

Christian Goth

*Analyse und Optimierung der Entwicklung und Zuverlässigkeit räumlicher
Schaltungsträger (3D-MID)*

Christian Goth

*Analyse und Optimierung der Entwicklung und Zuverlässigkeit
räumlicher Schaltungsträger (3D-MID)*

Bericht aus dem Lehrstuhl für
Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

FAPS

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

Tag der Einreichung:	23. August 2012
Tag der Promotion:	05. Dezember 2012
Dekan:	Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein
Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke
	Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier, Univ. Paderborn

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten
sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

ISSN 1431-6226

ISBN 978-3-87525-340-5

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

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

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

© Meisenbach Verlag Bamberg 2013

Herstellung: inprint GmbH, Erlangen

Printed in Germany

Vorwort und Danksagung

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

Mein besonderer Dank gilt dem ehemaligen Lehrstuhlinhaber, Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Feldmann, und dem aktuellen Lehrstuhlinhaber, Herrn Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke, die mir beide durch das in mich gesetzte Vertrauen die Möglichkeit zur Promotion gegeben haben. Die intensive Förderung bei der Forschungsarbeit sowie die enge Zusammenarbeit während meiner Tätigkeit als Geschäftsführer der Forschungsvereinigung Räumliche Elektronische Baugruppen 3-D MID e.V. haben mich stark positiv geprägt.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier, Leiter der Fachgruppe Produktentstehung am Heinz Nixdorf Institut der Universität Paderborn, danke ich für die wohlwollende Übernahme des Koreferates. Mein Dank gilt ferner Herrn Prof. Dr.-Ing. Dietmar Fey als weiterem Mitglied des Prüfungsausschusses.

Diese Dissertation beruht auf Ergebnissen aus Forschungsprojekten, die vorwiegend durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) gefördert wurden. Den an diesen Projekten beteiligten Industriepartnern, Forschungsinstituten und den Mitgliedsunternehmen der Forschungsvereinigung 3-D MID e.V. sei für die gute Kooperation gedankt. Herr Dr. rer. nat. Wolfgang John ist dabei für den wertvollen fachlichen Austausch und sein persönliches Engagement hervorzuheben.

Großer Dank gilt allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern am Lehrstuhl FAPS. Besondere Würdigung verdienen die Kollegen und Freunde aus der Lehrstuhlgruppe Elektronikproduktion für den regen fachlichen Austausch und die äußerst angenehme Arbeitsatmosphäre, insbesondere Herr Dipl.-Ing. Johannes Hörber, Herr Dipl.-Ing. Andreas Reinhardt, Herr Dipl.-Ing. Stefan Härter, Herr Dipl.-Ing. Michael Pfeffer, Herr Dipl.-Ing. René Schramm, Herr Dipl.-Wirtsch.-Ing. (FH) Thomas Kuhn, Herr Dipl.-Wirtsch.-Ing. Martin Müller, Herr Dr.-Ing. Daniel Craiovan, Herr Dr.-Ing. Florian Schüßler, Herr Dr.-Ing. Michael Rösch, Herr Siegfried Maly, Herr Dipl.-Ing. Gerald Gion, Herr Leonhard Maußner, Herr Dipl.-Ing. Denis Kozic und Herr Michael Purkott.

Mein herzlichster Dank gehört jedoch meiner Familie. Meine Eltern und meine Schwester haben meine berufliche und persönliche Entwicklung durch die unermüdliche Unterstützung und den starken Rückhalt in den verschiedenen Lebensphasen, auch während meiner schweren Krankheit, enorm gefördert. Meine Frau Nina und meine Tochter Eleni haben durch ihr großes Verständnis gezeigt, wie sehr sie hinter dem von mir gewählten Weg stehen. Gleichzeitig sorgen sie durch ihre einzigartige Liebe für den willkommenen Ausgleich und die notwendige Motivation. Ohne ihre Unterstützung wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Technologie- und Marktpotenziale räumlicher Schaltungsträger	3
2.1	Technologische Grundlagen	3
2.1.1	Fertigungsgerechte und funktionsorientierte Entwicklung.....	4
2.1.2	Prozessketten zur Herstellung spritzgegossener Schaltungsträger	7
2.1.3	Fertigungskonzepte und Montagelösungen für 3D-MID	16
2.1.4	Qualität und Zuverlässigkeit	20
2.2	Technologie- und Marktanalyse im globalen Vergleich	23
2.2.1	Produktfelder und Anwendungsbereiche	23
2.2.2	Technologieschwerpunkte in den Regionen Europa, USA und Asien.....	25
2.2.3	Internationale Marktentwicklung	27
2.2.4	Spritzgegossene Schaltungsträger im Umfeld der Elektronikproduktion	28
2.2.5	Technologische Trends	29
2.3	Handlungsfelder zur Steigerung der Einsatzmöglichkeiten der Technologie MID	30
3	Schutzmechanismen für den Einsatz von MID bei hoher Umweltbelastung	34
3.1	Umweltbelastungen und Elektronikschutz durch Verkapselung	34
3.2	Umhausung räumlicher Schaltungsträger im Montagespritzguss	38
3.2.1	Fertigungsprozess, Werkstoffe, Bauelemente und Probekörper.....	39
3.2.2	Einfluss des Umspritzens auf laserdirektstrukturierte Leiterbahnen.....	44
3.2.3	Einfluss des Umspritzens auf Bauelemente und Verbindungsstellen	45
3.3	Zuverlässigkeit im Montagespritzguss umhauster MID im Vergleich mit Verguss und Lackierung.....	51

3.3.1	Thermische Belastung im Temperaturschocktest.....	51
3.3.2	Test auf Mediendichtheit.....	58
3.3.3	Mechanische Belastung im Falltest	59
3.4	FE-Analyse umspritzter thermoplastischer Schaltungsträger bei thermischer Belastung.....	60
3.5	Herausforderung und Chancen zum Schutz elektronischer Schaltungsträger	65
4	Zuverlässigkeit mikromechatronischer Systeme mit Chip auf MID	67
4.1	Stand der Technik bei der Verarbeitung von Silizium-Chips	68
4.1.1	Chipmontagetechnologien.....	68
4.1.2	Zuverlässigkeit von Baugruppen mit Silizium-Chips	69
4.2	Experimentelle Qualifizierung verschiedener Chipmontagetechnologien auf MID	71
4.2.1	Flip-Chip- und Drahtbondtechnologien	71
4.2.2	Substratmaterialien.....	75
4.2.3	Stressmesschip und elektrisches Testlayout.....	76
4.2.4	Charakterisierung der Aufbautechnologien.....	78
4.2.5	Stressmonitoring und Lebensdaueranalysen.....	82
4.3	Systematische Analyse der Erkenntnisse für den Verbund Chip auf thermoplastischen Substraten	92
4.3.1	Verifikation der FE-Analyse mit der experimentellen Qualifizierung.....	92
4.3.2	Bewertung der Zuverlässigkeit der Chipmontage auf MID.....	95
5	Rapid Prototyping und Manufacturing von 3D-MID	97
5.1	Grundlagen zur Herstellung von Prototypen	97
5.1.1	Generative Fertigungsverfahren zur mechanischen Formgebung	98
5.1.2	Funktionalisierung mit elektrischen Leiterbahnen.....	100
5.1.3	Bewertung der unterschiedlichen Prototyping-Strategien für die Technologie MID.....	101
5.2	Aerosol-Jet-Technologie zur dreidimensionalen Strukturierung	103
5.2.1	Funktionsprinzip	103
5.2.2	Einflussgrößen auf den Aerosol-Jet-Prozess.....	105
5.2.3	Substratmaterialien, Tintenwerkstoffe und Testlayout	107

5.3	Untersuchungen zum Aerosol-Jet-Druck auf Stereolithografiebauteilen.....	111
5.3.1	Geometrische Eigenschaften der Leiterbahnen.....	111
5.3.2	Hafffestigkeit der gedruckten Strukturen	116
5.3.3	Elektrische Charakterisierung der gedruckten Strukturen	118
5.3.4	Zuverlässigkeit im Umwelttest	121
5.3.5	Strukturierung dreidimensionaler Oberflächen	123
5.3.6	Prozessstabilität	127
5.4	Einsatzpotenzial zur Fertigung dreidimensionaler Prototypen.....	127
6	Strategien zur Integration und Umsetzung von MID im Unternehmen.....	130
6.1	Strategisches Technologie- und Innovationsmanagement.....	131
6.2	Strategien für den erfolgreichen MID-Innovationsprozess.....	133
6.2.1	Unternehmensexterne Technologieentwicklungen	134
6.2.2	Unternehmensinterne Technologiekompetenzen	135
6.2.3	Markt- und Technologieportfolio zur Integration der Umwelt- und Unternehmensanalyse.....	137
6.2.4	Technologieförderung zur Überwindung bestehender Widerstände	139
6.3	Schlüsselfaktoren für erfolgreiche MID-Projekte	144
7	Zusammenfassung	146
8	Summary	149
9	Abkürzungsverzeichnis.....	151
10	Literatur	153
11	Anhang	169

1 Einleitung

Der stetige technologische Fortschritt führt zu einem Anstieg elektronischer Systeme in nahezu allen Industriebereichen: in der Medizintechnik im Bereich der Diagnostik für mobiles Monitoring oder der Telechirurgie, im alltäglichen Leben durch Ambient Assisted Living oder im Bereich Automotive durch neue Antriebstechnologien wie Elektromobilität oder Fahrerassistenzsysteme [183]. Die notwendige Miniaturisierung und Funktionsvielfalt zur Erschließung neuer und dezentraler Einbauräume erfordern innovative Systemlösungen. Konventionelle Flachbaugruppen und flexible Schaltungsträger bilden in diesem Zusammenhang den Fokus und werden stringent weiterentwickelt, um der stetigen Steigerung der Systemintegration auf Substrat- und Bauelementebene gerecht zu werden. Zunehmend wird neben der hohen Integrationsdichte elektronischer Funktionen aber auch die direkte Abbildung mechanischer, fluidischer, optischer oder thermischer Funktionen gefordert. Diesem Anspruch können herkömmliche elektronische Systeme nur bedingt gerecht werden und der Einsatz mechatronischer Systeme ist gefordert.

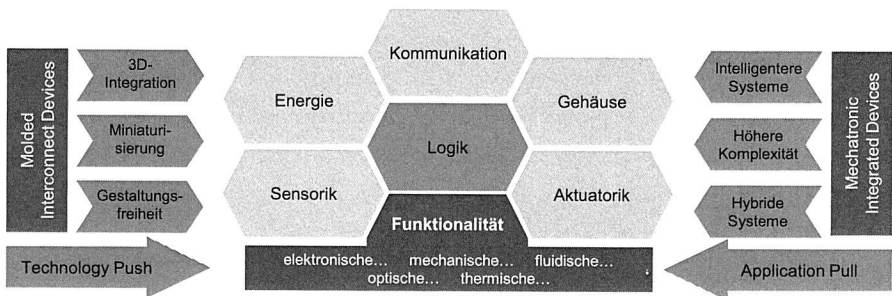


Abbildung 1: Funktionsintegration in heterogenen Mechatronik-Systemen

Insbesondere räumliche elektronische Baugruppen (MID – Molded Interconnect Devices) tragen in diesem Zusammenhang zu einer Verbesserung des Gesamtsystems bei. Die nahezu beliebige Gestaltungsfreiheit des Spritzgussprozesses ermöglicht eine enorme Funktionserweiterung bei gleichzeitiger Miniaturisierung. Die Technologie MID kann dabei in allen Integrationsebenen der Elektronik eingesetzt werden: als Gehäuse für Integrierte Schaltkreise (IC), als funktionsintegrierter Schaltungsträger für elektronische Bauelemente oder als Makro-MID (z. B. Automotive-Türmodul oder Flugzeug-Innenverschalung). Die eingesetzten thermoplastischen oder keramischen Werkstoffe sind im Vergleich zu herkömmlichen Epoxidharzen (z. B. FR4) umweltverträglich und recyclebar. Räumliche elektronische Baugruppen bieten, basierend auf der engen Verzahnung von Mechanik, Elektrik/Elektronik, Software und Regelungstechnik, die ideal geeigneten Produktaufbau- und Herstellungstechnologien für die vielversprechenden

Ansätze zur Realisierung verschiedener Funktionen auf kleinstem Raum, z. B. zur Dezentralisierung der elektronischen Intelligenz, zur Selbst-Identifikation, zur Darstellung sensorischer und aktorischer Fähigkeiten sowie zur Umsetzung einer Vielfalt heterogener Systeme (Abbildung 1), die unter den unterschiedlichsten Begriffen verbreitet werden (z. B. Mikrosysteme, Embedded Systems, Cyber-Physical Systems, Smart Systems, Autarke Systeme) [204].

Die Beherrschung der Komplexität der gesamten Herstellungsprozesskette, von der Formulierung der Thermoplaste über die Verarbeitung im Spritzguss, der Strukturierung und Metallisierung bis zu den 3D-Montage- und Prüftechnologien ist dabei eine entscheidende Voraussetzung. Die weitere Marktdurchdringung wird durch Entwicklungen in der Technologie MID selbst, aber auch durch die hohe Integration auf Chipebene begünstigt. Aufgabe des Schaltungsträgers wird dabei vielmehr die exakte Positionierung des elektronischen Bauelementes oder die Verbindung zu der Peripherie sein denn eine komplexe Leiterbahnführung. Funktionalität, Zuverlässigkeit und Entwicklungszeit sind Gradmesser für die Umsetzung weiterer erfolgreicher MID-Applikationen.

Die Funktionserweiterung und Miniaturisierung erhöht die Ausfallwahrscheinlichkeit des Gesamtsystems und führt zu steigenden Anforderungen an Qualität und Zuverlässigkeit. Hieraus ergeben sich völlig neue Herausforderungen für die Produktentwicklung. Verstärkt wird dieser Effekt dadurch, dass Unternehmen zur Erzielung von Wettbewerbsvorteilen eine Beschleunigung der Entwicklungszyklen und Produktanlaufzeiten anstreben. Komplexe Produkte und Fertigungsprozesse werden deshalb zunehmend auch in der virtuellen Umgebung entwickelt und getestet. In der Technologie MID existieren aufgrund der hohen Interdisziplinarität, der Integralbauweise sowie der Vernetzung verschiedener Unternehmen in der Lieferkette und der daraus folgenden Abhängigkeiten besondere Herausforderungen. In [50] erfolgt eine Klassifizierung in entwicklungsspezifische (z. B. Komplexität der Prozesskette, keine Standardisierung), herstellungsspezifische (z. B. fehlendes Rapid Prototyping, keine Aussagen zur Langzeitzuverlässigkeit), wirtschaftliche (z. B. Investitionen in Anlagentechnik, Wertschöpfungskette über mehrere Unternehmen verteilt) und psychologische (z. B. geringe Risikobereitschaft, großer Respekt vor neuer Technologie) Aspekte.

Zur Begegnung der genannten Anforderungen ist die Konzeption technologieorientierter Lösungen zur Erweiterung der Einsatzmöglichkeiten räumlicher elektronischer Schaltungsträger Schwerpunkt in dieser Arbeit. Ausgehend von einer Analyse der MID-Technologie mit einem Überblick zum Stand der Technik und der aktuellen Entwicklungen werden wesentliche Aspekte, die für die weitere Marktdurchdringung erforderlich sind, wissenschaftlich untersucht. Dabei stehen die Realisierung robuster MID-Systeme für den Einsatz bei hoher Umweltbelastung, die Optimierung des Verbundes Chip auf MID und die Fertigung von 3D-MID-Prototypen im Fokus. Abschließend werden die Chancen der Technologie MID im Innovationsumfeld der Unternehmen betrachtet.

2 Technologie- und Marktpotenziale räumlicher Schaltungsträger

Die Technologie MID zeichnet sich durch einen hohen Innovationsgrad aus. Die ersten Überlegungen zur Integration elektronischer und mechanischer Funktionen innerhalb eines spritzgegossenen Bauteils und relevante Patentschriften sind bereits in den späten 1970er und frühen 1980er Jahren erfolgt [50]. Insbesondere in den letzten Jahren sind jedoch wesentliche technologische Fortschritte im Bereich der Substratmaterialien, der Schaltungsträgerherstellung mit Strukturierung und Metallisierung sowie der unterschiedlichen Verbindungstechnologien erzielt worden. Im Folgenden werden der aktuelle Stand der Technik und die zentralen Entwicklungen vorgestellt.

2.1 Technologische Grundlagen

Molded Interconnect Devices sind spritzgegossene Formteile mit strukturiertem Leiterbild [48]. Diese Definition gilt bis heute, wobei zunehmend der Begriff räumliche elektronische Baugruppe verwendet wird. Ansätze zur Erweiterung des Begriffs *Molded Interconnect Devices* zu *Mechatronic Integrated Devices* existieren [50][52]. Dies wird mit einer stetigen Erweiterung der Funktionalität und der Vielfalt möglicher Substratmaterialien begründet.

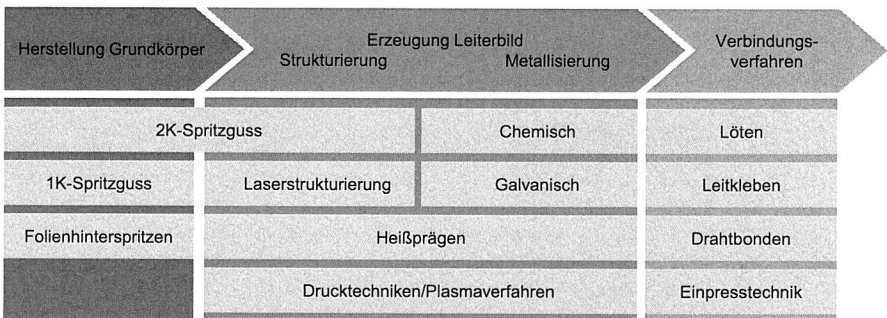


Abbildung 2: Referenzprozess MID: Prozessketten zur Herstellung räumlicher elektronischer Schaltungsträger

Als Referenzprozess zur Herstellung von MID-Teilen sind unterschiedliche Ansätze bekannt. In [46][48][55][57] wird jeweils ein Referenzprozess MID gezeigt. Basierend auf dem aktuellen Stand der Technik erfolgt im Rahmen dieser Arbeit eine Darstellung und Bewertung der etablierten MID-Verfahren sowie neuer Technologien mit entsprechendem Potenzial für zukünftige Anwendungen gemäß dem in Abbildung 2 dargestellten Referenzprozess.

2.1.1 Fertigungsgerechte und funktionsorientierte Entwicklung

Im Gegensatz zu in klassischer Weise hergestellten elektronischen Baugruppen ermöglicht die Technologie MID die mechanische, optische, fluidische und thermische Funktionalisierung des gesamten Bauteils durch eine nahezu beliebige Gestaltungsfreiheit. MID lassen sich nach [48] im Wesentlichen in die vier Dimensionen 2D (planare Prozessfläche), 2,5 D (planparallele Prozessflächen), $n \times 2D$ (Prozessflächen in Winkellage) und 3D (Freiformflächen, Regelflächen) geometrisch klassifizieren. Neben der Gestaltungsfreiheit ergeben sich durch verkürzte Prozessketten und die Einsparung mechanischer Komponenten große Rationalisierungspotenziale. Ein weiterer Vorteil ist der Aspekt der Umweltverträglichkeit. MID bestehen meist aus rezyklierbaren Thermoplasten und sind somit unkritisch bei der Entsorgung, zudem wird die Werkstoff- und Teilevielfalt reduziert [48].

Die Nutzenpotenziale der Technologie können durch die Geometrie des Formkörpers und die selektive Strukturierung und Metallisierung erreicht werden. Die dreidimensionale Anordnung ermöglicht definierte Winkel zwischen Bauelementen (z. B. für LED-Applikationen), das Stapeln und präzise Positionieren von Chips (z. B. für Sensoren) sowie die Erzeugung von Kavitäten zum Schutz oder zur einfachen Kontaktierung von Bauelementen. Die Flexibilität des MID-Layouts ermöglicht die direkte Darstellung von Antennen- (z. B. für RFID oder Mobiltelefon) oder Taststrukturen und die Realisierung einer EMV-Abschirmung durch eine vollflächige Metallisierung des Gehäuses. Mechanische Funktionen (z. B. Befestigungselemente oder Versteifungen), fluidische Funktionen (z. B. Fluidkanal als Teil des Gehäuses) und thermische Funktionen (z. B. Kühlrippen) lassen sich durch den Spritzgussprozess direkt in das Gehäuse integrieren. [7][87]

Eine Differenzierung der Technologie MID gegenüber Stanzgitter-, Leiterplatten- und Folientechnik kann aufgrund der spezifischen Nutzenpotenziale, die von keiner der anderen Technologien in der Gesamtheit abgebildet werden, klar erfolgen. Umgekehrt ist die Technologie MID nur eingeschränkt für die spezifischen Anwendungsfelder der genannten Techniken geeignet. Entsprechend der Anforderung, des Einsatzgebietes und der Komplexität der Applikation muss die geeignete Technologie ausgewählt werden.

