74: Wachstumsverhalten der chemischen Kupfermetallisierung mit dem SIPA-Verfahren

Die Leiterbahnabstände müssen zu Beginn deutlich größer als die Bahnbreite gewählt werden, da erst Erfahrungen in der Badführung der Kupfermetallisierung gesammelt werden müssen, um die Proben durch eine zu starke Metallisierung nicht sofort unbrauchbar zu machen. Aufgrund der begrenzten Kapazität in der Aktivierung und Metallisierung im Labormaßstab können nicht alle Materialvarianten, Laserparameter und Aktivierungseinstellungen in Form einer statistischen Versuchsplanung gegeneinander geprüft werden um die beste Kombination zu ermitteln.

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Metallisierung von Leiterbahnstrukturen zwischen 80 und 40 μ m auf den Substratmaterialien B und C vorgestellt, wie in Tabelle 22 zusammengefasst.

	Epoxid Duroplast Substrate	Leiterbahn- breite	Leiterbahn- abstand	Kupfer- metallisierung	Schicht- system	Bewertung
	NU505	80 μm	150 µm	chemisch	Cu	+++
Träger 1	NU505	60 μm	100 µm	chemisch	Cu	+++
	NU505	40 μm	50 µm	chemisch	Cu	+
	NU505	80 μm	150 µm	galvanisch	Cu	+++
Träger 2	NU505	60 μm	100 µm	galvanisch	Cu	+++
	NU505	40 μm	50 µm	galvanisch	Cu	++
	EP3581T-1	30 µm	40 µm	chemisch	Cu	-
Trägor e	EP3581T-1	60 µm	60 μm	galvanisch	Cu	+
Trager 3	EP3581T-1	40 µm	200 µm	chemisch	Cu/Ni/Au	++
	EP3581T-1	80 µm	50 µm	galvanisch	Cu/Ni/Au	+++

Tabelle 22: Fine-Pitch-Leiterbahnen mit dem SIPA-Verfahren

Das Material B (NU505) wird ausgewählt, da es im Vergleich zu dem Typ C (EP3581T-1) nur mineralisch gefüllt ist, anstatt mit Glasfasern. Schon bei der Laserbearbeitung hat es sich durch die sehr gute Kavitätenausbildung ohne Materialauswürfe an den Rändern als besonders geeignet hervorgetan. In beiden Fällen werden Varianten mit chemischer und galvanischer Kupfermetallisierung prozessiert.

Als Laserparameter werden 3 Watt mit einer Pulsfrequenz von 200 kHz und der Vorschubbewegung 1000 mm/s gewählt.

Die Füllinien des Lasers, auch Hatchlinien genannt, werden zuerst automatisch durch die Software *CircuitPro 3D* von LPKF bei der Arbeitsvorbereitung gesetzt. Je feiner die Leiterbahndimensionen sind, desto mehr müssen die für den LDS[®]-Prozess übliche Hatchlinienanzahl, der Hatchabstand und die Randlinien manuell angepasst werden, sodass nur die minimal notwendige Wirkleistung des Lasers aufgebracht wird, da sonst die Qualität der Leiterbahnen beeinträchtigt wird. Alle hier vorgestellten Versuche werden mit der LPKF Fusion 1100 Laseranlage, mit einem Spotdurchmesser von 50 µm strukturiert. Durch das einmalige Überfahren einer Hatchstruktur mit dem Laser können hierbei auch Metallisierungsbreiten von unter 50 µm erzeugt werden. Die Leiterbahnabstände sind mit 50, 100 und 150 µm entsprechend hochgewählt, um der Bildung von Kurzschlüssen entgegenzuwirken.



Substrat: B (NU505) oben: chemisch CU unten: galvanisch CU

Breite: 80 µm Abstand: 150 µm Vergrößerung: 150-fach Breite: 60 µm Abstand: 100 µm Vergrößerung: 150-fach

Breite: 50 µm Abstand: 50 µm Vergrößerung: 150-fach

Bild 75: Testträger mit Leiterbahnlayout auf dem Substrat B (NU505)

Die Ergebnisse auf den mikroskopischen Fotos in Bild 75 zeigen bei den Leiterbahnbreiten 80 µm und 60 µm sehr gute Ergebnisse sowohl mit der chemischen als auch mit der galvanischen Metallisierung. Bei den 50 µm breiten Strukturen fällt vor allem bei der chemischen Variante ein zunehmendes Ausfransen der Randgeometrie auf, welches bei einer weiteren Reduzierung des Abstandes 40 µm zu Kurzschlüssen führen würde. Durch die galvanische Metallisierung werden in geringem Maß überschüssige Kupferpartikel auf der Oberfläche, die nicht elektrisch angeschlossen sind, wieder vom Substrat gelöst. Der Galvanisierungsprozess hat somit einen Effekt, der die Selektivität der Metallisierung begünstigt.

In Bild 76 sind Aufnahmen von Teststrukturen auf dem Substrat C (EP3581T-1) dargestellt. Bei diesem mit Glasfasern gefüllten Material offenbaren sich die negativen Einflüsse auf die Metallisierung etwas deutlicher. Die Strukturen mit 40 µm (rechts und links) weisen Beeinträchtigungen der Leiterbahn durch Kurzschlüsse und Unterbrechungen auf, die auch bei der galvanischen Metallisierungsvariante beeinträchtigend sind. Die beiden rechten Bilder zeigen den typischen MID-Schichtaufbau mit Kupfer, Nickel und Gold.



Bild 76: Testträger mit Leiterbahnlayout auf dem Material C (EP3581T1)

Die experimentellen Metallisierungsdurchführungen in Kapitel 6 veranschaulichen, dass mit dem SIPA-Verfahren Leiterbahnbreiten mit bis zu 40 µm Breite abgebildet werden können. Die Abstände zwischen zwei Leiterbahnen können jedoch nicht im gleichen Maß reduziert werden, sondern müssen in Abhängigkeit des Substrates teilweise auf den doppelten Wert vergrößert werden. Die durchgängige Gegenüberstellung des LDS^{*}-Verfahrens, zeigt in den Versuchen eine gute Vergleichbarkeit in dem Miniaturisierungsumfang der Leiterbahnstrukturen.

Der entscheidende Faktor für Fine-Pitch-Leiterbahnen, stellt jedoch das Substratmaterial dar. Glasfasergefüllte Materialien mit Faserlängen zwischen 50-200 µm wirken sich eindeutig nachteilig auf die Selektivität und Ausprägung der Randgeometrie der Leiterbahnen aus.

Neueste Bestrebungen der industriellen Materialhersteller deuten auf zukünftige Epoxidwerkstoffe hin, die Kurzfaserfüllstoffe enthalten mit Längen unter 10 µm. [44] In Verbindung mit geringeren Laserspotdurchmessern sind auf diese Weise zukünftig deutliche Verringerungen der Leiterbahnstrukturen auf MIDs zu erwarten.

7 Untersuchung der Benetzungsmechanismen zur selektiven Bekeimung von duroplastischen Substraten in einem Tauchbadverfahren

Duromere zählen zur Gruppe der Polymere und sind, ohne entsprechende Additive, gute Isolatoren. Für die Herstellung von polymerbasierten mechatronischen Schaltungsträgern ergibt sich dabei folgende Fragestellung: Wie kann eine laserstrukturierte, elektrisch nichtleitende Polymeroberfläche den nasschemischen Palladium-Katalysator aufnehmen und im drauffolgenden Prozess selektiv mit metallischem Kupfer beschichtet werden? Die Fähigkeit eines Stoffes, mit seiner Oberfläche an der eines anderen zu haften, wird durch verschiedene adhäsive Faktoren bestimmt. Die Adhäsion wird als Zustand einer Grenzflächenschicht beschrieben, die sich zwischen zwei miteinander in Kontakt tretenden kondensierenden Phasen bildet, wie in Bild 77 links veranschaulicht. Der mechanische Zusammenhalt der beteiligten Phasen, der durch molekulare Wechselwirkungen in der Grenzfläche hervorgerufen wird, ist das wesentliche Merkmal dieser Verbindung. [90] Die theoretische und experimentelle Erforschung der Adhäsionsmechanismen beschäftigt sich mit der Charakterisierung und Erklärung dieser Wechselwirkungen.



Bild 77: Kontaktwinkel, Adhäsion, grenzflächenenergetische Wechselwirkung [63] [144][S3]

7 Untersuchung der Benetzungsmechanismen zur selektiven Bekeimung von duroplastischen Substraten in einem Tauchbadverfahren

Das Forschungsgebiet der Adhäsion beginnt am Ende des 18. Jahrhunderts mit Joseph-Aignan Sigaud de Lafond, der als erster die Theorie durch die Erkenntnis konkretisieren, dass die Haftmechanismen zwischen den Grundbausteinen (Atome, Ionen, Moleküle) auf eine Gravitation in der Grenzflächenschicht zurückzuführen sind. [144] Die späteren Untersuchungen von Michael Faraday konnten diese Theorie konkretisieren durch die Erkenntnis, dass zwischen den Phasenbausteinen tatsächlich anziehende Wechselwirkungskräfte bestehen, die den Zusammenhalt durch gegenseitige Absättigung bewirken. Dabei stellte er fest, dass Atome nahe der Phasengrenze in einem energiereicheren Zustand aufgrund von nicht abgesättigten Restkräften vorliegen als die gleichen im Phaseninneren (Bild 77 rechts). [144] Der in diesem Forschungszusammenhang eingesetzte Laserprozess erzeugt folglich durch die Aufrauhung der Oberfläche eine Erhöhung des Adhäsionspotentials in der Grenzfläche.

Neben der mechanischen Druckknopftheorie gibt es Modelle wie den Diffusionsmechanismus, elektrostatische Kräfte und weitere chemische und thermische Hypothesen, die sich in die speziellen Adhäsionsmodelle untergliedern lassen. Die in Bild 78 zusammengefassten Theorien treten in der Praxis alle gleichzeitig auf, unterscheiden sich allerdings in ihrer jeweiligen Wirkkraft erheblich voneinander. Sie werden in der weiteren Ausarbeitung nicht einzeln vorgestellt und untersucht, da nicht jede dieser Theorien eine Palladium-Polymerhaftung vollständig interpretieren kann. Für die Erklärung des Benetzungsverhaltens wird sich im weiteren Verlauf der Ausarbeitung daher auf die durch Messungen überprüfbare Druckknopftheorie des mechanischen Adhäsionsmodells gestützt. [S3]



Bild 78: Übersicht und Gliederung der wichtigsten Adhäsionsmodelle [144]

Wie bereits ausgeführt, haben bei der Metallbeschichtung von Polymersubstraten deren chemische Zusammensetzung, Füllstoffe und insbesondere die Oberflächenbeschaffenheit auf die Benetzungsfähigkeit in flüssigen Elektrolyten einen entscheidenden Einfluss. [61] Die Gegenkraft zur Adhäsion ist die Kohäsion, bei der die Anhaftung auf der Theorie der gegenseitigen Anziehung der Atome und Moleküle durch die stoffliche Homogenität einer Substanz basiert und die den polaren Zusammenhalt von flüssigen Medien bewirkt. Für eine erfolgreiche Benetzung und Adhäsion auf einer Oberfläche muss daher die notwendige Kraft zur Dispersion überwunden werden. [145] [S9]

Die Adhäsion von Materialien im gleichen oder differenten Aggregatszustand (fest, flüssig, gasförmig) erfordert einen möglichst engen Kontakt der Komponenten auf ihrer molekularen Ebene. Eine gute Haftung kann nur dann realisiert werden, wenn durch eine hohe Anzahl an Kontaktpunkten ein Verbund von Komponenten vorliegt. Die Adhäsion des neuen Werkstoffverbundes wird somit durch die Vorkonditionierung der Oberfläche in diesem Fall durch den Spritzgussprozess selbst, die Laserbearbeitung und das Aufquellen im Tauchbad bestimmt. [61] [70]

7.1 Adhäsion durch mechanische Verankerung

Das mechanische Adhäsionsmodell, welches häufig auch als Druckknopftheorie bezeichnet wird, beschreibt die Anhaftung von Molekülen und Agglomeraten in Kavitäten einer dafür zuvor konditionierten Oberfläche. Der Ursprung findet sich in der Norm der Klebetechnik (DIN 8593-8), wonach eine adhäsive Bindung von zwei Fügepartnern erzeugt werden kann, indem ein flüssiger Kleber (Adhäsiv) in die Oberflächenkavitäten eines Festkörpers (Adhärens) eindringt und dort letztendlich aushärtet. [76] [90]

Die Folge ist eine mechanische Verankerung des Klebstoffes mit den zu fügenden Komponenten, vergleichbar wie bei einer Druckknopfverbindung. Prinzipiell gilt dabei: je stärker die Rauheit erhöht wird, desto mehr steigt die adhäsionsfördernde Vergrößerung der Oberfläche, die wiederum zu einer zunehmenden Haftung führt. Allerdings hängt die mechanische Adhäsion nicht nur von der Oberflächenrauheit, sondern auch von der Form und der Geometrie der Phasengrenze ab. Adhäsionsfördernd ist eine Geometrie deren Grenzfläche so beschaffen ist, dass es zu möglichst vielen Hinterschneidungen und somit zu einer Vergrößerung der Kontaktoberfläche kommt, wie in Bild 79 rechts unter c) abstrahiert. Nach mechanischen Gesichtspunkten gewährleistet diese Geometrieform die höchste Verbundfestigkeit im Vergleich zu den Varianten a) und b). [63] [144] [146] 7 Untersuchung der Benetzungsmechanismen zur selektiven Bekeimung von duroplastischen Substraten in einem Tauchbadverfahren



Bild 79: Mechanischen Verankerung zwischen Adhäsiv und Adhärens [146]

Analog zur Klebeverbindung lässt sich die Adhäsionstheorie auch auf die Palladium-Polymerhaftung übertragen. Die Polymeroberfläche wird so stark aufgeraut, dass es zu einer gesteigerten Flüssigkeitsaufnahme und einer Verankerung der Moleküle kommt. Eine definierte Aufrauhung kann über mechanische Bearbeitung, chemisches Beizen, oder wie bei dem hier beschriebenen Verfahren über einen Laserprozess erzeugt werden.

Die Effekte lassen sich über die erzwungene Aufrauhung nicht unbegrenzt steigern. Ab einer bestimmten Intensität ist in Abhängigkeit des Substratmaterials mit gegenteiligen Effekten zu rechnen. Aus der industriellen Beizbehandlung von Polymeren mit Chromschwefelsäure ist eine Überbeizung bekannt. Dabei werden durch zu lange und intensive Behandlungszeiten zu viele und zu große Kavernen erzeugt, die die Oberfläche so porös und löchrig werden lassen, dass sich dort kaum Aktivatorkeime anlagern lassen bzw. leicht wieder herausgewaschen werden können. Aufgrund der Sprödigkeit besteht außerdem die Gefahr, dass der oberflächennahe Bereich zu einem späteren Zeitpunkt in größeren Zusammenhängen wegbrechen kann.

Der Fachausschuss der *Deutschen Gesellschaft für Galvanotechnik* hat in der Veröffentlichung "*Fortschritte bei der Galvanisierung problematischer Grundwerkstoffe*" eine Untersuchung zur Evaluierung des Zusammenhangs zwischen Abzugsfestigkeit einer Metallschicht und der Beizdauer auf einer PP-Oberfläche durchgeführt. [147] Demnach konnte beobachtet werden, wie die Haftfestigkeit mit steigender Aufrauhung der Oberfläche zuerst zunahm, dann jedoch wieder abfiel, als die Oberflächenrauheit ein bestimmtes Maß überschritten hatte. Auch hier wird geschlussfolgert, dass die Oberfläche zwar sehr stark aufgeraut wird, gleichzeitig aber soweit geschädigt und zerklüftet wird, sodass eine gute Metallkeimverankerung darin nur noch ungenügend möglich ist.

In dieser Ausarbeitung wird die Hypothese aufgestellt, dass sich durch die Laserbearbeitung eine Vergrößerung der Oberfläche mit definierten mikroporösen Kavitäten erzeugen lässt, in die sich die Palladiummoleküle während des Tauchvorgangs besser einlagern können, als auf den unbearbeiteten glatten Stellen. Ziel ist es, dass sie dadurch auch nach der Spülung mit Wasser in den Vertiefungen verbleiben, anschließend in den Kupferelektrolyten miteingebracht werden und an diesen Stellen katalytisch wirken können. Nachfolgend wird versucht, diese Theorie anhand von Untersuchungen der Benetzungsfähigkeit der laserbearbeiteten Polymeroberfläche durch eine goniometrische Messung zu beweisen.

7.2 Theorie der Benetzungsfähigkeit

Die unter Kapitel 7 beschriebenen Adhäsionshypothesen treten alle in Kombination und mit entsprechenden Wechselwirkungen zueinander bei den hier angewendeten Metallisierungsprozessen auf und beeinflussen die Anhaftung von Metallatomen auf der Substratoberfläche primär. Die genauen Effekte und Größen sind häufig schwer quantitativ messbar, wie beispielsweise die Van-der-Waals-Bindungen, die bisher nicht messbar sind. Zudem sind ihre anzunehmenden Einflussgrößen auf das Metallisierungsergebnis stark voneinander abweichend. [23] [144] Um die Funktionsweise eines lasergestützten Aktivierungs- und Metallisierungsprozesses zu beschreiben, ist es notwendig, mindestens einen dominanten Mechanismus quantitativ nachzuweisen.

Eine relativ zuverlässige Methode, die Benetzungsfähigkeit von Feststoffoberflächen zu messen, ist die Kontaktwinkelmessung und damit die Bestimmung der Oberflächenenergie. [63] Sie wird daher für die Beschreibung des Wirkmechanismus der Palladiumaktivierung in diesem Forschungszusammenhang herangezogen.

Eine Oberfläche ist eine sichtbare Fläche einer Flüssigkeit oder eines soliden Festkörpers, welche an ein umgebendes Gas grenzt, das in den meisten Fällen die Umgebungsatmosphäre, bestehend aus Luft, ist. Unter dem Begriff Grenzfläche wird die Fläche zwischen zwei festen oder flüssigen, bzw. eine Kombination aus festen und flüssigen Phasen verstanden. Als Ursache für die Oberflächenspannungen gelten die Wechselwirkungen zwischen benachbarten Molekülen. Im Inneren eines Flüssigkeitstropfens sind die resultierenden Kräfte Null und die Moleküle befinden sich im Gleichgewicht, wenn sich der Tropfen, wie in Bild 80 abstrahiert, weder ausdehnt noch zusammenzieht. Wird dagegen das Molekül an der Flüssigkeitsoberfläche betrachtet, fehlt ein Teil der Wechselwirkung mit anderen Molekülen der Flüssigkeit und als resultierende Kraft wirkt auf das Molekül an der Oberfläche eine nach innen, senkrecht zur Oberfläche gerichteten Kraft σ_L , die Oberflächenspannung genannt wird. [62] [S9] 7 Untersuchung der Benetzungsmechanismen zur selektiven Bekeimung von duroplastischen Substraten in einem Tauchbadverfahren



Bild 80: Benetzung durch liegenden Tropfen auf fester Oberfläche [63] [61]

Bei der Kontaktwinkelmessung wird eine flüssige Lösung mit bekannter Oberflächenspannung mit einem Tropfen auf ein planares Polymersubstrat titriert. Es treten je nach Ausprägung der Grenzflächenspannung γ_{sv} (fest/gasförmig), γ_{Iv} (flüssig/gasförmig) und γ_{sl} (fest/flüssig) verschiedene Gleichgewichtszustände der drei beschriebenen Phasen auf. [63] [61] Unter Kontaktwinkel, wie in Bild 80 dargestellt, versteht man den Winkel, der eine Tangente an der Tropfenkontur in dem Drei-Phasen-Punkt zur Oberfläche des Festkörpers bildet und somit ein quantitatives Maß für die Benetzbarkeit der Oberfläche darstellt. Der vektorielle Zusammenhang der Grenzflächenspannung für einen liegenden Tropfen auf einem ebenen Feststoff ist durch die Formel (3.1) beschrieben. Sie ist nach ihrem Entdecker *Young 'sche* Gleichung benannt. Sie betrachtet jedoch nicht den Einfluss der Kondensation durch das umgebende Medium, wie in diesem Fall Luft, der vernachlässigt wird. [63] [144] [148]

$$\sigma_{s} = \sigma_{LS} + \sigma_{L} * \cos \theta \qquad (7.1)$$

$$\Leftrightarrow \cos \theta = \frac{\sigma_{S} - \sigma_{LS}}{\sigma_{L}}$$

$$\Theta \qquad \text{Kontaktwinkel Theta}$$

$$\sigma_{S} \qquad \text{Festkörperoberflächenspannung}$$

$$\sigma_{L} \qquad \text{Oberflächenspannung der Flüssigkeit}$$

 $\sigma_{LS} \qquad \mbox{Grenzflächenenergie zwischen Flüssigkeit und Feststoff} \\$

Für eine erfolgreiche Benetzung eines Feststoffsubstrates durch eine Flüssigkeit gilt also folgende Bedingung: [61]

$$\sigma_s \ge \sigma_{LS} + \sigma_L \tag{7.2}$$

Die Benetzungsfähigkeit einer Substratoberfläche lässt sich wie in Bild 81 dargestellt, über die Höhe des gemessenen Kontaktwinkels θ bemessen. Je nach Verhältnis von Adhäsions- und Kohäsionskräften kann die Oberfläche eines Stoffes hydrophob oder hydrophil sein. Im benetzenden Fall ist die Adhäsion größer als die Kohäsion (z.B. Wasser auf Glas, mit $\theta = 0^{\circ}$). Im umgekehrten Fall ist die Kohäsion größer als die Adhäsion (z.B. Quecksilber auf Glas, mit $\theta = 150^{\circ}$). Eine gute Benetzung liegt demzufolge bei einem kleinen Kontaktwinkel vor, wie in Bild 81 ganz rechts veranschaulicht.



Bild 81: Klassifizierung des Kontaktwinkels

7.3 Goniometrische Messung der Benetzung von Polymersubstraten (Kontaktwinkelmessung)

Das Ziel der Untersuchung ist die Bestimmung der Benetzungsfähigkeit, bzw. der Flüssigkeitsaufnahme der Substratmaterialien mit der Palladium-Katalysatorlösung in Abhängigkeit der durch den Laserprozess erzeugten Rauheit. Die Untersuchungen zeigen, dass Korrelationen zwischen der Laserbearbeitung, der Beschichtung mit Palladium im Aktivierungsschritt und der chemischen Kupfermetallisierung bestehen. Durch die definierte Aufrauhung der Substratoberfläche wird die Fähigkeit der Oberfläche, Flüssigkeiten aufzunehmen, vergrößert. Das hat zur Folge, dass mehr Palladiumkeime je Fläche bei gleicher Tauchbadzeit angelagert werden können.

Bei der anschließenden chemischen Kupfermetallisierung wächst somit mehr Kupfer je Flächeneinheit bei gleichbleibender Zeit und Konzentration. In Bild 82 ist das optische Messverfahren durch ein Goniometer (Typ PGX+ der Firma Fibro) auf den laserstrukturierten Testplatten dargestellt.

7 Untersuchung der Benetzungsmechanismen zur selektiven Bekeimung von duroplastischen Substraten in einem Tauchbadverfahren

Das Messgerät kann selbständig eine zuvor definierte Menge zwischen o-5 µl titrieren. Die Messung wird jeweils einzeln auf allen Laserparameterfeldern durchgeführt. Es wird dabei das Volumen des Tropfens vor der Titrierung hängend an der Pipette und nach der Ablage auf dem Substrat gemessen. Die Wasseraufnahme auf der Polymeroberfläche wird über einen Zeitraum von 10 Minuten mithilfe der Kontaktwinkelmessung durch ein Kamerasystem ausgewertet. [S9]



Bild 82: Goniometrische Messung der Benetzungsfähigkeit (links und Mitte) des Testkörpers mit der strukturierten Parameterstudie (rechts)

Die Auswertung und Steuerung des Messablaufs läuft automatisiert und softwaregesteuert ab, sodass hier Fehlereinflussquellen durch Bedienabweichungen weitestgehend ausgeschlossen werden können. Als Testmedium wird, neben VE-Wasser als Referenz, die Palladiumaktivatorlösung verwendet, da diese im Vergleich zu Wasser eine andere Oberflächenspannung und höhere Dichte durch die Schwefelsäureverbindung hat. In Bild 83 sind die aufgenommenen Messbilder der Kontaktwinkelmessung über den Zeitraum von 10 Minuten zusammengefasst. Das verwendete Testsubstrat C ist das EP3581T-1. Es zeigen sich, abhängig von der Wirkleistung des Lasers, entsprechende Unterschiede in der Benetzungsfähigkeit der strukturierten Testflächen. Bei einer Rauheit von Rz 33,7 µm kann über den Zeitraum von 10 Minuten 0,81 µl Flüssigkeit aufgenommen werden, im Vergleich zu dem Feld mit der Rauheit Rz 8.9 µm, bei dem nur 0,28 µl Palladiumaktivator aufgenommen werden kann. Alle Messungen werden in einem künstlich klimatisierten Labor durchgeführt. In einem geringfügigen Umfang ist der natürliche Effekt der Verdunstung vorhanden. Da die gesamte Messreihe unter den gleichen Laborbedingungen durchgeführt wird ist die-
ser vernachlässigbar. Somit wird die über den Messzeitraum ermittelte Volumenabnahme so betrachtet, als dass sie vollständig von dem Substrat aufgenommen wird.



Bild 83: Messung der Benetzung des Materials C (EP3581T-1) über 10 Minuten [S9]

Die Proben sind zum Zeitpunkt der Messung trocken. Ein Aufquellen der strukturierten Probenoberfläche hat auf die Metallisierung einen positiven Effekt. Versuche zeigen auch hier, dass ein vorangehendes Aufquellen in einem Tauchbad mit VE-Wasser die Flüssigkeitsaufnahme begünstigt und ein schnelleres Anspringverhalten im Kupferelektrolyten bewirkt. In Tabelle 23 sind die Ergebnisse der Flüssigkeitsaufnahme und des Kontaktwinkels in Korrelation mit dem Leistungsindex der Laserparameter und der Rauheit zusammengefasst. Abgesehen von Messausreißern ist anhand der farblich abgestuften Formatierung bereits ein entsprechendes Zutreffen der angestellten Hypothesen zu erkennen. Die farbliche Skala veranschaulicht von grün nach rot die Stärke der Ausprägung eines Merkmals. Bei der Rauheit besteht allerdings ein Zielkonflikt zwischen einer möglichst guten Oberflächenqualität durch einen geringen Rz-Wert und einer guten Haftfestigkeit durch eine gute Verzahnung bei hohen Rz-Werten. Bestimmt durch die jeweils geplanten Nachfolgeprozesse der Aufbau- und Verbindungstechnik muss in diesem Fall ein Kompromiss gefunden werden. [S9]

7 Untersuchung der Benetzungsmechanismen zur selektiven Bekeimung von duroplastischen Substraten in einem Tauchbadverfahren

Der Kontaktwinkel bestimmt die Größe des Wassertropfens nach einem Messzeitraum von 10 Minuten. Je kleiner der gemessene Winkel ausfällt, umso mehr Flüssigkeit wurde von der Substratoberfläche aufgenommen.

Laser-	Puls-	Laser	Rauheit	Rauheit	Kontakt-	Volumen-	Schicht-
leistung	fre-	Vor-	Rz	Ra	winkel	abnahme	dicke (CU)
[147]	quenz	schub	[um]	[]	[0]	[1]	[]
[vv]	[KFIZ]	[mm/s]	ιμmj	ιμmj	[]	ιμιj	լµmj
2	120	1000	12,23	0,52	77,7	0,31	6,96
2	160	1000	12,49	0,33	75,0	0,32	3,92
2	200	1000	8,88	0,26	77,0	0,42	1,87
2	120	1500	3,52	0,28	76,4	0,34	2,43
2	160	1500	2,10	0,21	80,3	0,33	0,95
2	200	1500	5,81	0,40	72,1	0,32	0,37
2	120	2000	2,63	0,20	78,6	0,32	0,13
2	160	2000	2,31	0,26	80,6	0,33	0,06
2	200	2000	1,60	0,19	75,7	0,26	0,00
3	120	1000	29,94	3,61	63,3	0,67	11,13
3	160	1000	28,78	2,42	72,2	0,88	11,13
3	200	1000	21,61	2,01	65,0	0,44	10,71
3	120	1500	25,64	2,72	68,3	0,57	10,17
3	160	1500	17,32	0,96	68,8	0,31	8,81
3	200	1500	13,91	0,72	70,4	0,31	6,96
3	120	2000	18,96	1,29	71,6	0,36	7,98
3	160	2000	11,04	0,63	66,0	0,36	6,72
3	200	2000	7,90	0,35	70,6	0,31	4,86
4	120	1000	31,40	3,24	63,9	0,31	11,15
4	160	1000	31,60	4,07	61,1	0,68	11,12
4	200	1000	33,72	3,56	52,2	0,76	11,21
4	120	1500	26,22	3,76	61,1	0,70	11,70
4	160	1500	26,27	3,07	60,8	0,59	10,90
4	200	1500	23,03	2,38	60,6	0,65	10,61
4	120	2000	23,90	3,22	64,4	0,66	11,54
4	160	2000	24,92	2,26	55,9	0,51	10,05
4	200	2000	16,06	1,11	67,9	0,39	8,58
Substrat	C unstr	ukturiert					
(EP3581T-1):			2,15	2,13	78,3	0,30	

Tabelle 23: Zusammenfassung der Messwerte: Rauheit, Benetzung und Schichtdicke [S9]

Das Verhalten der Volumenabnahme verhält sich analog zur Wasseraufnahme in umgekehrter Richtung. Je geringer das gemessene Volumen des Wassertropfens nach 10 Minuten ausfällt, umso mehr Flüssigkeit wurde von dem Substrat aufgenommen. Die Schichtdicke ist letztendlich eines der wichtigsten quantitativen messbaren Merkmale über welche die Qualität der elektrischen Funktionalisierung der MID-Baugruppe bestimmt werden kann. Je mehr Kupfermetall mit der geforderten Selektivität über eine definierte Prozesszeit (hier 90 Minuten) abgeschieden werden kann, umso besser ist das Prozessergebnis. Durch die Berechnung der statistischen Korrelationen, wie in den Diagrammen in Bild 84 dargestellt wird der Zusammenhang zwischen den Messreihen ausgewählter Merkmale noch deutlicher dargestellt.



Bild 84: Statistische Korrelationen zwischen ausgewählten Messreihen

- a) Mit der Zunahme der Rauheit (Ra) nimmt der gemessene Kontaktwinkel ab, daher ist der Korrelationswert von -0,82 negativ. Durch die zerklüftete Oberfläche wird die Benetzungsfähigkeit gesteigert, sodass der Werkstoff mehr Flüssigkeit im betrachteten Messzeitraum (hier 10 Minuten) aufnehmen kann.
- b) Die Gegenprobe zum Kontaktwinkel ist die Messung der Volumenabnahme über denselben Zeitraum. Mit einer Korrelation von o,81 sind die Merkmale in einer guten Wechselbeziehung, sodass bei zunehmender Oberflächenrauheit das Flüssigkeitsvolumen schneller abnimmt da es vom Substrat aufgenommen wird. Der Effekt des Verdunstens ist vernachlässigt, da alle Versuche unter gleichen, zwangsklimatisierten Bedingungen in einem Labor durchgeführt werden.

7 Untersuchung der Benetzungsmechanismen zur selektiven Bekeimung von duroplastischen Substraten in einem Tauchbadverfahren

- c) Mit einem Korrelationswert von 0,90 ist die Beziehung zwischen der Haftfestigkeit der Metallisierung und der Oberflächenrauheit (Ra) sehr zutreffend. Mit zunehmender Rauheit steigt die Haftfestigkeit, da die Verzahnung der Metallschicht mit der Werkstoffoberfläche zunimmt.
- d) Einen idealen Zusammenhang zeigen die Messwerte der Merkmale Schichtdicke und Rauheit (Ra) mit einer Korrelation von 0,87. In Verbindung mit der Korrelation zwischen dem Kontaktwinkel und der Rauheit kann somit bewiesen werden, dass durch die Erhöhung der Laserenergie die Rauheit und damit die Aufnahme des flüssigen Palladium Katalysators gesteigert wird. Durch die Steigerung der Menge des Aktivators, der von der Substratoberfläche aufgenommen wird, kann die Abscheidung von metallischem Kupfer verbessert werden. Bei gleicher Metallisierungsprozessdauer kann somit eine höhere Schichtdicke abgeschieden werden.
- e) Die Korrelation der Merkmale Schichtdicke und Kontaktwinkel (-0,82) zeigen wie in (b) mit der Rauheit (Ra) eine gute Beziehung zueinander und bestätigen damit, dass durch eine erhöhte Oberflächenrauheit mehr Aktivatorflüssigkeit aufgenommen wird und dadurch die Kupfermetallisierung begünstigt wird.
- f) Das Diagramm zeigt auf, dass bei der Volumenaufnahme ein Sättigungsverhältnis eintritt. Ab einer Benetzungsmenge von ca. o,6 μl kann keine signifikante Steigerung der Metallisierungsschichtdicke mehr erzielt werden. Der Bekeimungsprozess des Palladiumkatalysators ist somit auf dieses Optimum einzustellen, um eine sichere Beschichtung zu ermöglichen.

7.4 Untersuchung der Haftfestigkeit

Die Haftung der Metallisierung auf dem duroplastischen Substrat ist wie bei allen anderen MID-Verfahren auch hier eine entscheidende Qualitätskenngröße. Die Adhäsion muss ausreichend gewährleistet sein, sodass die Leiterbahnen auch bei sehr geringen Fine-Pitch-Dimensionen von kleiner 50 µm noch ausreichend mechanisch auf der Oberfläche des Substrates verankert sind.

Zur Prüfung der Haftfestigkeit gibt es in der MID-Technik die Methoden der Scherkraftmessung und den Stirnabzugstest nach EN ISO 4624:2003. [8] Etabliert hat sich in Anlehnung an das Stirnabzugsverfahren der Hot-Pin-Pull-Test von Nordson Dage. Hier wird ein kupferner Prüfstift mit einem Durchmesser von 1 mm auf eine ebenso große kreisrunde, metallisierte Teststruktur auf dem Substrat definiert aufgelötet und anschließend vertikal abgezogen. Die Maximalkraft die beim Abreisen des Stiftes von der Lötstelle bzw. dem Werkstoff auftritt, wird mit einer Messdose aufgezeichnet und kann digital ausgewertet werden. [S11]

Für die Messung werden die Einstellung aus der vorangegangenen statistischen Versuchsplanung über die Laserparameter herangezogen, um direkte Vergleiche ziehen zu können. Die Metallisierung erfolgt mit chemisch Kupfer über 120 Minuten, chemisch Nickel 60 Minuten und chemisch Gold mit 15 Minuten Prozessdauer auf dem Substrat C. Die Auswertung in Bild 85 weist auf eine starke Beziehung zwischen der Leistung des Lasers und der Haftfestigkeit hin. Ab einer eingestellten Leistung von 3 Watt kann mit einer Haftfestigkeit von größer 5 N/mm² kalkuliert werden. Der gesamte Korrelationswert über alle 27 Messfelder von 0,92 zwischen den Rauheits- und Haftfestigkeitswerten zeigt einen nahezu idealen Zusammenhang dieser beiden Merkmale und bestätigt damit die zuvor angestellte Hypothese bezüglich der Laseraufrauhung und der mechanischen Adhäsion der chemisch metallisierten Kupferschicht und dem Substrat C (EP3581T-1).



Bild 85: Korrelation Haftfestigkeitsuntersuchung

Im Rahmen des AiF-Forschungsprojekts "LDS-MIDCHAMP" [19] wurde die Haftfestigkeit der chemischen Kupfermetallisierung auf dem thermoplastischen Substrat Vectra LCP E840iLDS, unter anderem mit dem gleichen HotPinPull-Testverfahren untersucht. [149] Dabei wurden rauhigkeitsabhängige Mittelwerte von 5,94 N/mm² und 8,91 N/mm² gemessen. Auf dem Polyamid Vestamid Htplus TGP3586 konnten Mittelwerte von 15,13 N/mm² und 17,94 N/mm² gemessen werden. Im direkten Vergleich mit den Werten

7 Untersuchung der Benetzungsmechanismen zur selektiven Bekeimung von duroplastischen Substraten in einem Tauchbadverfahren

auf dem Duroplast C (EP3581T-1) (10,53 N/mm² und 12,74) zeigt sich eine vergleichbare Metall-Polymerhaftung, die noch über dem des LCP-LDS[®] Materials liegt. Ab einer Oberflächenrauheit von Rz 20 µm können unter Berücksichtigung der Standardabweichung mittlere Haftfestigkeitswerte von größer 8 N/mm² zuverlässig erreicht werden, wie in Bild Säule Nr.2 dargestellt. [19]



Bild 86: Vergleich der Haftfestigkeitsmesswerte zwischen Duroplast (SIPA) und Thermoplasten (LDS $^{\circ}$) [19][S11]

7.5 Zusammenfassung der Wirkzusammenhänge des SIPA-Verfahrens

Aus den durchgeführten Untersuchungen können die zuvor in Kapitel 6.1 aufgestellten Forschungshypothesen durch folgende Erkenntnissen bestätigt werden:

A1: Steigerung der Grenzflächenenergie durch den Laserprozess: Die Untersuchungen der Grenzflächeneffekte zeigen, dass die Laserbearbeitung drei wesentliche Wirkungen erzielen, die in Bild zusammengefasst sind. Neben den schwer zu messenden verschiedenen chemisch-katalytischen Effekten auf der Oberfläche kann anhand der goniometrischen Messung, die grenzflächenenergetische Intensivierung durch die Laserstrukturierung nachgewiesen werden. Die Steigerung der Oberflächenenergie bewirkt, dass sich metallisches Palladium auf den laserbearbeiteten Flächen innerhalb der Benetzungszeit abscheiden kann. Das vorhandene Palladium bewirkt im anschließenden chemischen Kupferprozess einen selektiven Selbstzerfall des Elektrolyten durch das Palladium.



Bild 87: Wirkmechanismen der Laserstrukturierung

Neben den Abscheide- und Austauschreaktionen ist davon auszugehen, dass bisher unbestimmte Anteile des Palladiumaktivators in den Kavitäten mitgeschleppt werden und es durch das Formaldehyd (Reduktor) im Kupferelektrolyten zu einer vollständigen Reduzierung kommt. Die Aufnahme und Abscheidung des Palladiums beeinflussen in einem direkten Zusammenhang die abgeschiedene Schichtdicke der Kupfermetallisierung.

Die Haftfestigkeitsmessungen der Kupferschicht beweisen, dass sich die Verankerung der Polymer-Metallverbindung durch die Intensität der Laserstrukturierung steuern lässt.

A2: Dispersionsgrad beeinflusst die Selektivität: Die zu Beginn angestellte Hypothese über einen Zusammenhang zwischen der Verteilung des Palladiums in der Lösung und der Aktivierungsleistung für enge Isolationsabstände zwischen angrenzenden Leiterbahnen kann bestätigt werden. Die gute Ausprägung der Randgeometrie kann zuverlässige Leiterabstände mit bis zu 50 µm abbilden. Bei Breiten darunter ist abhängig vom Werkstoff mit einer schlechten Ausprägung der Randgeometrie zu rechnen. Die vergleichenden Untersuchungen der kolloidalen Zinn-Palladium-Komplexverbindung analog zum LISA-Verfahren zeigen eine deutliche Verbesserung der Selektivität.

Die Wirkmechanismen der selektiven, ionogenen Palladiumbekeimung (SIPA) ist maßgeblich abhängig von den gewählten Parametern des Laserprozesses. Die Steigerung der Intensität des Lasers bewirkt eine Zunahme der Oberflächenrauheit, die wiederum die Flüssigkeitsbenetzung und die Palladiumbekeimung intensiviert. Eine dichte Benetzung mit Palladium ohne Fehlstellen ist ausschlaggebend für eine intensive und starke Metallabscheidung in dem Kupferelektrolyten. In Bild ist der Prozessablauf der lasergestützten SIPA-Beschichtung in einem Entscheidungsbaum zusam-

7 Untersuchung der Benetzungsmechanismen zur selektiven Bekeimung von duroplastischen Substraten in einem Tauchbadverfahren

mengefasst, anhand der die Wirkungskette zwischen Laserbearbeitung, Benetzungsfähigkeit, Palladiumaktivierung und der Kupfermetallisierung veranschaulicht wird.



Bild 88: Zusammenfassung der Wirkungskette

Die Untersuchungen zur Metallisierung von Fine-Pitch-Leiterbahnen zeigen, dass sich insbesondere die Glasfasern negativ auf die Isolationsabstände auswirken können, indem dass sich Palladium und anschließend Kupfer aufgrund der Kavitäten dort unkontrolliert abscheiden und letztendlich elektrische Kurzschlüsse verursachen.

Im Rahmen der Arbeit konnten von zwei verschiedenen Herstellern (Firma Duresco und Firma Raschig) insgesamt sechs epoxidharzbasierte Substratmaterialien getestet werden. Für einen reproduzierbaren industriellen Einsatz des SIPA-Verfahrens konnten jedoch nicht alle Parametervarianten in jede Untersuchung miteinfließen, da dies den möglichen Probenumfang in einer Laborumgebung weit übersteigt. Hierzu sind gesonderte, weiter vertiefende Untersuchungen notwendig. Die Erfahrungen können lediglich zeigen, dass es geringfügige Unterschiede in der Metallisierbarkeit zwischen den Substraten gibt, auf die der Laserprozess und die Aktivierung entsprechend angepasst werden müssen, um vergleichende Ergebnisse zu erzielen. Das SIPA-Verfahren basiert im Gegensatz zu dem LDS[®]-Verfahren nicht auf spezielle Additive in den Substraten, daher sind die grundsätzlichen Einflüsse hinsichtlich der Aktivierbar- und Metallisierbarkeit bei verschiedenen Substraten in der gleichen Typengruppe geringer.

8 Zuverlässigkeitsuntersuchungen

Für die Bestimmung der Produktzuverlässigkeit über den Lebenszeitraum werden elektronische Baugruppen Stresstests ausgesetzt, die Bedingungen in dem späteren Anwendungsfeld oder bezogen auf bestimmte Herstellungsprozesse nachbilden. Klassisch zählen dazu die Temperaturschockprüfungen, Feuchte-Wärme-Klimasimulation, mechanische Schock- und Vibrationsbelastungen sowie chemische Belastungen wie beispielsweise der Salzsprühnebeltest.

Aufgrund der in Kapitel 4.2.1 beschriebenen unterschiedlichen thermomechanischen Eigenschaften in Multimaterialverbunden ergeben sich unter Belastung zwischen den Grenzflächen entsprechende Zug- und Druckspannungen, die im schlimmsten Fall zu elektrischen Ausfällen führen können. Für mechatronische Baugruppen stellen die Temperaturschockprüfung und der Lötprozess eine der größten Herausforderungen hinsichtlich der Zuverlässigkeit dar. Im folgenden Kapitel werden Testkörper mit Fine-Pitch-Leiterstrukturen mit dem SIPA-Verfahren hergestellt, mit einem Löttestverfahren und durch eine Temperaturschockprüfung mit dem LDS^{*}-Verfahren verglichen.

8.1 Das Insitu-Löttestverfahren zur Detektierung von Mikrorissen in Leiterbahnen

In der Aufbau- und Verbindungstechnik stellt der Lötprozess ein weit verbreitetes Verfahren zur elektrischen und mechanischen Verbindung dar, der gleichzeitig eine kurzzeitig starke Temperaturbeaufschlagung erfordert. Um die Zuverlässigkeit von verschiedenen Substraten in Verbindung mit der chemischen Kupfermetallisierung zu überprüfen, wird ein Versuch in einem Dampfphasenlötprozess durchgeführt. Der Test wird für ein einfacheres Handling und der verbesserten Möglichkeit, bestromte Leiterbahnen in Echtzeit über einen Datenlogger während der Testdurchführung zu überwachen, in einem Labormaßstab durchgeführt. Dazu wird das Medium Galden 200 in einem Becherglas entsprechend erhitzt. [150] Die Versuchsträger können somit sehr schnell manuell zwischen dem Lötbad und einem Wasserbad bei Raumtemperatur (ca. 22 °C) bis zu 10-mal abwechselnd getaucht werden, um eine schnelle Temperaturbeaufschlagung zu erzielen. Das Galden-Medium wird in der Dampfphasentechnik industriell angewendet und hat die Eigenschaft, eine gesättigte inerte Dampfzone auszubilden, deren Temperatur (in diesem Fall 200 °C) mit dem Siedepunkt der Flüssigkeit fast identisch ist und präzise gehalten werden kann. Wenn das Werkstück eingebracht wird, kondensiert der Dampf auf der Bauteiloberfläche solange, bis es die Temperatur angenommen hat.

In diesem Testverfahren wird das Eintauchen in das bereits erhitzte Galden-Medium von Hand durchgeführt. In der Praxis wird über ein definiertes Lötprofil eine entsprechend langsamere und schonendere Aufheizphase eingestellt. Die Belastungen auf das Bauteil und die Leiterbahnen sind in diesem Laboraufbau durch den innerhalb einer Sekunde erfolgenden, schlagartigen Temperaturwechsel erheblich größer, als es bei gängigen Lötprofilen über mehrere Minuten der Fall ist. Die Abtastrate des Datenschreibers ist für diese Messung auf 200 ms eingestellt.

In Bild 89 ist zur Verdeutlichung ein Ausschnitt der Widerstands- und Temperaturveränderungen über die Zeit während des Lötprozesses von insitu-überwachten Leiterbahnen auf dem Vectra-LCP 845i-LDS (8-58 ppm/K) und dem Duroplast C (EP 3581T-1) (15-20 ppm/K) dargestellt. Der Testzyklus wird fünfmal im Wechsel durchfahren. Die Dimensionen der elektrischen Leiter auf dem LCP sind 80 µm breit und etwa 15 µm starke Kupfer-, Nickel- und Gold-Mäanderstrukturen, mit dem LDS[®]-Verfahren erstellt. Das Duroplast hat den gleichen Schichtaufbau, jedoch ist hier die Leiterbahnbreite mit 40 µm nur halb so breit gewählt worden. Daher liegt das Widerstandsniveau von Beginn an etwas höher.



Bild 89: Dampfphasen Insitu-Löttest bei 200 °C mit Leiterbahnen auf Vectra LCP E845i LDS (rot) und dem Epoxidduromere Typ C EP33581 T-1 (grün)

Im Testverlauf ist bei beiden Testträgern die leichte Widerstandserhöhung durch den Wärmeeintrag nach dem Eintauchen in die Dampfphase festzustellen. Die Leiterbahn auf dem LCP-Substrat zeigt im vierten Versuch, etwa bei der Hälfte der Temperaturbeaufschlagung, erste kurzzeitige Widerstandserhöhungen, die letztlich zu einem kompletten Versagen der Leiterbahn führen. Erst wieder in der Abkühlphase lässt die Zugspannung, die das Substrat auf den Riss in der Leiterbahn ausübt nach. Der Widerstand erreicht dabei fast wieder das Ausgangsniveau. Das Verhalten zeigt, dass eine nachträgliche Messung des Fehlers bei Raumtemperatur bei diesem typischen Rissverhalten in der Regel nicht möglich ist, da im erkalteten Zustand der Kontakt wieder geschlossen ist. Es ist zu erwarten, dass ein irreversibler Defekt erst zu einem späteren Zeitpunkt nach mehrmaliger Beaufschlagung eintritt. Unter entsprechenden Umwelteinflüssen tritt an den Rissflanken eine Korrosion auf, die langfristig zum Versagen der elektrischen Funktion führt. Das Schadensbild ist in MID-Anwenderkreisen seit ca. 15 Jahren bekannt und entsprechende Abstellmaßnahmen regelmäßig Bestandteil von Forschungsprojekten, die die Zuverlässigkeit von MID-Baugruppen untersuchen. [19]

8.2 Zuverlässigkeit im Umwelttest durch Temperaturschockprüfung

Die Temperaturschockprüfung zählt in der Bewertung der Zuverlässigkeit der Leiterstrukturen bei thermisch-mechanischer Belastung von elektronischen und mechanischen Bauteilen zu einem etablierten Prüfverfahren, das in allen Produktbranchen mit jeweils an die prognostizierten Feldbedingungen und Lebenszyklen angepassten Parameter angewendet wird. Zur abschließenden Bewertung der Zuverlässigkeit von Fine-Pitch-Leiterbahnen auf epoxidharzbasierten Duroplasten wird somit ein Test mit entsprechend harschen Bedingungen mit 500 Zyklen zwischen -40 °C und +150 °C mit jeweils 15 Minuten Haltezeit, in Anlehnung an die DIN EN 60 068-2-14, gewählt. [S10]

Der Temperaturbereich gilt für Automobilanwendungen bei Bauteilen, die im Motorraum in unmittelbarer Nähe des Verbrennungsmotors eingesetzt werden. Bei den Prüfstrukturen handelt es sich um zweidimensionale Leiterbahnen auf ebenen Substratplatten, die als ideale Bedingungen angesehen werden können. Forschungsprojekte, wie LDS-MIDCHAMP der AiF, [19] zeigen, dass entsprechende Bauteilgeometrien, wie beispielsweise Außenwinkel vermehrt zu mechanische Spannungen im Werkstoff führen als Innenwinkel. Elektrische Leiterbahnen die über Außenwinkel geführt werden, neigen daher häufiger zu Rissbildungen. In Bild 90 sind die Aufnahmen der Prüflinge mit dem Testlayout nach der Temperaturschockprüfung dargestellt. Sie zeigen keine korrosionsbedingten Auffälligkeiten nach der ca. 260 Stunden andauernden Umweltprüfung.