Bei der Stanzgittertechnik wird mit einem Stanzwerkzeug aus einem Materialband die elektrisch leitfähige Struktur ausgestanzt, ggf. räumlich gebogen und mit Kunststoff umspritzt. Die Bauteile sind gleichzeitig Verdrahtungsträger, Gehäuse und ggf. auch Schaltungsträger mit galvanischer Veredelung der Oberfläche (z. B. Zinn). Die Stanzgittertechnik wird vor allem bei Forderung nach hoher Stromtragfähigkeit und mechanischer Festigkeit eingesetzt. Das Potenzial hinsichtlich Miniaturisierung ist begrenzt, auch wenn einzelne Stege mit geringen Breiten (100 μm) ausgeführt werden können [57][155]. Die flexible und starre Leiterplattentechnik eignet sich für die Verarbeitung hochintegrierter Bauelemente mit kleinsten Anschlussstrukturen und hoher Packungs-

dichte sowie für die Herstellung mehrlagiger Systeme. Es existieren detaillierte Normen, Standards und Prüfkriterien. Substratmaterialien, Verbindungsmedien und Bauelemente sind intensiv qualifiziert und im Detail aufeinander abgestimmt. Eine hocheffiziente Anlagentechnik für hohe Durchsätze bei planarer Verarbeitung ist verfügbar. Die Folientechnik wird insbesondere dort eingesetzt, wo der Schaltungsträger einer Biegung oder Verdrehung bzw. Schock- und Vibrationsbelastungen ausgesetzt ist [179]. [41]

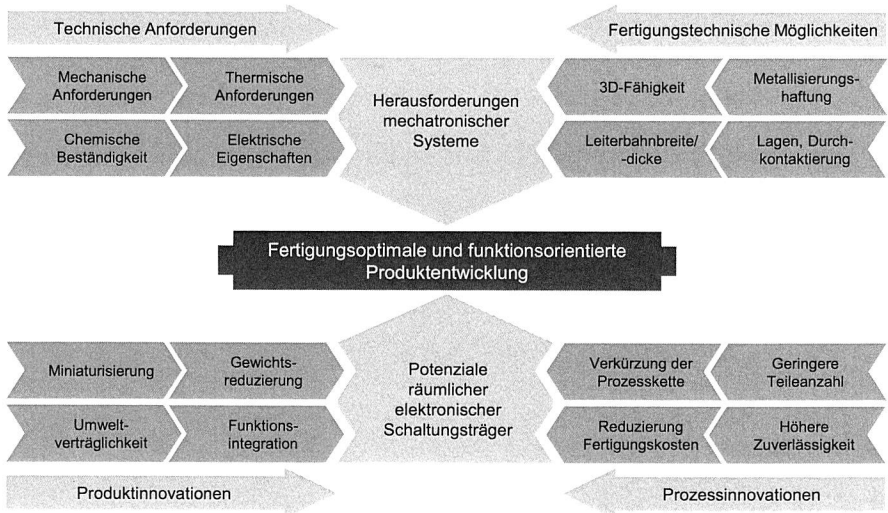


Abbildung 3: Herausforderungen einer fertigungsgerechten und funktionsorientierten Produktkonzeption

In der MID-Technologie ergeben sich durch die Komplexität der Prozesskette, den hohen Grad an Interdisziplinarität (Mechanik, Elektronik, Werkstofftechnik, Aufbau- und Verbindungstechnik etc.) sowie die Abhängigkeit zwischen Produktfunktion und Produktionsprozess Besonderheiten bezüglich der Produktentwicklung [51][93][151]. Voraussetzung für eine funktionsorientierte und fertigungsoptimale Konzeption in technologischer und wirtschaftlicher Hinsicht ist ein umfassendes Prozessverständnis. Die Herausforderungen für ein optimales MID-Design sind demzufolge die gleichzeitige Berücksichtigung der technischen Anforderungen, die an die Baugruppe gestellt werden, und die fertigungstechnische Realisierbarkeit der MID-Prozesse [108].

Für spritzgegossene Schaltungsträger existieren neben allgemeingültigen Vorgehensmodellen, z. B. die VDI-Richtlinie 2206 als Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme, noch keine spezifische Systematik, mit der Produkte entwickelt werden [155]. In den einzelnen Unternehmen werden Erfahrungen in iterativen Lernprozessen zeit-

aufwändig gesammelt. In [93] wird ein generisches Vorgehensmodell vorgestellt, das den MID-Entwicklungsprozess strukturiert sowie Methoden und Richtlinien zur Reduzierung der Komplexität der Entwicklungsaufgabe integriert. Auf detaillierter Ebene sind zur Unterstützung der Entwicklungsaufgabe MID-spezifische Gestaltungsrichtlinien und Leitfäden verfügbar bzw. können etablierte Lösungen aus Konstruktionskatalogen übertragen werden. [50][136]

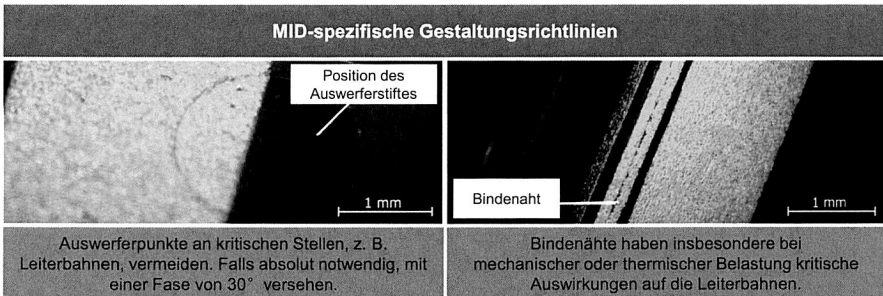


Abbildung 4: Die Konstruktion räumlicher Schaltungsträger erfordert die Berücksichtigung MID-spezifischer Gestaltungsrichtlinien [88][136]

Erfolgreiche MID-Entwicklungen aus technischer und wirtschaftlicher Sicht fundieren auf der Identifikation geeigneter Applikationen. Nach [151] existiert eine Methodik zur Produktoptimierung mechanisch elektronischer Baugruppen durch die Technologie MID. Serienanwendungen sollen dabei über das Redesign bzw. den reinen Ersatz der konventionellen Lösung hinausgehen. Hier findet lediglich eine Funktionserweiterung ohne effiziente Rationalisierung statt. Die Neuentwicklung einer elektronischen Baugruppe unter vollständiger Ausnutzung der Integrationspotenziale spritzgegossener räumlicher Schaltungsträger ermöglicht dagegen eine optimale Prozessanpassung, höchste Funktionsintegration und die Ausnutzung der wirtschaftlichen Vorteile der MID-Technik [108].

Zur Beherrschung der Komplexität der Integralbauweise von MID ist eine ganzheitliche rechnerunterstützte Entwicklung unabdingbar. In der industriellen Praxis werden MID-Teile meist unter Einsatz getrennter MCAD (Mechanical Computer Aided Design)- und ECAD (Electronical Computer Aided Design)-Systeme entwickelt. Die Funktionalität klassischer Konstruktionssoftware ist jedoch für die Anforderungen von 3D-MID nicht ausreichend. Neben einer dreidimensionalen Entwicklungsumgebung für die Darstellung des räumlichen Schaltungsträgers ist die Integration von Konstruktionsbefehlen aus verschiedenen domänenspezifischen Softwarepaketen notwendig [48][40]. Weitere Randbedingungen werden durch ein zielgerichtetes Design for Manufacturing definiert. Im CAD-System müssen neben den produktspezifischen Anforderungen auch fertigungstechnische Restriktionen, beispielsweise der Laseranlage oder des Bestückauto-

maten, festgelegt werden [51]. Die Software NEXTRA® bietet eine dreidimensionale Entwicklungsumgebung mit der Möglichkeit zur räumlichen Platzierung der Bauelemente und deren dreidimensionale Verbindung durch Leiterbahnen. Zusätzlich wird der Konstrukteur durch Bauteilbibliotheken und Design Rule Checks unterstützt. [96]

2.1.2 Prozessketten zur Herstellung spritzgegossener Schaltungsträger

Entscheidend für die erfolgreiche Umsetzung mechatronischer Systeme auf Basis spritzgegossener Schaltungsträger sind die Materialauswahl und ein anforderungsgerechtes Strukturierungs- und Metallisierungsverfahren. Der Substratwerkstoff muss den Einsatzbedingungen und der eingesetzten Verbindungstechnologie gerecht werden. Hinzu kommt eine haftfeste Metallisierung, da dieser Faktor während des Einsatzes einen immensen Einfluss auf die Langzeitzuverlässigkeit der Baugruppe hat.

Herstellungsverfahren

Für die Strukturierung und Metallisierung spritzgegossener 3D-Schaltungsträger werden vor allem die Laserstrukturierung, der Zweikomponentenspritzguss und das Heißprägen in der Serienfertigung eingesetzt. Das Folienhinterspritzen hat sich ebenfalls als Fertigungstechnologie für spezifische Anwendungen etabliert. Weitere Möglichkeiten zur Fertigung von MID-Teilen existieren: 3D-Maskenverfahren (Photoimaging), Primertechnologie, Siebdruckverfahren, selektive PVD-Metallisierung oder mechanische Strukturierungsverfahren [46][48][155]. Diese Verfahren sind für die Technologie MID unbedeutend und werden daher nicht näher ausgeführt. Neben den etablierten Technologien werden verstärkt weitere vielversprechende Herstellverfahren, insbesondere Druck- und Plasmaverfahren, speziell für die Technologie MID entwickelt [50][75][188].

Laserstrukturierung

Bei der Laserstrukturierung unterscheidet man additive, subtraktive und semi-additive Verfahren. Für jede dieser Strukturierungstechniken existieren wiederum leicht unterschiedliche Prozessabfolgen. Bei der subtraktiven Laserstrukturierung erfolgt zunächst außenstromlos eine vollflächige Metallisierung (z. B. Cu/Ni/Au), die anschließend mit einem UV-Laser selektiv entfernt wird. Alternativ wird das Leiterbild durch das Erzeugen entsprechender Isolationsflächen realisiert. Bei den semi-additiven Verfahren wird zunächst ein Teil der Metallisierung vollflächig aufgetragen. Anschließend wird mit einem UV- oder IR-Laser die Metallisierung subtraktiv entfernt und das Oberflächenfinish sowie ggf. auch die Cu-Verstärkung additiv aufgebaut. Eine serienreife Verfahrensvariante ist die Technologie MIPTEC (Microscopic Integrated Processing Technology). [46][82]

Bei der Laserdirektstrukturierung kommt ein spezifischer thermoplastischer Werkstoff zum Einsatz, der feinstverteilt spezielle Wirksubstanzen (z. B. metallorganischer Komplex oder Kupferpulver) in passiviertem Zustand enthält. Diese Additive können nach dem Spritzgießen mit geeigneter Laserstrahlung (z. B. Nd:YAG; $\lambda = 1064 \text{ nm}$) selektiv

im Bereich der Leiterbahnen freigesetzt werden. Der Laserstrahl führt an der Oberfläche eine Ablation der Polymermatrix um die Füllstoffpartikel durch. Somit werden die Metallisierungskeime aktiviert und eine mikrorauhe Topografie erzeugt, die eine haftfeste Verankerung des Kupfers ermöglicht. Die Haftfestigkeit der Metallisierung kann durch eine optimierte Abstimmung zwischen Füllstofftyp, Partikelgröße und Laserparameter verbessert werden. Die Prozesskette der Laserdirektstrukturierung ist in Abbildung 5 veranschaulicht. Von besonderer Bedeutung in diesem Zusammenhang ist das patentierte LPKF-LDS®-Verfahren. [143][144][145][172][173][200]

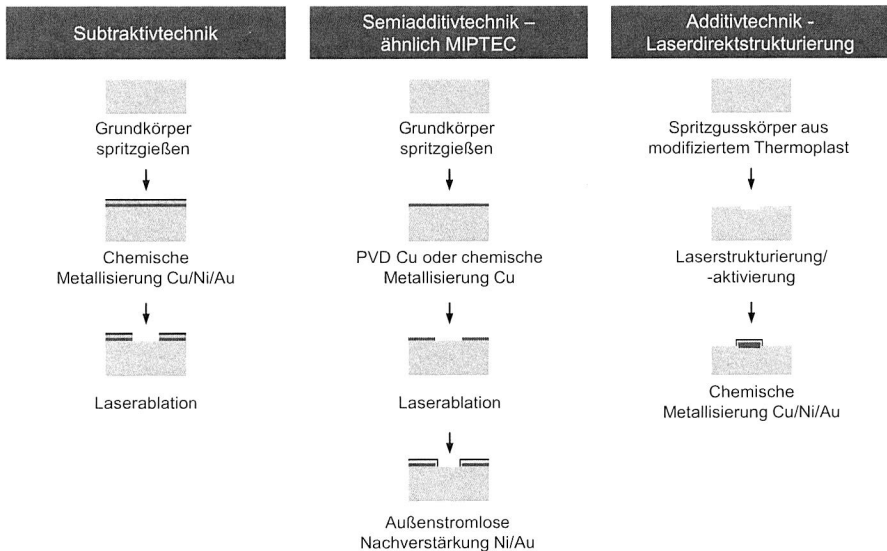


Abbildung 5: Prozessketten der additiven, subtraktiven und semi-additiven Laserdirektstrukturierung

Die Laserstrukturierung bietet die Möglichkeit, flexibel Varianten hinsichtlich des Schaltungslayouts zu erzeugen. Hinzu kommen eine hohe Änderungsfähigkeit während der Produktentstehungsphase sowie kleine Leiterbahnbreiten und -abstände. Mit dem LPKF-LDS®-Verfahren können im Serienprozess Strukturen mit einem Line/Space von 150 µm realisiert werden [136]. Die technologische Grenze liegt bei 80 µm [50]. Mit der Technologie MIPTec lassen sich Leiterbahnbreiten bis zu 25 µm bei einem Leiterbahnabstand von 30 bis 50 µm erzeugen; in Serie werden Leiterbahnbreiten von 70 µm bei einem Abstand von 70 µm umgesetzt [82]. Durch neue Anlagentechnik sind auch große Stückzahlen mit kurzen Taktzeiten möglich. Die 3D-Fähigkeit wird durch entsprechende Handhabungssysteme sowie die Anordnung mehrerer Laserköpfe erhöht. Nachteil der

Laserstrukturierung, vor allem des LPKF-LDS®-Verfahrens, sind die hohen Investitionskosten in die Anlagentechnik und der Preis der speziellen Substratwerkstoffe.

Zweikomponentenspritzguss

Beim Zweikomponentenspritzguss wird der Schaltungsträger aus zwei unterschiedlichen Kunststoffkomponenten in zwei aufeinanderfolgenden Spritzgussvorgängen hergestellt. Der eine Kunststoff ist durch das Eincompoundieren von Katalysatoren metallisierbar (nicht elektrisch leitend) und bildet die Leiterbahngeometrie ab, der andere Kunststoff ist nicht metallisierbar und dient als Isolator. Die Leiterbahnstruktur wird folglich bereits während des Spritzgussprozesses festgelegt. Das Zweikomponentenspritzgussreihenfolge der metallisierbaren und nicht metallisierbaren Komponente ergeben [46]. Im Anschluss werden die im Kunststoff enthaltenen Metallisierungskeime mittels chemischer Aktivierung freigelegt und selektiv metallisiert. Die Verwendung nicht kernkatalytischer Kunststoffe erfordert einen an die Materialkombination angepassten Vorbehandlungsprozess. [83][174][209]

Die Leiterbahnen werden beim Zweikomponentenspritzguss durch die Gestaltung des Werkzeugs festgelegt, wodurch die minimalen Leiterbahnbreiten und -abstände auf 200 bis 250 µm in Abhängigkeit der Fließweglänge begrenzt sind. Das Verfahren bietet die größte geometrische Freiheit. Durchkontaktierung und Leiterbahnen in Kavitäten, die für den Laser nicht zugänglich sind, können realisiert werden. Aufgrund der hohen Werkzeugkosten eignet sich das Verfahren für große Stückzahlen. Eine Variantenflexibilität ist nicht gegeben.

Heißprägen

Beim Heißprägen wird eine metallische Folie (Basismaterial Kupfer, Oberflächenfinish: Sn, Ni/Au) durch einen Stempel auf einen thermoplastischen Grundkörper aufgebracht. Der Grundkörper wird im Einkomponentenspritzguss hergestellt. Die Prozessparameter Druck und Temperatur sind in Abhängigkeit des Kunststofftyps für das Verpressen der Folie festzulegen. Der Kunststoff wird dabei lokal angeschmolzen, so dass ein Verbund zwischen Thermoplast und Metallfolie entsteht. Die Prägetemperatur bestimmt im Wesentlichen die Haftfestigkeit der Metallisierung. Die Haftung beruht auf mechanischer Adhäsion, die durch eine Rauheit (10-25 µm) auf der Unterseite mit Schwarzoxidbeschichtung erzeugt wird. Die Oberflächenschicht des Kunststoffs muss während des Prägens ausreichend niedrigviskos sein, so dass ein Ineinanderfließen möglich ist. Die Folie wird durch die auf der Stempelunterseite erhabenen ausgebildete Leiterbildstruktur abgesichert und die Restfolie kann entfernt werden. Für die fehlerfreie Montage der Bauelemente ist darauf zu achten, dass die Prägewulst, die durch den Prägedruck und das Verdrängen der Kunststoffschmelze seitlich der Metallfolie entsteht, nicht zu groß

wird. Das Stempelmateriale (Stahl oder Messing) sowie der Kunststofftyp beeinflussen die Stempelstandzeit und folglich die Anzahl der Prägungen. [46][179][185]

Das Heißprägen zeichnet sich durch eine kurze Prozesskette ohne chemische und galvanische Prozesse aus. Die Dicke der Metallisierung im Bereich 12-100 µm (gängig: 18 µm, 25 µm oder 35 µm) ermöglicht im Vergleich zum Zweikomponentenspritzguss und zur Laserdirektstrukturierung Anwendungen mit höherer Stromtragfähigkeit. Allerdings sind die Gestaltungsfreiheit und das Miniaturisierungspotenzial begrenzt. Aufgrund des Prägevorgangs sind die Anwendungen nur eingeschränkt dreidimensional realisierbar. Die minimalen Leiterbahnbreiten sind bei elektrolytisch aufgebauten Folien (ED) auf 500 µm begrenzt [46]. Das Heißprägen eignet sich daher für Bauelemente mit großen Rastermaßen. Durchkontaktierungen sind nur über Zusatzverfahren (z. B. Einpresstechnik oder leitfähige Materialien) realisierbar.

Tabelle 1: Vergleich der technologischen Kennwerte der MID-Herstellverfahren Laserstrukturierung, Heißprägen und Zweikomponentenspritzguss (++ geeignet, + bedingt geeignet, o nicht geeignet) [46][50][136][163][174]

	Zweikomponenten-spritzguss	Laserstrukturierung		Heißprägen
		Subtraktiv/ Semiadditiv	Additiv	
Min. Leiterbahnbreite in µm	200	Serie: 70 Techn.: 25	Serie: 150 Techn.: 80	ED-Folie: 500
Min. Leiterbahnabstand in µm	250	Serie: 70 Techn.: 30-50	200	ED-Folie: 500
Metallisierbare Durchkontaktierung	++	++	+	o
3D-Fähigkeit	++	+	+	o
Komplexität des Leiterbildes	+	++	++	o
Flexibilität	o	++	++	+
Verfügbare Substratwerkstoffe	o	++	++	++

Folienhinterspritzen

Das Folienhinterspritzen bietet die Möglichkeit, Kombinationen aus starren und flexiblen Leiterplatten einzusetzen. Hierbei wird eine meist vorgeformte ein- oder mehrlagige flexible Leiterbildfolie mit geeigneten Kunststoffen im Einkomponentenspritzguss hinterspritzt. Die für die elektrische Funktionalität notwendige strukturierte Metallisierung der Folien kann u. a. mittels Primer und anschließender chemischer Metallisierung, Heißprägen oder chemisch-galvanischer Metallisierung in Anlehnung an die Standardprozesse der Leiterplattentechnik erfolgen. Eine ausreichende Haftung zwischen Folie und Kunststoff kann durch die Verwendung chemisch ähnlicher Werkstoffe realisiert werden.

Aufgrund der hohen Belastungen beim Hinterspritzen kann es bei den metallisierten Kunststofffolien aufgrund der geringen Duktilität der Metalle leicht zu einer Beschädigung der elektrischen Strukturen kommen. Fließ- und druckarme Varianten des Hinterfüttens wie der Thermoplastschaumguss, das Spritzprägen oder das Hinterpressen vermindern die maximale Druckbelastung. Durch den Einsatz strahlenvernetzter Thermoplastfolien können auch kostengünstige technische Kunststoffe verarbeitet werden. [12][46][50]

Das Folienhinterspritzen ermöglicht nur eine eingeschränkte Dreidimensionalität aufgrund der geringen Bruchdehnung der Kupferleiterbahnen und der Faltenbildung. Der Einsatz funktionalisierter Folien ermöglicht allerdings die Realisierung mehrlagiger Schaltungsträger.

Alternative Herstellungsverfahren

Zu den neuen Technologien, die zunehmend für MID an Bedeutung gewinnen, zählen vor allem die Drucktechnologien Aeorosol-Jet® und Ink-Jet sowie die Plasmaverfahren Flamecon® und Plasmadust®. Des Weiteren werden alternative Verfahren der Laserstrukturierung durch eine Weiterentwicklung der 3D-Fähigkeit, Stromtragfähigkeit, Haftfestigkeit und der erforderlichen Strukturgrößen für die Herstellung von MID-Teilen interessant.

Das Ink-Jet- und das Aerosol-Jet®-Verfahren sind kontakt- und maskenlose Drucktechnologien für sehr feine Strukturen. Die funktionalen Tinten können leitende, halbleitende oder isolierende Materialien sein. Nach dem Druckprozess können die Tinten mit UV-Licht, thermisch, induktiv oder mittels Laser ausgehärtet werden. Beim Ink-Jet-Prozess werden niedrigviskose Tinten (<20 mPas) in Drop on Demand (DOD) oder Continuous Flow Technik auf das Substrat appliziert. Bei der DOD-Methode werden durch einen äußeren thermischen oder elektrischen Impuls einzelne Tintentropfen aus dem Druckkopf emittiert. In Abhängigkeit von der Tinte können Leiterbahnen mit einer Höhe von bis zu 2 µm und einer Breite von 50-100 µm appliziert werden [86]. Das Aerosol-Jet®-Verfahren ermöglicht das Drucken von Leiterbahnbreiten kleiner 50 µm. Das Aerosol wird in einem Zerstäuber erzeugt, im Druckkopf aerodynamisch fokussiert und auf das Substrat appliziert. Der Ultraschall-Zerstäuber ist für Tinten mit niedriger Viskosität und kleine Partikelgrößen (<100 nm), der pneumatische Zerstäuber ist für Lösungen mit hoher Viskosität (Partikelgröße bis 500 nm). Bei der Aerosol-Jet-Technologie kann die Leiterbahnbreite flexibel über die Druckeinstellungen sowie den Abstand Düse zu Substrat variiert (2 bis 5 mm) werden. Kleine Stufen können folglich ohne Änderung der z-Achse bedruckt werden. [86][54][74][75]

Weitere Möglichkeiten zur selektiven Metallisierung sind die plasmabasierten Beschichtungstechnologien Flamecon® und Plasmadust®. Flamecon® ist ein thermokinetisches

Auftragsverfahren. Metallpartikel (z. B. Kupfer, Zink oder Aluminium) werden über eine Dosierung in eine Kammer mit hohen Temperaturen geführt. Ein robotergesteuerter Spritzkopf transportiert die geschmolzenen Partikel über einen sanften Trägergasstrom auf die Werkstückoberfläche. Die Partikel verschmelzen beim Abkühlen. Die Haftung wird durch eine Kombination aus mechanischer Verklammerung mit der Oberfläche und chemischer Bindung erzeugt. Mittels Flamecon[®]-Technologie können metallische Strukturen mit einer Dicke von 20 µm bis über 100 µm, einer minimalen Spurbreite von 1 mm (unmaskiert) und einer Prozessgeschwindigkeit von bis zu 20 Metern pro Minute aufgetragen werden. Durch sich wiederholende Prozessabläufe können Schichten größer 1.000 µm aufgebaut werden. Plasmadust[®] ermöglicht die Abscheidung metallischer Strukturen (z. B. Kupfer, Silber oder Zinn) aus kaltaktivem Atmosphärendruck-Plasma direkt auf das Substratmaterial (z. B.: Kunststoff oder Keramik). Die Erzeugung des Gasplasmas erfolgt durch eine hochwirksame direkte Gasentladung (Inverterprinzip). Das Schichtmaterial mit Korngröße 0,1 bis 20 µm wird vom Gasstrom mitgezogen und aufgeschmolzen. Die Prozessgeschwindigkeit liegt bei bis zu 50 Metern pro Minute. Die erzeugbare Schichtdicke der metallischen Strukturen liegt im Bereich zwischen 1 µm und 200 µm. Die minimale Spurbreite ist derzeit bei 2 mm (unmaskiert). Vorteil der Technologie Plasmadust[®] ist, dass die Oberflächenaktivierung zur Steigerung der Haftfestigkeit direkt in den Prozess integriert werden kann. Die Verfahren Flamecon[®] und Plasmadust[®] eignen sich aufgrund der aufgeführten technologischen Grenzwerte hinsichtlich Leiterbahnbreite für großflächige Anwendungen. [189][188] [190]

Das LISA-Verfahren (Laser-induzierte selektive Aktivierung) hat die Verwendung von Standardkunststoffen im Fokus. Hierbei wird die Polymeroberfläche (z. B. PE, PP, ABS, PET/PBT oder PC) mit einem Laser in einem entionisiertem Medium modifiziert. Dieser Vorgang muss mehrmals durchgeführt werden, um eine entsprechende Oberflächenstruktur zu erhalten. Anschließend wird die Substratoberfläche in einer Palladiumlösung aktiviert, wobei sich die Palladiumpartikel nur an den modifizierten Bereichen anlagern. Danach erfolgt eine außenstromlos-chemisch selektive Metallisierung mit Kupfer. [205]

Substratmaterialien

Die Vielzahl an MID-Herstellungsverfahren und die unterschiedlichen technischen Herausforderungen bedingen die Entwicklung spezifischer Werkstoffe. Die wichtigsten zu berücksichtigenden Materialparameter sind dabei die thermischen Anforderungen während der Fertigung und im Einsatz sowie mechanische und elektrische Eigenschaften (Abbildung 6). Hinzu kommen die Spritz- und Metallisierbarkeit, Wasseraufnahme, Schwindung, Flammenschutz und die Kosten. [34][35][37][46]

Für die durchgeführten Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit müssen insbesondere die unterschiedlichen Materialeigenschaften von Metall und Kunststoff berücksichtigt werden. Starke Abkühlung und Erwärmung der Bauteile können zum thermischen

Spannungsaufbau und damit zu einer mechanischen Schwächung an der Grenzfläche Kunststoff/Metall führen. Grundsätzlich haben die thermoplastischen Werkstoffe im Vergleich zu den Standardmaterialien der Elektronikproduktion einen hohen thermischen Ausdehnungskoeffizienten (CTE), der zudem richtungsabhängig ist und auch entscheidend durch die Bauteilform beeinflusst wird [46][66]. Des Weiteren kommen in dieser Arbeit nur Werkstoffe zum Einsatz, die den thermischen Anforderungen während des Lötens mit höherschmelzenden bleifreien Lötten im Kondensationslötöfen genügen.

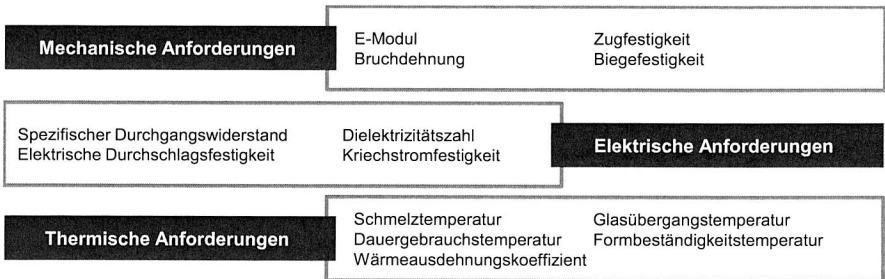


Abbildung 6: Charakteristische Materialparameter für die Realisierung elektronischer Schaltungsträger auf Basis thermoplastischer Substratwerkstoffe

Im Gegensatz zu den in der Leiterplattentechnik verwendeten duroplastischen oder keramischen Basissubstraten werden für MID Thermoplaste eingesetzt. Duroplaste bestehen aus engmaschigen Makromolekülen, die durch Elektronenpaarbindung fest vernetzt sind. Duroplaste erweichen beim Erhitzen nicht und sind nicht schmelzbar. Der Werkstoff kann mechanisch, z. B. durch Sägen oder Bohren, bearbeitet werden. Thermoplaste bestehen aus linearen, teilweise gering verzweigten Makromolekülen, die nur durch schwache physikalische Bindungen verbunden sind, die bei höheren Temperaturen aneinander vorbeigleiten und daher schmelzbar und plastisch verformbar sind. Thermoplaste können im festen Zustand als amorphe oder teilkristalline Festkörper vorliegen. Amorphe Kunststoffe werden unterhalb der Glasübergangstemperatur eingesetzt. Teilkristalline Werkstoffe können dagegen auch bei Temperaturen oberhalb T_g zur Anwendung kommen. Unterhalb T_g liegt der amorphe Anteil erstarrt vor, der Kunststoff ist hart und spröde. Die kristallinen Bereiche bleiben bis zur Schmelztemperatur erhalten und bestimmen die mechanischen Eigenschaften oberhalb T_g . Eine höhere Wärmeformbeständigkeit kann durch Vernetzung mittels Elektronenbestrahlung (Strahlenvernetzung) erreicht werden [12]. Dies ermöglicht gegebenenfalls den Einsatz kostengünstigerer Thermoplaste. [35][46]

Für die LDS-Technologie stehen u. a. die Werkstoffe LCP, PA6/6T, PA6T/X, PA4T, PA10T, PBT, PET+PBT, PPA, PC und PC/ABS zur Verfügung [50][136]. Die meisten Anwendungen werden mit LCP hergestellt. Weitere wichtige Werkstoffe für Serienappli-

kationen im LDS-Prozess sind PET+PBT und PA6/6T. Die drei Werkstoffe sind für den Lötprozess (Kondensationslöten bei 230°C) qualifiziert. In [192] werden auch Werkstoffe vorgestellt, die zur Verarbeitung mit niedrigschmelzenden Lotwerkstoffen geeignet sind. Für Antennenapplikation für Mobiltelefone werden Low-cost Thermoplaste wie PC oder PC/ABS eingesetzt. In Tabelle 2 werden die im weiteren Verlauf der Arbeit für die durchgeführten Untersuchungen verwendeten Werkstoffe LCP, PA6/6T und PET+PBT in Vergleich zu Standardwerkstoffen der Elektronikproduktion gesetzt.

Tabelle 2: MID-Substratwerkstoffe für die Laserdirektstrukturierung im Vergleich mit Standardwerkstoffen der Elektronikproduktion [120][124][128][208]

	Standardwerkstoffe der Elektronikproduktion			MID-Substratwerkstoffe für die Laserdirektstrukturierung		
	Silizium	Kupfer	FR4	LCP	PA6/6T	PET+PBT
CTE (x/y) in ppm/K	2,5-3	16,5	12/17	12/27	30/50	36/56
T _g in °C	-	-	135	-	90-95	60
max. T in °C	>> 260 °C	>> 260 °C	> 260 °C	> 260 °C	> 260 °C	< 255 °C

Für den Zweikomponentenspritzguss müssen die beiden Kunststoffkomponenten eine gute Schmelzeverträglichkeit für eine ausreichende Haftung aufweisen. Derzeit wird für Anwendungen in der Technologie MID fast ausschließlich eine Kombination aus LCP (Vectra® E 820i PD) als metallisierbare Komponente und LCP (Vectra® E130i) als nicht metallisierbare Komponente eingesetzt. Die Haftungsneigung von LCP im Zweikomponentenspritzgießen ist gering. Eine entsprechende Verbindung der beiden Komponenten muss durch konstruktive Maßnahmen realisiert werden. [46][50]

LCP ist ein flüssigkristallines Polymer und zeichnet sich im Gegensatz zu anderen Thermoplasten durch einen geringen Längenausdehnungskoeffizienten, vergleichbar mit Leiterplattenmaterialien, aus. LCP ist in Abhängigkeit von der Geometrie für das Konvektions- und Kondensationslöten geeignet. Mit LCP können extrem lange Fließwege bei dünnen Wandstärken realisiert werden. Bei guter Verarbeitung lassen sich Zweikomponentenspritzgussteile ohne Überspritzung und Gratbildung herstellen. Zudem ist die Wasseraufnahme des Werkstoffs LCP sehr gering. [174]

Für das Heißprägen ist eine Vielzahl unterschiedlicher Kunststoffe, auch Low-Cost-Thermoplaste, verfügbar. Für Anwendungen mit hohen thermischen Anforderungen hinsichtlich der Verarbeitung eignet sich nach [179] neben PPS und verschiedenen PA-Typen das flüssigkristalline LCP als Basismaterial.

Oberflächenbeschichtung

Bei der Herstellung von MID-Teilen im Zweikomponentenspritzguss oder mittels Laserdirektstrukturierung werden die in den Thermoplasten compoundingierten Additive entweder physikalisch (z. B. durch die Laserenergie selektiv) aktiviert oder durch chemische Aktivierung (z. B. Beizen) freigelegt. Anschließend wird der Kunststoff in der MID-Technik mittels eines stromlos arbeitenden Kupferelektrolyten metallisiert. [149][32]

Typische Kupferschichtdicken sind hierbei im Bereich 5-7 μm , aufgrund der rauen Topografie mit einer Toleranz von $\pm 3 \mu\text{m}$. Aus wirtschaftlichen Gründen sind die maximalen Schichtdicken auf kleiner 8 μm zu begrenzen [131][130]. Bei chemisch abgeschiedenen Kupferschichten werden etwa 60 % der Leitfähigkeit von massivem Kupfer erreicht. Daher kann die Stromtragfähigkeit nur über die Leiterbahnbreite erhöht werden. Grenzwerte für die elektrischen Eigenschaften typischer Schichtdicken für MID-Bauteile sind in [130][131][136] dargestellt. Für Anwendungen, die eine hohe Stromtragfähigkeit erfordern und die Schichtdicken der chemischen Abscheidung nicht ausreichend sind, ist eine galvanische Nachverstärkung möglich [16][101]. Hier müssen alle Leiterbahnen elektrisch verbunden sein und in einem abschließenden Prozessschritt wieder getrennt werden.

Tabelle 3: Etablierte Finishoberflächen für MID mit Bewertung der Eignung für spezifische Verbindungsverfahren (++ geeignet, + bedingt geeignet, o nicht geeignet) [136]

	EN-IG	EN-EP-IG	EN-IG-EG	EN-IP-IG	ASIG
Leitkleben	++	++	++	++	++
Mehrfachlöten (bleifrei)	++	++	++	++	++
US-Bonden	+	+	+	++	++
TS-Bonden	o	+	+	++	++
Pd-Dicke in μm		0,02		0,03	
Ag-Dicke in μm					0,2
Au-Dicke in μm	0,1	0,1	> 0,5 gesamt	0,03	0,1

Für die weiteren Prozesse der Aufbau- und Verbindungstechnik ist eine Veredelung der Kupferstruktur mit einem der Anwendung gerechten Oberflächenfinish erforderlich. Dafür eignen sich prinzipiell die in Tabelle 3 aufgeführten Oberflächen. Eine wirtschaftliche Alternative zu den genannten Verfahren ist das chemische Aufbringen von Zinn. Allerdings sind die dünne Zinnschicht (ca. 1 μm) und das Phasenwachstum (0,3-0,8 μm /Reflowschritt) nur eingeschränkt für das Löten LDS-strukturierter Bauteile geeignet. [131][38][8]

Für Bondverbindungen ist eine glatte Oberfläche mit einem arithmetischen Mittelrauwert $R_a < 0,025 \mu\text{m}$ (R_z -Werte von max. $10 \mu\text{m}$) erforderlich [111]. Da meist nur ein rein chemischer Schichtaufbau erfolgt und insbesondere bei der Laserstrukturierung prozessbedingt eine raue Topografie entsteht, ist für Bondprozesse eine Nachbehandlung zur Glättung der Oberfläche erforderlich. Die Nachbehandlung kann mit Schneestrahlnreinigung oder einem Stempel erfolgen und ist in Abhängigkeit des Werkstoffs auszuwählen. [129][135]

Für das Heißprägen werden Prägefolien verwendet. Die Prägefolien sind meist elektrolytisch aufgebaute Kupferfolien (ED-Folien, electro deposited) mit Schwarzoxidbeschichtung als haftvermittelnde Komponente und einer entsprechenden Oberflächenmetallisierung (z. B. Sn). Alternativ zu einer anorganischen Haftschrift kann auch eine klebstoffbasierte Haftschrift verwendet werden. Kupferfolien, die im Walzprozess hergestellt werden, sind erst nach Vorbearbeitung (z. B. Laservorschnitt) heißprägbare. Walzfolien können mit geringeren Kräften geprägt werden und ermöglichen dadurch eine höhere Stempelstandzeit bei geringeren Leiterbahnstrukturen. Zudem sind Walzfolien in der Herstellung kostengünstiger und dadurch trotz des zusätzlichen Prozessschritts wirtschaftlich eine sinnvolle Alternative. [46]

2.1.3 Fertigungskonzepte und Montagelösungen für 3D-MID

Für MID-Teile können zur mechanischen Fixierung und elektrischen Kontaktierung der Bauelemente prinzipiell die gleichen Verbindungstechniken und -medien eingesetzt werden, die auch aus der planaren Leiterplattentechnik bekannt sind. Für die Verarbeitung elektronischer Bauelemente sind das Lötens und das Leitleben auf den Standardoberflächen der MID-Technik geeignet. Als Chipmontagetechnologien haben sich sowohl das Drahtbonden als auch die Flip-Chip-Technik etabliert.

Die räumliche Komplexität der Baugruppe bestimmt die Auswirkungen auf die weitere Prozesskette der SMT (Surface Mount Technology)-Fertigung. Bei einfachen Baugruppen können die Standardprozesse Pastendruck oder Dispensen des Verbindungsmediums, Bauelementbestückung und Lötens, Leitleben oder Drahtbonden eingesetzt werden. Mit steigender geometrischer Komplexität wird jedoch eine Modifizierung bzw. Anpassung der Prozesse erforderlich. Davon sind vor allem der Bestückprozess und der Auftrag des Verbindungsmediums betroffen.

Verbindungsverfahren

Bei der Verarbeitung räumlicher Schaltungsträger ergeben sich aufgrund der in Kapitel 2.1.2 beschriebenen Prozessketten Besonderheiten, die direkte Auswirkung auf die Verbindungstechnik haben und daher bei der Festlegung der Prozessparameter berücksichtigt werden müssen (Abbildung 7). Die thermischen Eigenschaften der Thermoplaste weisen eine niedrige Schmelztemperatur bei hohen Ausdehnungskoeffizienten

auf, die zudem richtungs- und bauteilformabhängig sind. Bei hoher thermischer Belastung besteht somit die Gefahr von Mikrorissen und Delamination der Leiterbahnen. Die Montage der Bauelemente erfolgt meist ohne Lötstopplack, wodurch eine weiträumige Benetzung entstehen kann. Die Metallisierung ist bei außenstromlos-chemisch aufgetragenen Strukturen sehr dünn und in Abhängigkeit des Herstellverfahrens teilweise sehr rau. [87][208]

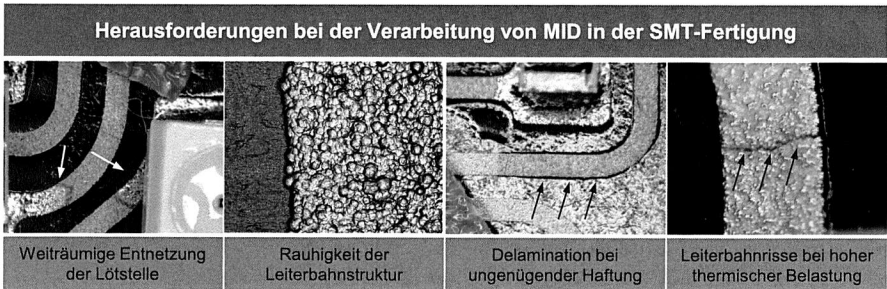


Abbildung 7: Bei der Verarbeitung räumlicher Schaltungsträger in der Standard-SMT-Prozesskette ergeben sich Besonderheiten

Der Lötprozess kann selektiv oder mit den gängigen Reflow-Lötverfahren, Konvektionslöten unter Schutzgasatmosphäre und Kondensationslöten, erfolgen. Aufgrund der homogenen Temperaturverteilung wird bei 3D-Bauteilen das Kondensationslöten gegenüber dem Konvektionslöten bevorzugt. Bei exakt reproduzierbaren Prozessbedingungen mit hohem Wärmeübergangskoeffizienten ergibt sich eine gleichmäßige Temperaturverteilung entsprechend dem Siedepunkt des Dampfphasenmediums (z. B. 230°C für SnAgCu-Lotpaste) auf der gesamten Baugruppe. Auch bei komplexen 3D-Geometrien entstehen durch Abschattungseffekte oder Höhenunterschiede der Prozessflächen im Bereich der Dampfphase keine Temperaturunterschiede. Bei selektiven Lötverfahren (z. B. Laserstrahllöten) ist die Temperaturbelastung für Bauelement und Substrat zeitlich und örtlich begrenzt. Somit können thermisch sensible Bauelemente und Werkstoffe mit geringer Wärmeformbeständigkeit verarbeitet werden, allerdings ist es ein sequentieller Prozess und daher nur für Baugruppen mit wenigen Bauelementen geeignet [46][67][208]

Als Verbindungsmedium können die Standardlotwerkstoffe der konventionellen Leiterplattentechnologie eingesetzt werden. Das Standard-Schichtsystem Cu/Ni/Au ist unkritisch hinsichtlich der Bildung intermetallischer Phasen [208]. Das Fehlen des Lötstopplacks erfordert eine Optimierung des geometrischen Designs der Pads, der Lotmenge und der Lötparameter. Durch die weiträumige Benetzung fließt das Lot aus der Verbin-

dungszone ab und kann somit zu einer Reduzierung der Langzeitzuverlässigkeit führen [88].

Leitklebstoffe können in isotrop und anisotrop leitfähige Klebstoffe unterteilt werden [103]. Das Leitkleben von Bauelementen erfolgt meist mit isotrop leitfähigen Klebstoffen, die aus einer Polymermatrix mit metallischen Füllpartikeln bestehen. Die mechanische Festigkeit wird durch die thermische Aushärtung, die elektrische Verbindung durch das dreidimensionale Netzwerk der sich berührenden in die Polymermatrix eingebetteten Partikel realisiert. Als Füllstoff wird aufgrund der guten elektrischen Leitfähigkeit und der hohen Wärmeleitfähigkeit meist Silber verwendet [103]. Die niedrigen Aushärtetemperaturen (120 bis 150 °C) ermöglichen den Einsatz thermisch empfindlicher Materialien. Spezielle Bauelementanschlussmetallisierungen können hohe Übergangswiderstände beim Leitkleben vermeiden [208]. Die fehlende Selbstzentrierung erfordert eine hohe Bestückgenauigkeit.

Chipmontagetechnologien sind auch in der Technologie MID aufgrund der zunehmenden Miniaturisierung, dem damit einhergehenden geringeren Platzbedarf und der höheren Packungsdichte von großer Bedeutung. In [81] sind die für MID geeigneten Chipmontagetechnologien aufgeführt. Für die mechanische und elektrische Verbindung des Silizium-Chips zu dem MID-Substrat mit entsprechendem Schutz gegen Umgebungseinflüsse stehen die Chipmontagetechniken Drahtbonden und Flip-Chip zur Verfügung. Das Drahtbonden ermöglicht durch die variable Position und Länge der Drahtverbindungen ein flexibles Substratlayout und bietet aufgrund der beweglichen Drahtverbindungen eine zuverlässige elektrische Kontaktierung. Wesentliche Vorteile der Flip-Chip-Technik sind der geringere Platzbedarf und die Möglichkeit, die gesamte Chipfläche zur Steigerung der Packungsdichte zu nutzen. Im Gegensatz zu dem sequentiellen Verbindungsprozess Drahtbonden werden alle Anschlüsse in einem Schritt kontaktiert. [81][99][202]

Tabelle 4: Chipmontage mit den Verbindungstechnologien Drahtbonden, Flip-Chip-Löten und Flip-Chip-Kleben [81]

Chipmontagetechniken		
Drahtbonden	Flip-Chip-Kleben	Flip-Chip-Löten
Thermosonic-Bonden (TS)	Isotrop leitender Klebstoff (ICA)	Bleifreies Lot mit/ohne Flussmittel
Ultraschall-Bonden (US)	Anisotrop leitender Klebstoff (ACA)	Bleihaltiges Lot mit/ohne Flussmittel
Nicht leitender Klebstoff (NCA)		

In der MID-Technik wird meist das Ultraschall-Wedge-Wedge-Bonden eingesetzt. Die mechanische Fixierung des Silizium-Chips erfolgt mit einem Kleber. Aufgrund der guten

thermischen Leitfähigkeit werden hier oft Leitlebstoffe verwendet. Bei der Flip-Chip-Technologie ist die Funktionsseite des Chips zum Substrat gedreht. Die direkte Kontaktierung der Pads des Silizium-Chips mit der Substratmetallisierung erfolgt mittels Löten oder Kleben mit isotrop leitenden (ICA), anisotrop leitenden (ACA) oder nicht leitenden (NCA) Klebstoffen.