SIPA-Verfahren, chemisch metallisiert (Cu/Ni/Au) Duroplast C (EP 3581T-1)



SIPA-Verfahren, galvanisch metallisiert (Cu/Ni/Au) Duroplast C (EP 3581T-1)



LDS®-Verfahren, chemisch metallisiert (Cu/Ni/Au) LCP E840i LDS

Bild 90: Proben der Temperaturschockprüfung nach DIN EN 60068-2-14

Der Prüfaufbau wird so gewählt, dass eine regelmäßige Abtastrate der Spannungs- und Temperaturwerte von einer Sekunde möglich ist. Als Prüflinge werden, wie in Tabelle 24 aufgeführt, zwei duroplastische Substrate mit verschiedenen Fine-Pitch-Strukturen mit chemischer und galvanischer Metallisierung untersucht. Zu Vergleichszwecken werden ebenfalls LDS^{*}-Strukturen auf dem LCP E840i LDS Material betrachtet.

Auf den beiden unterschiedlichen Testsubstraten wird jeweils die gleiche elektrische Mäanderstruktur in variierten Breiten aufgebracht, um einen Einfluss des geringeren Leiterbahnquerschnitts und der Rissanfälligkeit zu untersuchen.

Kanal	Substrat	Aktivierung	Metallisierung		Bestromung	Schicht-	Leiterbahn-
						dicke	breite
			galvanisch	chemisch	[mA]	[µm]	[µm]
CH1 Ter	mperatursensor						
CH2	EP 3581 T-1	SIPA		CU/NI/AU	200	10,2	100
CH3	EP 3581 T-1	SIPA		CU/NI/AU	200	10,2	70
CH4	EP 3581 T-1	SIPA		CU/NI/AU	200	10,2	45
CH5	EP 3581 T-1	SIPA	CU	CU/NI/AU	200	27,5	100
CH6	EP 3581 T-1	SIPA	CU	CU/NI/AU	200	27,5	70
CH7	EP 3581 T-1	SIPA	CU	CU/NI/AU	200	27,5	45
CH8	LCP E840i LDS	LDS		CU/NI/AU	200	11,0	100
CH9	LCP E840i LDS	LDS		CU/NI/AU	200	11,0	70
CH10	LCP E840i LDS	LDS		CU/NI/AU	200	11,0	45

Tabelle 24: Temperaturschockprüfung nach DIN EN 60068-2-14

Eine Teststruktur wird als fehlerhaft gewertet, wenn eine Verbindungsstelle unterbrochen ist, die Widerstandswerte gegen steil ansteigen und folglich kein elektrischer Kontakt mehr besteht.

Alle Prüfstrukturen auf den Testplatten werden jeweils durch einen eigenen Kanal mit einer Stromquelle konstant mit 200 mA bestromt. Mit einer Abtastrate von 500 ms über den gesamten Prüfzeitraum können mit Hilfe eines Datenloggers die Spannungswerte erfasst werden. Aus der Spannung und dem Strom kann im Anschluss über das Ohm'sche Gesetz der Leitungswiderstand berechnet werden. Das Diagramm in Bild 91 zeigt zur besseren Veranschaulichung nur einen Ausschnitt von acht Zyklen aus der Datenüberwachung. [S10]



Bild 91: Ausschnitt aus der Temperaturwechselprüfung

Bei den Temperaturwechseln ist anzumerken, dass erwartungsgemäß die Spannungswerte bei den galvanischen Strukturen am geringsten zwischen der Kalt- und Warmphase schwanken. Bei den LDS[°]-Strukturen treten geringere Spannungsschwankungen als bei den SIPA-Strukturen auf. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass die LDS[®]-Proben in einem separaten Metallisierungsvorgang beschichtet wurden und die morphologische Struktur der Metallschicht leicht Abweichungen aufweist.

Grundsätzlich bietet die Labormetallisierung aufgrund natürlicher Schwankungen im Reaktionsverhalten, keine ideal-stabilen Prozessbedingungen. Zur weiteren Auswertung der Prüfung werden neben der Onlineerfassung der Spannung, die Widerstandswerte vor und nach dem Testdurchlauf gemessen und miteinander verglichen, wie in Bild 92 grafisch veranschaulicht. Die Widerstandswerte der Messleitungen werden zuvor herausgerechnet.



Bild 92: Messung der Eingangs- und Ausgangswiderstände

Es ist erkennbar, dass sich die elektrischen Widerstände der chemischen Kupferstrukturen mit dem SIPA-Verfahren doppelt so hoch sind, wie die des LDS[®]-Verfahrens. Generell zeigen sich geringe Erhöhungen in den Widerstandwerten zwischen der Eingangs- und Ausgangsmessung, die auf eine Korrosion der Metallschichten während den Klimasimulationsprüfungen zurückzuführen ist.

Zusammenfassend lässt sich schlussfolgern, dass über alle Testgruppen hinweg keine elektrischen Ausfälle aufgetreten sind und die selektive ionogene Palladiumaktivierung (SIPA-Verfahren) den Umwelttest Anforderungen der genormten Temperaturschock- und Vibrationstests standhalten kann.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Lasergestützte Metallisierungsverfahren zur Erstellung von dreidimensionalen mechatronischen Schaltungsträgern zählen, maßgeblich durch das LDS[®]-Verfahren geprägt, zu den etablierten Methoden, um ein selektives Leiterbahnlayout mit einer hohen Flexibilität auf einen Polymerträger aufzubringen. Der Vorteil der Bauraumeinsparung durch die Kombination von elektrischen und mechanischen Funktionen reduziert die Anzahl der einzelnen Bauteile und erweitert die Funktionalität. Dabei müssen sich die verschiedenen MID-Verfahren in den meisten Anwendungsbereichen mit etablierten Technologien wie der Leiterplatte hinsichtlich ihrer Einsatzgrenzen und Kosten messen lassen.

Ein besonders aussichtsreiches Anwendungsfeld für 3D-MIDs kann die einleitend angestellte Marktstudie für hochintegrierte mechatronische Sensorpackages identifizieren, da Anwendungsfelder wie das autonome Fahren stark automatisierte Industrie 4.0-Fertigungsumgebungen, aber auch designorientierte Bereiche wie die Unterhaltungselektronik und Wearables einen enormen Bedarf an hochintegrierten sensorischen Schaltungsträgern generieren.

In den letzten zehn Jahren sind große technologische Fortschritte im Bereich der Qualitätssicherung der Herstellungsprozesse von MIDs erfolgt, die durch eine ganze Reihe von Serienanwendungen ein entsprechendes Know-how am Markt bei den spezialisierten Zulieferern aber auch Gesamtverantwortlichen etablieren konnten. Die vergangenen Serienanwendungen haben aber auch deutliche Herausforderungen im Bereich Langzeitzuverlässigkeit, konkurrenzfähiger Kostenstrukturen und realer technologisch möglicher Miniaturisierung gezeigt.

Insbesondere temperaturbedingte Spannungen, die zwischen dem thermoplastischen Polymerwerkstoff und den metallischen Leiterbahnen auftreten können, führen bei der Verringerung der Breiten zunehmend zu einer Schwächung der Leiterbahnen, die durch Bildung von Spannungsrissen unter Umwelteinflüssen versagen.

Die aus den durchgeführten Versuchen gewonnenen Erkenntnisse über die physikalischen Eigenschaften thermoplastischer und duroplastischer Substratmaterialien sowie die auftretenden Wechselwirkungen mit den metallischen Funktionsschichten sind wesentliche Schwerpunkte, die die vorliegende Forschungsarbeit umfasst. Eine hohe Relevanz veranschaulichen die Ergebnisse aus den Zugversuchsprüfungen, die ergeben, dass die mechanischen Eigenschaften der chemisch abgeschiedenen Kupferschichten, wie beispielweise die Bruchdehnung, etwa nur ein Zehntel der von reinem Kupfer betragen und somit deutlich anfälliger für mechanische Schäden sind.

Resultierend aus diesem Verständnis beschäftigt sich der zweite und signifikantere Bestandteil dieser Forschungsarbeit mit der selektiven Beschichtung von im Spritzgussprozess verarbeiteten epoxidharzbasierten Duroplasten. Dazu kann ein ursprünglich aus der vollflächigen Beschichtungsindustrie stammendes chemisches Aktivierungsverfahren in Kombination mit einem Laserprozess zu dem SIPA-Verfahren (Selektive ionogene Palladiumaktivierung) weiterentwickelt werden, sodass damit ein Fine-Pitch-Leiterbahnlayout mit einer deutlich gesteigerten Präzision in einem Standard-Kupferelektrolyten metallisierbar ist.

Die Erforschung der Prozesse und erforderlichen Parameter beinhalten auch die Untersuchung des Wirkmechanismus der Aktivierung von Duroplasten in Verbindung mit einer flexiblen Laserbearbeitung. Durch den Energieeintrag des Laserprozesses wird selektiv das Substratmaterial aufgeraut und die Aufnahme des Palladiumkatalysators im Tauchbadprozess gezielt steuerbar.

Anhand der durchgeführten statistischen Versuche, ist der immense Parameterraum der Prozesse zur Laserbearbeitung und chemischen Aktivierung eingegrenzt und die einflussbestimmenden Einstellungen für ein anwendungsorientiertes Verfahren definiert.

Auf die zu Beginn aufgestellten Argumente des Handlungsbedarfs kann nun wie folgt Stellung bezogen werden:

A1) Flexibilität und 3D-Packaging-Fähigkeit:

Die Möglichkeit, Silizium-Chip-Packages in dreidimensionale mechatronische Schaltungsträger durch Einbetten und Umspritzen zu packen, erweitert die Funktionalität und steigert die Integrationsdichte durch Reduzierung des Bauraums von Anwendungen. Lasergestützte MID-Verfahren bieten durch den bereits bestehenden Prozessablauf den Vorteil der Ankontaktierung mittels Laserbohren und chemischer Metallisierung. Der erfolgreiche Aufbau einer MID-Packaging-Testschaltung mit einem eingebetteten MEMS-SIP-Beschleunigungssensor in einem Epoxid-Duroplast beweist, dass sich das hierfür entwickelte lasergestützte Aktivierungs- und Metallisierungsverfahren für eine elektrische Ankontaktierung eignet.

Das SIP ist eingebettet in einer Tiefe von 350 μ m mit einem Anschlusspitchabstand von 300 μ m durch lasergebohrte Vias mit einem Durchmesser von 100 μ m.

A2) Miniaturisierung durch Reduzierung des Fine-Pitches:

Die Laserbearbeitung ermöglicht ein selektives Anlegen eines Leiterbahnlayouts auf den untersuchten Epoxid-Duroplasten, die Leiterbahnbreiten bis zu 30 μ m mit einem Abstand von bis zu 50 μ m abbilden können und die zuverlässig chemisch und galvanisch metallisierbar sind. Das Verfahren bietet jedoch Potential, die Leiterbahndimensionen zukünftig durch geringere Spotdurchmesser der verwendeten Laseranlage weiter zu reduzieren. Das ideale Verhalten des Materialabtrages durch Verdampfen des Epoxid-Duroplasts durch die einwirkende Energie des Lasers ist dabei von hohem Vorteil im Vergleich zu dem von Aufschmelzen geprägten Verhalten der Thermoplaste. Die Dimensionen der Glasfaserfüllstoffe an der Oberfläche sind analog wie bei dem LDS[®]-Verfahren eine weiterhin bestehende Herausforderung für die selektive Metallisierung mit Isolationsabständen kleiner 50 μ m.

A3) Verbesserung der thermomechanischen Anpassung: Die beschriebenen Voruntersuchungen veranschaulichen, dass sich durch den Einsatz von epoxidharzbasierten duroplastischen Substraten, gegenüber den bisher ausschließlich verwendeten thermoplastischen Polymeren bei den lasergestützten Verfahren, die thermomechanische Anpassung des MID-Multimaterialverbundes wirksam verbessern lässt.

A4) Hohe Kosten als Hemmschwelle für die MID-Technologie: Serienprojekte in den vergangenen 15 Jahren konnten deutliche Herausforderungen in der Kostenstruktur von Herstellungs- und Qualitätssicherungsprozessen der MID-Technik, im Vergleich zu etablierten Verdrahtungstechnologien aufzeigen. Epoxidharz-Duroplaste weisen gegenüber den technischen Thermoplasten, die bei dem konventionellen LDS®-Verfahren eingesetzt werden, einen Kostenvorteil zwischen 50-60 % auf und können somit ökonomische Einstiegshemmschwellen nachhaltig senken.

A5) Erweiterung der Einsatzgrenzen von MID-Baugruppen in harschen Umweltbedingungen: Mit Hilfe der verbesserten thermomechanischen Anpassung lassen sich die Einsatzgrenzen von LDS®-MID-Anwendungen in bisher nicht erschlossene Bereiche erweitern. Zusätzlich bieten sie eine bessere Widerstandsfähigkeit gegenüber aggressiver Chemikalien. Für den Bereich der sensorischen Anwendungen bedeutet das, dass Package-Trägersysteme in schwierigere Umgebungen integriert werden können als das bisher der Fall ist.

A6) Eine selektive lasergestützte Metallisierung für Duroplaste ist bisher nicht verfügbar: Das in dieser Forschungsarbeit entwickelte SIPA-Metallisierungsverfahren steigert die Fine-Pitch-Leiterbahneigenschaften gegenüber den bisher bekannten lasergestützten MID-Verfahren. Damit können nun alternative epoxidharzbasierte Duroplaste, die nicht mit speziellen Aktivator-Additiven versehen sind, frei am Markt ausgewählt werden und mit einer hohen Präzision mit bis zu 40 µm feinen Strukturen selektiv aktiviert und mit Standardprozessen metallisch beschichtet werden. Limitierend sind aktuell die Substrate mit ihren Glasfaserfüllstoffen, die bisher notwendig sind, um die entsprechend niedrigen CTE-Eigenschaften und hohe Stabilität zu erreichen. Der Laserprozess bietet Potential durch eine stärkere Fokussierung und eine kürzere Pulsdauer eine höhere Energiedichte in einem kleineren Spotdurchmesser zu ermöglichen um die Leiterbahnbreiten weiter zu reduzieren. Entsprechende industrielle Anlagen sind weithin verfügbar.

Abschließend zeigen die durchgeführten Stresstests der Zuverlässigkeitsuntersuchungen, dass das neu entwickelte SIPA-Verfahren eine Erweiterung zu den bereits bekannten und etablierten lasergestützten MID-Technologien, wie das LDS[°]- und das LISA-Verfahren bieten kann.

Für die Überführung des hier entwickelten Aktivierungsverfahrens zur Anwendung in einem Serienfertigungsprozess sind weitere Untersuchungen hinsichtlich der Prozessoptimierung und eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung notwendig, um beispielweise das optimale Minimum der kostspieligen Palladiumkonzentration für eine erfolgreiche Bekeimung festzulegen. Ein hohes zukünftiges Potential wird in der Weiterentwicklung der Epoxid-Duromere gesehen. Neueste Forschungsbestrebungen der Polymersubstrathersteller wie beispielsweise Shin-Etsu zeigen sehr vielversprechende Epoxidmaterialien für den Transferspritzguss, die mit Glasfaserfüllstoffen gefüllt werden, deren Partikelgrößen kleiner 10 µm bemessen sind. Die thermomechanischen Eigenschaften können hierbei mit einem CTE-Bereich zwischen 7-14 ppm/K erweitert werden. [151]

Versuche der Firma Huawei auf diesem LDS®-Substrat Vias zu bohren zeigen, dass sich das Aspektverhältniss zwischen Bohrlochdurchmesser und Bohrtiefe auf bis zu 1 zu 10 steigern lässt. Zielanwendungsfelder sind die thermische Entwärmung rückwärtig ankontaktierter Nackt-Dies oder als elektrische Durchkontaktierung von überspritzten Leiterplattenstrukturen mit geringem Fine-Pitch zum Aufbau zusätzlicher Packaging Ebenen. [44]

10 Summary and Outlook

Laser-based metallization processes for the creation of three-dimensional mechatronic circuit carriers are significantly influenced by the LDS[®] process and are one of the established methods for applying a selective trace layout with a higher degree of flexibility to a polymer substrate. The advantage of space savings through the combination of electrical and mechanical functions reduces the number of individual components and extends the functionality. The various MID-processes have to be benchmarked in terms of their limits and costs in most application areas with established technologies such as the printed circuit board.

A particularly promising field of applications for 3D-MIDs can be identified in the introductory market study for highly integrated mechatronic sensor packages, as application fields such as autonomous driving, highly automated Industrie 4.0 production environments, but also design-oriented areas such as consumer electronics and wearables generate an enormous demand for highly integrated circuit carriers.

In the last ten years, great technological advances have been made in the area of quality assurance on manufacturing processes on MIDs, which have been able to establish appropriate knowledge in the market for specialized suppliers as well as overall key suppliers through a wide range of series applications. However, the past series applications have also shown challenges in terms of long-term reliability, competitive cost structures and real technological miniaturization. In particular, temperature-induced stresses that may occur between the thermoplastic resin carrier and the metallized conductor tracks, lead in miniaturized conductor path profiles to a weakening and can result circuit cracks and disruptions. The insights gained from the fundamental physical interactions of thermoplastic and thermoset substrate materials as well as the interactions that occur with the metallic functional layers are major recognitions of the present research work. The results from the tensile tests, which show that the mechanical properties of the chemically deposited copper layers, such as the elongation at break, can only achieve about one-tenth of that of pure copper and thus are much more susceptible to mechanical damage in field application.

As a result of this understanding, the second and more significant part of this research work is the selective coating of injection-molded epoxy resinbased thermosets. For this purpose, a chemical activation process originating from the full-surface coating industry in combination with a laser process can be further developed into the SIPA process (Selective Ionogenic

Palladium Activation) so that a fine-pitch trace layout can be metallized with a significantly increased precision in a standard copper electrolyte. The investigation of the processes and required parameters also includes the investigation of the activation mechanism of thermosets in connection with a flexible laser processing. Due to the energy input of the laser process, the substrate material is selectively roughened and the liquid absorption of the palladium catalyst in the dipping bath process can be selectively controlled. On the basis of the statistical experiments carried out, the immense parameter range of the laser processing and chemical activation processes is limited and the essential influence-determining settings for an application-oriented method are defined. The results of the investigations that have been carried out in this work can be concluded in the following points: A1) Flexibility and 3D packaging capability: The ability to combine MEMS-sensor packages in three-dimensional mechatronic circuit carriers by embedding and overmolding enhances functionality and increases integration density by reducing the installation space of applications. Laserassisted MID-processes offer the advantage of contacting by means of laser drilling and chemical metallization due to the existing process flow. The successful construction of a MID-packaging test circuit with an embedded MEMS-SIP accelerometer in an epoxy thermoset shows that the laser-assisted activation and metallization process developed for this purpose is appropriate. The demonstrator can show a SIP can be embedded in a depth of 350 µm with a pitch of 300 µm through laser-drilled vias with a diameter of 100 µm.

A2) Miniaturization by reducing the fine-pitch: The laser processing allows a selective creation of a conductor track layout on the investigated epoxy thermosets, which can reproduce a line width down to 30 μ m with a space distance of 50 μ m which can be metallized chemically and galvanically. The process offers the potential to further reduction of the conductor dimensions in the future by reducing the spot diameter of the laser system used. The ideal behavior of the material removal by evaporation of the epoxy thermoset by the acting energy of the laser is of great advantage in comparison to the stamped behavior of the thermoplastics. Similar to the LDS[®]-process, the dimensions of the glass fiber fillers on the surface are still a challenge for selective metallization with insulation distances of less than 50 μ m.

A3) Improvement of the thermo-mechanical adaptation: The preliminary studies illustrate that the use of epoxy resin-based thermoset substrates can improve the thermo-mechanical adaptation of the MID-multimaterial composite compared to the previously used thermoplastic materials in laser-assisted processes.

A4) High costs as a barrier to MID-technology: Series projects over the past 15 years have been able to demonstrate significant challenges in the cost structure of manufacturing and quality assurance processes in MID-technology compared to established wiring technologies. Epoxy resin thermosets have a cost advantage of between 50-60 % compared to the standard technical thermoplastics used in the conventional LDS^{*}-process, and can thus sustainably lower economic entry thresholds.

A5) Extension of the application limits of MID-assemblies in harsh environmental conditions: The significantly improved thermomechanical adaptation in a MID-multi-material composite by means of thermoset substrates increases the previous application limits of LDS[®]-MID applications. In addition, they offer significantly better resistance to aggressive chemicals. In the field of sensory applications, this means that these circuit carriers can be integrated into more difficult environments than was previously possible with laser assisted MID-technologies.

A6) Selective laser-assisted metallization for thermosets not available: The SIPA metallization process developed in this research enhances the fine-pitch interconnect properties compared to the previously known laser-assisted MID-methods. Thus, alternative substrate materials that are not provided with special activator additives can be freely selected on the market and selectively activated with a high precision with up to 30 μm fine structures and coated with standard processes metal. Limiting are currently both the laser process, which can produce a higher energy density and thus a reduced spot diameter in the future by a stronger focus and a shorter wavelength as well as fillers such as glass fibers in the substrates affecting short circuits in fine selective plating.

Finally, the stress tests conducted in the reliability studies show that the newly developed SIPA method can be an extension to the already known and established laser-based MID-technologies, such as the LDS[®] and the LISA method. For the transfer of the activation process developed here for use in a mass production process, further investigations regarding the process optimization and a cost-effectiveness consideration are necessary, for example, to determine the optimal minimum of the expensive palladium concentration for successful activation. Further investigations need to be focused into expanding the variety of substrates that can be activated and metallized in the future with this technology.

A high potential is seen in the development of the epoxy thermosets. The latest research efforts by polymer substrate manufacturers such as Shin-Etsu show very promising new epoxy based material compounds for transfer injection molding, which are filled with glass-fiber particles smaller than 10 μ m. The thermomechanical properties of this material can be further improved with a CTE range between 7-14 ppm / K. [151]

Attempts by Huawei to drill into these materials with the LDS[®]-laser vias show that the aspect ratio between the borehole diameter and the drilling depth is increased by one to ten. Target application fields are the thermal cooling of back-contacted bare dies or as electrical through-plating of overmolded printed circuit board structures with low fine pitch to build up additional packaging levels. [44]

Literaturverzeichnis

- [1] INEMI International Electronics Manufacturing Initiative, "Technology Roadmap," North Carolina, 2015.
- [2] I. ALEXEEV, Laser Technology, Erlangen: Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, 2016.
- [3] J. R. SHILLER, "Stock Market Data used in "Irrational Exuberance"," Princeton University Press, Princeton, 2005.
- [4] ZVEI, Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie, "Technologie Roadmap Stressarme MST-Packages," Frankfurt am Main, 2013.
- [5] E. HÄNDELER, Die Geschichte der Zukunft Sozialverhalten heute und der Wohlstand von morgen Kondratieffs Globalsicht, Moers: Joh. Brendow & Sohn Verlag GmbH, 5. Auflage 2005.
- [6] ITRS-Association, "International Technology Roadmap for Semiconductors," USA, 2015.
- [7] INDUSTRY ASSOCIATION CONNECTION ELECTRONICS, "International Technology Roadmap for Electronic Interconnects (IPC)," Chicago, 2015.
- [8] J. FRANKE, Räumliche elektronische Baugruppen (3D-MID): Werkstoffe, Herstellung, Montage und Anwendungen für spritzgegossene Schaltungsträger, München: Carl Hanser Verlag, 2013.
- [9] V. DENNER, "Annual Speach," Robert Bosch GmbH, Gerlingen, 2017.
- [10] INTEL Inc., "Moore's Law," https://www.intel.com, Seattle, Zugriff am 23.03.2018.
- [11] NIELSEN NORMAN GROUP, "Law of Bandwidth," https://www.nngroup.com/articles/law-of-bandwidth, Webseite, Zugriff am 23.03.2018.
- [12] INEMI International Electronics Manufacturing Initiative, "Technology Roadmap," North Carolina, 2017.