Eine weitere Alternative zum Löten ohne thermische Belastung der Baugruppe ist die Einpresstechnik. Bei dieser lötfreien Verbindung erfolgt die elektrische Kontaktierung durch Einpressen eines Stiftes in ein metallisiertes Loch [24]. Dabei muss eine gasdichte Verbindung zwischen Einpressstift und metallisierter Durchkontaktierung sichergestellt sein. Aufgrund der geringen Schichtdicken bei rein chemischer Metallisierung und des viskoelastischen Werkstoffverhaltens der Thermoplaste ist die Einpressverbindung in der MID-Technik bisher als lötfreie Verbindung von untergeordneter Bedeutung. Wissenschaftlich ist das Thema umfassend betrachtet und entsprechende Richtlinien sind vorhanden. [14][24][37]

Ein wesentlicher Faktor bei der Anwendung der Technologie ist die Kontaktierung der MID-Teile zu der Peripherie. Mit Ausnahme weniger Anwendungen (z. B. RFID) erfolgt eine Informationsweitergabe durch eine elektrische Verbindung. Die direkte Integration eines Steckgesichts durch metallisierte Kunststoffpins oder umspritzte bzw. eingepresste Metallpins, die mittels Löten mit der leitfähigen Struktur verbunden werden, sind in Serie umgesetzte Lösungen. Das Anlöten eines Standardsteckers oder von Litzen ist ebenfalls möglich. Die Kontaktierung mit einer Leiterplatte kann auf ähnliche Weise realisiert werden. Das MID-Teil wird wie ein Bauelement zugeführt und z. B. über metallisierte Kunststoffpins mit der Leiterplatte durch eine Löt- oder Leitlebverbindung angebunden. [50]

3D-Montage

Bei räumlichen Schaltungsträgern der Dimension 2,5 D, n x 2D oder 3D muss die Montage elektronischer Bauelemente gegenüber den Standardprozessen planarer Substrate erweitert werden. Montagesysteme für die Flachbaugruppenfertigung werden stetig hinsichtlich Bestückleistung, Montagetoleranzen und Bauelementspektrum optimiert. Der daraus resultierende Anlagenaufbau, der Arbeitswege und den Prozessraum minimiert, ist deshalb nur eingeschränkt für die Bestückung nicht planarer Baugruppen geeignet [44]. Bei der Bestückung von Bauelementen auf Schaltungsträgern muss die Bestückebene normal zur Fügeichtung der Bauelemente ausgerichtet sein [10]. Für den Auftrag des Verbindungsmediums und die Bestückung räumlicher Schaltungsträger sind deshalb bis zu sechs Freiheitsgrade erforderlich.

Zur 3D-Montage wurden wissenschaftlich bereits unterschiedliche Konzepte evaluiert [10][98]. Die kinematische Erweiterung eines Bestückungsautomaten mit verlängertem z-Hub und einem schwenk- und kippbaren Werkstückträger sowie der Einsatz eines 6-

Achs-Industrieroboters stellen mögliche Systeme dar, die aber Einschränkungen in Bezug auf Mengenleistung, Bestückgenauigkeit und geometrischer Freiheit aufweisen [153]. Die Mengenleistung kann bei einer Fertigung im Nutzen optimiert werden. Entsprechende Werkstückträger werden derzeit entwickelt [152]. Abbildung 8 zeigt den automatischen Werkstückträger integriert in einen Standard-SMT-Bestückautomaten. Des Weiteren sind entsprechende Konzepte zur Handhabung der MID-Teile von großer Bedeutung. Eine Erhöhung des Durchsatzes kann beispielsweise auch durch die automatisierte Zuführung entsprechend der elektronischen Bauelemente in Gurtbändern oder mittels einer Reel-to-Reel Fertigung erfolgen [100].

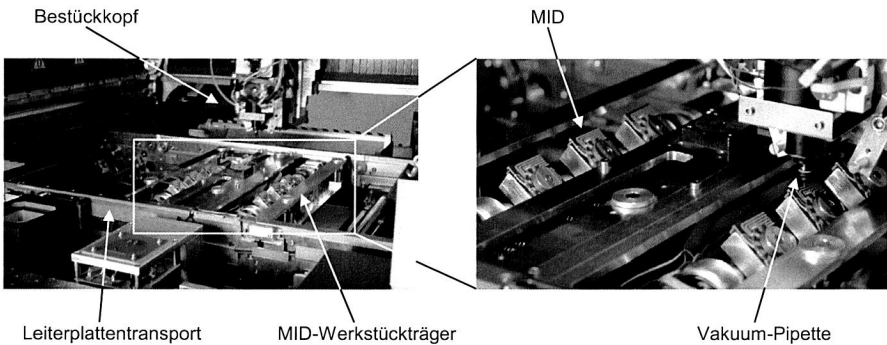


Abbildung 8: Automatisierter Werkstückträger integriert in einen Standard-SMT-Bestückautomaten [153]

Am Markt sind bereits Anlagen zur 3D-Montage verfügbar [50]. Allerdings sind diese Anlagen meist komplexe Speziallösungen. Ein entscheidender Erfolgsfaktor für die weitere Marktdurchdringung der Technologie MID ist eine flexible und automatisierte 3D-Montage [50][55][59]. In diesem Kontext stehen modulare Anlagenkonzepte, die Erweiterung der Anlagen um Dispenseinheiten, die direkte Integration von Lötssystemen sowie eine integrierte Prozesskontrolle im Vordergrund.

2.1.4 Qualität und Zuverlässigkeit

Die Qualitätssicherung in der Produktion und die Absicherung der Langzeitzuverlässigkeit der MID-Teile stellen eine große Herausforderung dar. Bislang werden vor allem technische Standards und Normen aus der Leiterplattentechnik (DIN-, IEC-, und ISO-Normen; Standards der IPC und UL) herangezogen [46]. Eigene Normen und technische Standards sind für die Technologie MID bislang nicht vorhanden. Unternehmen entwickeln zum Teil eigene Prüfstrategien, die aber nicht allgemein zugänglich und anerkannt sind. Die spezifischen Problemstellungen, die sich durch andersartige Substratmaterialien, geometrische Anforderungen und Herstellungsverfahren ergeben, er-

fordern jedoch eine Standardisierung der Qualitäts- und Prüfanforderungen für MID. Es müssen spezifische Prüfmethoden, beispielsweise zur Bestimmung der Haftfestigkeit der Leiterbahnstrukturen, entwickelt werden. Erste Ansätze zur Realisierung von Standardprüfkörpern und zur Entwicklung von Prüfvorschriften bzw. Prüfequipment existieren [199].

Ebenso im Bereich der planaren Leiterplatte deutet sich ein Wandel an. Standardisierte Testmethoden sind zwar vorhanden, die Testbedingungen werden aber zunehmend von den OEM in Frage gestellt. Bleifreie Lotlegierungen und neue Substratmaterialien bei komplexeren Baugruppen und feineren Strukturen verhalten sich anders, was sich auf die Zuverlässigkeit des Gesamtsystems auswirkt und neue Prüfstrategien für die Lebensdauerprognose erfordert. [47][179]

Zur Bestimmung der Langzeitzuverlässigkeit und Qualitätssicherung in der Produktion werden in der Elektronikfertigung und ebenso in der MID-Technik zerstörungsfreie, zerstörende und elektrische Prüfverfahren eingesetzt. Zerstörungsfreie Prüfverfahren, z. B. optoelektronische Inspektion, Röntgen-/Ultraschallmikroskopie oder Thermografie, dienen zur Prozessüberwachung und können meist produktionsnah eingesetzt werden. Zerstörende Prüfverfahren, z. B. Pull-/Schertests, Gefügeanalyse, Elementanalyse oder Oberflächenanalyse, dienen neben der Qualitätssicherung vor allem der Zuverlässigkeitsbewertung und der Schadensanalyse. Elektrische Prüfverfahren werden als Funktionstests eingesetzt und dienen ebenfalls der Absicherung der Fertigungsqualität. [148][169][171]

Absicherung der Qualität in der Produktion

Die Absicherung der Qualität in der Produktion der MID-Technik wird vor allem durch die Komplexität der Prozesskette stark beeinflusst. Aufgrund der hohen Interdisziplinarität sind oft mehrere Unternehmen an der Herstellung eines MID beteiligt. Die daraus resultierenden Abhängigkeiten und Auswirkungen müssen zur Gewährleistung stabiler Produktionsprozesse beherrscht werden.

Eine ganzheitliche Betrachtung der Prozesskette mit einer Vernetzung aller an der Herstellungskette beteiligten Unternehmen ist erforderlich [166]. Zwischen allen Prozessschritten sind Schnittstellen zu definieren, prozessbedingte Risiken zu identifizieren und die Qualität eines Einzelprozesses immer im Hinblick auf die gesamte Prozesskette zu beurteilen (Abbildung 9). Bei Fertigungsproblemen ist es nicht ausreichend, nur direkt vor- bzw. nachgelagerte Prozessschritte zu betrachten.

Konventionelle Techniken und Systeme, die aus der Elektronikfertigung bekannt sind, sind aufgrund der Strukturbreiten in der MID-Technik vollkommen ausreichend. Allerdings sind auch an dieser Stelle die Besonderheiten der Technologie MID mit erweiterten Anforderungen an die Prüf- und Inspektionstechnik zu berücksichtigen. Aus wirt-

schaftlichen Gründen muss die Qualitätssicherung automatisch und fertigungs-
begleitend erfolgen.

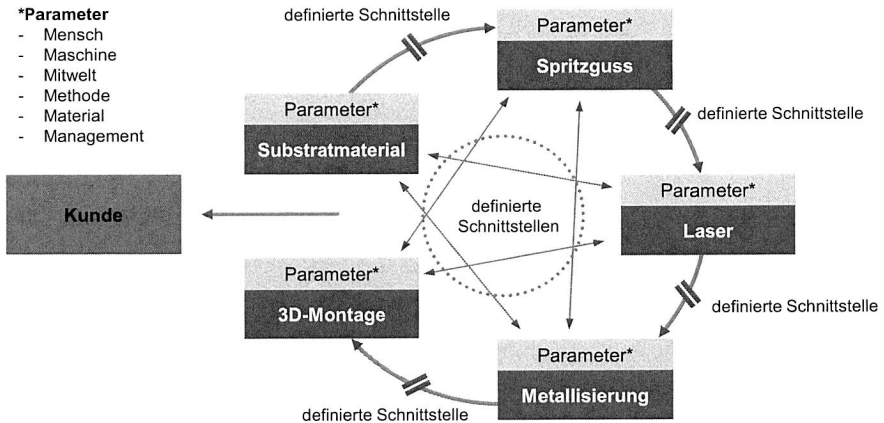


Abbildung 9: Erforderliche Vernetzung in der Qualitätssicherung der Prozesskette MID [7]

Die automatische optische Inspektion (AOI) ist in der Fertigung planarer Leiterplatten zur dreidimensionalen Vermessung des Pastendrucks, zur optischen Überwachung der Bestückung sowie zur optischen und röntgentechnischen Sensorik bei der Lötstellenkontrolle etabliert. Die automatische optische Inspektion (AOI) in der 3D-MID-Fertigung stellt erweiterte Herausforderungen an die Prüftechnik. Für die MID-Technik ergeben sich besondere Anforderungen an das Handling des Bauteils und die Prüfaufgabe. Eine rein orthogonale Sicht auf das Prüfobjekt ist nicht ausreichend. Die Prüfung muss sowohl nach der Fertigstellung des MID-Substrates als auch während/nach der Montage der Bauelemente erfolgen. Das MID-Substrat ist auf Fremdmetallisierung, Vollständigkeit der Leiterbahnen, Delaminationen, Kurzschlüsse und Leiterbahnrisse zu prüfen. Die weitere Prüfung umfasst u. a. die Inspektion der Bauelemente (z. B. Position, Polarität) und der Lötstellen (z. B. Tombstone, Abfließen des Lotes). [5]

Absicherung der Langzeitzuverlässigkeit

Für eine hohe Langzeitzuverlässigkeit sind insbesondere thermische Wechselbelastungen für MID-Teile aufgrund des hohen CTE äußerst kritisch. Dabei kommt es zwischen Schaltungsträger, Verbindungsstelle und Bauelement zu thermomechanischen Spannungen, die zu kritischen Ausfällen führen können [134][142][208]. Typische Schadensmechanismen in der MID-Technik sind beispielsweise ein Riss in der relativ dünnen und rauen Leiterbahn oder ein Defekt in der Lötverbindung, begünstigt durch das

starke Entnetzen der Lötstelle bei Baugruppen ohne Lötstopplack. Die Zuverlässigkeit thermoplastischer Schaltungsträger wird derzeit fast ausschließlich experimentell durch Umwelttests zur beschleunigten Alterung mit den Belastungsarten Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Vibration gemäß den Standards aus der Leiterplattentechnik bzw. den Vorgaben der OEM abgesichert. Typischerweise werden Prüfungen mit zeitlicher Begrenzung, Sudden-Death-Prüfungen und End-of-Life-Tests unterschieden. Die Bewertung der Zuverlässigkeit erfolgt mittels statistischer Auswertung. Die Bestimmung der charakteristischen Lebensdauer kann, basierend auf Lebensdauerprognosen in der Standard-Elektronikproduktion, mittels Weibull-Analyse erfolgen [171]. Die charakteristische Lebensdauer α definiert die Lage der Verteilungsfunktion bezüglich der Zeitachse. Eine Ausfallwahrscheinlichkeit von 63,21 % wird hierbei als die charakteristische Lebensdauer bezeichnet und als Mittelwert der Verteilung verstanden. Eine Beschreibung unterschiedlicher Ausfallverhalten hinsichtlich der Gesamtlebensdauer erfolgt mit der sogenannten Badewannenkurve. Der Formfaktor β ermöglicht eine Einteilung in Frühausfälle ($0 < \beta < 1$), zufällige Ausfälle ($\beta = 1$) und Ermüdungs- bzw. Verschleißausfälle ($\beta > 1$). [36]

Zur Absicherung der Langzeitzuverlässigkeit wird aber auch bei MID-Baugruppen zunehmend die thermomechanische Simulation erforderlich. Hier kann eine Optimierung des MID-Substrates (z. B. Füllverhalten, Bindenahtlage, Materialorientierung), der Metallisierung (z. B. Spannungen, Rissbildung) sowie der Verbindungstechnik (z. B. Ausfallursachen, Lebensdauer) erfolgen [71]. Durch Kopplung einer Spritzgussimulation mit einer strukturellen Simulation werden Modelle erstellt, die das komplexe richtungs- und ortsabhängige Materialverhalten nachbilden [51]. Lebensdauer- und Zuverlässigkeitsmodelle können somit die Entwicklungszeit und -kosten deutlich reduzieren. [72][142][161]

2.2 Technologie- und Marktanalyse im globalen Vergleich




Im Rahmen der MID-Studien 2003 und 2006 wurde die Technologie MID intensiv analysiert und das Marktpotenzial sowie die Technologiepotenziale ausführlich dargestellt. Die Studien haben gezeigt, dass eine Vielzahl an Argumenten für die Einführung der Technologie MID sprechen [55][59]. Dennoch haben zahlreiche Barrieren das prognostizierte Marktwachstum bislang verhindert. Die Anzahl an Serienapplikationen hat in der Zwischenzeit signifikant zugenommen. Produktfelder und Anwendungsbereiche haben sich deutlich erweitert. Dadurch konnten sich MID-Anlagenhersteller und MID-Fertiger am Markt etablieren und hohe Umsätze generieren [50]. Im Folgenden werden die aktuellen Entwicklungen und wesentlichen Trends vorgestellt.

2.2.1 Produktfelder und Anwendungsbereiche

Der Bereich Automotive ist mit zahlreichen Serienapplikationen ein wesentlicher Treiber der MID-Entwicklung. Die Technologie MID wird aber auch verstärkt in der Medizin-

technik, in der Industrieautomatisierung, besonders in der Mess-, Steuer- und Regelungstechnik sowie in der IT- und Telekommunikation eingesetzt (Tabelle 5). Weitere wichtige Branchen mit großem Anwendungspotenzial sind sowohl die Luft- und Raumfahrt als auch die Militärtechnik. Die Bereiche Haushaltsgeräte und Konsumer sind derzeit noch von untergeordneter Bedeutung [50].

Tabelle 5: Serienapplikationen in MID-Technik aus den Marktsegmenten Automotive, Medizintechnik und Industrieautomatisierung

	Drucksensor	Multi LED	Leuchtmodul
			
	Bild: Robert Bosch GmbH	Bild: 2E mechatronic GmbH & Co. KG	Bild: HARTING AG Mtronics
Herstellungsverfahren	Zweikomponentenspritzguss	Laserdirektstrukturierung	Laserdirektstrukturierung
Material	LCP/LCP	LCP	LCP
Stückzahl	> 10 Mio. p. a.	70.000 p. a.	k. A.
Anwendungsgebiet	Automotive	Medizintechnik	Industrieautomatisierung

Automotive

Die Forderungen der Automobilindustrie nach erhöhter Sicherheit, moderner Kommunikations- und Informationstechnik bei zeitgleicher Umweltverträglichkeit werden vor allem durch die Integration elektronischer Systeme, beispielsweise von Steuergeräten (ESP, Motorsteuerung) oder Sensoren, unterstützt [43][78]. Die zunehmende Beherrschung der Technologie MID ermöglicht die Verarbeitung kleinster Bauelemente, so dass miniaturisierte Lösungen mit umfangreicher Funktionalität ihren Platz in dezentralen Systemen finden. Dadurch lässt sich für vielfältige Anwendungen die „vor-Ort-Intelligenz“ steigern. Die hohen Anforderungen der Automobilindustrie an die Zuverlässigkeit von MID können erfüllt werden. Werkstoffe (Substratmaterialien, Verbindungsmedien) sind auch für Anwendungen bei höheren Temperaturen, beispielsweise im Motorraum, entwickelt [97][167]. Der hohe Kostendruck der Automobilindustrie fordert darüber hinaus, dass MID-Teile in wirtschaftlicher Hinsicht eine vorteilhafte Alternative zu konventionellen Lösungen darstellen [50].

Medizintechnik

Der allgemeine Erkenntnisgewinn im Bereich der medizinischen Forschung fordert entsprechend leistungsfähigere technische Geräte. Hinzu kommt der demografische Wandel mit einer steigenden Nachfrage nach innovativen und günstigen Geräten. Die Technologie MID wird hier beispielsweise für audilogische Geräte eingesetzt. Bei idealer

Anpassung an den vorgegebenen Einbauraum wird zur optimierten Lokalisierung von Geräuschquellen eine räumliche Ausrichtung der Mikrofone ermöglicht. Ein weiterer Anwendungsbereich ist ein Disposable für die Bioanalytik zur elektronischen Auswertung von flüssigen Medien. Das MID integriert hier einen mikrofluidischen Kanal und den Auswertechip. Der Zweikomponentenspritzguss ermöglicht eine kostengünstige Fertigung bei hohen Stückzahlen.

IT- und Telekommunikation

In der IT- und Telekommunikation wird die Technologie MID bislang hauptsächlich für Smartphones eingesetzt. Die Fertigung der MID-Antennen wird in Millionenstückzahlen gemäß der vorgegebenen Struktur einer Handyschale realisiert. Funkstandards, wie z. B. WLAN, Bluetooth, UMTS oder LTE können abgebildet werden. Zunehmend werden auch mobile Rechner mit LDS-Antennen ausgestattet. Die Antennen mit einer Länge bis zu 300 mm ermöglichen eine Verlagerung des Einbauraums der Antennenmodule direkt ins Gehäuse und somit flachere und leichtere Gesamtsysteme. [140]

Industriearomatisierung

Die MID-Technik unterstützt hier vor allem den Bereich intelligenter Sensorkonzepte und Beleuchtungsmodule durch die räumliche Anordnung von Sensorchips oder LEDs. Ferner können MID auch für RFID-Antennen mit hoher Reichweite durch die dreidimensionalen Antennenstrukturen zur kontaktlosen Signalübertragung eingesetzt werden. [76][114]

Allgemein betrachtet sind die Sensortechnik und die Antennentechnik aktuell die bedeutendsten Anwendungsbereiche. MID-Sensoren zeichnen sich durch beliebige Komplexität und hohe Funktionsintegration aus. Eine exakte Anordnung bzw. Ausrichtung der mechanischen und elektrischen Komponenten wird ermöglicht und bestehende Sensorkonzepte können deutlich miniaturisiert werden. Eine große Anzahl an MID-Sensorapplikationen, z. B. Stromsensoren, Drucksensoren, Lichtsensoren, verdeutlichen dies. MID-Antennen werden insbesondere im Mobilfunksektor eingesetzt. Die Anwendungen sind meist wenig komplex und werden mit Standardkunststoffen, z. B. PC-ABS, in sehr hohen Stückzahlen realisiert. Der Bereich der optischen Funktionen bietet zukünftig großes Potenzial im Bereich der Beleuchtungstechnik, z. B. durch die definierte Anordnung der LEDs oder die verschiedenen Möglichkeiten der Wärmeableitung, aber auch hinsichtlich der Integration von Lichtwellenleitern zur Datenübertragung. [50]

2.2.2 Technologieschwerpunkte in den Regionen Europa, USA und Asien

In den USA wurden sehr früh MID-Projekte mit großen Stückzahlen zielstrebig umgesetzt. Nach einer turbulenten Phase mit diversen Übernahmen folgte eine starke Konzentration auf den Mobilfunkmarkt auf Basis des Zweikomponentenspritzgusses und

der Laserdirektstrukturierung (Abbildung 10). In der Zwischenzeit haben die großen MID-Fertiger Produktionskapazitäten verstärkt nach Asien verlagert.

Die MID-Entwicklung in Europa ist geprägt von einer wachsenden Anzahl an Unternehmen, die sich an der Gemeinschaftsforschung beteiligen und für eine sehr gute wissenschaftliche Basis sorgen. Alle wesentlichen MID-Verfahrenstechniken sind verfügbar. Speziell das LPKF-LDS®-Verfahren hat in den letzten Jahren zu einer deutlichen Belebung des MID-Marktes in Europa geführt. Es ist umfangreiches Prozess-Know-how vorhanden und komplexe Anwendungen werden in Serie, zum Teil in sehr großen Stückzahlen, realisiert. Die Anzahl anspruchsvoller MID-Projekte in bestückter Ausführung, auch für den Automotive-Bereich, belegt das hohe Niveau der MID-Entwicklung in Europa. Die Lieferkette mit nur wenigen Komplettanbietern aller Fertigungsschritte muss ausgebaut werden.

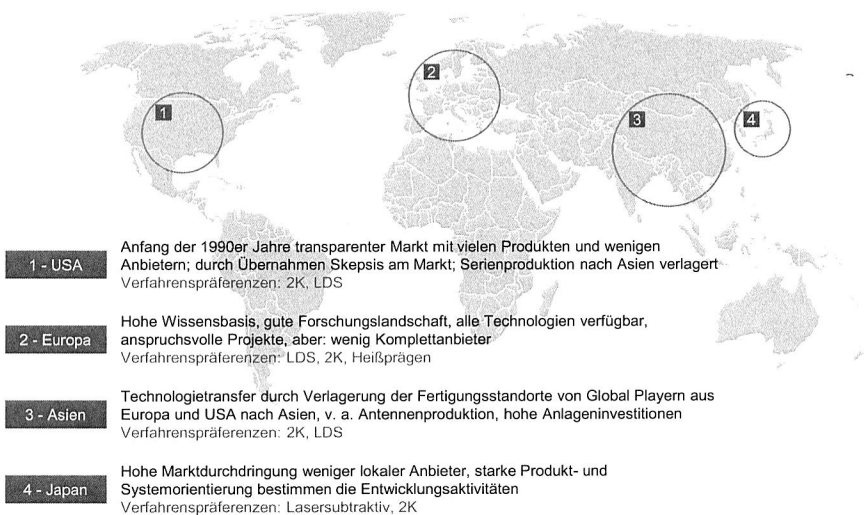


Abbildung 10: Verfahrenspräferenzen und Schwerpunkte der einzelnen Regionen [50]

In Japan ist die Verfahrensentwicklung von einer starken Fokussierung auf den produktorientierten Einsatz der Technologie durch wenige MID-Fertiger geprägt. Das Hauptaugenmerk liegt vor allem in der Funktionsintegration und Miniaturisierung von Produkten aus einheimischer Entwicklung. Die Verfahrenspräferenzen sind der Zweikomponentenspritzguss und die subtraktive Laserstrukturierung. Das übrige Asien mit China, Taiwan und Korea profitiert vom Technologietransfer aus USA und Europa sowie der Risikobereitschaft der Unternehmer. Infolge der zunehmenden Globalisierung und dem Kostendruck haben die großen Zulieferer für Mobilfunkantennen ihre Fertigungen

zu einem Großteil in Asien platziert. Hohe Stückzahlen im Mobilfunkmarkt haben zu erheblichen Investitionen in die Anlagentechnik der Laserdirektstrukturierung und des Zweikomponentenspritzgusses geführt.

2.2.3 Internationale Marktentwicklung

Im Rahmen der durchgeführten MID-Studie 2011 haben die bedeutenden MID-Hersteller keine verlässlichen Zahlen zu getätigten Investitionen und den erzielten Umsätzen in der Technologie MID zur Verfügung gestellt. Eine relativ genaue Abschätzung des Marktvolumens ist im Bereich der LDS-Technologie auf Basis der weltweit verkauften Lasermaschinen (Abbildung 11) seit der Installation des ersten Systems in 2004 möglich. Innerhalb von sieben Jahren haben die MID-Hersteller bis 2011 über 60 Millionen Euro in die Laseranlagentechnik investiert. Der Hauptanteil entfällt durch die Investitionen in Laseranlagen zur Strukturierung von MID-Teilen auf Asien. In China stehen mit 81 ML3D 160-, 76 Fusion3D 6000-, 6 Fusion3D 1000- und 2 Fusion3D 1500-Systemen die meisten Anlagen. Für den Aufbau einer MID-Fertigungslinie sind aber weitere Investitionen (Spritzguss, Metallisierung, Montage, Qualitätssicherung) notwendig. [50]

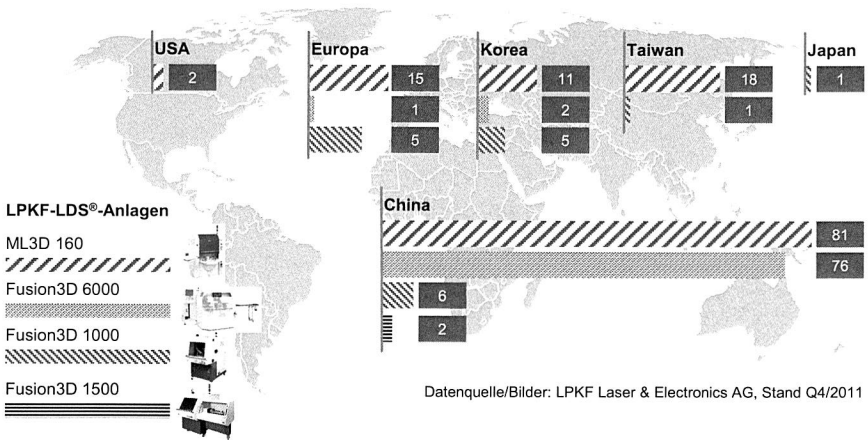


Abbildung 11: Schwerpunkt der MID-Fertigung am Beispiel der weltweiten Verteilung der LPKF-LDS®-Anlagen

Das Marktsegment mit den höchsten Stückzahlen ist derzeit die Telekommunikation. Schwerpunkt der Fertigung ist Asien mit klarem Fokus auf Antennen für Smartphones. In Europa dominiert die Automobilindustrie mit technologisch anspruchsvollen Anwendungen. Weitere Applikationen werden vor allem in der Medizintechnik umgesetzt. Der Großteil der Serienteile wird in der LDS-Technologie realisiert. Eine Analyse erfolgrei-

cher MID in [50] zeigt, dass derzeit fast 60 % aller Anwendungen in der LDS-Technologie und 20 % im Zweikomponentenspritzguss hergestellt werden. Die subtraktive und semiadditive Laserstrukturierung sowie das Heißprägen werden nur für Anwendungen mit spezifischen Anforderungen eingesetzt. Insbesondere das Verfahren MIPTEC ist auf den japanischen Markt fokussiert.

2.2.4 Spritzgegossene Schaltungsträger im Umfeld der Elektronikproduktion

Die dargestellten Potenziale der Technologie MID zeigen die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten bei der Realisierung mechatronischer Systeme oder elektronischer Anwendungen. Die stetige Veränderung in der konventionellen Elektronikproduktion schreitet parallel hierzu weiter voran. Veränderungen ergeben sich vor allem hinsichtlich Miniaturisierung und Funktionalität, die eine Systemintegration auf Bauelement- und Baugruppenebene erfordern. Die enorme Integrationsdichte sowie sich verändernde Einsatz- und Herstellungsbedingungen führen zu steigender thermischer, mechanischer und chemischer Belastung. Gleichzeitig erhöhen sich die Anforderungen an die Zuverlässigkeit bei immensem Kostendruck. Die wesentlichen Trends sind in Abbildung 12 veranschaulicht. [15][179][203][204]

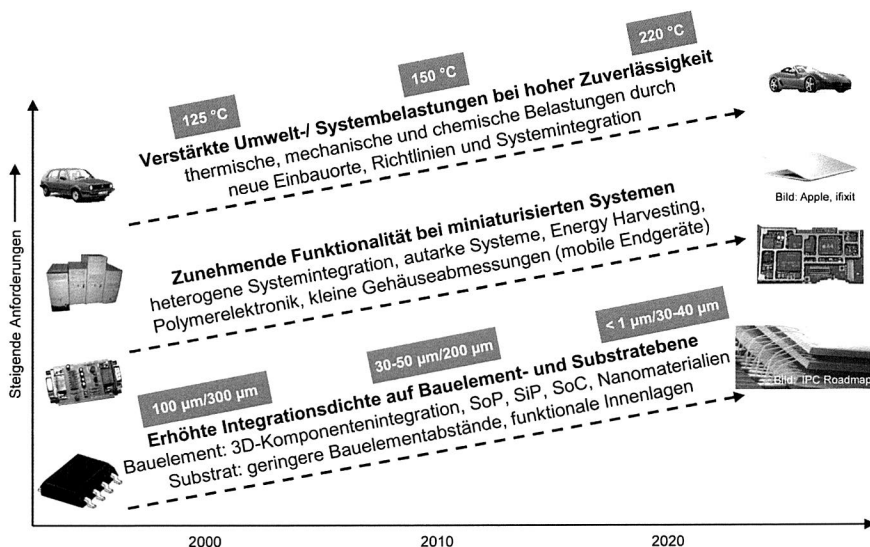


Abbildung 12: Trends im Umfeld der Elektronikproduktion

Im Vordergrund steht die weitere Miniaturisierung auf Bauelementebene. Ausgehend von reinen SMD-Bauelementen mit minimalen Gehäuseabmessungen von 0,4 mm * 0,2 mm (CR01005) und Single-Chip-Bauelementen (z. B.: Ball Grid Array,

Quad Flat Package) mit Rastermaßen von 0,4 mm erfolgt eine funktionale Integration in der Halbleitertechnik (SoC – System on Chip). Der Siliziumchip wird hierbei auf einem Leadframe verklebt und mittels Drahtbonden kontaktiert oder direkt auf einem Interposer verlötet [77]. Darüber hinaus geht es auch um die funktionale Integration auf und in Substraten (SiP – System in Package bzw. SoP – System on Package) sowie die 3D-Komponentenintegration (Die-Stacking oder Package-Stacking) und die Nutzung unterschiedlicher Technologien in einem System. Auf Baugruppenebene werden, bedingt durch die Entwicklung auf Bauelementebene und die reduzierten Bauelementabstände, Strukturgrößen im Bereich 30-40 μm angestrebt [141]. Neben der Weiterentwicklung alternativer Oberflächenmetallisierungen (z. B.: chem. Ag, Ni/Pd/Au) und neuer Substratmaterialien zur Verbesserung der thermischen und mechanischen Eigenschaften stehen mehrlagige Aufbauten mit funktionalen Innenlagen (z. B. optische Leiter, eingebettete aktive und passive Komponenten) im Fokus. [158][179][204]

Diese technologischen Entwicklungen beeinflussen in zunehmendem Umfang auch die Technologie MID. Mehrlagige Aufbauten sind mit spritzgegossenen Schaltungsträgern nicht möglich. Eine Strukturierung und Metallisierung sowie Durchkontaktierungen bei dünnen Wandstärken können nur auf Ober- und Unterseite erfolgen. Ein wissenschaftlich untersuchter Ansatz zur Realisierung von Multilayer-MID wird in [102] beschrieben, ist aber aus fertigungstechnischen Gründen in der Industrie bislang nicht realisiert. Eine weitere Einschränkung ergibt sich in Bezug auf die minimal erreichbaren Leiterbahnbreiten und -abstände. In Kapitel 2.1.2 werden die Grenzwerte der jeweiligen Herstellungsverfahren aufgeführt. Eine Verarbeitung von Bauelementen mit Strukturgrößen von 30 μm wie in [179] ist demzufolge bislang nicht möglich und erfordert eine Verlagerung der Komplexität auf die Bauelementebene (SiP, SoP) oder eine Kombination von Leiterplatte und MID. Die derzeit industriell umgesetzten Prozessketten mit rein chemischer Metallisierung sind vor allem bei den additiven Prozessen der Laserdirektstrukturierung und dem Zweikomponentenspritzgießen nur für Anwendungen mit Signalströmen geeignet. Die geringen Schichtdicken ermöglichen keine hohe Stromtragfähigkeit. In [101] ist ein Ansatz zur galvanischen Nachverstärkung dargestellt, der allerdings eine aufwändige Nachbearbeitung zur Trennung der elektrischen Verbindungen erfordert und daher industriell nur vereinzelt eingesetzt wird. Entscheidend ist, dass die Technologie MID mit den in Kapitel 2.1.1 aufgeführten Nutzenpotenzialen zum Einsatz kommt und nicht als Konkurrenztechnologie zu den konventionellen Verfahren betrachtet wird.

2.2.5 Technologische Trends

Patente sind ein bedeutender Indikator für den technologischen Fortschritt innerhalb eines Technologiefeldes und dienen zur technologischen Früherkennung [201]. Durch Experteninterviews und die Analyse aktueller Forschungsprojekte verfeinert sich das Bild der derzeitigen Entwicklungen und wissenschaftlicher Schwerpunkte. Eine Patentanalyse in der Technologie MID im Zeitraum der Jahre 2006 bis 2009 zeigt einen

stetigen Anstieg der Patentanzahl. Über 40 % der recherchierten Patente wurden erst im letzten betrachteten Jahr angemeldet. Der Trend zu verstärkter Erfindungstätigkeit unterstreicht die Meinung der Experten, die die Bedeutung von MID als sehr hoch einschätzen und mit einer starken Zunahme an Applikationen rechnen. [52]

Ein Fokus auf bestimmte Anwendungsbereiche ist mit Ausnahme der direkten Integration der leitenden Strukturen in das Gehäuse nicht erkennbar. Sensoren, optische Applikationen, Steckverbinder oder Antennenstrukturen sind in etwa gleichverteilt. Eine Analyse anwendungsbezogener Patente hinsichtlich der erzielbaren Nutzenpotenziale zeigt, dass die Funktionsintegration durch Schnittstellenreduzierung im Vordergrund steht. Die verfahrensbezogenen Patente belegen, dass weiterhin neue Verfahren entwickelt werden. Dies verdeutlicht, dass die Technologie MID immer noch als Schrittmachertechnologie einzustufen ist. Vor allem in jüngster Zeit stehen zunehmend auch die Optimierung der Prozesssicherheit und die Produktivitätssteigerung im Mittelpunkt. [50]

Forschungsinstitute und Industrieunternehmen in Europa, vor allem in Deutschland, forcieren die meist industrienah ausgerichteten Forschungsaktivitäten. In diesem Bereich kristallisiert sich heraus, dass die Fragestellungen verstärkt auf eine Verbesserung der Fertigungsprozesse bezüglich Geschwindigkeit und Zuverlässigkeit abzielen sowie sehr anwendungsspezifisch ausgerichtet sind. Beispielsweise werden die Optimierung der 3D-Montage mit Nutzenträgertechnologie, die MID-Herstellung mittels Reel-to-Reel, die Integration mehrerer Laserköpfe in eine Anlage, thermisch leitfähige, biokompatible oder farbige Kunststoffe sowie Chipmontagetechnologien betrachtet. Ein weiterer wesentlicher Punkt ist die Standardisierung der Technologie und die Entwicklung entsprechender branchenübergreifender und allgemein gültiger Prüfkriterien und Spezifikationen. [50][52][89][100][152][159][180]

2.3 Handlungsfelder zur Steigerung der Einsatzmöglichkeiten der Technologie MID

Die bisherigen Ausführungen zeigen, dass für eine weitere Marktdurchdringung der Technologie MID Entwicklungen entlang der Prozesskette im Bereich des Engineering, der Substratmaterialien, der Schaltungsträgerherstellung, der Verbindungstechnologie, der 3D-Montage sowie der Qualität und Zuverlässigkeit erforderlich sind. Die in den folgenden Kapiteln dargestellten Untersuchungen greifen diese Herausforderung auf und liefern einen Beitrag zur Erschließung neuer Einsatzfelder und einer schnellen Umsetzung innovativer Produktideen vor diesem Hintergrund.

Schutz von MID-Baugruppen für den Einsatz unter extremen Umweltbedingungen

Die Anforderungen an elektronische Baugruppen hinsichtlich Gebrauchs- und Herstellungsbedingungen haben sich enorm verändert. Die Nachfrage nach Baugruppen, die auch bei extremen Umweltbedingungen eine sichere Funktion gewährleisten, steigt

durch neue Einbauorte, zunehmende Integrationsdichten, gesetzliche Bestimmungen und steigende Zuverlässigkeitsanforderungen [44][97]. Der Einsatz von MID ist bislang auf Bereiche mit geringen Umweltbelastungen beschränkt. Durch die Qualifizierung neuer Materialien, insbesondere für den LDS-Prozess, können neue Anwendungsfelder erschlossen werden und somit werden entsprechende Fertigungsverfahren zum Schutz der Leiterbahnen und Bauelemente vor Medieneinflüssen sowie hohen thermischen und mechanischen Belastungen erforderlich [76].



Abbildung 13: Die Schwerpunkte der Arbeit ergeben sich aus den technologischen Entwicklungen und den Marktanforderungen

Ein vielversprechender Ansatz ist das Einhausen der MID im Montagespritzguss zum Schutz der elektrischen bei gleichzeitiger Erweiterung der mechanischen Funktionalität. Schwerpunkt der Forschungsarbeit in Kapitel 3 ist es daher, Kenntnisse über mechanische (Druck- und Scherbelastungen) und thermische Belastungen der elektronischen Komponenten und Verbindungsstellen während des Überspritzens und im Feldeinsatz durch angepasste Umwelttests zu gewinnen. Durch eine Variation von Leiterbahnlayout, Bauelementart, geometrische Auslegung des Testkörpers und Werkstoffauswahl werden entsprechende Gestaltungsrichtlinien entwickelt. Der Effekt der thermomechanischen Spannungen durch die unterschiedlichen CTE-Werte wird bei diesem Sandwichaufbau verstärkt. Hierzu werden modellbasierte Berechnungen zur Verifizierung der experimentell ermittelten Schadensmechanismen durchgeführt.

Zuverlässigkeit mikromechatronischer Systeme mit Chip auf MID

Die Bedeutung der Technologie MID als multifunktionales 3D-Package nimmt kontinuierlich zu [99][113]. Insbesondere durch die Verbreitung der LDS-Technologie mit feinen Strukturierungsmöglichkeiten erweitert sich das Bauteilspektrum für MID-Teile um Chips mit feinen Anschlussstrukturen. Allerdings werden derzeit meist kleine Chips mit wenigen Kontakten verarbeitet, da sich aufgrund der thermoplastischen Substratmaterialien

ein Verbund mit teils sehr unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten ergibt. Die Absicherung der Zuverlässigkeit erfolgt mittels beschleunigter Umwelttests; Lebensdauermodelle und die Kenntnis entsprechender Schadensmechanismen sind nicht bekannt. Die Folge sind lange Entwicklungszyklen, da Zuverlässigkeitsaussagen nur anhand von realen Testbaugruppen getroffen werden können.

Die Realisierung einer langzeitzuverlässigen Verbindung mit Chip auf MID erfordert jedoch umfangreiche Erkenntnisse über ein MID-gerechtes Design anhand von experimentell ermittelten und thermomechanisch berechneten Spannungen in Abhängigkeit von Materialparametern, der Verbindungstechnik und Umwelteinflüssen. Ziel des Kapitels 4 sind daher Zuverlässigkeitsaussagen über den Verbund von Chip auf MID. Mit einem membranbasierten mikromechanischen Sensorchip und entsprechender Messtechnik können die durch das Packaging auftretenden Spannungen in-situ messtechnisch erfasst werden. Schwerpunkt der Untersuchungen ist der Vergleich unterschiedlicher Drahtbond- und Flip-Chip-Technologien auf verschiedenen spritzgegossenen thermoplastischen Substraten. Als Referenz werden auch FR4-Substrate untersucht. Abschließend erfolgt eine Gegenüberstellung der berechneten und experimentell ermittelten Daten.

Rapid Prototyping von 3D-MID

Aufgrund der zunehmenden geometrischen und funktionalen Anforderungen an MID-Teile gewinnt die Herstellung funktionaler Prototypen an Bedeutung. Die Konzeptionsphase ist eine höchst sensible Phase bei der Entscheidung für oder gegen eine MID-Lösung. Unterstützt wird dies durch die Forderung des Marktes nach kurzen Entwicklungszeiten. Zur Herstellung spritzgegossener Schaltungsträger mit den serienerprobten Herstellungsverfahren sind abformende Werkzeuge nötig. Folglich ist eine schnelle und kostengünstige Realisierung von Prototypen nur bedingt möglich. Daher besteht Bedarf an Lösungen für das wirtschaftliche 3D-MID-Prototyping und gegebenenfalls auch an Methoden zur Fertigung kostengünstiger Kleinserien. Die Kombination aus generativen Fertigungsverfahren und Drucktechnologien zeigt hier großes Potenzial.

In Kapitel 5 wird die Realisierung von 3D-MID-Prototypen mittels Stereolithografie und Aerosol-Jet-Technologie untersucht. Hochtemperaturbeständige Stereolithografieharze werden mit katalytischen Tinten für eine anschließende nasschemische Metallisierung bzw. mit direkt leitfähigen Werkstoffen bedruckt und elektronische Bauelemente mit angepasster Verbindungstechnologie montiert. Erforscht wird insbesondere, inwieweit Aushärtezeit, Plasmabehandlung und Prozessparameter einen Einfluss auf qualitätsbestimmende Größen wie Leiterbahngeometrie, Haftfestigkeit und elektrische Leitfähigkeit haben. Erste Aussagen zur Zuverlässigkeit des Verbundes werden durch entsprechende Umwelttests erzielt. Das Ableiten von Gestaltungsrichtlinien für das Bedrucken dreidimensionaler Substrate ist ein weiterer Schwerpunkt der Untersuchungen.

MID im Innovationsumfeld der Unternehmen

Trotz der zahlreichen Potenziale und der erfolgreichen Serienanwendungen ist der Einstieg für Unternehmen in die Technologie MID als Anwender oder Hersteller sowie die Umsetzung neuer Produktideen nach wie vor ein schwieriger Prozess. Eine reine Orientierung der Unternehmen nach innen mit einer Qualitäts-, Kosten- und Zeitoptimierung des Kerngeschäfts ist in der Zwischenzeit eine Basisanforderung und kann demzufolge kaum zur Erzielung strategischer Wettbewerbsvorteile ausreichen. Für die Unternehmen wird es aus den genannten Gründen entscheidend sein, mit innovativen Produkten und Prozessen die Wettbewerbsfähigkeit auszubauen.

Fokus des Kapitels 6 ist daher eine allgemeine Betrachtung der Potenziale der Technologie MID zur Erzielung von Wettbewerbsvorteilen. Basierend auf unternehmensexternen Technologieentwicklungen sowie einer technologie- und innovationsorientierten Unternehmensanalyse werden die Möglichkeiten zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit durch räumliche Schaltungsträger und wesentliche Schlüsselfaktoren zur Realisierung erfolgreicher Projekte aufgezeigt.