- [13] ZVEI, Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie, "Die globale Elektroindustrie – Daten, Zahlen und Fakten," Frankfurt am Main, 2017.
- [14] YOLE REPORT, "Power Packaging Technology Trends and Market Expectations," Lyon-Villeurbanne, 2015.
- [15] YOLE REPORT, "Power Packaging Technology Trends und Market Expectations," Lyon-Villeurbanne, 2019.
- [16] ZVEI, Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie, "Bericht Die deutsche Elektroindustrie - Daten, Zahlen und Fakten," Frankfurt am Main, 2017.
- [17] FORSCHUNGSVEREINIGUNG RÄUMLICHE ELEKTRONISCHE BAUGRUPPEN 3D-MID e.V., MID Marktstudie, Erlangen: Inprint Verlag, 2011.
- [18] IGF-Vorhaben, 16591N, "Abschlussbericht: MID-HAUSUNG: Einhausung von MID-Baugruppen im Montagespritzguss für den Einsatz unter extremen Umweltbedingungen," IGF, Erlangen, 2012.
- [19] IGF-Vorhaben und 1. Abschlussbericht, "Charakterisierung und praxisnahe Methoden zur Prüfung von Leiterbahnen auf LDS-MID als Metall/Kunststoff-Verbundsysteme; LDS-MIDCHAMP," AIF, Erlangen, 2015.
- [20] ZVEI, Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie, "Monatliches Konjunkturbarometer," Frankfurt am Main, 2017.
- [21] ZVEI, Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie, "Bericht Mitgliederversammlung," Frankfurt am Main, 2017.
- [22] ZVEI, Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie, "Bericht Mitgliederversammlung," Frankfurt am Main, 2016.
- [23] R. MEHNERT, "Zeitschrift für Physikalische Chemie Zugriff 2017," Teil 1 und 2; S.282-283, 1996.
- [24] J. FLEISCHER, G. LANZA und V. SCHULZE, "WBK KIT-Herbstklausur "Made in China 2025 – Erfolgsrezepte für deutsche Unternehmen"," KIT, Karlsruhe, 2016.

- [25] W. EBERHARDT und A. Z. FRANK KERN, "Laserstrukturierung von Spritzgegossenen Keramischen 3D-Schaltungsträgern," Industrielle Gemeinschaftsforschung (IGF-Projekt), Stuttgart, 2015.
- [26] D. MOSER und J. KRAUSE, "3D-MID Multifunctional Packages for Sensors in Automotive Applications," in Advanced Microsystems for Automotive Applications, Berlin, 2006.
- [27] K. LIPINSKI, "Fine-Pitch," URL http://www.itwissen.info/pitch-Rastermass-RM.html, Aktualisierungsdatum: 2017; Abrufdatum: 05.10.17.
- [28] T. TILLE, Automobil-Sensorik 2; Systeme, Technologien und Applikationen, Berlin: Springer-Vieweg Verlag, 2018.
- [29] M. S. R. R. TUMMALA, Introduction to System on Package (SOP), Miniaturization of the Entire System., United States of America: The Mc Graw-Hill Companies, Inc., 2008.
- [30] R. WINKLER, "Studie Benutzerfreundliche Parkhäuser," ADAC, München, 2013.
- [31] Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS), "Tagungsklausur Forschungsgruppe Bordnetze "Trends in der Elektronik der Automobilentwicklung"," Regensburg, 2018.
- [32] H. KATZIER, Elektrische Kabel und Leitungen Anwendungen und Anforderungen; Erste Auflage, Bad Saulgau: Leuze Verlag, 2015.
- [33] ZVEI, Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie, "Spannungsklassen in der Elektromobilität," Frankfurt am Main, 2013.
- [34] J. ADAM, "Strombelastbarkeit von Leiterbahnen," [Online]. Available: http://www.adam-research.de. [Zugriff am 23 Mai 2018].
- [35] F. SCHÜßLER, Dissertation: Verbindungs- und Systemtechnik für thermisch hochbeanspruchte und miniaturisierte elektronische Baugruppen, Bamberg: Maisenbach Verlag, 2010.
- [36] K. REIF, Kraftfahrtechnisches Taschenbuch Robert Bosch GmbH, Stuttgart: Springer Vieweg, 2018.

- [37] L. EDERLEH, Mikromaterialbearbeitung mit dem Laser Von der Idee bis zum Produkt, Garbsen: Laser Micronics GmbH, 2013.
- [38] AiF-/ IGF-Abschlussbericht, 19758N, "Selektive laserbasierte Metallisierung zur Direktkontaktierung von elektronischen Komponenten in duroplastischen 3D-Packages SLIMDUP," Erlangen, 2020.
- [39] FORSCHUNGSVEREINIGUNG RÄUMLICHE SCHALTUNGS-TRÄGER 3D-MID e.V., "Industriepreis für Kontineztrainer der Firma 2E-Mechatronik," München, 2017.
- [40] APPLE Inc., "Apple iWatch," https://www.apple.com/de/watch/, Zugriff am 18.01.2018.
- [41] R. MEIER, Strategien f
 ür einen produktorientierten Einsatz r
 äumlicher spritzgegossener Schaltungstr
 äger (3D-MID), Erlangen: Meisenbach Verlag, 2002.
- [42] T. KORDAß und J. FRANKE, Vorlesung: Molded Interconnect Devices und flexible Schaltungsträger 3D-MID (VHB), Erlangen: FAU Lehrstuhl FAPS, 2018.
- [43] H. KÜCK und E. WOLFGANG, Multifunktionale 3D-MID-Packages für die Mikrosystemtechnik, Potenziale und Trends der Mikro- und Nanotechnik, Stuttgart: GMM – VDE/VDI-Gesellschaft Mikroelektronik, Mikro- und Feinwerktechnik. VDE-Verlag, 2006.
- [44] S. MARTENS, "Vortrag Firma Huawei "Laser Drilling for 3D-MID Packaging"," in Hahn-Schickard: Workshop Visions to Products- MID and Beyond, Stuttgart, 2019.
- [45] S. BEICHTER, S. WESER, H. MÜLLER, S. PETILLON, B. HAUG, T. GÜNTHER, W. EBERHARDT und A. ZIMMERMANN, "Functionalized Sensor Packaging Based on Thermoset Injection Molding and Selective Metallization Technology," in *EMPC 2015*, Friedrichshafen, 2015.
- [46] PANASONIC Inc., *MIPTEC Technology Introduction*, Webseite: https://www3.panasonic.biz/ac/e/tech/mid/miptec /index.jsp;, Abgerufen am 17. Februar 2018.

- [47] R. SCHRAMM, Dissertation: Strukturierte additive Metallisierung durch kaltaktives Atmosphärendruckplasma, Bamberg: Meisenbachverlag, 2016.
- [48] J. FRANKE, K. FELDMANN und C. FISCHER, "Konstruktionswerkzeuge für Molded-Interconnect-Device (3D-MID) Technologie mit Bezug zu CAM," Kongreß Internationales Forum Mechatronik, Linz, 2009.
- [49] Z. YANG, Dissertation: Laser Inducted Selective Activation for Subsequent Autocatalytic Electroless Plating, Denmark: Department of Mechanical Engineering, Technical University of Denmark, 2010.
- [50] FORSCHUNGSVEREINIGUNG RÄUMLICHE SCHALTUNGS-TRÄGER 3D-MID e.V., "Forschungsvereinigung Räumliche Schaltungsträger," Zugriff am 10.04.2018 November 2018. [Online]. Available: http://3d-mid.de/cms/front_content.php?idcat=12;.
- [51] R. SÜß-WOLF und M. D. PAOLIS, PLUS: Strukturierte Metallisierung von der Idee zur technischen Umsetzung, Bad Saulgau: Leuze Verlag, 2007.
- [52] N. KANANI, Chemische Vernicklung Nickel-Phosphor-Schichten, Bad Saulgau: Leuze Verlag, 2007.
- [53] LKT, FAPS und HSG-IMAT, "Abschlussbericht HT-MID: Untersuchungen zur Optimierung der Temperaturfestigkeit von Heißpräge-MID-Baugruppen; Abrufdatum 07.12.2017," 3D-MID e.V., Stuttgart, 2017.
- [54] A. DIRK, Untersuchungen zur laserbasierten Herstellung von Vias in MID und Charakterisierung eines neuartigen Messprinzips zur Badcharakterisierung von außenstromlosen Kupferelektrolyten, Dissertation Universität Stuttgart, 2013.
- [55] R. SÜß-WOLF, Fachgespräch: "Chemische Aktivierung und Metallisierung nicht leitfähiger Polymerwerkstoffe", Lehrstuhl FAPS, Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, 2018.
- [56] LPKF Laser & Electronics AG, Fachgespräch Fine-Pitch LDS und alternative Substratmaterialien, 2014.

- [57] LPKF Laser & Electronics AG, "Patent: Verfahren zur Herstellung einer dreidimensionalen Leiterbahnstruktur sowie eine nach diesem Verfahren hergestellte Leiterbahnstruktur DE 10 2012105 765 A1 2013.12.19," Garbsen, 2013.
- [58] LPKF Laser & Electronics AG, "Verfahren zur Herstellung einer elektrisch leitfähigen Struktur sowie ein mit diesem Verfahren hergestelltes Trägermaterial DE 10 2014 114 987 A1 2016.04.21," Garbsen, 2016.
- [59] LPKF Laser & Electronics AG, "Patent: Verfahren zur Herstellung einer elektrisch leitfähigen Struktur auf einem nichtleitenden Trägermaterial sowie ein hierzu bestimmtes Additiv und Trägermaterial DE 10 2013 100 016 A1 2014.07.03," Garbsen, 2014.
- [60] LPKF Laser & Electronics AG, Datenblatt: Laserparameter Empfehlung für LDS-Substratmaterialien, Stand 2015.
- [61] R. SUCHENTRUNK, Kunststoff-Metallisierung (Schriftenreihe Galvanotechnik und Oberflächenbehandlung) 3. Auflage, Bad Saulgau: Verlag Leuze, 2000.
- [62] H.-G. HOFAMNN und J. SPINDLER, Verfahren in der Beschichtungs- und Oberflächentechnik Grundlagen-Vorbehandlung-Beschichtung-Oberflächenreaktionen-Prüfung, München: Carl Hanser Verlag, 2014.
- [63] N. KANANI, Galvanotechnik: Grundlagen, Verfahren und Praxis einer Schlüsseltechnologie; 2. Auflage, München: Hanser Verlag, 2009.
- [64] Z. ALI-ABASSI und N. KANANI, Kupferschichten: Abscheidung, Eigenschaften, Anwendungen, Bad Saulgau: Leuze, 2000.
- [65] R. HOFFMANN und J. UNRUH, Chemie für die Galvanotechnik und Oberflächentechnik, Bad Saulgau: Leuze Verlag, 2008.
- [66] G. STAN, Funktionelle Beschichtungen in Konstruktion und Anwendung, Bad Saulgau: Leuze Verlag, 1994.
- [67] M. LAKE, Oberflächentechnik in der Kunststoffverarbeitung, Vorbehandeln, Beschichten, Funktionalisieren und Kennzeichnen

von Kunststoffoberflächen, 1. Auflage, München: Carl Hanser Verlag, 2009.

- [68] M. BINNEWIES, M. FINZE, M. JÄCKEL, P. SCHMIDT, H. WILLNER und G. R. CANHAM, Allgemeine und Anorganische Chemie, Berlin: Springer Verlag, 2016.
- [69] T. JELINEK, Prozeßbegleitende Analytik in der Galvanitechnik, Bad Saulgau: Eugen G. Leuze Verlag, 1999.
- [70] J. UNRUH, Tabellenbuch Galvanotechnik, Bad Saulgau: Leuze Verlag, 2001.
- [71] H. FISCHER, Grundlagen der außenstromlosen außenkatalytischen Metallabscheidung, Surface, 1975.
- [72] A. MUSCHET und O. ZIEGERT, Stoffströme in der Prozessindustrie, Klagenfurt: Kärntner Druck- und Verlagsgesellschaft m.b.H., 2005.
- [73] ROHM&HAAS Inc., "Datenblatt Circuposit 4500," Stand: 2005.
- [74] ATOTECH GmbH, "Datenblatt Cupracid BL-R," Stand: 11.01.2016.
- [75] SPITZKE, "Datenblatt Hochphosphorhaltige Chemische Nickelschichten," http://www.spitzke-hartchrom.de/files/spitzkehartchrom/downloads/Technisches-Datenblatt-Chemisch-Nickel.pdf, Zugriff am 07.11.2017.
- [76] J. SPRINGER und F. FÖRSTER, Theorien zur Haftung stromlos abgeschiedener Metallschichten auf Polymeren, Teil 1, 1984.
- [77] N. BACHNAK, "3D-MID-Technology MEMS Connectivity at System Level," in *IEEE 14th Electronics Packaging Technology Conference*, Singapore, 2012.
- [78] DURESCO, Fachgespräch: Verarbeitung epoxidharzbasierte Polymere, 2017.
- [79] A. FISCHER, T. KUHN, H. MÜLLER, D. DRUMMER und A. ZIMMERMANN, "Effect of flow lines on the metallization of laser structured polymer parts," SPE Proceedings ANTEC, Anaheim, 2017.
- [80] C. GOTH, Dissertation: Analyse und Optimierung der Entwicklung und Zuverlässigkeit räumlicher Schaltungsträger (3D-MID), Erlangen: Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg; Meisenbachverlag, 2015.

- [81] G. RAU und R. RAU, Die Metalle: Werkstoffkunde mit ihren chemischen und physikalischen Grundlagen, München: Verlag Neuer Merkur, 2004.
- [82] ATOTECH GmbH, "Datenblatt MID Nickel HP," Stand: 15.06.2009.
- [83] E. VINARICKY, Elektrische Kontakte Werkstoffe und Anwendung, 3. Auflage, Heidelberg: Verlag Springer, 2016.
- [84] F. ATOTECH, "Datenblatt und Gebrauchsanleitung Cupralux INI," Stand: 30.11.2009.
- [85] T. KUHN und J. FRANKE, "Test Methodes and Influencing Factors for the Adhesion Strength Measurement of Metallized Structures on Thermoplastics Substrates," in *Electronics Packaging Technology Conference (EPTC)*, Singapur, 2014.
- [86] W. KAISER, Kunststoffchemie für Ingenieure, München: Carl Hanser Verlag, 2011.
- [87] P. EYERER, T. HIRTH und P. ELSNER, Polymer Engineering: Technologien und Praxis, Berlin: Springer Verlag, 2007.
- [88] H.-J. BARGEL und G. SCHULZE, Werkstoffkunde, Berlin: Springer Verlag, 2012.
- [89] H. HÜGEL und T. GRAF, Laser in der Fertigung, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014.
- [90] G. HABENICHT, Kleben: Grundlagen, Technologien, Anwendungen (VDI-Buch), Berlin: Springer Verlag, 2008.
- [91] H. MUELLER, T. GROEZINGER, S. WESER, W. EBERHARDT und A. ZIMMERMANN, "Investigations on Flexural Fatigue Strength of Conductor Paths Fabricated by LPKF-LDS[®] Technology," Journal of Micro- and Nano-Manufacturing, 2017.
- [92] A. ESFANDYARI, A. SYED-KHAJA, T. JAVIED und J. FRANKE, "Energy efficiency investigation on high-pressure convection reflow soldering in electronics production," in *Trans Tech Publications Ltd.*, Schweiz, 2014.
- [93] J. FRANKE, J. HÖRBER, D. DRUMMER, F. RANFT und C. HEINLE, "IGF-Bericht 1558₃N: Verbesserung der Lötbeständigkeit von 3D-MIDs durch wärmeleitende Kunststoffe," IGF, Erlangen, 2011.

- [94] F. KLAUS und R. KARL, Thermisch leitfähige Kunststoffe für kostengünstige Fertigung und erweiterte Funktionalität in der MID-Technologie, Düsseldorf,: Springer VDI Verlag, 1998.
- [95] C. GOTH und T. KUHN, "Räumlich Schaltungsträger mit feiner Struktur – Die 3D-Technologie auf dem Vormarsch," Kunststoffe; Carl Hanser Verlag, 2015.
- [96] W. WOEBCKEN, Durplaste Kunststoff Handbuch Band 10; 2. Auflage, München: Verlag Carl Hanser, 1988.
- [97] CELANESE Inc., "Datenblatt; Vectra® E820i PD," Stand: 07.02.2014.
- [98] W. BOHL und W. ELMENDORF, Technische Strömungslehre (Kamprath-Reihe), Würzburg: Vogel Buchverlag, 2005.
- [99] A. BÖGE, W. BÖGE und G. BÖGE, Technische Mechanik: Statik Reibung – Dynamik – Festigkeitslehre, Wiesbaden: Springer Verlag, 2019.
- [100] W. WEIßENBACH, M. DAHMS und C. JAROSCHEK, Werkstoffkunde, Strukturen, Eigenschaften, Prüfung, 19 Auflage, Wiesbaden: Verlag Springer, 2015.
- [101] H. KATZIER, Elektrische Steckverbinder, Technologien, Anwendungen und Anforderungen; Erste Auflage, Bad Saulgau: Leuze Verelag, 2012.
- [102] DURESCO, "Datenblatt NU6110T," Stand: 01.06.2016.
- [103] RASCHIG GmbH, "Datenblatt Thermosets Epoxidur EP3581T-1," Stand: 15.03.2013.
- [104] EVONIK AG, "Datenblatt Vestamid[®] HATplus PA6T/X und PA10T/X," Stand: 01.09.2012.
- [105] CELANESE Inc., "Vectra® E845i LDS," Stand: 07.02.2014.
- [106] E. WITTEN, M. SAUER und M. KÜHNEL, "Composites-Marktbericht: Marktentwicklungen, Trends, Ausblicke und Herausforderungen," AVK Industrievereinigung verstärkte Kunststoffe, Frankfurt am Main, 2017.
- [107] INDUSTRIEVEREINIGUNG VERSTÄRKTE KUNSTSTOFFE UND COMPOSITES, (AVK), "Marktbericht," AVK, Frankfurt am Main, 2017.

- [108] G. W. EHRENSTEIN, E. BITTMANN und L. HOFFMANN, Duroplaste: Aushärtung - Prüfung - Eigenschaften, München: Hanser Verlag, 1997.
- [109] D. DRUMMER, Vorlesung: Kunststoffverarbeitung Fließpressen, Erlangen: FAU, Sommersemester 2015.
- [110] T. SCHEFFLER, "Chancen und Möglichkeiten des Duroplast für MID-Anwendungen," Technische Universität Chemnitz, Chemnitz, 2014.
- [111] DURESCO, "Datenblatt NU505," Stand: 01.08.2013.
- [112] RASCHIG GmbH, "Datenblatt Thermosets Epoxidur EP3581X," Stand: 07.07.2016.
- [113] RASCHIG GmbH, "Datenblatt Thermosets Epoxidur EP3582," Stand: 09.03.2016.
- [114] RASCHIG GmbH, "Datenblatt Thermosets Epoxidur EP3681," Stand: 12.09.2016.
- [115] J. FRANKE, Vorlesung: Produktionsprozesse in der Elektronik, Erlangen: FAU Lehrstuhl FAPS, 2017.
- [116] R. POPRAWE, Lasertechnik f
 ür die Fertigung: Grundlagen, Perspektiven und Beispiele (VDI-Buch), Berlin: Springer Verlag, 2004.
- [117] E. BEYER und K. WISSENBACH, Oberflächenbehandlung mit Laserstrahlung, Berlin: Springer Verlag, 1998.
- [118] B. SALEH und M. TEICH, Grundlagen der Photonik, Wiley-VCH, 2008.
- [119] S. MARTENS, Dissertation: Artefaktfreie Zielpräparation in hochintegrierten Mikrosystemen mit Schwerpunkt auf System-in-Package (SIP), Freiburg: Universität Freiburg, 2011.
- [120] J. MEISTER, R. FRANZEN und C. A. N. GUTKNECHT, "Influence of the spatial beam profile on hard tissue ablation, Part II: pulse energy and energy density distribution in simple beams," *Laser Medical Science*, 2004.

- [121] LPKF Laser & Electronics AG, "Fusion3D 1100; Technical Information," http://www.lpkf.de/produkte/mid/fusion3d-1100.htm, Zugriff am 16.11.2017.
- [122] B. BACHY, Experimental Investigation, Modeling, Simulation and Optimization of Molded Interconnect Devices (MID) Based on Laser Direct Structuring (LDS), Erlangen,: Meisenbach GmbH;, 2017.
- [123] D. DRUMMER, J. FRANKE und H. KÜCK, "Abschlussbericht: Untersuchungen zur Herstellung von spritzgegossenen, duroplastischen Schaltungsträgern mittels der LDS-Technologie," Otto von Guericke e.V. (AiF), Köln, 2013.
- [124] L. WANG, R. SÜß-WOLF und J. FRANKE, "Investigation of the laser ablation threshold for optimizing Laser Direct Structuring in the 3D-MID-Technology," in *ICEP-IAAC*, Kuwana Mie, Japan, 2018.
- [125] S. JUNG und W. HAAS, Institut für Maschinenelemente Oberflächenbeurteilung Rauheitsmessung, Stuttgart: Universität Stuttgart, 2005.
- [126] BROWN, CHRISTOPHER, "Introduction to Surface Roughness Measurement," Firma Olympus, Worcester Polytechnic Institute, 2017.
- [127] B. FIEDRICH-WILHEM, M. KAI, L. ANDREAS und W. THOMAS, Moderne Beschichtungsverfahren, Weinheim: Wiley-VCH, 2004.
- [128] HELMUT FISCHER GmbH, "Datenblatt, Fischerscope XDLM-C4," Stand 2012.
- [129] H. KÜCK, Abschlussbericht FV-Nr.: 14282N: Untersuchungen zu Micro-Vias bei Laser-Feinst-Pitch-MID für die Mikro-Systemtechnik, Stuttgart: Hahn-Schickard-Gesellschaft; Institut für Mikroaufbautechnik, 2006.
- [130] ST-MICROELECTRONICS, "Datenblatt LIS3DH LGA SIP-MEMS Beschleunigungssensor," 2011.
- [131] S. K. L. LIU, C. CHAN und K. YEE, "A potential silver catalyst system for new generation of electroless Cu process as a palladium substitution," in *IMPACT*, Warwick, 2016.

- [132] T. W. JELINEK, Praktische Galvanotechnik 7. Aktualisierte Auflage, Bad Salgau: Leuze Verlag, 2013.
- [133] J. GÜNTHER, Galvanisierung von Kunststoffteilen hochwertiges Design mit Hindernissen, Metalloberfläche 2, München: Hanser Verlag, 2000.
- [134] R. MEEK und R. a. C. A. G. COHEN, "Review on recent results on palladium-tin catalyst systems for electroless plating," in *Plat. Electron. Ind., Symp.*, 5th, 1975.
- [135] C. SHIPLEY, "Method of electroless deposition on a substrate and catalyst solution". USA Patent U.S. 3,011,920, 1961.
- [136] C. PETROW und M. u. L. A. ENTSCHEWA, "Aktivieren mit kolloidalem Palladium beim Galvanisieren von ABS-Polymeren 1. Radiochemische Untersuchungen," *Metalloberfläche*, pp. 309-314, 1976.
- [137] E. MATIJEVIC und A. M. a. Z. P. POSKANZER, "Characterization of stannous chloride/palladium chloride catalysts for electroless plating," *Plat. Surf. Finish.*, pp. 958-965, 1975.
- [138] S. WESER, "Selektive außenstromlose Metallisierung von Duroplasten," Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung, Jahresbericht, Stuttgart,, 2012.
- [139] J. HEYER, Interviewee, Heyer Consulting; Fachgespräch Reaktionsmechanismen Oberflächenaktivierung. [Interview]. April 2018.
- [140] ATOTECH GmbH, "Datenblatt und Gebrauchsanleitung MID Activator Ni," Stand: 30.11.2009.
- [141] C. SHIPLEY, "Method of electroless deposition on a substrate and catalyst solution therefore". Patent U.S. 3.011.920, 1961.
- [142] C. SHIPLEY und M. GULLA, "Electroless copper plating". USA Patent U.S. 3, 457,089.
- [143] BON, JACKSON, R. MACARY und G. SHAWAHN, "Transactions of the Institute of Metal Finishing," 1990.
- [144] C. BISCHOF und W. POSSART, Adhäsion- Theoretische und experimentelle Grundlagen, Berlin: Akademie-Verlag, 1983.
- [145] H. GLEICH, Dissertation: Zusammenhang zwischen Oberflächenenergie und Adhäsionsvermögen von Polymerwerkstoffen am Beispiel von PP und PBT und deren Beeinflussung durch die Niederdruck-Plasmatechnologie, Duisburg: Universität Duisburg-Essen, 2004.
- [146] K. MITTAL und A. PIZZI, "Adhesion Promotion Techniques; Technological Applications," M. Dekker, New York, 1999.
- [147] DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR GALVANOTECHNIK, Ulmer Gespräche: Fortschritte bei der Galvanisierung problematischer Grundwerkstoffe: Kunststoffe, Metall, Keramik, Bad Saulgau: Leuze Verlag, 1984.
- [148] C. KRÜGER, Experimentelle Untersuchungen zur Oberflächenveränderung metallischer Implantatmaterialien durch Plasmabehandlung, Bochum: Medizinische Fakultät der Ruhr-Universität, 2009.
- [149] C. GOTH, T. KUHN und J. FRANKE, "Hot Pin Pull Method New Test Procedure for the Adhesion Measurement for 3D-MID; Advanced Material Research; Volume 1038; September 2014," Advanced Material Research Volume 1038, September 2014.
- [150] ASSCON GmbH, "Produktinformation Galden Dampfphasen Löten," http://www.asscon.de/d/pages/produkte/galden.html, Zugriff am 15.02.2018.
- [151] SHIN-ETSU Inc., "Datenblatt EMC X-43-2916," Stand 2019.
- [152] B. BACHY, R. SÜß-WOLF, L. WANG, Z. FU, N. TRAVITZKY und J. FRANKE, "Novel Ceramic-Based Material for the Applications of Molded Interconnect Devices (3D-MID) Based on Laser Direct Structuring," *Journal of Advanced Materials*, 2018.
- [153] A. FISCHER, D. DRUMMER, T. KUHN, J. FRANKE, H. MÜLLER und A. ZIMMERNANN, "Effect of flow lines on the metallization of laserstructured polymer parts," SPE Proceedings ANTEC, Anaheim, 2017.

Verzeichnis promotionsbezogener, eigener Publikationen

- [P1] T. KORDAß, "3D-MID Technology Conference at Feng Chia University, "Automotive Sensor Applications with Laser-structured 3D-MID Packaging Applications, Taichung, 2016.
- [P2] T. KORDAß und J. FRANKE, "Galvanic Plating for 3D-MID Applications", ISSE-Conference, Dresden, 2014.
- [P3] T. KORDAß, M. WEISSER, B. BACHY und J. FRANKE, "Laser-assisted Selective Activation of Injection Molded Chip Packaging Devices with Thermoset Substrate Materials for Intelligent Connectivity Systems in Automobiles," in CIRP Conference on Manufacturing Systems, Taiwan, 2017.
- [P4] T. KORDAß, "Innovative Mechatronic Applications with 3D-MID Technology," in 3D-MID technology conference at King Monguts University North Bangkok, Thailand, 2015.
- [P5] T. KORDAß, Diplomarbeit: Prozesskettenanalyse eines 3D-MID Bauteils in der Automobiltechnik, Wiesbaden/Immenstadt: Robert-Bosch GmbH, 2010.
- [P6] B. BACHY, R. SÜß-WOLF, T. KORDAß und J. FRANKE, "Simulation and Experimental Investigation for the 2D and 3D Laser Direct Structuring Process," International Journal of Advanced Manufacturing Technology, März 2017.

Verzeichnis promotionsbezogener, studentischer Arbeiten

- [S1] P. DECKER, T. KORDAß und J. FRANKE, "Erstellung eines eingebetteten 3D-MID-Chip-Packaging-Demonstrators auf duroplastischem Substrat mit elektrischer Kontaktierung über Microvias", Bachelorarbeit, Erlangen, 2018.
- [S2] J. LOU, T. KORDAß und J. FRANKE, "Erstellung einer Technologiestudie über intelligente Stecksysteme mit eingebetteter Sensorik auf dem europäischen und asiatischen Markt", Projektarbeit, Erlangen, 2017.
- [S3] S. BURMANN, T. KORDAß und J. FRANKE, "Untersuchung und Beschreibung nasschemischer Aktivierungsmethoden für duroplastische Substrate mit Palladium, zur selektiven, chemischen Metallisierung dreidimensionaler mechatronischer Schaltungsträger", Masterarbeit, Erlangen, 2017.
- [S4] M. WEISSER, T. KORDAß und J. FRANKE, "Lasergestützte Aktivierung von Duroplastmaterialien zur selektiven Metallisierung von Leiterbahnen und Durchkontaktierungen", Masterarbeit, Erlangen, 2016.
- [S5] A. KRÜGELSTEIN, T. KORDAß und J. FRANKE, "Packaging-Anwendungen auf 3D-MID Trägern hergestellt mit dem LDS-Verfahren", Projektarbeit, Erlangen, 2015.
- [S6] S. GICK, T. KORDAß und J. FRANKE, "Entwicklung von Prozessparametern für lasergebohrte, elektrische Durchkontaktierungen (Vias) mit dem LDS – Verfahren", Projektarbeit, Erlangen, 2016.
- [S7] X. YE, T. KORDAß und J. FRANKE, "Untersuchung des mechanischen Adhäsionsmechanismus bei Palladium-Polymer-Verbunden und Prozessentwicklung einer elektrogalvanischen Kupfermetallisierung für laserstrukturierte 3D-MID Bauteile", Bachelorarbeit, Erlangen, 2017.
- [S8] Y. JIN, T. KORDAß und J. FRANKE, "Untersuchung von verschiedenen Wärmeableitkonzepten auf duroplastischen Substratmaterialien mit selektiver lasergestützter, chemischer und galvanischer Metallisierung", Projektarbeit, Erlangen, 2017.

- [S9] G. EMINI, T. KORDAß und J. FRANKE, "Untersuchung und Optimierung des Palladiumbekeimungsprozesses von laserbearbeiteten, duroplastischen Substratmaterialien durch die Analyse der Benetzungsfähigkeit", Projektarbeit, Erlangen, 2018.
- [S10] A. PURRER, T. KORDAß und J. FRANKE, "Qualitätsuntersuchung für 3D-MID auf Duroplastmaterialien", Bachelorarbeit, Erlangen, 2018.
- [S11] X. FENG, T. KORDAß und J. FRANKE, "Untersuchung der Funktionseigenschaften von selektiv chemisch und galvanisch abgeschiedenen Kupferschichten auf duroplastischen Substraten", Masterarbeit, Erlangen, 2017.

Anhang

Haftfestigkeit	N/mm ²	0	0	0	8,05	0	0	6,65	12,05	5,05	9,99	0	2,78	2,7	8,98	12,35	10,59	15,28	1,3	5,49	8,9	12,12	12,38	15,16	14,15	12,73	12,68	14,84
Volumen	m	0,32	0,34	0,33	0,36	0,26	0,33	0,31	o,57	0,36	o,66	0,32	0,31	0,32	0,31	0,7	0,51	0,67	0,42	0,31	0,39	o,59	0,88	0,31	0,65	0,44	o,68	0,76
Kontaktwinkel	°Grad	78,6	76,4	80,6	71,6	75,7	80,3	7.77	68,3	66	64,4	72,1	70,6	75	68,8	61,1	55,9	63,3	77	70,4	62,9	60,8	72,2	63,9	60,6	65	61,1	52,2
Schichtdicke	μm	0,13	2,43	0,06	7,98	0	o,95	6,96	10,17	6,72	n,54	0,37	4,86	3,92	8,81	п,7	10,05	п,13	1,87	6,96	8,58	10,9	n,13	11,15	10,61	10,71	11,12	11,21
Rauheit (RA)	μm	0,2	0,28	0,26	1,29	0,19	0,21	0,52	2,72	0,63	3,22	0,4	0,35	0,33	0,96	3,76	2,26	3,61	0,26	0,72	1,11	3,07	2,42	3,24	2,38	2,01	4,07	3,56
Rauheit (RZ)	μm	2,6	3,5	2,3	18,9	1,6	2,1	12,2	25,6	п	23,9	5,8	7,9	12,5	17,3	26,2	24,9	29,9	8,9	13,9	16	26,2	28,8	31,4	23	21,6	31,6	33,7
Leistungsindex	-	0,12	0,16	0,16	0,18	0,2	0, 21	0,24	0,24	0,24	0,24	0,27	0,3	0,32	0,32	0,32	0,32	0,36	0,4	0,4	0,4	0,43	o,48	o,48	0,53	0,6	0,64	0,8
Vorschub	mm/s	1000	1000	1000	1500	1500	1500	2000	2000	2000	1000	1000	1000	1500	1500	1500	2000	2000	2000	1000	1000	1000	1500	1500	1500	2000	2000	2000
Frequenz	kHz	120	160	200	120	160	200	120	160	200	120	160	200	120	160	200	120	160	200	120	160	200	120	160	200	120	160	200
Leistung	Watt	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	9	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Feld Nr.		1	2	3	4	5	9	7	8	6	10	п	12	13	14	15	16	71	81	61	20	21	22	23	24	25	26	27

Tabelle A.1 Statistische Versuchsplanung

			- 1	1		Ju	5'	C1	Ju	.cı	10	
vanisch	Kraft			V/mm ²	0,00	6,04	33,13	59,21	70,29	80,32	87,60	
Probe ga	Dehnung			3ruchd. %	0,00	0,40	1,40	2,41	3,41	5,44	8,79	
ANAI	(raft I			V/mm ²	0,00	7,50	11,50	16,00	17,50	18,50	19,80	21,00
Reff. K/	Jehnung k			truchd. %	0,00	0,40	1,30	2,40	3,40	4,40	5,30	5,80
8 3	raft I	_		l/mm ² B	0,00	0,28	3,36	8,20	26,37	21,35		
Probe	ehnung K	m		ruchd. % N	0,00	0,33	1,33	2,34	3,34	3,83		
7	raft D	-		[/mm ² B	0,00	2,13	5,40	15,50	14,98	15,14	14,58	
Probe	ehnung K	R N		ruchd. % N	0,00	0,33	1,33	2,33	3,34	4,35	5,36	
6	raft D	н		/mm ² B	0,00	0,06	0,44	5,18	19,56	27,85	49,00	45,46
Probe	ehnung K	E N		uchd. % N	0,00	0,33	1,34	2,34	3,34	4,35	5,36	5,86
5	raft D	E		/mm ² Bi	0,00	0,06	0,64	7,44	28,81	54.73	46,18	
Probe	ehnung K	Z E		ruchd. % N	0,00	0,33	1,34	2,34	3,34	4,36	4,96	
4	raft D	н		/mm ² B	0,00	0,07	2,22	15,38	46,13	29,73		
Probe	ehnung K	M		ruchd. % N	0,00	0,33	1,33	2,34	3,35	4:35		
e3	raft D	-		l/mm ² B	0,00	0,03	0,55	16,19	28,62	29,01	26,62	
Prob	Jehnung k	u u		truchd. %	0,00	0,33	1,34	2,34	3,34	3,43	3,54	
e 2	(raft I	7		V/mm ² E	0,00	1,33	9,52	13,46	15,27	14,41	15,57	13,42
Prob	Jehnung k	uu		sruchd. %	0,00	0,32	1,33	2,35	3,35	4,35	5,36	5,96
1 JG	Kraft I	7		V/mm ² E	0,00	0,05	0,31	3,41	6,68	18,45	11,49	
Prol	Dehnung	m		Bruchd. %	0,00	0,33	1,33	2,34	3,35	4,36	5,39	

Tabelle A.2 Zugversuche

Anhang

Reihenübersicht

Koordination der Reihe (Stand 2021): Geschäftsstelle Maschinenbau, Dr.-Ing. Oliver Kreis, www.mb.fau.de/diss/

Im Rahmen der Reihe sind bisher die nachfolgenden Bände erschienen.

Band 1 – 52 Fertigungstechnik – Erlangen ISSN 1431-6226 Carl Hanser Verlag, München

Band 53 – 307 Fertigungstechnik – Erlangen ISSN 1431-6226 Meisenbach Verlag, Bamberg

ab Band 308 FAU Studien aus dem Maschinenbau ISSN 2625-9974 FAU University Press, Erlangen

Die Zugehörigkeit zu den jeweiligen Lehrstühlen ist wie folgt gekennzeichnet:

Lehrstühle:

Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik
Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
Lehrstuhl für Fertigungstechnologie
Lehrstuhl für Photonische Technologien
Lehrstuhl für Ressourcen- und Energieeffiziente Produktionsmaschinen

Band 1: Andreas Hemberger Innovationspotentiale in der rechnerintegrierten Produktion durch wissensbasierte Systeme FAPS, 208 Seiten, 107 Bilder. 1988. ISBN 3-446-15234-2.

Band 2: Detlef Classe Beitrag zur Steigerung der Flexibilität automatisierter Montagesysteme durch Sensorintegration und erweiterte Steuerungskonzepte FAPS, 194 Seiten, 70 Bilder. 1988. ISBN 3-446-15529-5.

Band 3: Friedrich-Wilhelm Nolting Projektierung von Montagesystemen FAPS, 201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tab. 1989. ISBN 3-446-15541-4.

Band 4: Karsten Schlüter Nutzungsgradsteigerung von Montagesystemen durch den Einsatz der Simulationstechnik FAPS, 177 Seiten, 97 Bilder. 1989. ISBN 3-446-15542-2.

Band 5: Shir-Kuan Lin Aufbau von Modellen zur Lageregelung von Industrierobotern FAPS, 168 Seiten, 46 Bilder. 1989. ISBN 3-446-15546-5.

Band 6: Rudolf Nuss Untersuchungen zur Bearbeitungsqualität im Fertigungssystem Laserstrahlschneiden LFT, 206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tab. 1989. ISBN 3-446-15783-2. Band 7: Wolfgang Scholz Modell zur datenbankgestützten Planung automatisierter Montageanlagen FAPS, 194 Seiten, 89 Bilder. 1989. ISBN 3-446-15825-1.

Band 8: Hans-Jürgen Wißmeier Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhaltens von Hartmetall-Fließpreßmatrizen LFT, 179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tab. 1989. ISBN 3-446-15921-5.

Band 9: Rainer Eisele Konzeption und Wirtschaftlichkeit von Planungssystemen in der Produktion FAPS, 183 Seiten, 86 Bilder. 1990. ISBN 3-446-16107-4.

Band 10: Rolf Pfeiffer Technologisch orientierte Montageplanung am Beispiel der Schraubtechnik FAPS, 216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tab. 1990. ISBN 3-446-16161-9.

Band 11: Herbert Fischer Verteilte Planungssysteme zur Flexibilitätssteigerung der rechnerintegrierten Teilefertigung FAPS, 201 Seiten, 82 Bilder. 1990. ISBN 3-446-16105-8.

Band 12: Gerhard Kleineidam CAD/CAP: Rechnergestützte Montagefeinplanung FAPS, 203 Seiten, 107 Bilder. 1990. ISBN 3-446-16112-0. Band 13: Frank Vollertsen Pulvermetallurgische Verarbeitung eines übereutektoiden verschleißfesten Stahls LFT, XIII u. 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tab. 1990. ISBN 3-446-16133-3.

Band 14: Stephan Biermann Untersuchungen zur Anlagen- und Prozeßdiagnostik für das Schneiden mit CO2-Hochleistungslasern LFT, VIII u. 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tab. 1991. ISBN 3-446-16269-0.

Band 15: Uwe Geißler Material- und Datenfluß in einer flexiblen Blechbearbeitungszelle LFT, 124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tab. 1991. ISBN 3-446-16358-1.

Band 16: Frank Oswald Hake Entwicklung eines rechnergestützten Diagnosesystems für automatisierte Montagezellen FAPS, XIV u. 166 Seiten, 77 Bilder. 1991. ISBN 3-446-16428-6.

Band 17: Herbert Reichel Optimierung der Werkzeugbereitstellung durch rechnergestützte Arbeitsfolgenbestimmung FAPS, 198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tab. 1991. ISBN 3-446-16453-7.

Band 18: Josef Scheller Modellierung und Einsatz von Softwaresystemen für rechnergeführte Montagezellen FAPS, 198 Seiten, 65 Bilder. 1991. ISBN 3-446-16454-5. Band 19: Arnold vom Ende Untersuchungen zum Biegeumforme mit elastischer Matrize LFT, 166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tab. 1991. ISBN 3-446-16493-6.

Band 20: Joachim Schmid

Beitrag zum automatisierten Bearbeiten von Keramikguß mit Industrierobotern FAPS, XIV u. 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tab. 1991. ISBN 3-446-16560-6.

Band 21: Egon Sommer Multiprozessorsteuerung für kooperierende Industrieroboter in Montagezellen FAPS, 188 Seiten, 102 Bilder. 1991. ISBN 3-446-17062-6.

Band 22: Georg Geyer Entwicklung problemspezifischer Verfahrensketten in der Montage FAPS, 192 Seiten, 112 Bilder. 1991. ISBN 3-446-16552-5.

Band 23: Rainer Flohr Beitrag zur optimalen Verbindungstechnik in der Oberflächenmontage (SMT) FAPS, 186 Seiten, 79 Bilder. 1991. ISBN 3-446-16568-1.

Band 24: Alfons Rief

Untersuchungen zur Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen in der Rohkarosseriefertigung

LFT, VI u. 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab. 1991. ISBN 3-446-16593-2. Band 25: Christoph Thim Rechnerunterstützte Optimierung von Materialflußstrukturen in der Elektronikmontage durch Simulation FAPS, 188 Seiten, 74 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17118-5.

Band 26: Roland Müller CO2 -Laserstrahlschneiden von kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen LFT, 141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tab. 1992. ISBN 3-446-17104-5.

Band 27: Günther Schäfer Integrierte Informationsverarbeitung bei der Montageplanung FAPS, 195 Seiten, 76 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17117-7.

Band 28: Martin Hoffmann Entwicklung einer CAD/CAM-Prozeßkette für die Herstellung von Blechbiegeteilen LFT, 149 Seiten, 89 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17154-1.

Band 29: Peter Hoffmann

Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und –schweißen: Prozeßführung und Systemtechnik in der 3D-Laserstrahlbearbeitung von Blechformteilen LFT, 186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tab. 1992. ISBN 3-446-17153-3.

Band 30: Olaf Schrödel Flexible Werkstattsteuerung mit objektorientierten Softwarestrukturen FAPS, 180 Seiten, 84 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17242-4. Band 31: Hubert Reinisch Planungs- und Steuerungswerkzeuge zur impliziten Geräteprogrammierung in Roboterzellen FAPS, XI u. 212 Seiten, 112 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17380-3.

Band 32: Brigitte Bärnreuther Ein Beitrag zur Bewertung des Kommunikationsverhaltens von Automatisierungsgeräten in flexiblen Produktionszellen FAPS, XI u. 179 Seiten, 71 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17451-6.

Band 33: Joachim Hutfless Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik in der Strahlführung einer CO2-Hochleistungslaseranlage LFT, 175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tab. 1993. ISBN 3-446-17532-6.

Band 34: Uwe Günzel

Entwicklung und Einsatz eines Simulationsverfahrens für operative und strategische Probleme der Produktionsplanung und –steuerung FAPS, XIV u. 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab. 1993. ISBN 3-446-17604-7.

Band 35: Bertram Ehmann

Operatives Fertigungscontrolling durch Optimierung auftragsbezogener Bearbeitungsabläufe in der Elektronikfertigung FAPS, XV u. 167 Seiten, 114 Bilder. 1993. ISBN 3-446-17658-6.

Band 36: Harald Kolléra Entwicklung eines benutzerorientierten Werkstattprogrammiersystems für das Laserstrahlschneiden LFT, 129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tab. 1993. ISBN 3-446-17719-1. Band 37: Stephanie Abels Modellierung und Optimierung von Montageanlagen in einem integrierten Simulationssystem FAPS, 188 Seiten, 88 Bilder. 1993. ISBN 3-446-17731-0.

Band 38: Robert Schmidt-Hebbel Laserstrahlbohren durchflußbestimmender Durchgangslöcher LFT, 145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tab. 1993. ISBN 3-446-17778-7.

Band 39: Norbert Lutz Oberflächenfeinbearbeitung keramischer Werkstoffe mit XeCl-Excimerlaserstrahlung LFT, 187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tab. 1994. ISBN 3-446-17970-4.

Band 40: Konrad Grampp Rechnerunterstützung bei Test und Schulung an Steuerungssoftware von SMD-Bestücklinien FAPS, 178 Seiten, 88 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18173-3.

Band 41: Martin Koch Wissensbasierte Unterstützung der Angebotsbearbeitung in der Investitionsgüterindustrie FAPS, 169 Seiten, 68 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18174-1.

Band 42: Armin Gropp Anlagen- und Prozeßdiagnostik beim Schneiden mit einem gepulsten Nd:YAG-Laser LFT, 160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tab. 1995. ISBN 3-446-18241-1. Band 43: Werner Heckel Optische 3D-Konturerfassung und on-line Biegewinkelmessung mit dem Lichtschnittverfahren LFT, 149 Seiten, 43 Bilder, 11 Tab. 1995. ISBN 3-446-18243-8.

Band 44: Armin Rothhaupt Modulares Planungssystem zur Optimierung der Elektronikfertigung FAPS, 180 Seiten, 101 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18307-8.

Band 45: Bernd Zöllner Adaptive Diagnose in der Elektronikproduktion FAPS, 195 Seiten, 74 Bilder, 3 Tab. 1995. ISBN 3-446-18308-6.

Band 46: Bodo Vormann Beitrag zur automatisierten Handhabungsplanung komplexer Blechbiegeteile LFT, 126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab. 1995. ISBN 3-446-18345-0.

Band 47: Peter Schnepf Zielkostenorientierte Montageplanung FAPS, 144 Seiten, 75 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18397-3.

Band 48: Rainer Klotzbücher Konzept zur rechnerintegrierten Materialversorgung in flexiblen Fertigungssystemen FAPS, 156 Seiten, 62 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18412-0. Band 49: Wolfgang Greska Wissensbasierte Analyse und Klassifizierung von Blechteilen LFT, 144 Seiten, 96 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18462-7.

Band 50: Jörg Franke Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3-D MID) FAPS, 196 Seiten, 86 Bilder, 4 Tab. 1995. ISBN 3-446-18448-1.

Band 51: Franz-Josef Zeller Sensorplanung und schnelle Sensorregelung für Industrieroboter FAPS, 190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tab. 1995. ISBN 3-446-18601-8.

Band 52: Michael Solvie Zeitbehandlung und Multimedia-Unterstützung in Feldkommunikationssystemen FAPS, 200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tab. 1996. ISBN 3-446-18607-7.

Band 53: Robert Hopperdietzel Reengineering in der Elektro- und Elektronikindustrie FAPS, 180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tab. 1996. ISBN 3-87525-070-2.

Band 54: Thomas Rebhahn Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung mit Excimerlasern - Systemkomponenten und Verfahrensoptimierungen LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tab. 1996. ISBN 3-87525-075-3. Band 55: Henning Hanebuth Laserstrahlhartlöten mit Zweistrahltechnik LFT, 157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab. 1996. ISBN 3-87525-074-5.

Band 56: Uwe Schönherr Steuerung und Sensordatenintegration für flexible Fertigungszellen mit kooperierenden Robotern FAPS, 188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tab. 1996. ISBN 3-87525-076-1.

Band 57: Stefan Holzer Berührungslose Formgebung mit Laserstrahlung LFT, 162 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab. 1996. ISBN 3-87525-079-6.

Band 58: Markus Schultz Fertigungsqualität beim 3D-Laserstrahlschweißen von Blechformteilen LFT, 165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tab. 1997. ISBN 3-87525-080-X.

Band 59: Thomas Krebs Integration elektromechanischer CA-Anwendungen über einem STEP-Produktmodell FAPS, 198 Seiten, 58 Bilder, 8 Tab. 1997. ISBN 3-87525-081-8.