3 Schutzmechanismen für den Einsatz von MID bei hoher Umweltbelastung

Elektronische Baugruppen werden zunehmend in Systemen mit sicherheitsrelevanten Funktionen und in neuen Einbauorten mit hoher Umweltbelastung eingesetzt. Insbesondere in der Automobilindustrie steigen daher die Zuverlässigkeitsanforderungen. Die Baugruppen müssen auch bei extremen Umweltbedingungen eine sichere Funktion gewährleisten. Spritzgegossene Schaltungsträger werden derzeit nur eingeschränkt in diesen Bereichen eingesetzt. Durch erfolgreiche Referenzprojekte, verfügbare Informationen über die Langzeitzuverlässigkeit und die Qualifizierung neuer Materialien, vor allem für den LDS-Prozess, können aber neue Anwendungsfelder erschlossen werden. Folglich sind entsprechende Fertigungsverfahren zum Schutz der Leiterbahnen und Bauelemente vor Medieneinflüssen sowie hohen thermischen und mechanischen Belastungen erforderlich. [46][76][170]

3.1 Umweltbelastungen und Elektronikschutz durch Verkapselung

Die Zuverlässigkeit eines elektronischen Systems wird im Wesentlichen durch die Materialien und Komponenten (Substratwerkstoff, Bauelemente, Verbindungsmedien), das Design und die Verbindungstechnik bestimmt, allerdings ist die Lebensdauer auch stark von den Einsatzbedingungen abhängig [197]. Die Baugruppen sind vor allem klimatischen, mechanischen, elektrischen und chemischen Umweltbelastungen ausgesetzt. Im Feld wirken je nach Einsatzort zum Teil mehrere dieser Faktoren gleichzeitig auf eine Baugruppe und erzeugen eine spezifische Form von mechanischem oder thermischem Stress. Dies kann zu einem Fehlverhalten oder Totalausfall der Baugruppe führen. Im Automobil sind beispielsweise primär klimatische Belastungsarten für den Ausfall von Elektroniksystemen verantwortlich (Tabelle 6). Chemische Einflussfaktoren, ausgelöst durch Öle, Fette oder Säuren, sind dagegen nur bedingt die Ursache für einen Fehler. Zu den klimatischen Einflussfaktoren zählen Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Kondensation, Betauung, Regen, Staub, Schadgase, Luftdruck, Sonnenbestrahlung und Salzsprühnebel [106][170]. Hinzu kommt, dass durch die Miniaturisierung, die erhöhten Integrationsdichten und dadurch geringeren Bauelementabstände sowie höhere Leistungsdichten und den Einsatz neuer Substratmaterialien die thermomechanischen Belastungen für elektronische Systeme kritischer werden. [4][11][177]

Durch chemische oder klimatische Belastungen sind elektronische Systeme einer elektrochemischen Korrosion ausgesetzt. Die Korrosion von Metallen wird durch eine chemische Reaktion mit der Umgebung ausgelöst. Dabei werden den Metallatomen Elektronen entzogen und das Metall oxidiert. Die elektrochemische Migration ist in diesem Zusammenhang eine der häufigsten Ausfallursachen. Unter dem Einfluss einer ionisierten Flüssigkeit kommt es zur Ausbildung von Kurzschlussbrücken, sogenannten Dendriten, zwischen den metallisierten Leiterbahnen oder Lötstellen. Folge der Metallbewe-

gung zwischen Anode und Kathode ist eine Abnahme des Oberflächenisolationswiderstandes und ein damit verbundener Leckstrom. [105][106][170]

Tabelle 6: Belastungsprofile der KFZ-Elektronik in verschiedenen Einbauräumen [191]

Umgebungsbedingungen "vor Ort"			
Beispiel	Steuergerät	Steuergerät	Sensoren
Klassifikation	unter der Haube	am Motorblock	am Motorblock
Temperatur	-40 °C bis +125 °C	-40 °C bis +150 °C	-40 °C bis +175 °C
Vibration, typisch	bis 3 g	bis 10 g	bis 40 g
Schock, typisch	bis 20 g	bis 30 g	bis 50 g
Feuchte	bis 100 % rLF, Spritzwasser, Betauung		
Medien	Salze, Schadgase, Staub		

Thermisch-mechanisch induzierte Belastungen führen klassischerweise zu Gewaltbruch, Low-Cycle-Fatigue oder High-Cycle-Fatigue. Ein Gewaltbruch ist eine Folge von Überlastung bei kurzzeitig sehr hoher mechanischer Belastung. Folge ist beispielsweise ein Bruch keramischer Bauelemente. Low-Cycle-Fatigue wird durch Temperaturwechsel (Umgebungstemperatur oder Verlustwärme) aufgrund unterschiedlicher CTE der Werkstoffe verursacht. Typisch für diese Belastungsart ist, dass die Verbindungsstelle belastet wird, obwohl hier das Problem nicht verursacht wird. Bei relativ geringen Spannungs- und Dehnungsamplituden und hohen Lastspielzahlen ($> 10^5$ Zyklen) kommt es zu einer Ermüdung der Baugruppe (High-Cycle-Fatigue). Ursache hierfür sind beispielsweise betriebsbedingte Vibrationen des Motors. Dieser Ausfallmechanismus ist vor allem bei Bauelementen mit Leadframes zu beobachten, flächig verlötete Bauelemente sind weniger anfällig. [175][197]

Die Beschichtung (Coating) bzw. die Verkapselung elektronischer Systeme auf Bauelement- und Baugruppenebene dienen der elektrischen Isolation, dem Schutz der Bauelemente bzw. Silizium-Chips und der Anschlussstrukturen vor mechanischen Einflüssen wie Stößen, Fremdkörpern oder Staub, dem Schutz vor dem Eindringen von Feuchtigkeit, Wasser und korrosiven Medien sowie dem Ausgleich unterschiedlicher thermischer Ausdehnungskoeffizienten zwischen Substrat und Chip. Eine Einteilung in verschiedene Schutzarten der IP-Codes gemäß Tabelle 7 ist in der Norm DIN EN 60 529 festgelegt [25]. Bei der Realisierung entsprechender Schutzmechanismen ist stets darauf zu achten, dass dadurch keine negativen Effekte für die Baugruppe entstehen. In diesem Zusammenhang sind insbesondere das Überhitzen der Baugruppe durch eine schlechte Wärmeleitfähigkeit des Einbettmaterials, thermischer Stress durch unterschiedliche CTE, eine zu starke Lasterhöhung durch die Masse der Verkapselung, das

Einschleppen von Verunreinigungen oder direkte Belastungen durch den Umhausungs-Prozess zu vermeiden. [3][177]

Der Schutz der elektronischen Schaltung kann durch ein Gehäuse, das Coating mit einem Lacksystem, durch einen Verguss sowie durch werkzeuggebundene Verkapselungsprozesse, z. B. Hotmelt, Transfer Molding oder Montagespritzguss, realisiert werden. Die Bauelemente bzw. die Anschlussstrukturen können zusätzlich auch mit einem Glob Top oder mit einem Underfill geschützt werden. Die Entscheidung für einen bestimmten Schutzmechanismus ist aufgrund der jeweiligen Belastungsart und der Zuverlässigkeitsanforderungen zu treffen. Lacksysteme sind für einen Schutz vor Feuchte und Betauung ausreichend, ein zusätzlicher mechanischer Schutz wird für die Baugruppe dadurch aber nur eingeschränkt erzeugt. Durch das Vergießen der ganzen Baugruppe oder das komplette Umhausen ergibt sich dagegen auch ein entsprechender mechanischer Schutz. Insbesondere der Einsatz von Hochtemperaturthermoplasten als Schutzkomponente ermöglicht Gebrauchstemperaturen bis 270 °C. [3][70]

Tabelle 7: Einteilung der Schutzarten nach DIN EN 60 529 [25]

Code Buchstaben: IP (International Protection)			
Erste Kennziffer: Schutz gegen feste Fremdkörper		Zweite Kennziffer: Schutz gegen Wasser	
Kennziffer	Schutzzumfang	Kennziffer	Schutzzumfang
0	kein Schutz	0	kein Wasserschutz
1	gegen große Fremdkörper	1	gegen Tropfwasser
2	gegen mittelgroße Fremdkörper	2	gegen schräg fallendes Tropfwasser
3	gegen kleine Fremdkörper	3	gegen Sprühwasser
4	gegen kornförmige Fremdkörper	4	gegen Spritzwasser
5	gegen Staubablagerungen	5	gegen Strahlwasser
6	gegen Staubeintritt	6	gegen starkes Strahlwasser
		7	gegen zeitweiliges Untertauchen
		8	gegen dauerhaftes Untertauchen

Für eine gute Verbindung zwischen der elektronischen Baugruppe und dem Schutzsystem und für einen leistungsfähigen Schutzmechanismus ist eine gute Haftung der Verbundpartner folglich Voraussetzung. Oberflächenverunreinigungen zwischen Substrat und Lacksystem, Verguss- oder Moldmasse können die Haftfestigkeit herabsetzen und zu Defekten (z. B. Delaminationseffekte, Rissbildung) führen [105]. Das Reinigen elektronischer Baugruppen wird in der Standard-Elektronikproduktion zur Entfernung von Flussmittelrückständen, Fett, Öl oder Lösungsmittelrückständen vor der späteren Schutzbeschichtung oder vor Verkapselungsprozessen eingesetzt. Besonders Harzrückstände aus der Lotpaste und hygroskopische Verunreinigungen (z. B. Aktivatoren

im Flussmittel) haben großen Einfluss auf die Benetzbarkeit der Oberfläche und damit auf die Haftung. [3][181]

Für nachfolgende Prozesse sind daher entsprechende Maßnahmen zur Oberflächenreinigung bzw. -aktivierung erforderlich, damit Verunreinigungen beseitigt werden und eine gute Benetzbarkeit der Oberfläche erzielt wird [105]. Als Reinigungssysteme werden organische Lösemittel und wasserbasierende Systeme eingesetzt, wobei Letztere aufgrund ökonomischer und ökologischer Vorteile bedeutender werden [181]. Als Alternative zur nasschemischen Reinigung und zur zusätzlichen reaktiven Veränderung der Oberfläche kann Openair®-Plasma eingesetzt werden. Plasma entsteht durch zusätzlichen Energieeintrag in die gasförmige Materie (Abbildung 14). Es bildet sich ein Gemisch aus positiv geladenen Ionen, Elektronen, Neutronen und hoch energetischen Molekülfragmenten. Durch die im Plasma enthaltene Energie werden lange Molekülketten durchtrennt. Gleichzeitig erfolgt eine Anlagerung von Sauerstoff und damit eine Funktionalisierung der Oberfläche [150]. Die neu geschaffenen chemisch reaktiven Gruppen ermöglichen eine signifikante Haftungssteigerung. Allerdings kann mittels Plasma kein anorganischer Schmutz entfernt werden. [31][109][110]

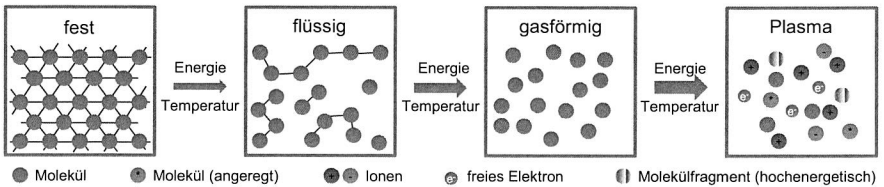


Abbildung 14: Plasma entsteht durch zusätzlichen Energieeintrag aus der gasförmigen Materie [109]

In der Technologie MID sind bislang keine grundlegenden Erkenntnisse zum Schutz der Baugruppen vor Umweltbelastungen bekannt. In [107] werden Untersuchungen zum Umspritzen von Nackchips mit laserstrukturierbaren Thermoplasten vorgestellt. Erkenntnisse zur Belastung der Nackchips im Spritzgussprozess werden erzielt, allerdings wird der reine Nackchip ohne Leiterbahn und Verbindungstechnik gehaust. Die Motivation der Untersuchungen ist der Verzicht auf den notwendigen Prozessschritt der Planarisierung der nasschemisch aufgetragenen Metallisierung. Die Forschungsarbeit in [4] fokussiert das Bauelement und nicht die Baugruppe. Industriell sind bislang zwei Serienapplikationen mit Lacksystemen bekannt. Das Coating schützt hier vor allem vor Feuchtigkeit.

Grundlegende Erkenntnisse zum Schutz der elektronischen Systeme mittels Lackieren, Vergießen etc. können aus der Standard-Elektronikproduktion auf MID unter Berücksichtigung der spezifischen Materialeigenschaften übertragen werden. Für die MID-

Technik bietet sich als Alternative zu den gängigen Schutzmechanismen das Umspritzen mit Thermoplasten an. Dies kann unter Verwendung der gleichen Anlagentechnik wie bei der Herstellung der Basissubstrate realisiert werden. Neben einem mediendichten System mit thermischem Schutz wird gleichzeitig eine mechanisch stabile Baugruppe erzeugt. Die Anwendungen können durch die große Gestaltungsfreiheit des Spritzgussprozesses optimal an den Bauraum angepasst werden. Des Weiteren können mechanische Zusatzfunktionen wie Schnappelemente, Steckerkragen oder Montagehilfen integriert werden. Durch die Verwendung artgleicher Werkstoffe mit identischer thermischer Ausdehnung der beiden Kunststoffkomponenten ist zudem eine höhere Zuverlässigkeit bei Temperaturwechsel wahrscheinlich. Bei Verwendung eines LDS-Werkstoffs als Umspritzkomponente ist prinzipiell auch ein Multilayer möglich.

Die Herausforderung ist die Realisierung eines stoffschlüssigen Verbundes durch Verschweißen an der Kontaktfläche [34]. Die in Tabelle 7 aufgeführten IP-Codes zur Gewährleistung eines mediendichten Systems können mit einer rein formschlüssigen Verbindung durch konstruktive Maßnahmen (z. B. Hinterschneidungen) nicht realisiert werden. Dabei muss im Gegensatz zum klassischen Zweikomponentenspritzguss, bei dem die zweite Komponente unmittelbar nach der ersten eingespritzt wird, das Bauteil nach dem ersten Spritzgussprozess für die Laserstrukturierung, die Metallisierung und die Montage der Bauelemente aus dem Werkzeug entnommen werden. Dadurch kann es zu Oberflächenveränderungen und -verschmutzungen sowie Bauteilverzug kommen. Eine Anpassung der Materialauswahl, der Prozessführung und der Gestaltung des Bauteils ist nur bedingt möglich.

Die experimentellen Untersuchungen in diesem Kapitel zielen daher primär darauf ab, Erkenntnisse über im Montagespritzguss eingehauste Schaltungsträger zu erzielen. Basierend auf grundlegenden Untersuchungen zum Verhalten der Leiterbahnen und der Bauelemente bei der Prozessbelastung des Umspritzens betrachten weiterführende Analysen die Lebensdauer des Verbundes. Zur Qualifizierung der Langzeitzuverlässigkeit werden Umwelttests zur Prüfung der thermischen und mechanischen Stabilität sowie der Mediendichtheit durchgeführt.

3.2 Umhausung räumlicher Schaltungsträger im Montagespritzguss

Für das Umhausen räumlicher Schaltungsträger ist gemäß den Anforderungen des Fertigungsprozesses eine zielgerichtete Werkstoff- und Bauelementauswahl, Bestimmung der Prozessparameter und eine geometrische Auslegung des Probekörpers erforderlich. Daraus resultiert die mechanische, thermische und thermomechanische Belastung der Bauelemente, der Verbindungsstellen sowie der gesamten Baugruppe, insbesondere im Bereich der Grenzfläche zwischen den beiden Kunststoffkomponenten mit den metallisierten Strukturen. Wesentliche Aspekte sind hierbei Einspritz- und Nachdruck, Massetemperatur bzw. Viskosität der Schmelze, Schwindung, Scherkraft und Angriffs-

fläche der Bauelemente, Anschlussstrukturen, Verbindungsmedium, thermische Ausdehnung und Füllstoffgehalt der Werkstoffe, Anspritzrichtung bzw. Faserorientierung, die Dicke der Überspritzung sowie die Integration von Kavitäten oder Schutzwänden. Resultierende Spannungszustände durch Schwindung oder Verzug müssen dabei nicht direkt zu einem elektrischen Ausfall nach dem Umspritzen führen, können aber bei thermischer oder mechanischer Belastung ein erhöhtes Ausfallrisiko darstellen [194].

3.2.1 Fertigungsprozess, Werkstoffe, Bauelemente und Probekörper

Fertigungsprozess

Die Prozesskette für die Verkapselung der Schaltungsträger ist in Abbildung 15 dargestellt. Dem Aufbau des Basissubstrates mit Spritzgießen, Strukturierung und Metallisierung, folgt die Montage der elektronischen Komponenten. Vor der Verkapselung des Schaltungsträgers wird mittels Oberflächenvorbehandlung und/oder Reinigung die Haftung des Verbundpartners verbessert.

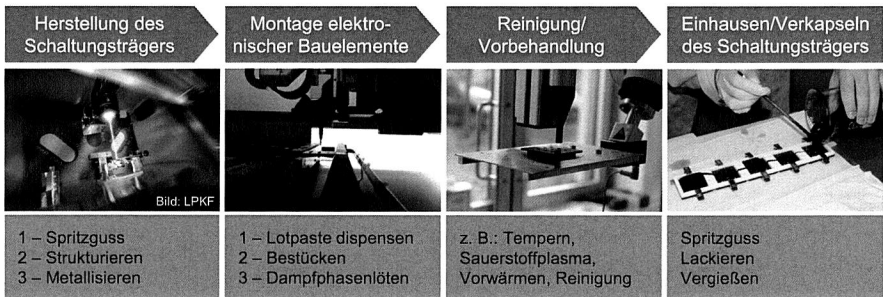


Abbildung 15: Prozesskette zum Aufbau und Schutz räumlicher Schaltungsträger

Die Herstellung des Basissubstrates wird entsprechend dem in Kapitel 2.1.2 dargestellten Prozess der Laserdirektstrukturierung ausgeführt. Der Grundkörper wird aus einem modifizierten Thermoplast im Spritzguss hergestellt. Die Funktionalisierung der Spritzgussteile mit Leiterbahnen erfolgt mittels Laserdirektstrukturierung nach dem LPKF-LDS®-Verfahren. Die mit dem Laser aktivierten Bereiche werden außenstromlos mit Cu/Ni/Au metallisiert. Das Umhausen der Schaltungsträger erfolgt ebenfalls im Spritzgussprozess. Das Spritzgießen wird vom Lehrstuhl für Kunststofftechnik, FAU Erlangen-Nürnberg, im Rahmen eines gemeinsamen Kooperationsprojektes durchgeführt. Ein Teil der Baugruppen wird als Referenz mittels Lackieren und Vergießen für die nachfolgenden Umwelttests geschützt. Tabelle 8 zeigt die Parameter des Spritzgussprozesses für das Basissubstrat und die Überspritzkomponente PA6/6T (unverstärkt, 25 und 35 Gew.-% Glasfaserfüllung). Die Kennwerte sind jedoch stark werkstoffspezifisch. Bei Verwendung des Elastomers TPU als zweiter Komponente ergibt sich beispiels-

weise eine geringere thermische Belastung beim Umspritzprozess bei reduzierter Einspritzgeschwindigkeit [139].

Die Prozesskette zur Bauelementmontage ist dem Ablauf in der MID-Serienfertigung angepasst: Dispensen der Lotpaste, Bestücken der Bauelemente und Dampfphasenlöten. Für das Dispensen der Lotpaste wird ein Schraubendispenser eingesetzt. Die Bestückung wird mit einem Standard-SMT-Bestückautomaten durchgeführt. Das Dampfphasenlöten ermöglicht eine homogene Temperaturverteilung unabhängig von der Komplexität der Baugruppe und erfolgt bei 230 °C in inerter Atmosphäre. Dieses Lötverfahren ist in der MID-Technik das Standardverfahren.

Tabelle 8: *Parameter des Spritzgussprozesses für die grundlegenden Prozessuntersuchungen [70][139]*

	MID-Substrat PA6/6T	Überspritzkomponente PA6/6T (2 mm)
Massetemperatur in °C	310	310
Werkzeugtemperatur in °C	100	100
Einspritzgeschwindigkeit in mm/s	40	40
Nachdruck in bar	300	300
Nachdruckzeit in s	15	15
Kühlzeit in s	20	20

Anpassung der Massetemperatur (315 °C) und Einspritzgeschwindigkeit (60 mm/s) bei Variation Überspritzwerkstoff und -dicke.

Zur Optimierung der Haftung zwischen erster und zweiter Kunststoffkomponente wird der Einfluss der Vorbehandlung der Baugruppen vor dem Überspritzen und der Reinigung nach der Montage der elektronischen Komponenten untersucht. Zur Reinigung der Baugruppen werden wasserbasierende VIGON®-Reiniger eingesetzt. Da grundlegende Kenntnisse zur Reinigung thermoplastischer LDS-Schaltungsträger fehlen, werden der neutrale Reiniger VIGON® VP 666/1940, der alkalische Reiniger VIGON® A 250 und der angesäuerte Reiniger VIGON® SC 200 getestet. Die Reinigung wird von der Fa. ZESTRON Europe durchgeführt. Die Begutachtung der Baugruppen vor und nach der Reinigung erfolgt mittels optischer Sichtprüfung gemäß IPC-A-610E, statischer Kontaktwinkelmessung, Testtinte zur Bestimmung der Oberflächenspannung, Messung der ionischen Verunreinigung gemäß IPC 650, ZESTRON® Flux Test (Nachweis von Aktivatoren aus Flussmittel) und ZESTRON® Harz-Test (Nachweis dünner Filme an Kolophonium und synthetischen Harzen). Die Reinigung der Baugruppen zeigt die besten Ergebnisse mit dem neutralen Reiniger VIGON® VP 666/1940 [18]. Allgemein ist die Interpretation der Reinigungsergebnisse bei MID aufgrund der dunklen Substratmaterialien schwieriger als bei herkömmlichen elektronischen Baugruppen. Vor dem Überspritzen werden alle Substrate bei 140 °C für eine Stunde getempert, um vorhandene

Spannungen im Kunststoffteil abzubauen [70]. Ein Teil der Schaltungsträger wird zudem vor dem Überspritzen mit Openair®-Plasma mit dem Prozessgas Luft behandelt. Der Einfluss des Vorwärmens der Bauteile auf 100 °C vor dem Umspritzen wird ebenfalls betrachtet.

Spritzgusswerkstoffe, Verbindungsmedien und Bauelemente

Als Basissubstratmaterial für den spritzgegossenen Schaltungsträger wird der laserdirektstrukturierbare Thermoplast PA6/6T ausgewählt. Als Überspritzkomponente kommt ebenfalls ein Thermoplast vom Typ PA6/6T mit 25 Gew.-% Glasfaserfüllung zum Einsatz. Des Weiteren werden ein ungefüllter PA6/6T, ein PA6/6T mit 35 Gew.-% Glasfaserfüllung und ein TPU als Variation der Überspritzkomponente untersucht. Die wichtigsten Eigenschaften der Substratmaterialien sind in Tabelle 9 dargestellt. Für die vergleichenden Untersuchungen werden ein chemisch härtendes Silikon-Dickschicht-Lacksystem auf Basis von Polyorganosiloxan und eine Vergussmasse auf Basis von Polyurethan/Polybutadien ausgewählt. Beide Systeme bieten eine hohe Haftfestigkeit auf nicht-metallischen Oberflächen ohne zusätzliche Haftmittel (self-priming). Der Lack und das Vergussmaterial weisen eine hohe Elastizität zur Reduzierung auftretender Materialspannungen bei Temperaturwechselbelastung auf. Gemäß den Herstellerangaben sind die beiden Systeme für die Temperaturbereiche von -40 °C bis +150 °C geeignet und zeichnen sich darüber hinaus durch eine hohe chemische Beständigkeit aus.

Tabelle 9: *Eigenschaften der Spritzgusswerkstoffe [117][124][125][126][127]*

	Substrat- werkstoff	Überspritz- werkstoff 1	Überspritz- werkstoff 2	Überspritz- werkstoff 3	Überspritz- werkstoff 4
	PA6/6T (LDS)	PA6/6T	PA6/6T	PA6/6T	TPU
Füllstoffanteil	GF10M25	GF25	GF35	unverstärkt	unverstärkt
CTE (x/y) in ppm/K	30/50	25/50-60	15/50-60	60-80	100
Verarbeitungs- schwindung (x/y) in %	0,60/0,80	0,45/1,00	0,30/1,00	0,84/1,12	k. A.





Als Verbindungsmedien werden ein bleifreies SnAgCu-Lot und ein Silber-Leitklebstoff untersucht. Die Kennwerte sind in Tabelle 10 zusammengefasst. Auf die Verwendung von Lötstopplack wird verzichtet, da dadurch die Haftung reduziert werden könnte. Ferner ist es in der Serienfertigung ein zusätzlicher Prozessschritt. Durch die Verwendung von Leitkleber kann auch ohne Lötstopplack ein Abfließen des Verbindungsmediums verhindert und somit gleichmäßig ausgeprägte Verbindungsstellen erzielt werden. Der Leitkleber hat zudem ein wesentlich geringeres E-Modul. Allerdings sind die Abscherkräfte erfahrungsgemäß geringer [103].

Tabelle 10: Kennwerte der Verbindungsmedien

Lotpaste		Leitkleber	
Legierung	Sn95,5Ag4Cu0,5	Matrix	Epoxidharz
Klasse	Typ 3	Füllstoff	Ag
Korngröße	25-45 µm	E-Modul	5.580 MPa
E-Modul	50.000 MPa	T _g	80 °C
Schmelztemperatur	217 °C	CTE	31 ppm/K (T < 80 °C)
		CTE	158 ppm/K (T > 80 °C)

Für die Untersuchungen werden verschiedene Bauelemente, basierend auf den Randbedingungen der Technologie MID und dem Einfluss im Montagespritzguss, ausgewählt. Die Kunststoffschmelze der zweiten Komponente trifft dabei in Abhängigkeit der Bauelementorientierung und -größe auf unterschiedlich große Flächen. Die Abmessungen und Kennwerte der Bauelemente sind in Tabelle 11 aufgeführt. Insgesamt werden vier Bauelemente eingesetzt: zwei 0 Ω-Widerstände mit quaderförmiger Gehäuseform in den Baugrößen CR1206 und CR0603 sowie ein SOT23 und ein SO8 vom Typ Gull-wing mit seitlich abstehenden Leadframes und Daisy-Chain-Verdrahtung.

Tabelle 11: Kennwerte der Bauelemente für die Aufbau- und Verbindungstechnik

Bauelemente				
	CR0603 	CR1206 	SOT23 	SO8 
Breite in mm	0,85 (±0,10)	1,6 (±0,15)	1,30 (+0,20/-0,15)	3,90
Höhe in mm	0,45 (±0,05)	0,55 (±0,05)	0,93	1,50
Länge in mm	1,55 (+0,10/-0,05)	3,20 (+0,10/-0,20)	2,92 (±0,20)	4,90
Fläche parallel in mm ²	0,38	0,88	1,21	5,85
Fläche senkrecht in mm ²	0,69	1,76	2,72	7,35

Probekörpergeometrien und Layoutvarianten

Basis der Untersuchungen ist ein speziell entwickelter 2D-Probekörper. Die erste Komponente (MID-Werkstoff) formt einen 50 mm * 50 mm großen Schaltungsträger mit Verstärkungsrippen auf der Unterseite und einer Substratdicke von 2 mm. Mit der zweiten Komponente wird nach der Metallisierung und Montage der Bauelemente der Bereich der Bauelemente mit einer Größe von 40 mm * 40 mm überspritzt. Der äußere Rand mit den Messkontakten für die elektrische Prüfung bleibt dabei frei. Die Dicke der Überspritzung ist ebenfalls 2 mm. Vergleichende Untersuchungen werden mit einer 4 mm starken Überspritzung durchgeführt. Erste und zweite Komponente werden mit einem Bandanguss verarbeitet.

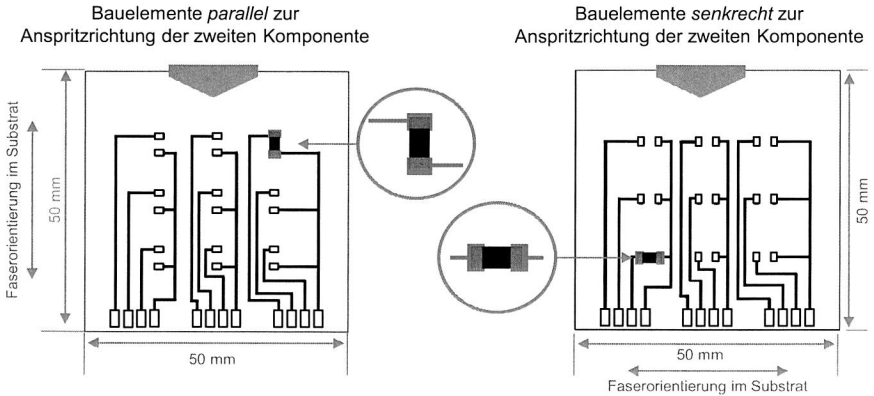


Abbildung 16: Schaltungslayout für das Bauelement CR1206

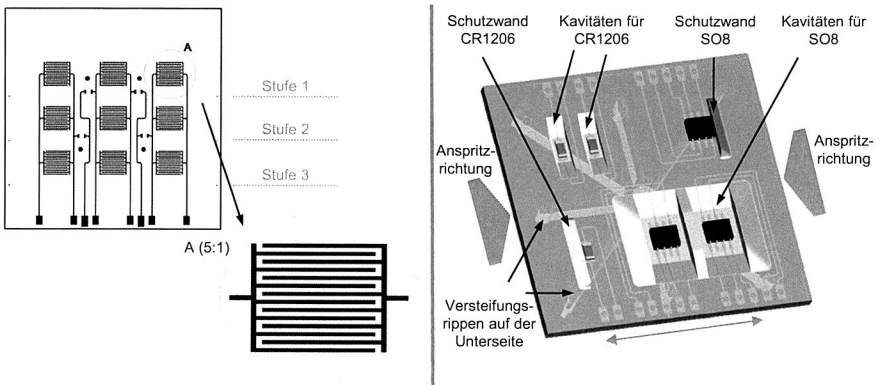


Abbildung 17: Schaltungslayout zur Prüfung der Mediendichtheit mit Mäanderstruktur (links) und der 3D-Gestaltungsmöglichkeiten mit Kavitäten und Schutzwänden (rechts)

In Abbildung 16 ist das Schaltungslayout für den Bauelementtyp CR1206 dargestellt. Das Layout für die Bauelemente CR0603, SO8 und SOT23 ist mit Anpassung der jeweiligen Padgeometrien entsprechend ausgeführt. Auf einem Probekörper werden insgesamt neun Bauelemente platziert. Für beide Layoutvarianten werden die Bauelemente mit der langen Gehäuseseite jeweils parallel (Layout parallel) und senkrecht (Layout senkrecht) zur Spritzgussrichtung der zweiten Komponente aufgebracht. Die Faserorientierung der ersten Komponente ist stets parallel zu der längeren Gehäuseseite der

Bauelemente und damit beim Layout parallel ebenfalls parallel, beim Layout senkrecht hingegen senkrecht zur zweiten Komponente.

Die konstruktive Freiheit des Spritzgießens ermöglicht zum Schutz der Bauelemente auch die Realisierung von 3D-Geometrien mit Kavitäten oder Schutzwänden (Abbildung 17). Durch eine entsprechende Modifikation des Werkzeugs können diese Baugruppen ebenfalls abgebildet werden. Untersuchungen zum Einfluss des Umspritzens auf die laserdirektstrukturierten und nasschemisch metallisierten Leiterbahnen werden mit einem anderen Grundkörper und Testlayout durchgeführt. Die Randbedingungen sind in 3.2.2 beschrieben.

3.2.2 Einfluss des Umspritzens auf laserdirektstrukturierte Leiterbahnen

Zur Verifikation, welchen Einfluss das Umspritzen auf die Eigenschaften der Leiterbahn hat, erfolgen zunächst Untersuchungen an Probekörpern ohne Bauelemente. Das Layout besteht aus Mäanderstrukturen und Strukturen im Winkel von 45° zur Spritzgussrichtung der zweiten Komponente. Jedes Layout umfasst dabei drei Strukturbereiche mit jeweils 1 mm, 200 µm und 100 µm breiten Leiterbahnen, um den Einfluss angussnaher bzw. angussferner Anordnungen und unterschiedlicher Leiterbahngeometrien erfassen zu können. Die Probekörper werden nach der Laserdirektstrukturierung ebenfalls außenstromlos mit Cu/Ni/Au metallisiert. Bei jeder Teststruktur wird der Durchgangswiderstand der jeweiligen Leiterbahn und der Isolationswiderstand benachbarter Strukturen gemessen, um mögliche Beschädigungen der Metallisierung oder auch Kurzschlüsse in Folge von Verschiebungen detektieren zu können.

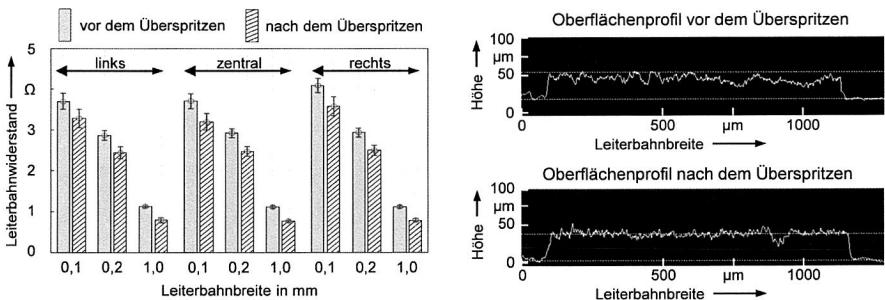


Abbildung 18: Durchgangswiderstand der 45°-Teststrukturen (links) und Oberflächenprofil der überspritzten und nicht überspritzten Metallisierung im Vergleich (rechts)

Die Ergebnisse zeigen keinen negativen Einfluss des Umspritzens auf die Funktionsfähigkeit der Leiterbahnstrukturen. Der Durchgangswiderstand der Leiterbahnen nimmt nach dem Überspritzen sowohl bei den 45°-Strukturen als auch bei den Mäanderstruk-

turen ab. In Abbildung 18 sind die Mittelwerte des Leiterbahnwiderstandes der 45 Grad-Teststrukturen jeweils getrennt für die einzelnen Strukturbereiche sowie das Oberflächenprofil der Metallisierung im überspritzten und nicht überspritzten Zustand dargestellt. Die Abnahme des Leiterbahnwiderstandes deutet auf eine Verdichtung der Strukturen hin. Das Oberflächenprofil zeigt nach dem Überspritzen eine deutlich geringere Oberflächenrauheit und bestätigt diesen Effekt.

3.2.3 Einfluss des Umspritzens auf Bauelemente und Verbindungsstellen

Neben dem Einfluss des Umspritzens auf die laserdirektstrukturierten Leiterbahnen ist auch die Auswirkung auf die elektronischen Bauelemente und die Verbindungsstellen von entscheidender Bedeutung. Grundlegende Erkenntnisse über die mechanische Festigkeit der unterschiedlichen Bauelemente werden vorab mittels Schertests erzielt. Die Scherkräfte werden dabei für die verschiedenen Bauelementtypen, in Abhängigkeit der Temperatur, für die unterschiedlichen Verbindungstechniken und unter Berücksichtigung von Alterungseffekten bei thermischer Schockbelastung ermittelt. Die Ergebnisse der Untersuchungen für die Bauelemente CR1206 und CR0603 sind in Anhang A, Abbildung A dargestellt. Die identifizierten Scherkräfte auf PA6/6T sind im Ausgangszustand im Bereich der Werte von FR4. Die gemessenen Scherkräfte bei dem Bauelement CR1206 sind dabei mit einem Mittelwert von fast 80 N deutlich höher als bei dem Bauelement CR0603. Allerdings bietet das größere Bauelement beim Umspritzen auch eine größere Angriffsfläche für die auftreffende Schmelze. Das Versagenskriterium ist dabei fast ausschließlich das Ablösen der gesamten Metallisierung, die mit Lotpaste benetzt ist. Ein Versagen in der Lötstelle ist kaum zu beobachten. Vergleichende Untersuchungen bei dem Bauelement CR1206 bei 100 °C zeigen mit etwa 50 N deutlich niedrigere Scherkräfte. Dieser Effekt muss berücksichtigt werden und kann, beispielsweise beim Vorwärmen der Baugruppe vor dem Umspritzen, einen Einflussfaktor darstellen. Nach 1.000 Zyklen Temperaturschocktest (-40 °C/+125 °C) kommt es bei den untersuchten Bauelementen zu einer deutlichen Abnahme der Scherkraft. Des Weiteren kommt es vermehrt zu einem Lötstellenbruch. Bei den Bauelementen SO8 und SOT23 mit Gullwing-Anschlusstrukturen treten Scherkräfte mit einem Mittelwert von 35 N und 27 N auf. Das Bauelement SO8 hat demzufolge trotz eines relativ großen Körpers vergleichsweise niedrige Scherkräfte. Das Leitkleben zeigt bei den Bauelementen CR1206 und CR0603 nur geringfügig niedrigere Scherwerte als das Löten.

Prozessanalyse

Zur Untersuchung des Einflusses des Umspritzens auf die elektronischen Bauelemente werden entsprechende Tests mit dem 2D-Probekörper durchgeführt. Neben dem Effekt unterschiedlicher Reinigungs- bzw. Vorbehandlungsmethoden werden auch der Einfluss der Anspritzrichtung der Bauelemente, der Bauelementart, des Verbindungsmediums, des Überspritzmaterials sowie der Überspritzdicke geprüft.

Einfluss der Reinigung bzw. Vorbehandlung

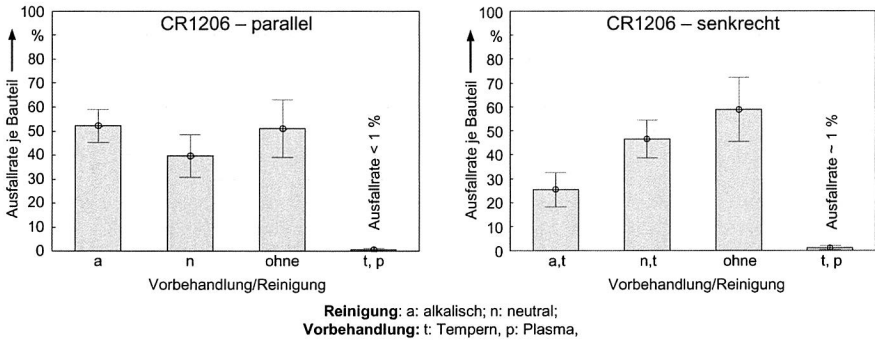


Abbildung 19: Bauelementdefekte je Bauteil nach dem Überspritzen bei unterschiedlichen Vorbehandlungs- und Reinigungsmethoden für das Bauelement CR1206 parallel und CR1206 senkrecht

In Abbildung 19 sind die Ausfallraten der Bauelemente je Bauteil für das Bauelement CR1206 in den Layoutvarianten parallel und senkrecht mit Mittelwert und Konfidenzintervall bei 68 % dargestellt. Durch eine neutrale Reinigung der Baugruppen nach dem Dampfphasenlöten kann die Ausbeute funktionsfähiger Bauelemente nach dem Überspritzen erhöht werden. Allerdings kann durch den Einsatz der Reinigung mit Ausfallraten von 40-50 % insgesamt kein zufriedenstellendes Ergebnis erzielt werden. Eine Reinigung in Kombination mit Tempern ermöglicht bessere Ergebnisse, die Ausfallraten sind mit 25-45 % aber weiterhin sehr hoch. Eine zusätzliche Vorbehandlung der Baugruppen direkt vor dem Umspritzen mit Plasma reduziert die Ausfallraten. Die Kombination aus neutraler Reinigung, Tempern und Plasma ermöglicht einen verbesserten Prozess mit Ausfallraten von 22 % der Bauelemente je Bauteil. Bei reiner Vorbehandlung der Bauteile mit Tempern und Plasma ohne zusätzliche Reinigung sind sehr hohe Ausbeuten möglich. Bei den Bauelementen CR1206 und CR0603 ergeben sich Ausfallraten kleiner 1 %. Als Referenzprozess für die weiteren Untersuchungen wurde daher eine Vorbehandlung mit Tempern und Plasma ohne Reinigung festgelegt. Eine Prüfung der Verbundfestigkeit bestätigt den positiven Effekt der Plasmabehandlung [70].

Einfluss der Anspritzrichtung zur Bauelementorientierung, des Überspritzwerkstoffes, der Verbindungstechnik, der Überspritzdicke und der Bauelementart

In weiterführenden Analysen, basierend auf dem entwickelten Referenzprozess, wird der Einfluss der Anspritzrichtung zur Bauelementorientierung, des Überspritzwerkstoffes, der Verbindungstechnik, der Überspritzdicke sowie der Bauelementart untersucht. Die Datenerhebung dieser Untersuchungen erfolgte am Lehrstuhl für Kunststofftechnik, FAU Erlangen-Nürnberg. Es ergibt sich ein klarer Zusammenhang zwischen Anspritzrichtung und Ausfallquote. Bei senkrecht zur Anspritzrichtung stehenden Bauelementen ist die Ausfallquote im Vergleich zu parallel orientierten Bauelementen deutlich erhöht. Einzig bei dem Werkstoff PA6/6T GF25 kann auch bei senkrecht zur Anspritzrichtung stehenden Bauelementen eine sehr hohe Ausbeute erzielt werden. Bei Einsatz von PA6/6T GF35 und PA6/6T unverstärkt zeigen die Baugruppen bei parallel orientierten Bauelementen sehr gute Ergebnisse, bei senkrecht ausgerichteten Bauelementen kommt es allerdings vermehrt zu Ausfällen. Die Überspritzung mit TPU führt bei senkrecht und parallel ausgerichteten Bauelementen zu relativ hohen Ausfallquoten. Bei gleichen Prozesseinstellungen ist bei den untersuchten Verbindungstechniken Leitleben und Löten kein Unterschied festzustellen. Bei der Überspritzkomponente PA6/6T GF25 können mit beiden Verbindungstechniken sowohl bei parallel als auch bei senkrecht orientierten Bauelementen sehr gute Ergebnisse mit Ausfallquoten von 0 % erzielt werden. Bei einer Überspritzdicke von 4 mm kommt es im Gegensatz zu 2 mm Überspritzdicke zu erhöhten Ausfallquoten, insbesondere bei senkrecht orientierten Bauelementen. Bei 4 mm dicker Umspritzung kann zudem bei einer Vielzahl der Baugruppen ein Spalt zwischen erster und zweiter Komponente beobachtet werden. Die Bauformen CR1206, CR0603 und SOT23 können unter Berücksichtigung der genannten Einflussfaktoren mit vergleichbarem Erfolg umspritzt werden. Einzig bei dem Bauelement SO8 können keine zufriedenstellenden Ergebnisse erzielt werden. Aufgrund der Bauelementhöhe ist eine Überspritzdicke von 2 mm nicht ausreichend, bei 3 und 4 mm werden die Bauelemente im angussnahen Bereich von der Kunststoffschmelze abgesichert bzw. löst sich die Überspritzkomponente vom Basissubstrat. [139][195]

Für das Einhausen im Montagespritzguss ist folglich die Verwendung artgleicher Werkstoffe mit möglichst gleichem Füllstoffanteil notwendig. Die geringeren Scherkräfte des Leitlebens aufgrund des niedrigeren E-Moduls wirken sich nicht negativ auf die Festigkeit beim Umspritzen aus. Sowohl das Leitleben als auch das Löten können eingesetzt werden. Die Dicke der Überspritzkomponente und des Basiskörpers sollte möglichst ähnlich sein, eine zu dicke Überspritzkomponente ist zu vermeiden. Bei der Auswahl der Bauelemente muss auf eine kleine Angriffsfläche bei hohen Scherkräften geachtet werden. Diese Erkenntnisse sind im Hinblick auf die Analyse der Zuverlässigkeitstests von besonderem Interesse. Bei höheren Ausfallraten nach dem Umspritzen kann eine niedrigere Zuverlässigkeit bei thermischer oder mechanischer Belastung unter Umständen auch auf eine Vorschädigung durch den Fertigungsprozess hindeuten.

Bei der optischen Inspektion zeigt sich bei den Baugruppen mit PA6/6T nach dem Überspritzen ein deutlicher Einfluss der Glasfaserfüllung auf die Verwölbung der Baugruppen. In Abbildung 20 ist exemplarisch ein Vergleich der Verwölbung der Baugruppen mit PA6/6T mit 25-Gew.-% Glasfaserfüllung und unverstärkt für die Layoutvariante parallel dargestellt. Durch die Glasfaserfüllung wird die Schwindung reduziert und damit auch die Verwölbung der gesamten Baugruppe. Da trotz erhöhter Verwölbung bei den parallel orientierten Bauelementen mit dem unverstärkten PA6/6T sehr gute Ergebnisse erzielt werden können, ist ein direkter Zusammenhang zwischen Ausfallquote und Verwölbung allerdings nicht ableitbar.