Band 60: Jürgen Sturm Prozeßintegrierte Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion FAPS, 167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab. 1997. ISBN 3-87525-082-6. Band 61: Andreas Brand Prozesse und Systeme zur Bestückung räumlicher elektronischer Baugruppen (3D-MID) FAPS, 182 Seiten, 100 Bilder. 1997. ISBN 3-87525-087-7.

Band 62: Michael Kauf Regelung der Laserstrahlleistung und der Fokusparameter einer CO2-Hochleistungslaseranlage LFT, 140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab. 1997. ISBN 3-87525-083-4.

Band 63: Peter Steinwasser Modulares Informationsmanagement in der integrierten Produkt- und Prozeßplanung FAPS, 190 Seiten, 87 Bilder. 1997. ISBN 3-87525-084-2.

Band 64: Georg Liedl Integriertes Automatisierungskonzept für den flexiblen Materialfluß in der Elektronikproduktion FAPS, 196 Seiten, 96 Bilder, 3 Tab. 1997. ISBN 3-87525-086-9.

Band 65: Andreas Otto Transiente Prozesse beim Laserstrahlschweißen LFT, 132 Seiten, 62 Bilder, 1 Tab. 1997. ISBN 3-87525-089-3.

Band 66: Wolfgang Blöchl Erweiterte Informationsbereitstellung an offenen CNC-Steuerungen zur Prozeß- und Programmoptimierung FAPS, 168 Seiten, 96 Bilder. 1997. ISBN 3-87525-091-5. Band 67: Klaus-Uwe Wolf Verbesserte Prozeßführung und Prozeßplanung zur Leistungs- und Qualitätssteigerung beim Spulenwickeln FAPS, 186 Seiten, 125 Bilder. 1997. ISBN 3-87525-092-3.

Band 68: Frank Backes Technologieorientierte Bahnplanung für die 3D-Laserstrahlbearbeitung LFT, 138 Seiten, 71 Bilder, 2 Tab. 1997. ISBN 3-87525-093-1.

Band 69: Jürgen Kraus Laserstrahlumformen von Profilen LFT, 137 Seiten, 72 Bilder, 8 Tab. 1997. ISBN 3-87525-094-X.

Band 70: Norbert Neubauer Adaptive Strahlführungen für CO2-Laseranlagen LFT, 120 Seiten, 50 Bilder, 3 Tab. 1997. ISBN 3-87525-095-8.

Band 71: Michael Steber Prozeßoptimierter Betrieb flexibler Schraubstationen in der automatisierten Montage FAPS, 168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tab. 1997. ISBN 3-87525-096-6.

Band 72: Markus Pfestorf Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen in der Umformtechnik LFT, 162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tab. 1997. ISBN 3-87525-097-4. Band 73: Volker Franke Integrierte Planung und Konstruktion von Werkzeugen für die Biegebearbeitung LFT, 143 Seiten, 81 Bilder. 1998. ISBN 3-87525-098-2.

Band 74: Herbert Scheller Automatisierte Demontagesysteme und recyclinggerechte Produktgestaltung elektronischer Baugruppen FAPS, 184 Seiten, 104 Bilder, 17 Tab. 1998. ISBN 3-87525-099-0.

Band 75: Arthur Meßner

Kaltmassivumformung metallischer Kleinstteile – Werkstoffverhalten, Wirkflächenreibung, Prozeßauslegung LFT, 164 Seiten, 92 Bilder, 14 Tab. 1998. ISBN 3-87525-100-8.

Band 76: Mathias Glasmacher Prozeß- und Systemtechnik zum Laserstrahl-Mikroschweißen LFT, 184 Seiten, 104 Bilder, 12 Tab. 1998. ISBN 3-87525-101-6.

Band 77: Michael Schwind Zerstörungsfreie Ermittlung mechanischer Eigenschaften von Feinblechen mit dem Wirbelstromverfahren LFT, 124 Seiten, 68 Bilder, 8 Tab. 1998. ISBN 3-87525-102-4.

Band 78: Manfred Gerhard Qualitätssteigerung in der Elektronikproduktion durch Optimierung der Prozeßführung beim Löten komplexer Baugruppen FAPS, 179 Seiten, 113 Bilder, 7 Tab. 1998. ISBN 3-87525-103-2. Band 79: Elke Rauh Methodische Einbindung der Simulation in die betrieblichen Planungs- und Entscheidungsabläufe FAPS, 192 Seiten, 114 Bilder, 4 Tab. 1998. ISBN 3-87525-104-0.

Band 80: Sorin Niederkorn Meßeinrichtung zur Untersuchung der Wirkflächenreibung bei umformtechnischen Prozessen LFT, 99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tab. 1998. ISBN 3-87525-105-9.

Band 81: Stefan Schuberth

Regelung der Fokuslage beim Schweißen mit CO2-Hochleistungslasern unter Einsatz von adaptiven Optiken LFT, 140 Seiten, 64 Bilder, 3 Tab. 1998. ISBN 3-87525-106-7.

Band 82: Armando Walter Colombo Development and Implementation of Hierarchical Control Structures of Flexible Production Systems Using High Level Petri Nets FAPS, 216 Seiten, 86 Bilder. 1998. ISBN 3-87525-109-1.

Band 83: Otto Meedt

Effizienzsteigerung bei Demontage und Recycling durch flexible Demontagetechnologien und optimierte Produktgestaltung FAPS, 186 Seiten, 103 Bilder. 1998. ISBN 3-87525-108-3.

Band 84: Knuth Götz Modelle und effiziente Modellbildung zur Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion FAPS, 212 Seiten, 129 Bilder, 24 Tab. 1998. ISBN 3-87525-112-1. Band 85: Ralf Luchs

Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT FAPS, 176 Seiten, 126 Bilder, 30 Tab. 1998. ISBN 3-87525-113-7.

Band 86: Frank Pöhlau Entscheidungsgrundlagen zur Einführung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID) FAPS, 144 Seiten, 99 Bilder. 1999. ISBN 3-87525-114-8.

Band 87: Roland T. A. Kals Fundamentals on the miniaturization of sheet metal working processes LFT, 128 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab. 1999. ISBN 3-87525-115-6.

Band 88: Gerhard Luhn Implizites Wissen und technisches Handeln am Beispiel der Elektronikproduktion FAPS, 252 Seiten, 61 Bilder, 1 Tab. 1999. ISBN 3-87525-116-4.

Band 89: Axel Sprenger Adaptives Streckbiegen von Aluminium-Strangpreßprofilen LFT, 114 Seiten, 63 Bilder, 4 Tab. 1999. ISBN 3-87525-117-2.

Band 90: Hans-Jörg Pucher Untersuchungen zur Prozeßfolge Umformen, Bestücken und Laserstrahllöten von Mikrokontakten LFT, 158 Seiten, 69 Bilder, 9 Tab. 1999. ISBN 3-87525-119-9. Band 91: Horst Arnet Profilbiegen mit kinematischer Gestalterzeugung LFT, 128 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab. 1999. ISBN 3-87525-120-2.

Band 92: Doris Schubart Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung beim Abtragen mit CO2-Laserstrahlung LFT, 133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab. 1999. ISBN 3-87525-122-9.

Band 93: Adrianus L. P. Coremans Laserstrahlsintern von Metallpulver -Prozeßmodellierung, Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahlgesinterter Metallkörper LFT, 184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tab. 1999. ISBN 3-87525-124-5.

Band 94: Hans-Martin Biehler Optimierungskonzepte für Qualitätsdatenverarbeitung und Informationsbereitstellung in der Elektronikfertigung FAPS, 194 Seiten, 105 Bilder. 1999. ISBN 3-87525-126-1.

Band 95: Wolfgang Becker Oberflächenausbildung und tribologische Eigenschaften excimerlaserstrahlbearbeiteter Hochleistungskeramiken LFT, 175 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab. 1999. ISBN 3-87525-127-X.

Band 96: Philipp Hein Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren: Modellierung, Prozeßauslegung und Prozeßführung LFT, 129 Seiten, 57 Bilder, 7 Tab. 1999. ISBN 3-87525-128-8. Band 97: Gunter Beitinger Herstellungs- und Prüfverfahren für thermoplastische Schaltungsträger FAPS, 169 Seiten, 92 Bilder, 20 Tab. 1999. ISBN 3-87525-129-6.

Band 98: Jürgen Knoblach Beitrag zur rechnerunterstützten verursachungsgerechten Angebotskalkulation von Blechteilen mit Hilfe wissensbasierter Methoden LFT, 155 Seiten, 53 Bilder, 26 Tab. 1999. ISBN 3-87525-130-X.

Band 99: Frank Breitenbach Bildverarbeitungssystem zur Erfassung der Anschlußgeometrie elektronischer SMT-Bauelemente LFT, 147 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2000. ISBN 3-87525-131-8.

Band 100: Bernd Falk Simulationsbasierte Lebensdauervorhersage für Werkzeuge der Kaltmassivumformung LFT, 134 Seiten, 44 Bilder, 15 Tab. 2000. ISBN 3-87525-136-9.

Band 101: Wolfgang Schlögl Integriertes Simulationsdaten-Management für Maschinenentwicklung und Anlagenplanung FAPS, 169 Seiten, 101 Bilder, 20 Tab. 2000. ISBN 3-87525-137-7.

Band 102: Christian Hinsel Ermüdungsbruchversagen hartstoffbeschichteter Werkzeugstähle in der Kaltmassivumformung LFT, 130 Seiten, 80 Bilder, 14 Tab. 2000. ISBN 3-87525-138-5. Band 103: Stefan Bobbert Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren LFT, 123 Seiten, 77 Bilder. 2000. ISBN 3-87525-145-8.

Band 104: Harald Rottbauer Modulares Planungswerkzeug zum Produktionsmanagement in der Elektronikproduktion FAPS, 166 Seiten, 106 Bilder. 2001. ISBN 3-87525-139-3.

Band 105: Thomas Hennige Flexible Formgebung von Blechen durch Laserstrahlumformen LFT, 119 Seiten, 50 Bilder. 2001. ISBN 3-87525-140-7.

Band 106: Thomas Menzel Wissensbasierte Methoden für die rechnergestützte Charakterisierung und Bewertung innovativer Fertigungsprozesse LFT, 152 Seiten, 71 Bilder. 2001. ISBN 3-87525-142-3.

Band 107: Thomas Stöckel Kommunikationstechnische Integration der Prozeßebene in Produktionssysteme durch Middleware-Frameworks FAPS, 147 Seiten, 65 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-143-1. Band 108: Frank Pitter Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen durch Einsatz mechatronischer Sensorlösungen FAPS, 158 Seiten, 131 Bilder, 8 Tab. 2001. ISBN 3-87525-144-X.

Band 109: Markus Korneli Integration lokaler CAP-Systeme in einen globalen Fertigungsdatenverbund FAPS, 121 Seiten, 53 Bilder, 11 Tab. 2001. ISBN 3-87525-146-6.

Band 110: Burkhard Müller Laserstrahljustieren mit Excimer-Lasern -Prozeßparameter und Modelle zur Aktorkonstruktion LFT, 128 Seiten, 36 Bilder, 9 Tab. 2001. ISBN 3-87525-159-8.

Band 111: Jürgen Göhringer Integrierte Telediagnose via Internet zum effizienten Service von Produktionssystemen FAPS, 178 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-147-4.

Band 112: Robert Feuerstein Qualitäts- und kosteneffiziente Integration neuer Bauelementetechnologien in die Flachbaugruppenfertigung FAPS, 161 Seiten, 99 Bilder, 10 Tab. 2001. ISBN 3-87525-151-2.

Band 113: Marcus Reichenberger Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten alternativer Elektroniklote in der Oberflächenmontage (SMT) FAPS, 165 Seiten, 97 Bilder, 18 Tab. 2001. ISBN 3-87525-152-0. Band 114: Alexander Huber Justieren vormontierter Systeme mit dem Nd:YAG-Laser unter Einsatz von Aktoren LFT, 122 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-153-9.

Band 115: Sami Krimi Analyse und Optimierung von Montagesystemen in der Elektronikproduktion FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 3 Tab. 2001. ISBN 3-87525-157-1.

Band 116: Marion Merklein Laserstrahlumformen von Aluminiumwerkstoffen - Beeinflussung der Mikrostruktur und der mechanischen Eigenschaften LFT, 122 Seiten, 65 Bilder, 15 Tab. 2001. ISBN 3-87525-156-3.

Band 117: Thomas Collisi Ein informationslogistisches Architekturkonzept zur Akquisition simulationsrelevanter Daten FAPS, 181 Seiten, 105 Bilder, 7 Tab. 2002. ISBN 3-87525-164-4.

Band 118: Markus Koch Rationalisierung und ergonomische Optimierung im Innenausbau durch den Einsatz moderner Automatisierungstechnik FAPS, 176 Seiten, 98 Bilder, 9 Tab. 2002. ISBN 3-87525-165-2.

Band 119: Michael Schmidt Prozeßregelung für das Laserstrahl-Punktschweißen in der Elektronikproduktion LFT, 152 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab. 2002. ISBN 3-87525-166-0. Band 120: Nicolas Tiesler Grundlegende Untersuchungen zum Fließpressen metallischer Kleinstteile LFT, 126 Seiten, 78 Bilder, 12 Tab. 2002. ISBN 3-87525-175-X.

Band 121: Lars Pursche Methoden zur technologieorientierten Programmierung für die 3D-Lasermikrobearbeitung LFT, 111 Seiten, 39 Bilder, o Tab. 2002. ISBN 3-87525-183-0.

Band 122: Jan-Oliver Brassel Prozeßkontrolle beim Laserstrahl-Mikroschweißen LFT, 148 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab. 2002. ISBN 3-87525-181-4.

Band 123: Mark Geisel Prozeßkontrolle und -steuerung beim Laserstrahlschweißen mit den Methoden der nichtlinearen Dynamik LFT, 135 Seiten, 46 Bilder, 2 Tab. 2002. ISBN 3-87525-180-6.

Band 124: Gerd Eßer Laserstrahlunterstützte Erzeugung metallischer Leiterstrukturen auf Thermoplastsubstraten für die MID-Technik LFT, 148 Seiten, 60 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-171-7.

Band 125: Marc Fleckenstein Qualität laserstrahl-gefügter Mikroverbindungen elektronischer Kontakte LFT, 159 Seiten, 77 Bilder, 7 Tab. 2002. ISBN 3-87525-170-9. Band 126: Stefan Kaufmann Grundlegende Untersuchungen zum Nd:YAG- Laserstrahlfügen von Silizium für Komponenten der Optoelektronik LFT, 159 Seiten, 100 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-172-5.

Band 127: Thomas Fröhlich Simultanes Löten von Anschlußkontakten elektronischer Bauelemente mit Diodenlaserstrahlung LFT, 143 Seiten, 75 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-186-5.

Band 128: Achim Hofmann Erweiterung der Formgebungsgrenzen beim Umformen von Aluminiumwerkstoffen durch den Einsatz prozessangepasster Platinen LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 4 Tab. 2002. ISBN 3-87525-182-2.

Band 129: Ingo Kriebitzsch 3 - D MID Technologie in der Automobilelektronik FAPS, 129 Seiten, 102 Bilder, 10 Tab. 2002. ISBN 3-87525-169-5.

Band 130: Thomas Pohl Fertigungsqualität und Umformbarkeit laserstrahlgeschweißter Formplatinen aus Aluminiumlegierungen LFT, 133 Seiten, 93 Bilder, 12 Tab. 2002. ISBN 3-87525-173-3.

Band 131: Matthias Wenk Entwicklung eines konfigurierbaren Steuerungssystems für die flexible Sensorführung von Industrierobotern FAPS, 167 Seiten, 85 Bilder, 1 Tab. 2002. ISBN 3-87525-174-1. Band 132: Matthias Negendanck Neue Sensorik und Aktorik für Bearbeitungsköpfe zum Laserstrahlschweißen LFT, 116 Seiten, 60 Bilder, 14 Tab. 2002. ISBN 3-87525-184-9.

Band 133: Oliver Kreis

Integrierte Fertigung - Verfahrensintegration durch Innenhochdruck-Umformen, Trennen und Laserstrahlschweißen in einem Werkzeug sowie ihre tele- und multimediale Präsentation

LFT, 167 Seiten, 90 Bilder, 43 Tab. 2002. ISBN 3-87525-176-8.

Band 134: Stefan Trautner

Technische Umsetzung produktbezogener Instrumente der Umweltpolitik bei Elektro- und Elektronikgeräten FAPS, 179 Seiten, 92 Bilder, 11 Tab. 2002. ISBN 3-87525-177-6.

Band 135: Roland Meier Strategien für einen produktorientierten Einsatz räumlicher spritzgegossener

Schaltungsträger (3-D MID) FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab. 2002. ISBN 3-87525-178-4.

Band 136: Jürgen Wunderlich Kostensimulation - Simulationsbasierte Wirtschaftlichkeitsregelung komplexer Produktionssysteme FAPS, 202 Seiten, 119 Bilder, 17 Tab. 2002. ISBN 3-87525-179-2.

Band 137: Stefan Novotny Innenhochdruck-Umformen von Blechen aus Aluminium- und Magnesiumlegierungen bei erhöhter Temperatur LFT, 132 Seiten, 82 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-185-7. Band 138: Andreas Licha

Flexible Montageautomatisierung zur Komplettmontage flächenhafter Produktstrukturen durch kooperierende Industrieroboter

FAPS, 158 Seiten, 87 Bilder, 8 Tab. 2003. ISBN 3-87525-189-X.

Band 139: Michael Eisenbarth Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und Verbindungstechnik für mechatronische Baugruppen FAPS, 207 Seiten, 141 Bilder, 9 Tab. 2003.

ISBN 3-87525-190-3.

Band 140: Frank Christoph Durchgängige simulationsgestützte Planung von Fertigungseinrichtungen der Elektronikproduktion FAPS, 187 Seiten, 107 Bilder, 9 Tab. 2003.

ISBN 3-87525-191-1.

Band 141: Hinnerk Hagenah Simulationsbasierte Bestimmung der zu erwartenden Maßhaltigkeit für das Blechbiegen LFT, 131 Seiten, 36 Bilder, 26 Tab. 2003. ISBN 3-87525-192-X.

Band 142: Ralf Eckstein Scherschneiden und Biegen metallischer Kleinstteile - Materialeinfluss und Materialverhalten LFT, 148 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab. 2003. ISBN 3-87525-193-8.

Band 143: Frank H. Meyer-Pittroff Excimerlaserstrahlbiegen dünner metallischer Folien mit homogener Lichtlinie LFT, 138 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab. 2003. ISBN 3-87525-196-2. Band 144: Andreas Kach Rechnergestützte Anpassung von Laserstrahlschneidbahnen an Bauteilabweichungen LFT, 139 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab. 2004. ISBN 3-87525-197-0.

Band 145: Stefan Hierl System- und Prozeßtechnik für das simultane Löten mit Diodenlaserstrahlung von elektronischen Bauelementen LFT, 124 Seiten, 66 Bilder, 4 Tab. 2004. ISBN 3-87525-198-9.

Band 146: Thomas Neudecker Tribologische Eigenschaften keramischer Blechumformwerkzeuge- Einfluss einer Oberflächenendbearbeitung mittels Excimerlaserstrahlung LFT, 166 Seiten, 75 Bilder, 26 Tab. 2004. ISBN 3-87525-200-4.

Band 147: Ulrich Wenger Prozessoptimierung in der Wickeltechnik durch innovative maschinenbauliche und regelungstechnische Ansätze FAPS, 132 Seiten, 88 Bilder, o Tab. 2004. ISBN 3-87525-203-9.

Band 148: Stefan Slama

Effizienzsteigerung in der Montage durch marktorientierte Montagestrukturen und erweiterte Mitarbeiterkompetenz FAPS, 188 Seiten, 125 Bilder, o Tab. 2004. ISBN 3-87525-204-7.

Band 149: Thomas Wurm

Laserstrahljustieren mittels Aktoren-Entwicklung von Konzepten und Methoden für die rechnerunterstützte Modellierung und Optimierung von komplexen Aktorsystemen in der Mikrotechnik LFT, 122 Seiten, 51 Bilder, 9 Tab. 2004. ISBN 3-87525-206-3. Band 150: Martino Celeghini Wirkmedienbasierte Blechumformung: Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss von Werkstoff und Bauteilgeometrie LFT, 146 Seiten, 77 Bilder, 6 Tab. 2004. ISBN 3-87525-207-1.

Band 151: Ralph Hohenstein Entwurf hochdynamischer Sensor- und Regelsysteme für die adaptive Laserbearbeitung LFT, 282 Seiten, 63 Bilder, 16 Tab. 2004. ISBN 3-87525-210-1.

Band 152: Angelika Hutterer Entwicklung prozessüberwachender Regelkreise für flexible Formgebungsprozesse LFT, 149 Seiten, 57 Bilder, 2 Tab. 2005. ISBN 3-87525-212-8.

Band 153: Emil Egerer Massivumformen metallischer Kleinstteile bei erhöhter Prozesstemperatur LFT, 158 Seiten, 87 Bilder, 10 Tab. 2005. ISBN 3-87525-213-6.

Band 154: Rüdiger Holzmann Strategien zur nachhaltigen Optimierung von Qualität und Zuverlässigkeit in der Fertigung hochintegrierter Flachbaugruppen FAPS, 186 Seiten, 99 Bilder, 19 Tab. 2005. ISBN 3-87525-217-9.

Band 155: Marco Nock Biegeumformen mit Elastomerwerkzeugen Modellierung, Prozessauslegung und Abgrenzung des Verfahrens am Beispiel des Rohrbiegens LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 13 Tab. 2005. ISBN 3-87525-218-7. Band 156: Frank Niebling Qualifizierung einer Prozesskette zum Laserstrahlsintern metallischer Bauteile LFT, 148 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab. 2005. ISBN 3-87525-219-5.

Band 157: Markus Meiler

Großserientauglichkeit trockenschmierstoffbeschichteter Aluminiumbleche im Presswerk Grundlegende Untersuchungen zur Tribologie, zum Umformverhalten und Bauteilversuche LFT, 104 Seiten, 57 Bilder, 21 Tab. 2005.

ISBN 3-87525-221-7.

Band 158: Agus Sutanto Solution Approaches for Planning of Assembly Systems in Three-Dimensional Virtual Environments FAPS, 169 Seiten, 98 Bilder, 3 Tab. 2005. ISBN 3-87525-220-9.

Band 159: Matthias Boiger Hochleistungssysteme für die Fertigung elektronischer Baugruppen auf der Basis flexibler Schaltungsträger FAPS, 175 Seiten, 111 Bilder, 8 Tab. 2005. ISBN 3-87525-222-5.

Band 160: Matthias Pitz Laserunterstütztes Biegen höchstfester Mehrphasenstähle LFT, 120 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab. 2005. ISBN 3-87525-223-3.

Band 161: Meik Vahl Beitrag zur gezielten Beeinflussung des Werkstoffflusses beim Innenhochdruck-Umformen von Blechen LFT, 165 Seiten, 94 Bilder, 15 Tab. 2005. ISBN 3-87525-224-1. Band 162: Peter K. Kraus Plattformstrategien - Realisierung einer varianz- und kostenoptimierten Wertschöpfung FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, o Tab. 2005. ISBN 3-87525-226-8.

Band 163: Adrienn Cser Laserstrahlschmelzabtrag - Prozessanalyse und -modellierung LFT, 146 Seiten, 79 Bilder, 3 Tab. 2005. ISBN 3-87525-227-6.

Band 164: Markus C. Hahn Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung von Leichtbauverbundstrukturen mit Aluminiumschaumkern LFT, 143 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab. 2005. ISBN 3-87525-228-4.

Band 165: Gordana Michos Mechatronische Ansätze zur Optimierung von Vorschubachsen FAPS, 146 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab. 2005. ISBN 3-87525-230-6.

Band 166: Markus Stark Auslegung und Fertigung hochpräziser Faser-Kollimator-Arrays LFT, 158 Seiten, 115 Bilder, 11 Tab. 2005. ISBN 3-87525-231-4.

Band 167: Yurong Zhou

Kollaboratives Engineering Management in der integrierten virtuellen Entwicklung der Anlagen für die Elektronikproduktion FAPS, 156 Seiten, 84 Bilder, 6 Tab. 2005. ISBN 3-87525-232-2. Band 168: Werner Enser Neue Formen permanenter und lösbarer elektrischer Kontaktierungen für mechatronische Baugruppen FAPS, 190 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab. 2005. ISBN 3-87525-233-0.

Band 169: Katrin Melzer Integrierte Produktpolitik bei elektrischen und elektronischen Geräten zur Optimierung des Product-Life-Cycle FAPS, 155 Seiten, 91 Bilder, 17 Tab. 2005. ISBN 3-87525-234-9.

Band 170: Alexander Putz Grundlegende Untersuchungen zur Erfassung der realen Vorspannung von armierten Kaltfließpresswerkzeugen mittels Ultraschall

LFT, 137 Seiten, 71 Bilder, 15 Tab. 2006. ISBN 3-87525-237-3.

Band 171: Martin Prechtl Automatisiertes Schichtverfahren für metallische Folien - System- und Prozesstechnik LFT, 154 Seiten, 45 Bilder, 7 Tab. 2006. ISBN 3-87525-238-1.

Band 172: Markus Meidert Beitrag zur deterministischen Lebensdauerabschätzung von Werkzeugen der Kaltmassivumformung LFT, 131 Seiten, 78 Bilder, 9 Tab. 2006. ISBN 3-87525-239-X.

Band 173: Bernd Müller

Robuste, automatisierte Montagesysteme durch adaptive Prozessführung und montageübergreifende Fehlerprävention am Beispiel flächiger Leichtbauteile FAPS, 147 Seiten, 77 Bilder, o Tab. 2006. ISBN 3-87525-240-3. Band 174: Alexander Hofmann Hybrides Laserdurchstrahlschweißen von Kunststoffen LFT, 136 Seiten, 72 Bilder, 4 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-243-9.

Band 175: Peter Wölflick

Innovative Substrate und Prozesse mit feinsten Strukturen für bleifreie Mechatronik-Anwendungen FAPS, 177 Seiten, 148 Bilder, 24 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-246-0.

Band 176: Attila Komlodi

Detection and Prevention of Hot Cracks during Laser Welding of Aluminium Alloys Using Advanced Simulation Methods LFT, 155 Seiten, 89 Bilder, 14 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-248-4.

Band 177: Uwe Popp

Grundlegende Untersuchungen zum Laserstrahlstrukturieren von Kaltmassivumformwerkzeugen LFT, 140 Seiten, 67 Bilder, 16 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-249-1.

Band 178: Veit Rückel

Rechnergestützte Ablaufplanung und Bahngenerierung Für kooperierende Industrieroboter FAPS, 148 Seiten, 75 Bilder, 7 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-250-7.

Band 179: Manfred Dirscherl Nicht-thermische Mikrojustiertechnik mittels ultrakurzer Laserpulse LFT, 154 Seiten, 69 Bilder, 10 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-251-4.

Band 180: Yong Zhuo

Entwurf eines rechnergestützten integrierten Systems für Konstruktion und Fertigungsplanung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3D-MID)

FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 5 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-253-8.

Band 181: Stefan Lang Durchgängige Mitarbeiterinformation zur Steigerung von Effizienz und Prozesssicherheit in der Produktion FAPS, 172 Seiten, 93 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-257-6.

Band 182: Hans-Joachim Krauß Laserstrahlinduzierte Pyrolyse präkeramischer Polymere LFT, 171 Seiten, 100 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-258-3.

Band 183: Stefan Junker

Technologien und Systemlösungen für die flexibel automatisierte Bestückung permanent erregter Läufer mit oberflächenmontierten Dauermagneten FAPS, 173 Seiten, 75 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-259-0.

Band 184: Rainer Kohlbauer Wissensbasierte Methoden für die simulationsgestützte Auslegung wirkmedienbasierter Blechumformprozesse LFT, 135 Seiten, 50 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-260-6. Band 185: Klaus Lamprecht Wirkmedienbasierte Umformung tiefgezogener Vorformen unter besonderer Berücksichtigung maßgeschneiderter Halbzeuge LFT, 137 Seiten, 81 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-265-1.

Band 186: Bernd Zolleiß

Optimierte Prozesse und Systeme für die Bestückung mechatronischer Baugruppen FAPS, 180 Seiten, 117 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-266-8.

Band 187: Michael Kerausch Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter Aluminiumplatinen LFT, 146 Seiten, 76 Bilder, 7 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-267-5.

Band 188: Matthias Weber Unterstützung der Wandlungsfähigkeit von Produktionsanlagen durch innovative Softwaresysteme FAPS, 183 Seiten, 122 Bilder, 3 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-269-9.

Band 189: Thomas Frick Untersuchung der prozessbestimmenden Strahl-Stoff-Wechselwirkungen beim Laserstrahlschweißen von Kunststoffen LFT, 104 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-268-2. Band 190: Joachim Hecht Werkstoffcharakterisierung und Prozessauslegung für die wirkmedienbasierte Doppelblech-Umformung von Magnesiumlegierungen LFT, 107 Seiten, 91 Bilder, 2 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-270-5.

Band 191: Ralf Völkl

Stochastische Simulation zur Werkzeuglebensdaueroptimierung und Präzisionsfertigung in der Kaltmassivumformung LFT, 178 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-272-9.

Band 192: Massimo Tolazzi Innenhochdruck-Umformen verstärkter Blech-Rahmenstrukturen LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 7 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-273-6.

Band 193: Cornelia Hoff Untersuchung der Prozesseinflussgrößen beim Presshärten des höchstfesten Vergütungsstahls 22MnB5 LFT, 133 Seiten, 92 Bilder, 5 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-275-0.

Band 194: Christian Alvarez Simulationsgestützte Methoden zur effizienten Gestaltung von Lötprozessen in der Elektronikproduktion FAPS, 149 Seiten, 86 Bilder, 8 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-277-4.

Band 195: Andreas Kunze Automatisierte Montage von makromechatronischen Modulen zur flexiblen Integration in hybride Pkw-Bordnetzsysteme FAPS, 160 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-278-1. Band 196: Wolfgang Hußnätter Grundlegende Untersuchungen zur experimentellen Ermittlung und zur Modellierung von Fließortkurven bei erhöhten Temperaturen LFT, 152 Seiten, 73 Bilder, 21 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-279-8.

Band 197: Thomas Bigl Entwicklung, angepasste Herstellungsverfahren und erweiterte Qualitätssicherung von einsatzgerechten elektronischen Baugruppen FAPS, 175 Seiten, 107 Bilder, 14 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-280-4.

Band 198: Stephan Roth Grundlegende Untersuchungen zum Excimerlaserstrahl-Abtragen unter Flüssigkeitsfilmen LFT, 113 Seiten, 47 Bilder, 14 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-281-1.

Band 199: Artur Giera Prozesstechnische Untersuchungen zum Rührreibschweißen metallischer Werkstoffe LFT, 179 Seiten, 104 Bilder, 36 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-282-8.

Band 200: Jürgen Lechler Beschreibung und Modellierung des Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen LFT, 154 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-286-6.

Band 201: Andreas Blankl Untersuchungen zur Erhöhung der Prozessrobustheit bei der Innenhochdruck-Umformung von flächigen Halbzeugen mit vor- bzw. nachgeschalteten Laserstrahlfügeoperationen LFT, 120 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-287-3. Band 202: Andreas Schaller Modellierung eines nachfrageorientierten Produktionskonzeptes für mobile Telekommunikationsgeräte FAPS, 120 Seiten, 79 Bilder, o Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-289-7.

Band 203: Claudius Schimpf Optimierung von Zuverlässigkeitsuntersuchungen, Prüfabläufen und Nacharbeitsprozessen in der Elektronikproduktion FAPS, 162 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-290-3.

Band 204: Simon Dietrich

Sensoriken zur Schwerpunktslagebestimmung der optischen Prozessemissionen beim Laserstrahltiefschweißen LFT, 138 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-292-7.

Band 205: Wolfgang Wolf Entwicklung eines agentenbasierten Steuerungssystems zur Materialflussorganisation im wandelbaren Produktionsumfeld FAPS, 167 Seiten, 98 Bilder. 2009. ISBN 978-3-87525-293-4.

Band 206: Steffen Polster Laserdurchstrahlschweißen transparenter Polymerbauteile LFT, 160 Seiten, 92 Bilder, 13 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-294-1.

Band 207: Stephan Manuel Dörfler Rührreibschweißen von walzplattiertem Halbzeug und Aluminiumblech zur Herstellung flächiger Aluminiumschaum-Sandwich-Verbundstrukturen LFT, 190 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-295-8. Band 208: Uwe Vogt Seriennahe Auslegung von Aluminium Tailored Heat Treated Blanks LFT, 151 Seiten, 68 Bilder, 26 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-296-5.

Band 209: Till Laumann

Qualitative und quantitative Bewertung der Crashtauglichkeit von höchstfesten Stählen LFT, 117 Seiten, 69 Bilder, 7 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-299-6.

Band 210: Alexander Diehl

Größeneffekte bei Biegeprozessen-Entwicklung einer Methodik zur Identifikation und Quantifizierung LFT, 180 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-302-3.

Band 211: Detlev Staud

Effiziente Prozesskettenauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter und geschweißter Aluminiumbleche LFT, 164 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-303-0.

Band 212: Jens Ackermann Prozesssicherung beim Laserdurchstrahlschweißen thermoplastischer Kunststoffe LPT, 129 Seiten, 74 Bilder, 13 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-305-4.

Band 213: Stephan Weidel

Grundlegende Untersuchungen zum Kontaktzustand zwischen Werkstück und Werkzeug bei umformtechnischen Prozessen unter tribologischen Gesichtspunkten LFT, 144 Seiten, 67 Bilder, 11 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-307-8. Band 214: Stefan Geißdörfer Entwicklung eines mesoskopischen Modells zur Abbildung von Größeneffekten in der Kaltmassivumformung mit Methoden der FE-Simulation LFT, 133 Seiten, 83 Bilder, 11 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-308-5.

Konzeption produktspezifischer Lösun-

gen zur Robustheitssteigerung elektroni-

scher Systeme gegen die Einwirkung von

FAPS, 165 Seiten, 93 Bilder, 14 Tab. 2010.

Band 215: Christian Matzner

Betauung im Automobil

ISBN 978-3-87525-309-2.

Band 219: Andreas Dobroschke Flexible Automatisierungslösungen für die Fertigung wickeltechnischer Produkte FAPS, 184 Seiten, 109 Bilder, 18 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-317-7.

Band 220: Azhar Zam Optical Tissue Differentiation for Sensor-Controlled Tissue-Specific Laser Surgery LPT, 99 Seiten, 45 Bilder, 8 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-318-4.

Band 216: Florian Schüßler Verbindungs- und Systemtechnik für thermisch hochbeanspruchte und miniaturisierte elektronische Baugruppen FAPS, 184 Seiten, 93 Bilder, 18 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-310-8. Band 221: Michael Rösch Potenziale und Strategien zur Optimierung des Schablonendruckprozesses in der Elektronikproduktion FAPS, 192 Seiten, 127 Bilder, 19 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-319-1.

Band 217: Massimo Cojutti Strategien zur Erweiterung der Prozessgrenzen bei der Innhochdruck-Umformung von Rohren und Blechpaaren LFT, 125 Seiten, 56 Bilder, 9 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-312-2.

Band 218: Raoul Plettke Mehrkriterielle Optimierung komplexer Aktorsysteme für das Laserstrahljustieren LFT, 152 Seiten, 25 Bilder, 3 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-315-3. Band 222: Thomas Rechtenwald Quasi-isothermes Laserstrahlsintern von Hochtemperatur-Thermoplasten - Eine Betrachtung werkstoff-prozessspezifischer Aspekte am Beispiel PEEK LPT, 150 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-320-7.

Band 223: Daniel Craiovan

Prozesse und Systemlösungen für die SMT-Montage optischer Bauelemente auf Substrate mit integrierten Lichtwellenleitern FAPS, 165 Seiten, 85 Bilder, 8 Tab. 2011.

ISBN 978-3-87525-324-5.

Band 224: Kay Wagner Beanspruchungsangepasste Kaltmassivumformwerkzeuge durch lokal optimierte Werkzeugoberflächen LFT, 147 Seiten, 103 Bilder, 17 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-325-2.

Band 225: Martin Brandhuber Verbesserung der Prognosegüte des Versagens von Punktschweißverbindungen bei höchstfesten Stahlgüten LFT, 155 Seiten, 91 Bilder, 19 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-327-6.

Band 226: Peter Sebastian Feuser Ein Ansatz zur Herstellung von pressgehärteten Karosseriekomponenten mit maßgeschneiderten mechanischen Eigenschaften: Temperierte Umformwerkzeuge. Prozessfenster, Prozesssimuation und funktionale Untersuchung LFT, 195 Seiten, 97 Bilder, 60 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-328-3.

Band 227: Murat Arbak Material Adapted Design of Cold Forging Tools Exemplified by Powder Metallurgical Tool Steels and Ceramics LFT, 109 Seiten, 56 Bilder, 8 Tab. 2012.

ISBN 978-3-87525-330-6.

Band 228: Indra Pitz Beschleunigte Simulation des Laserstrahlumformens von Aluminiumblechen LPT, 137 Seiten, 45 Bilder, 27 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-333-7. Band 229: Alexander Grimm Prozessanalyse und -überwachung des Laserstrahlhartlötens mittels optischer Sensorik LPT, 125 Seiten, 61 Bilder, 5 Tab. 2012.

ISBN 978-3-87525-334-4.

Band 230: Markus Kaupper Biegen von höhenfesten Stahlblechwerkstoffen - Umformverhalten und Grenzen der Biegbarkeit

LFT, 160 Seiten, 57 Bilder, 10 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-339-9.

Band 231: Thomas Kroiß

Modellbasierte Prozessauslegung für die Kaltmassivumformung unter Brücksichtigung der Werkzeug- und Pressenauffederung

LFT, 169 Seiten, 50 Bilder, 19 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-341-2.

Band 232: Christian Goth Analyse und Optimierung der Entwicklung und Zuverlässigkeit räumlicher Schaltungsträger (3D-MID) FAPS, 176 Seiten, 102 Bilder, 22 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-340-5.

Band 233: Christian Ziegler Ganzheitliche Automatisierung mechatronischer Systeme in der Medizin am Beispiel Strahlentherapie FAPS, 170 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-342-9. Band 234: Florian Albert Automatisiertes Laserstrahllöten und -reparaturlöten elektronischer Baugruppen LPT, 127 Seiten, 78 Bilder, 11 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-344-3.

Band 235: Thomas Stöhr Analyse und Beschreibung des mechanischen Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen LFT, 118 Seiten, 74 Bilder, 18 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-346-7.

Band 236: Christian Kägeler Prozessdynamik beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche im Überlappstoß LPT, 145 Seiten, 80 Bilder, 3 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-347-4.

Band 237: Andreas Sulzberger Seriennahe Auslegung der Prozesskette zur wärmeunterstützten Umformung von Aluminiumblechwerkstoffen LFT, 153 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-349-8.

Band 238: Simon Opel Herstellung prozessangepasster Halbzeuge mit variabler Blechdicke durch die Anwendung von Verfahren der Blechmassivumformung LFT, 165 Seiten, 108 Bilder, 27 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-350-4. Band 239: Rajesh Kanawade In-vivo Monitoring of Epithelium Vessel and Capillary Density for the Application of Detection of Clinical Shock and Early Signs of Cancer Development LPT, 124 Seiten, 58 Bilder, 15 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-351-1.

Band 240: Stephan Busse Entwicklung und Qualifizierung eines Schneidclinchverfahrens LFT, 119 Seiten, 86 Bilder, 20 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-352-8.

Band 241: Karl-Heinz Leitz Mikro- und Nanostrukturierung mit kurz und ultrakurz gepulster Laserstrahlung LPT, 154 Seiten, 71 Bilder, 9 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-355-9.

Band 242: Markus Michl Webbasierte Ansätze zur ganzheitlichen technischen Diagnose FAPS, 182 Seiten, 62 Bilder, 20 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-356-6.

Band 243: Vera Sturm Einfluss von Chargenschwankungen auf die Verarbeitungsgrenzen von Stahlwerkstoffen LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 9 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-357-3. Band 244: Christian Neudel Mikrostrukturelle und mechanischtechnologische Eigenschaften widerstandspunktgeschweißter Aluminium-Stahl-Verbindungen für den Fahrzeugbau LFT, 178 Seiten, 171 Bilder, 31 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-358-0. Band 249: Paul Hippchen Simulative Prognose der Geometrie indirekt pressgehärteter Karosseriebauteile für die industrielle Anwendung LFT, 163 Seiten, 89 Bilder, 12 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-364-1.

Band 245: Anja Neumann Konzept zur Beherrschung der Prozessschwankungen im Presswerk LFT, 162 Seiten, 68 Bilder, 15 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-360-3.

Band 246: Ulf-Hermann Quentin Laserbasierte Nanostrukturierung mit optisch positionierten Mikrolinsen LPT, 137 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-361-0.

Band 247: Erik Lamprecht Der Einfluss der Fertigungsverfahren auf die Wirbelstromverluste von Stator-Einzelzahnblechpaketen für den Einsatz in Hybrid- und Elektrofahrzeugen FAPS, 148 Seiten, 138 Bilder, 4 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-362-7.

Band 248: Sebastian Rösel

Wirkmedienbasierte Umformung von Blechhalbzeugen unter Anwendung magnetorheologischer Flüssigkeiten als kombiniertes Wirk- und Dichtmedium LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 12 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-363-4. Band 250: Martin Zubeil Versagensprognose bei der Prozess simulation von Biegeumform- und Falzverfahren LFT, 171 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-365-8.

Band 251: Alexander Kühl Flexible Automatisierung der Statorenmontage mit Hilfe einer universellen ambidexteren Kinematik FAPS, 142 Seiten, 60 Bilder, 26 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-367-2.

Band 252: Thomas Albrecht Optimierte Fertigungstechnologien für Rotoren getriebeintegrierter PM-Synchronmotoren von Hybridfahrzeugen FAPS, 198 Seiten, 130 Bilder, 38 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-368-9.

Band 253: Florian Risch Planning and Production Concepts for Contactless Power Transfer Systems for Electric Vehicles FAPS, 185 Seiten, 125 Bilder, 13 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-369-6.

Band 254: Markus Weigl Laserstrahlschweißen von Mischverbindungen aus austenitischen und ferritischen korrosionsbeständigen Stahlwerkstoffen LPT, 184 Seiten, 110 Bilder, 6 Tab. 2014.

ISBN 978-3-87525-370-2.

Band 255: Johannes Noneder Beanspruchungserfassung für die Validierung von FE-Modellen zur Auslegung von Massivumformwerkzeugen LFT, 161 Seiten, 65 Bilder, 14 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-371-9.

Band 256: Andreas Reinhardt Ressourceneffiziente Prozess- und Produktionstechnologie für flexible Schaltungsträger FAPS, 123 Seiten, 69 Bilder, 19 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-373-3.

Band 257: Tobias Schmuck Ein Beitrag zur effizienten Gestaltung globaler Produktions- und Logistiknetzwerke mittels Simulation FAPS, 151 Seiten, 74 Bilder. 2014. ISBN 978-3-87525-374-0.

Band 258: Bernd Eichenhüller Untersuchungen der Effekte und Wechselwirkungen charakteristischer Einflussgrößen auf das Umformverhalten bei Mikroumformprozessen LFT, 127 Seiten, 29 Bilder, 9 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-375-7. Band 259: Felix Lütteke

Vielseitiges autonomes Transportsystem basierend auf Weltmodellerstellung mittels Datenfusion von Deckenkameras und Fahrzeugsensoren

FAPS, 152 Seiten, 54 Bilder, 20 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-376-4.

Band 260: Martin Grüner Hochdruck-Blechumformung mit formlos festen Stoffen als Wirkmedium LFT, 144 Seiten, 66 Bilder, 29 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-379-5.

Band 261: Christian Brock Analyse und Regelung des Laserstrahltiefschweißprozesses durch Detektion der Metalldampffackelposition LPT, 126 Seiten, 65 Bilder, 3 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-380-1.

Band 262: Peter Vatter Sensitivitätsanalyse des 3-Rollen-Schubbiegens auf Basis der Finite Elemente Methode LFT, 145 Seiten, 57 Bilder, 26 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-381-8.

Band 263: Florian Klämpfl Planung von Laserbestrahlungen durch simulationsbasierte Optimierung LPT, 169 Seiten, 78 Bilder, 32 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-384-9. Band 264: Matthias Domke Transiente physikalische Mechanismen bei der Laserablation von dünnen Metallschichten LPT, 133 Seiten, 43 Bilder, 3 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-385-6.

Band 265: Johannes Götz Community-basierte Optimierung des Anlagenengineerings FAPS, 177 Seiten, 80 Bilder, 30 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-386-3.

Band 266: Hung Nguyen Qualifizierung des Potentials von Verfestigungseffekten zur Erweiterung des Umformvermögens aushärtbarer Aluminiumlegierungen LFT, 137 Seiten, 57 Bilder, 16 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-387-0.

Band 267: Andreas Kuppert Erweiterung und Verbesserung von Versuchs- und Auswertetechniken für die Bestimmung von Grenzformänderungskurven

LFT, 138 Seiten, 82 Bilder, 2 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-388-7.

Band 268: Kathleen Klaus

Erstellung eines Werkstofforientierten Fertigungsprozessfensters zur Steigerung des Formgebungsvermögens von Aluminiumlegierungen unter Anwendung einer zwischengeschalteten Wärmebehandlung LFT, 154 Seiten, 70 Bilder, 8 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-391-7. Band 269: Thomas Svec

Untersuchungen zur Herstellung von funktionsoptimierten Bauteilen im partiellen Presshärtprozess mittels lokal unterschiedlich temperierter Werkzeuge LFT, 166 Seiten, 87 Bilder, 15 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-392-4.

Band 270: Tobias Schrader

Grundlegende Untersuchungen zur Verschleißcharakterisierung beschichteter Kaltmassivumformwerkzeuge LFT, 164 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-393-1.

Band 271: Matthäus Brela

Untersuchung von Magnetfeld-Messmethoden zur ganzheitlichen Wertschöpfungsoptimierung und Fehlerdetektion an magnetischen Aktoren FAPS, 170 Seiten, 97 Bilder, 4 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-394-8.

Band 272: Michael Wieland Entwicklung einer Methode zur Prognose adhäsiven Verschleißes an Werkzeugen für das direkte Presshärten LFT, 156 Seiten, 84 Bilder, 9 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-395-5.

Band 273: René Schramm Strukturierte additive Metallisierung durch kaltaktives Atmosphärendruckplasma FAPS, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-396-2. Band 274: Michael Lechner Herstellung beanspruchungsangepasster Aluminiumblechhalbzeuge durch eine maßgeschneiderte Variation der Abkühlgeschwindigkeit nach Lösungsglühen LFT, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-397-9.

Band 275: Kolja Andreas Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf das Werkzeugeinsatzverhalten beim Kaltfließpressen LFT, 169 Seiten, 76 Bilder, 4 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-398-6.

Band 276: Marcus Baum Laser Consolidation of ITO Nanoparticles for the Generation of Thin Conductive Layers on Transparent Substrates LPT, 158 Seiten, 75 Bilder, 3 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-399-3.

Band 277: Thomas Schneider Umformtechnische Herstellung dünnwandiger Funktionsbauteile aus Feinblech durch Verfahren der Blechmassivumformung LFT, 188 Seiten, 95 Bilder, 7 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-401-3.

Band 278: Jochen Merhof Sematische Modellierung automatisierter Produktionssysteme zur Verbesserung der IT-Integration zwischen Anlagen-Engineering und Steuerungsebene FAPS, 157 Seiten, 88 Bilder, 8 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-402-0. Band 279: Fabian Zöller Erarbeitung von Grundlagen zur Abbildung des tribologischen Systems in der Umformsimulation LFT, 126 Seiten, 51 Bilder, 3 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-403-7.

Band 280: Christian Hezler Einsatz technologischer Versuche zur Erweiterung der Versagensvorhersage bei Karosseriebauteilen aus höchstfesten Stählen LFT, 147 Seiten, 63 Bilder, 44 Tab. 2016.

ISBN 978-3-87525-404-4.

Band 281: Jochen Bönig Integration des Systemverhaltens von Automobil-Hochvoltleitungen in die virtuelle Absicherung durch strukturmechanische Simulation FAPS, 177 Seiten, 107 Bilder, 17 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-405-1.

Band 282: Johannes Kohl Automatisierte Datenerfassung für diskret ereignisorientierte Simulationen in der energieflexibelen Fabrik FAPS, 160 Seiten, 80 Bilder, 27 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-406-8.

Band 283: Peter Bechtold Mikroschockwellenumformung mittels ultrakurzer Laserpulse LPT, 155 Seiten, 59 Bilder, 10 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-407-5. Band 284: Stefan Berger Laserstrahlschweißen thermoplastischer Kohlenstofffaserverbundwerkstoffe mit spezifischem Zusatzdraht LPT, 118 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-408-2.

Band 285: Martin Bornschlegl Methods-Energy Measurement - Eine Methode zur Energieplanung für Fügeverfahren im Karosseriebau FAPS, 136 Seiten, 72 Bilder, 46 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-409-9.

Band 286: Tobias Rackow Erweiterung des Unternehmenscontrollings um die Dimension Energie FAPS, 164 Seiten, 82 Bilder, 29 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-410-5.

Band 287: Johannes Koch Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung zyklisch-symmetrischer Bauteile mit Nebenformelementen durch Blechmassivumformung LFT, 125 Seiten, 49 Bilder, 17 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-411-2.

Band 288: Hans Ulrich Vierzigmann Beitrag zur Untersuchung der tribologischen Bedingungen in der Blechmassivumformung – Bereitstellung von tribologischen Modellversuchen und Realisierung von Tailored Surfaces LFT, 174 Seiten, 102 Bilder, 34 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-412-9. Band 289: Thomas Senner Methodik zur virtuellen Absicherung der formgebenden Operation des Nasspressprozesses von Gelege-Mehrschichtverbunden LFT, 156 Seiten, 96 Bilder, 21 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-414-3.

Band 290: Sven Kreitlein Der grundoperationsspezifische Mindestenergiebedarf als Referenzwert zur Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion FAPS, 185 Seiten, 64 Bilder, 30 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-415-0.

Band 291: Christian Roos Remote-Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche in Kehlnahtgeometrie LPT, 123 Seiten, 52 Bilder, o Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-416-7.

Band 292: Alexander Kahrimanidis Thermisch unterstützte Umformung von Aluminiumblechen LFT, 165 Seiten, 103 Bilder, 18 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-417-4.

Band 293: Jan Tremel

Flexible Systems for Permanent Magnet Assembly and Magnetic Rotor Measurement / Flexible Systeme zur Montage von Permanentmagneten und zur Messung magnetischer Rotoren FAPS, 152 Seiten, 91 Bilder, 12 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-419-8. Band 294: Ioannis Tsoupis Schädigungs- und Versagensverhalten hochfester Leichtbauwerkstoffe unter Biegebeanspruchung LFT, 176 Seiten, 51 Bilder, 6 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-420-4.

Band 295: Sven Hildering Grundlegende Untersuchungen zum Prozessverhalten von Silizium als Werkzeugwerkstoff für das Mikroscherschneiden metallischer Folien LFT, 177 Seiten, 74 Bilder, 17 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-422-8.

Band 296: Sasia Mareike Hertweck Zeitliche Pulsformung in der Lasermikromaterialbearbeitung – Grundlegende Untersuchungen und Anwendungen LPT, 146 Seiten, 67 Bilder, 5 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-423-5.

Band 297: Paryanto Mechatronic Simulation Approach for the Process Planning of Energy-Efficient Handling Systems FAPS, 162 Seiten, 86 Bilder, 13 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-424-2.

Band 298: Peer Stenzel Großserientaugliche Nadelwickeltechnik für verteilte Wicklungen im Anwendungsfall der E-Traktionsantriebe FAPS, 239 Seiten, 147 Bilder, 20 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-425-9. Band 299: Mario Lušić Ein Vorgehensmodell zur Erstellung montageführender Werkerinformationssysteme simultan zum Produktentstehungsprozess FAPS, 174 Seiten, 79 Bilder, 22 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-426-6.

Band 300: Arnd Buschhaus Hochpräzise adaptive Steuerung und Regelung robotergeführter Prozesse FAPS, 202 Seiten, 96 Bilder, 4 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-427-3.

Band 301: Tobias Laumer Erzeugung von thermoplastischen Werkstoffverbunden mittels simultanem, intensitätsselektivem Laserstrahlschmelzen LPT, 140 Seiten, 82 Bilder, o Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-428-0.

Band 302: Nora Unger

Untersuchung einer thermisch unterstützten Fertigungskette zur Herstellung umgeformter Bauteile aus der höherfesten Aluminiumlegierung EN AW-7020 LFT, 142 Seiten, 53 Bilder, 8 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-429-7.

Band 303: Tommaso Stellin Design of Manufacturing Processes for the Cold Bulk Forming of Small Metal Components from Metal Strip LFT, 146 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-430-3. Band 304: Bassim Bachy

Experimental Investigation, Modeling, Simulation and Optimization of Molded Interconnect Devices (MID) Based on Laser Direct Structuring (LDS) / Experimentelle Untersuchung, Modellierung, Simulation und Optimierung von Molded Interconnect Devices (MID) basierend auf Laser Direktstrukturierung (LDS) FAPS, 168 Seiten, 120 Bilder, 26 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-431-0.

Band 305: Michael Spahr Automatisierte Kontaktierungsverfahren für flachleiterbasierte Pkw-Bordnetzsysteme FAPS, 197 Seiten, 98 Bilder, 17 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-432-7.

Band 306: Sebastian Suttner Charakterisierung und Modellierung des spannungszustandsabhängigen Werkstoffverhaltens der Magnesiumlegierung AZ31B für die numerische Prozessauslegung LFT, 150 Seiten, 84 Bilder, 19 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-433-4.

Band 307: Bhargav Potdar A reliable methodology to deduce thermo-mechanical flow behaviour of hot stamping steels LFT, 203 Seiten, 98 Bilder, 27 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-436-5.

Band 308: Maria Löffler Steuerung von Blechmassivumformprozessen durch maßgeschneiderte tribologische Systeme LFT, viii u. 166 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-133-1. Band 309: Martin Müller

Untersuchung des kombinierten Trennund Umformprozesses beim Fügen artungleicher Werkstoffe mittels Schneidclinchverfahren

LFT, xi u. 149 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab. 2018. ISBN: 978-3-96147-135-5.

Band 310: Christopher Kästle Qualifizierung der Kupfer-Drahtbondtechnologie für integrierte Leistungsmodule in harschen Umgebungsbedingungen FAPS, xii u. 167 Seiten, 70 Bilder, 18 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-145-4.

Band 311: Daniel Vipavc Eine Simulationsmethode für das 3-Rollen-Schubbiegen LFT, xiii u. 121 Seiten, 56 Bilder, 17 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-147-8.

Band 312: Christina Ramer Arbeitsraumüberwachung und autonome Bahnplanung für ein sicheres und flexibles Roboter-Assistenzsystem in der Fertigung FAPS, xiv u. 188 Seiten, 57 Bilder, 9 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-153-9.

Band 313: Miriam Rauer Der Einfluss von Poren auf die Zuverlässigkeit der Lötverbindungen von Hochleistungs-Leuchtdioden FAPS, xii u. 209 Seiten, 108 Bilder, 21 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-157-7.

Band 314: Felix Tenner

Kamerabasierte Untersuchungen der Schmelze und Gasströmungen beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche

LPT, xxiii u. 184 Seiten, 94 Bilder, 7 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-160-7.

Band 315: Aarief Syed-Khaja Diffusion Soldering for High-temperature Packaging of Power Electronics FAPS, x u. 202 Seiten, 144 Bilder, 32 Tab. 2018. ISBN 978-3-87525-162-1.

Band 316: Adam Schaub

Grundlagenwissenschaftliche Untersuchung der kombinierten Prozesskette aus Umformen und Additive Fertigung LFT, xi u. 192 Seiten, 72 Bilder, 27 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-166-9.

Band 317: Daniel Gröbel

Herstellung von Nebenformelementen unterschiedlicher Geometrie an Blechen mittels Fließpressverfahren der Blechmassivumformung

LFT, x u. 165 Seiten, 96 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-168-3.

Band 318: Philipp Hildenbrand

Entwicklung einer Methodik zur Herstellung von Tailored Blanks mit definierten Halbzeugeigenschaften durch einen Taumelprozess

LFT, ix u. 153 Seiten, 77 Bilder, 4 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-174-4.

Band 319: Tobias Konrad

Simulative Auslegung der Spann- und Fixierkonzepte im Karosserierohbau: Bewertung der Baugruppenmaßhaltigkeit unter Berücksichtigung schwankender Einflussgrößen

LFT, x u. 203 Seiten, 134 Bilder, 32 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-176-8.

Band 320: David Meinel

Architektur applikationsspezifischer Multi-Physics-Simulationskonfiguratoren am Beispiel modularer Triebzüge FAPS, xii u. 166 Seiten, 82 Bilder, 25 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-184-3.

Band 321: Andrea Zimmermann

Grundlegende Untersuchungen zum Einfluss fertigungsbedingter Eigenschaften auf die Ermüdungsfestigkeit kaltmassivumgeformter Bauteile

LFT, ix u. 160 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-190-4.

Band 322: Christoph Amann

Simulative Prognose der Geometrie nassgepresster Karosseriebauteile aus Gelege-Mehrschichtverbunden LFT, xvi u. 169 Seiten, 80 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-194-2.

Band 323: Jennifer Tenner

Realisierung schmierstofffreier Tiefziehprozesse durch maßgeschneiderte Werkzeugoberflächen

LFT, x u. 187 Seiten, 68 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-196-6.

Band 324: Susan Zöller

Mapping Individual Subjective Values to Product Design

KTmfk, xi u. 223 Seiten, 81 Bilder, 25 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-202-4.
Band 325: Stefan Lutz Erarbeitung einer Methodik zur semiempirischen Ermittlung der Umwandlungskinetik durchhärtender Wälzlagerstähle für die Wärmebehandlungssimulation LFT, xiv u. 189 Seiten, 75 Bilder, 32 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-209-3.

Modellbasierte Prozesskettenabbildung

rührreibgeschweißter Aluminium-

halbzeuge zur umformtechnischen

Herstellung höchstfester Leichtbau-

2019. ISBN 978-3-96147-217-8.

LFT, xii u. 167 Seiten, 68 Bilder, 17 Tab.

Band 326: Tobias Gnibl

strukturteile

Band 330: Stephan Rapp Pump-Probe-Ellipsometrie zur Messung transienter optischer Materialeigenschaften bei der Ultrakurzpuls-Lasermaterialbearbeitung LPT, xi u. 143 Seiten, 49 Bilder, 2 Tab.

Band 331: Michael Scholz Intralogistics Execution System mit integrierten autonomen, servicebasierten Transportentitäten

Band 332: Eva Bogner

text der Digitalisierung

2019. ISBN 978-3-96147-235-2.

FAPS, xi u. 195 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-237-6.

Band 327: Johannes Bürner Technisch-wirtschaftliche Optionen zur Lastflexibilisierung durch intelligente elektrische Wärmespeicher

FAPS, xiv u. 233 Seiten, 89 Bilder, 27 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-219-2.

Band 328: Wolfgang Böhm Verbesserung des Umformverhaltens von mehrlagigen Aluminiumblechwerkstoffen mit ultrafeinkörnigem Gefüge LFT, ix u. 160 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-227-7.

Band 329: Stefan Landkammer Grundsatzuntersuchungen, mathematische Modellierung und Ableitung einer Auslegungsmethodik für Gelenkantriebe nach dem Spinnenbeinprinzip LFT, xii u. 200 Seiten, 83 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-229-1. FAPS, ix u. 201 Seiten, 55 Bilder, 28 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-246-8.

Strategien der Produktindividualisierung

in der produzierenden Industrie im Kon-

Band 333: Daniel Benjamin Krüger Ein Ansatz zur CAD-integrierten muskuloskelettalen Analyse der Mensch-Maschine-Interaktion KTmfk, x u. 217 Seiten, 102 Bilder, 7 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-250-5.

Band 334: Thomas Kuhn Qualität und Zuverlässigkeit laserdirektstrukturierter mechatronisch integrierter Baugruppen (LDS-MID) FAPS, ix u. 152 Seiten, 69 Bilder, 12 Tab. 2019. ISBN: 978-3-96147-252-9. Band 335: Hans Fleischmann Modellbasierte Zustands- und Prozessüberwachung auf Basis sozio-cyber-physischer Systeme FAPS, xi u. 214 Seiten, 111 Bilder, 18 Tab.

2019. ISBN: 978-3-96147-256-7.

Band 336: Markus Michalski Grundlegende Untersuchungen zum Prozess- und Werkstoffverhalten bei schwingungsüberlagerter Umformung LFT, xii u. 197 Seiten, 93 Bilder, 11 Tab. 2019. ISBN: 978-3-96147-270-3.

Band 337: Markus Brandmeier Ganzheitliches ontologiebasiertes Wissensmanagement im Umfeld der industriellen Produktion FAPS, xi u. 255 Seiten, 77 Bilder, 33 Tab. 2020. ISBN: 978-3-96147-275-8.

Band 338: Stephan Purr Datenerfassung für die Anwendung lernender Algorithmen bei der Herstellung von Blechformteilen LFT, ix u. 165 Seiten, 48 Bilder, 4 Tab. 2020. ISBN: 978-3-96147-281-9.

Band 339: Christoph Kiener Kaltfließpressen von gerad- und schrägverzahnten Zahnrädern LFT, viii u. 151 Seiten, 81 Bilder, 3 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-287-1.

Band 340: Simon Spreng Numerische, analytische und empirische Modellierung des Heißcrimpprozesses FAPS, xix u. 204 Seiten, 91 Bilder, 27 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-293-2. Band 341: Patrik Schwingenschlögl Erarbeitung eines Prozessverständnisses zur Verbesserung der tribologischen Bedingungen beim Presshärten LFT, x u. 177 Seiten, 81 Bilder, 8 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-297-0.

Band 342: Emanuela Affronti Evaluation of failure behaviour of sheet metals LFT, ix u. 136 Seiten, 57 Bilder, 20 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-303-8.

Band 343: Julia Degner Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung hochfester Aluminiumblechbauteile in einem kombinierten Umformund Abschreckprozess LFT, x u. 172 Seiten, 61 Bilder, 9 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-307-6.

Band 344: Maximilian Wagner Automatische Bahnplanung für die Aufteilung von Prozessbewegungen in synchrone Werkstück- und Werkzeugbewegungen mittels Multi-Roboter-Systemen FAPS, xxi u. 181 Seiten, 111 Bilder, 15 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-309-0.

Band 345: Stefan Härter Qualifizierung des Montageprozesses hochminiaturisierter elektronischer Bauelemente FAPS, ix u. 194 Seiten, 97 Bilder, 28 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-314-4.

Band 346: Toni Donhauser Ressourcenorientierte Auftragsregelung in einer hybriden Produktion mittels betriebsbegleitender Simulation FAPS, xix u. 242 Seiten, 97 Bilder, 17 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-316-8. Band 347: Philipp Amend Laserbasiertes Schmelzkleben von Thermoplasten mit Metallen LPT, xv u. 154 Seiten, 67 Bilder. 2020. ISBN 978-3-96147-326-7.

Band 348: Matthias Ehlert Simulationsunterstützte funktionale Grenzlagenabsicherung KTmfk, xvi u. 300 Seiten, 101 Bilder, 73 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-328-1.

Band 349: Thomas Sander

Ein Beitrag zur Charakterisierung und Auslegung des Verbundes von Kunststoffsubstraten mit harten Dünnschichten

KTmfk, xiv u. 178 Seiten, 88 Bilder, 21 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-330-4.

Band 350: Florian Pilz

Fließpressen von Verzahnungselementen an Blechen

LFT, x u. 170 Seiten, 103Bilder, 4 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-332-8.

Band 351: Sebastian Josef Katona Evaluation und Aufbereitung von Produktsimulationen mittels abweichungsbehafteter Geometriemodelle KTmfk, ix u. 147 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-336-6.

Band 352: Jürgen Herrmann Kumulatives Walzplattieren. Bewertung der Umformeigenschaften mehrlagiger Blechwerkstoffe der ausscheidungshärtbaren Legierung AA6014

LFT, x u. 157 Seiten, 64 Bilder, 5 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-344-1.

Band 353: Christof Küstner Assistenzsystem zur Unterstützung der datengetriebenen Produktentwicklung KTmfk, xii u. 219 Seiten, 63 Bilder, 14 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-348-9.

Band 354: Tobias Gläßel

Prozessketten zum Laserstrahlschweißen von flachleiterbasierten Formspulenwicklungen für automobile Traktionsantriebe FAPS, xiv u. 206 Seiten, 89 Bilder, 11 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-356-4.

Band 355: Andreas Meinel

Experimentelle Untersuchung der Auswirkungen von Axialschwingungen auf Reibung und Verschleiß in Zylinderrollenlagern KTmfk, xii u. 162 Seiten, 56 Bilder, 7 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-358-8.

Band 356: Hannah Riedle

Haptische, generische Modelle weicher anatomischer Strukturen für die chirurgische Simulation

FAPS, xxx u. 179 Seiten, 82 Bilder, 35 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-367-0.

Band 357: Maximilian Landgraf Leistungselektronik für den Einsatz dielektrischer Elastomere in aktorischen, sensorischen und integrierten sensomotorischen Systemen FAPS, xxiii u. 166 Seiten, 71 Bilder, 10 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-380-9.

Band 358: Alireza Esfandyari Multi-Objective Process Optimization for Overpressure Reflow Soldering in Electronics Production FAPS, xviii u. 175 Seiten, 57 Bilder, 23 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-382-3. Band 359: Christian Sand Prozessübergreifende Analyse komplexer Montageprozessketten mittels Data Mining FAPS, XV u. 168 Seiten, 61 Bilder, 12 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-398-4.

Band 360: Ralf Merkl

Closed-Loop Control of a Storage-Supported Hybrid Compensation System for Improving the Power Quality in Medium Voltage Networks

FAPS, xxvii u. 200 Seiten, 102 Bilder, 2 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-402-8.

Band 361: Thomas Reitberger Additive Fertigung polymerer optischer Wellenleiter im Aerosol-Jet-Verfahren FAPS, xix u. 141 Seiten, 65 Bilder, 11 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-400-4.

Band 362: Marius Christian Fechter Modellierung von Vorentwürfen in der virtuellen Realität mit natürlicher Fingerinteraktion

KTmfk, x u. 188 Seiten, 67 Bilder, 19 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-404-2.

Band 363: Franziska Neubauer

Oberflächenmodifizierung und Entwicklung einer Auswertemethodik zur Verschleißcharakterisierung im Presshärteprozess

LFT, ix u. 177 Seiten, 42 Bilder, 6 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-406-6.

Band 364: Eike Wolfram Schäffer Web- und wissensbasierter Engineering-Konfigurator für roboterzentrierte Automatisierungslösungen FAPS, xxiv u. 195 Seiten, 108 Bilder, 25

Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-410-3.

Band 365: Daniel Gross

Untersuchungen zur kohlenstoffdioxidbasierten kryogenen Minimalmengenschmierung

REP, xii u. 184 Seiten, 56 Bilder, 18 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-412-7.

Band 366: Daniel Junker

Qualifizierung laser-additiv gefertigter Komponenten für den Einsatz im Werkzeugbau der Massivumformung LFT, vii u. 142 Seiten, 62 Bilder, 5 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-416-5.

Band 367: Tallal Javied

Totally Integrated Ecology Management for Resource Efficient and Eco-Friendly Production FAPS, xv u. 160 Seiten, 60 Bilder, 13 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-418-9.

Band 368: David Marco Hochrein Wälzlager im Beschleunigungsfeld – Eine Analysestrategie zur Bestimmung des Reibungs-, Axialschub- und Temperaturverhaltens von Nadelkränzen – KTmfk, xiii u. 279 Seiten, 108 Bilder, 39 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-420-2. Band 369: Daniel Gräf Funktionalisierung technischer Oberflächen mittels prozessüberwachter aerosolbasierter Drucktechnologie FAPS, xxii u. 175 Seiten, 97 Bilder, 6 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-433-2.

Band 370: Andreas Gröschl Hochfrequent fokusabstandsmodulierte Konfokalsensoren für die Nanokoordinatenmesstechnik FMT, x u. 144 Seiten, 98 Bilder, 6 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-435-6.

Band 371: Johann Tüchsen Konzeption, Entwicklung und Einführung des Assistenzsystems D-DAS für die Produktentwicklung elektrischer Motoren KTmfk, xii u. 178 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-437-0.

Band 372: Max Marian Numerische Auslegung von Oberflächenmikrotexturen für geschmierte tribologische Kontakte KTmfk, xviii u. 276 Seiten, 85 Bilder, 45

Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-439-4.

Band 373: Johannes Strauß Die akustooptische Strahlformung in der Lasermaterialbearbeitung

LPT, xvi u. 113 Seiten, 48 Bilder. 2021. ISBN 978-3-96147-441-7.

Band 374: Martin Hohmann

Machine learning and hyper spectral imaging: Multi Spectral Endoscopy in the Gastro Intestinal Tract towards Hyper Spectral Endoscopy

LPT, x u. 137 Seiten, 62 Bilder, 29 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-445-5.

Band 375: Timo Kordaß

Lasergestütztes Verfahren zur selektiven Metallisierung von epoxidharzbasierten Duromeren zur Steigerung der Integrationsdichte für dreidimensionale mechatronische Package-Baugruppen FAPS, xviii u. 198 Seiten, 92 Bilder, 24 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-443-1

Abstract

Our everyday life in the modern digital communication society is increasingly based on data from the environment that is recorded and processed with sensors in mechatronic systems. In the future, applications are going to use this information obtained to independently derive more and more actions and generate added value for people.

Due to the constant increase in the density of functional integration within everyday applications while at the same time reducing the installation space, the demands on the reliability of all assembled components are increasing.

This research work is based on the miniaturization of electrical conductor track geometries on three-dimensional mechatronic-integrated components (3D-MID). Experience shows an early failure in connection with small conductor track cross-sections, caused by thermomechanical stresses between the polymer substrate materials and the metallized electrical conductor tracks.

For this purpose, the use of alternative epoxy resin-based duromers that can be processed in the transfer molding and injection molding process is investigated. Compared to the thermoplastic materials typically used up today, such as polycarbonates, polyamides and liquid-crystalline polyamides, they offer a significantly lower coefficient of thermal expansion (CTE). The research focus is on the development of a chemically based activation process for laser-based, selective-additive metallization of a fine-pitch conductor track layout on non-conductive substrates. Thanks to the ideal adaptation of the materials within the multi-material composite, the possible uses of 3D-MID applications in the area of package assemblies can be expanded and the degree of miniaturization increased.

Unser alltägliches Leben in der modernen digitalen Kommunikationsgesellschaft stützt sich zunehmend auf Daten, die von mechatronischen Systemen mit Hilfe von Sensoren aus der Umwelt erfasst und verarbeitet werden. Aus den gewonnenen Informationen sollen Anwendungen zukünftig mehr und mehr Handlungen selbstständig ableiten und den Menschen einen Mehrwert generieren. Durch die stetige Steigerung der Funktionsintegrationsdichte innerhalb alltäglicher Anwendungen bei gleichzeitig reduziertem Bauraum vergrößern sich dabei die Anforderungen an die Leistungsfähigkeit der eingesetzten Materialen innerhalb der Baugruppe.

Die vorliegende Forschungsarbeit setzt an der Miniaturisierung elektrischer Leiterbahngeometrien auf dreidimensionalen mechatronisch-integrierten Bauteilen (3D-MID) an. Erfahrungen zeigen, ein frühes Versagen in Verbindung mit geringen Leiterbahnquerschnitten, hervorgerufen durch thermomechanische Spannungen zwischen den Polymersubstratmaterialien und den metallisierten elektrischen Leiterbahnen.

Dazu wird die Verwendung alternativer epoxidharzbasierte Duromere untersucht, die im Spritzpress- und Spritzgießprozess verarbeiten werden können. Sie bieten im Vergleich zu den bisher typisch verwendeten thermoplastischen Materialien wie Polycarbonate, Polyamide und flüssigkristalline Polyamide einen deutlich geringeren thermischen Ausdehnungskoeffizienten (CTE).

Die Forschungsschwerpunkte liegen dabei auf der Entwicklung eines chemisch basierten Aktivierungsverfahrens zur lasergestützten, selektiv-additiven Metallisierung eines Fine-Pitch Leiterbahnlayouts auf nichtleitenden Substraten. Durch die ideale Anpassung der Werkstoffe innerhalb des Multimaterialverbundes lassen sich die Einsatzmöglichkeiten von 3D-MID Anwendungen in den Bereich der Package-Baugruppen erweitern und den Grad der Miniaturisierung steigern.