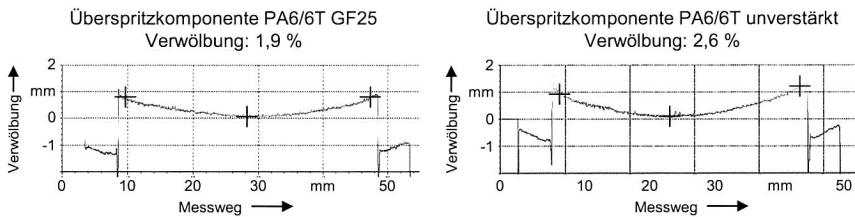


Abbildung 20: Verwölbung nach dem Überspritzen für Baugruppen mit der Überspritzkomponente PA6/6T unverstärkt bzw. mit 25 Gew.-% Glasfaserfüllung

Charakterisierung der Ausfallursachen

Zur Charakterisierung der Ausfallursachen nach dem Umspritzen werden Röntgenaufnahmen und Schlifffbilduntersuchungen der defekten Baugruppen durchgeführt. Die Röntgeninspektion in Abbildung 21 zeigt die verschiedenen Ausfallmechanismen. Ein Leiterbahnris in Bereichen ohne Bauelement tritt sehr oft auf. Ursache hierfür ist eine gute Verbindung der Überspritzkomponente mit der Metallisierung aufgrund der rauen Oberfläche. Ein Riss in der Leiterbahn entsteht folglich durch das partielle Abheben der zweiten Kunststoffkomponente bei ungenügender Verbindung mit der ersten. Ein weiterer häufiger Ausfallmechanismus ist ein Bruch in der Lötstelle oder am Lötanschluss, der vermehrt bei senkrechter Anspritzung der Bauelemente zu beobachten ist. Durch das starke Entnetzen der Lötstelle entsteht am Lötanschluss eine Art Kerbwirkung und stellt somit eine Schwachstelle dar, die durch den Einsatz von Lötstopplack reduziert werden könnte. Die durchgeführten Schertests bestätigen diesen Effekt durch das Ablösen der Bauelemente inklusive der Substratmetallisierung im Bereich der abgeflossenen Lotpaste. Das Vorwärmen der Schaltungsträger vor dem Umspritzen führt trotz abnehmender Scherkräfte nicht zu einem Verrutschen der Bauelemente. Allerdings kommt es zu einem Unterfließen der Bauelemente mit Lot. Die Vorwärmtemperatur mit 100 °C reicht nicht aus, um die Lotpaste in einen flüssigen Zustand zu bringen. Der zusätzliche Wärmeeintrag der Kunststoffschmelze führt aber zu einem Aufschmelzen der Lotpaste. Dieser Effekt ist ohne das Vorwärmen der Baugruppen nicht zu beobachten.

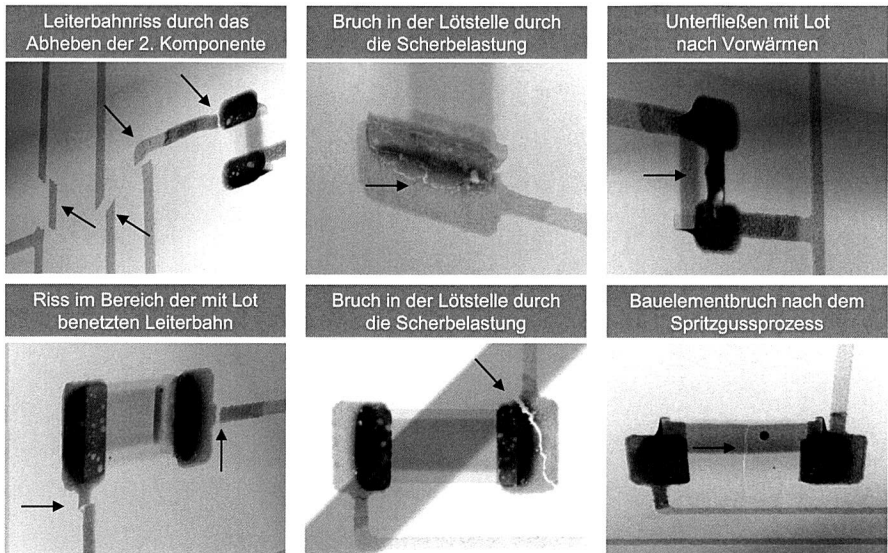


Abbildung 21: Röntgenuntersuchung zur Bestimmung der Ausfallursachen im Montagespritzguss umhauster Baugruppen

Ein Bauelementbruch kann nur vereinzelt beobachtet werden und tritt hauptsächlich bei den größeren Widerständen CR1206 beim Layout parallel auf. Bei dieser Anordnung der Bauelemente besteht verstärkt die Gefahr, dass die Kunststoffschmelze den Bereich unter dem Bauelement nicht komplett füllt und dadurch ein Hohlraum entsteht. Insbesondere in der Nachdruckphase wird eine Kraft auf das seitlich auf den Lotdepots gelagerte Bauelement ausgeübt, wodurch eine Schädigung herbeigeführt werden kann. Dieses Ausfallkriterium ist trotz des seltenen Auftretens besonders kritisch. In Abbildung 22 ist ein Schliffbild eines Bauelementbruchs des Widerstands CR1206 bei paralleler Spritzrichtung dargestellt. Hierbei ist deutlich zu erkennen, dass bei einem Widerstand trotz eines Bruchs des Bauelementkörpers die Widerstandsstruktur nicht defekt sein muss und somit bei einer elektrischen Prüfung kein Ausfall detektiert werden kann.

Das Ablösen der zweiten Spritzgusskomponente aufgrund ungenügender Haftung führt meist zu einem elektrischen Defekt und kann demzufolge relativ einfach mittels elektrischer Messung detektiert werden. In Abbildung 23 (links) umschließt z. B. die zweite Komponente das Bauelement fest und hebt von der ersten Komponente ab. Die Leiterbahn reißt nicht und bleibt in einem funktionsfähigen Zustand. In Abbildung 23 (rechts) hingegen ist die Leiterbahn durch das Abheben des Bauelementes gerissen. Hier ist im Schliffbild an der Form der zweiten Komponente deutlich zu erkennen, dass direkt nach dem Überspritzen eine Verbindung der Kunststoffkomponenten vorhanden war.

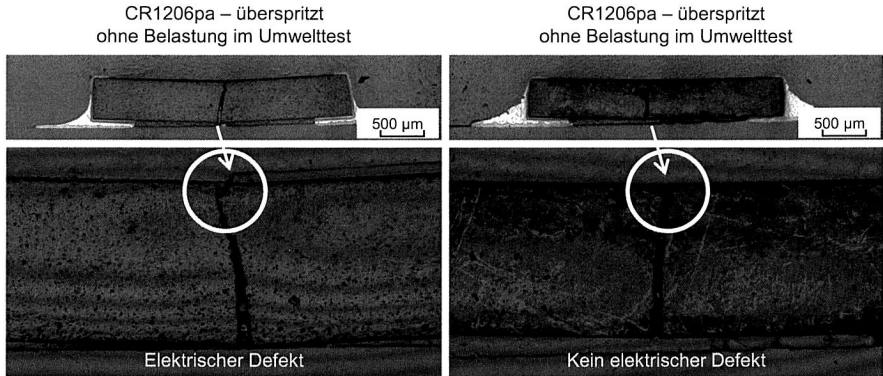


Abbildung 22: Bauelementbruch des Widerstands CR1206 bei paralleler Spritzrichtung der zweiten Komponente

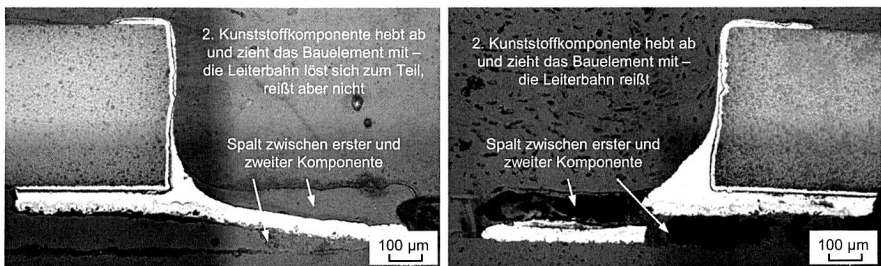


Abbildung 23: Das Ablösen der zweiten Komponente führt nicht zwingend zu einer Schädigung der elektrischen Struktur

3D-Geometrie

Bei den Untersuchungen mit dem 3D-Probekörper aus Abbildung 17 (rechts) konnten nach dem Überspritzen keine funktionierenden Baugruppen zur Verfügung gestellt werden. Allerdings tritt der Schaden nicht im Bereich der Verbindungsstellen der Bauelemente auf, sondern stets in der Leiterbahn am Ende der Schräge im Übergang zwischen erster und zweiter Spritzgusskomponente. Aussagen zu dem Potenzial von Schutzwänden und Kavitäten sind demzufolge nicht möglich. Schliffbildanalysen zeigen, dass es auch hier zu einem Ablösen der zweiten Komponente kommt und eine Optimierung des Spritzgussprozesses erforderlich ist. Eine weitere Verbesserung kann sich durch eine Anpassung des Schaltungslayouts ergeben.

3.3 Zuverlässigkeit im Montagespritzguss umhauster MID im Vergleich mit Verguss und Lackierung

Basierend auf den in Kapitel 3.2 erzielten Erkenntnissen werden die Schaltungsträger nach dem Einhausen im Montagespritzguss entsprechenden Umwelttests unterzogen. Die einzelnen Komponenten (Substratmaterial, Metallisierung, Verbindungsstelle, Bauelement und Überspritzkomponente) und das Zusammenwirken im Verbund haben einen entscheidenden Einfluss auf die Lebensdauer der Baugruppe. Im Folgenden erfolgt eine Analyse der Zuverlässigkeit der eingehausten Schaltungsträger bei thermischer und mechanischer Belastung sowie unter Medieneinfluss. Als Referenz zu den umspritzten Baugruppen werden auch nicht gehauste Baugruppen direkt nach der Aufbau- und Verbindungstechnik betrachtet. Des Weiteren erfolgen Untersuchungen mit lackierten und vergossenen Baugruppen.

3.3.1 Thermische Belastung im Temperaturschocktest

Für die Bewertung der Zuverlässigkeit umspritzter Baugruppen bei thermischer Belastung werden die Probekörper Temperaturschocktests (TST) unterzogen. Insgesamt werden 1.000 Zyklen bei Temperaturen $-40\text{ °C}/+125\text{ °C}$ bzw. $-40\text{ °C}/+150\text{ °C}$ mit einer Haltezeit von 15 Minuten und einer Umlagerungszeit von 10 Sekunden in Anlehnung an DIN EN 60 068-2-14 durchgeführt. Die Funktion der Schaltungsträger wird in definierten Abständen geprüft und die Ausfallraten der Bauelemente ermittelt. Eine Verbindung wird als fehlerhaft bewertet, wenn der elektrische Widerstand auf einen Wert größer $10\ \Omega$ ansteigt. Auf eine Prüfung der Baugruppen im Feuchte-Wärme-Test nach [23] wird verzichtet, da die nicht überspritzten Baugruppen im Feuchte-Wärme-Test (85 °C , 85 % rel. Feuchte; 1.000 h) trotz einer wachsenden intermetallischen Phase keine Ausfälle zeigen und der Einfluss im überspritzten Zustand aufgrund dieser Erkenntnisse als unkritisch eingeschätzt wird.

In Abbildung 24 ist die Ausfallwahrscheinlichkeit für das Bauelement CR1206 für Baugruppen im überspritzten Zustand im Vergleich mit nicht überspritzten Prüfkörpern dargestellt. Die charakteristische Lebensdauer der Bauelemente wird mittels einer statistischen Auswertung, der Weibull-Verteilung, bestimmt. Die Schätzung der Weibull-Parameter (α : charakteristische Lebensdauer; β : Formfaktor) erfolgt nach der Maximum-Likelihood-Methode. Grundsätzlich zeigt sich, dass durch das Einhausen im Montagespritzguss die Lebensdauer enorm gesteigert werden kann. Insbesondere die Layoutvariante parallel erweist sich im Temperaturschocktest mit einer charakteristischen Lebensdauer von über 5.000 Zyklen als sehr robust. Bei der Layoutvariante senkrecht ist der Formfaktor am geringsten. Demzufolge treten hier die Ausfälle früher auf und deuten auf eine mögliche Vorschädigung durch das Einhausen hin. Anhand der Ausfallraten werden für eine tiefergehende Analyse im Folgenden der Einfluss der Verbin-

dungstechnik, der Bauelement- und Faserorientierung sowie der Überspritzkomponente und -dicke untersucht.

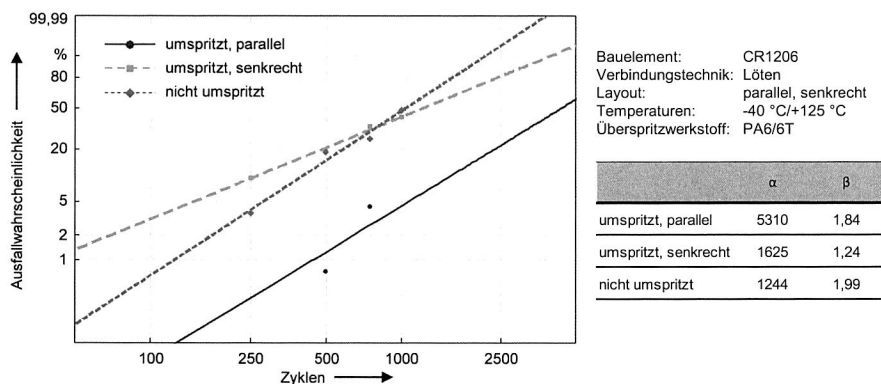


Abbildung 24: Ausfallwahrscheinlichkeit für das Bauelement CR1206 bei umspritzten und nicht umspritzten Schaltungsträgern im Vergleich

Einfluss der Bauelementorientierung, der Faserorientierung der Überspritzkomponente und der Verbindungstechnik

In Abbildung 25 werden die Ausfallraten der Bauelemente für die Layoutvarianten senkrecht und parallel, jeweils für die Verbindungstechnik Leitleben und Lötten, im Vergleich zu nicht überspritzten Baugruppen betrachtet. Beim Leitleben sind ohne Schutz nach 1.000 Zyklen mehr als 80 % der Bauelemente defekt. Im eingehausten Zustand reduziert sich bei der Layoutvariante senkrecht die Fehlerrate auf kleiner 20 %. Bei der Layoutvariante parallel treten auch nach 1.000 Zyklen keine Fehler auf. Die Verbindungstechnik Lötten zeigt sich im nicht geschützten Zustand robuster als das Leitleben. Trotzdem kann auch hier für beide Layouts eine deutliche Verbesserung durch das Umspritzen erzielt werden. Die Layoutvariante parallel ist mit Ausfallraten kleiner 10 % wiederum deutlich robuster. Der Unterschied der Lebensdauer zwischen den Layoutvarianten parallel und senkrecht verstärkt sich bei höheren Temperaturen. Die detaillierten Ergebnisse der Untersuchungen bei -40 °C/+150 °C sind im Anhang B dargestellt.

Die hohe Ausfallrate der nicht geschützten Aufbauten mit Leitlebstoff ist auf den niedrigen E-Modul des Leitlebstoffes zurückzuführen. Untersuchungen in [179] bestätigen diesen Sachverhalt. Bei überspritzten Baugruppen wirkt sich der niedrige E-Modul des Leitlebstoffes im Vergleich zu der Lotpaste jedoch positiv aus. Die höhere Zuverlässigkeit der Layoutvariante parallel kann durch zwei wesentliche Einflüsse erklärt werden. Aufgrund der um 90° versetzten Faserorientierung der ersten und zweiten Komponente

mit einem CTE-Unterschied von 20 ppm/K in x/y-Richtung werden beim schnellen Temperaturwechsel thermomechanische Spannungen in der Baugruppe induziert. Dieser Effekt wird möglicherweise durch eine Vorschädigung der Verbindungsstellen im Umspritzprozess verstärkt. Die Schmelze trifft bei senkrecht ausgerichteten Bauelementen auf eine größere Fläche und kann demzufolge wesentlich größere Scherkräfte auf das Bauelement ausüben. Ebenso zeigt eine Prozessanalyse in [194], dass durch die Schwindung während dem Abkühlen eine Kraft entgegengesetzt zur Fließrichtung auftritt, die in der Baugruppe einen bleibenden Spannungszustand generiert, der bei thermischer Wechselbeanspruchung die Lebensdauer verringern kann.

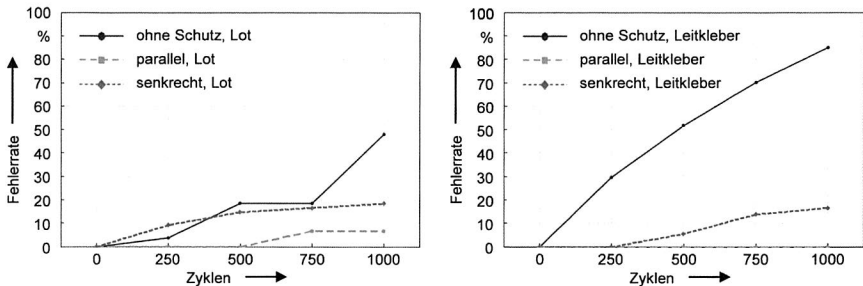


Abbildung 25: Ausfallraten gelöteter und leitgeklebter Bauelemente im Vergleich (Temperaturschocktest -40 °C/+125 °C)

Einfluss der Überspritzwerkstoffe und Überspritzdicke

Der Einfluss der Überspritzkomponente wird anhand der Werkstoffe PA6/6T und TPU analysiert. Der Werkstoff PA6/6T wird mit 35 Gew.-% und 25 Gew.-% Glasfaserfüllung sowie unverstärkt verarbeitet. Nach 1.000 Zyklen Temperaturschocktest (-40 °C/+125 °C) befinden sich die Ausfallraten der Bauelemente für die Prüfkörper mit der unverstärkten und verstärkten Überspritzung unter 7 %. Ein deutlicher Unterschied ist allerdings zu dem Werkstoff TPU mit einem Fehleranteil größer 15 % festzustellen. Ursache für die erhöhte Ausfallrate ist der größere thermische Ausdehnungskoeffizient im Vergleich zu dem Werkstoff PA6/6T. Ein weiterer Effekt könnte eine stärkere Vorschädigung im Spritzgussprozess durch eine stärkere Schwindung sein.

Noch deutlicher wird das Ergebnis bei einer Betrachtung der Ausfallraten der Baugruppen. Eine Baugruppe wird dabei als defekt bewertet, wenn das erste der neun Bauelemente einen Widerstand größer 10 Ω aufweist. Nach 1.000 Zyklen sind 100 % der Baugruppen mit TPU fehlerhaft. Die Ausfallraten der Baugruppen mit der Überspritzkomponente PA6/6T (GF25, GF35 und unverstärkt) sind dagegen kleiner 20 %. Die Ausfallraten der Baugruppen sind im Anhang B, Abbildung C dargestellt.

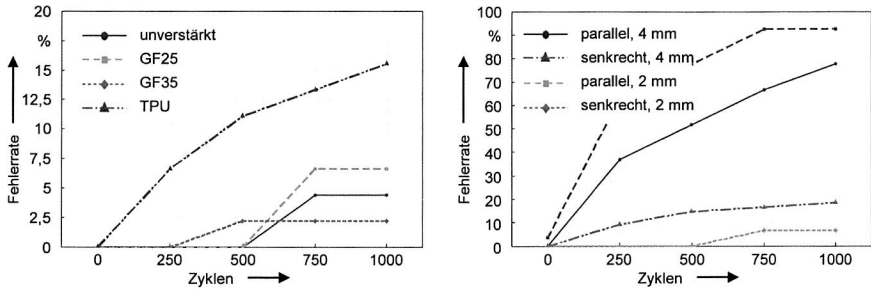


Abbildung 26: Ausfallraten in Abhängigkeit des Überspritzwerkstoffs für die Layoutvariante parallel (links) und der Überspritzdicke (rechts)

Bei der Layoutvariante senkrecht verhalten sich die Baugruppen mit den verstärkten Überspritzwerkstoffen GF25 und GF35 bei thermischer Belastung deutlich besser als unverstärkt. Der Einfluss der unterschiedlichen thermischen Ausdehnung gewinnt bei unterschiedlicher Faserorientierung der Werkstoffe an Bedeutung. Ebenso kann bei der unverstärkten Variante aufgrund der größeren Schwindung nach dem Umspritzen von einer Vorschädigung oder zumindest einer erhöhten Vorspannung ausgegangen werden. Dies wird durch die Tatsache unterstützt, dass Bauelemente der Baugruppen mit der unverstärkten Umhausung sogar im Vergleich mit nicht geschützten Schaltungsträgern höhere Ausfallraten aufweisen (Anhang B, Abbildung D). Der Werkstoff TPU konnte bei dieser Variante aufgrund der hohen Ausfallrate nach dem Überspritzen nicht getestet werden.

Zur Charakterisierung des Einflusses der Überspritzdicke wird das Basissubstrat (2 mm Dicke) mit einer zweiten Komponente mit 2 mm und 4 mm Dicke überspritzt. Als Überspritzwerkstoff wird PA6/6T mit GF25 eingesetzt. Die Umwelttests werden mit den Bauelementen CR1206 des Layouttyps parallel und senkrecht durchgeführt. Einen signifikanten Einfluss auf die Lebensdauer der Baugruppen hat die Überspritzdicke sowohl bei den Temperaturschocktests von $-40\text{ °C}/+125\text{ °C}$ als auch bei den Tests von $-40\text{ °C}/+150\text{ °C}$. Es zeigt sich, dass die Baugruppen mit 2 mm Dicke wesentlich robuster sind, obwohl durch die 4 mm ein größerer thermischer Schutz zu erwarten ist. Die frühen Ausfälle bei der 4 mm Variante zeigen, dass nach dem Spritzgussprozess eine Vorschädigung der Verbindungsstellen vorhanden ist. Der Einfluss der Bauelementorientierung zeigt sich ebenfalls. Die Ausfallrate der Layoutvariante parallel ist geringer als beim Layout senkrecht (Abbildung 26, rechts für $-40\text{ °C}/+125\text{ °C}$ und Anhang B, Abbildung E für $-40\text{ °C}/+150\text{ °C}$).

Einfluss der Bauelementart und der Position auf dem Schaltungsträger

Bei den kleineren Gehäuseformen CR0603 und SOT23 ist die Zuverlässigkeit im nicht geschützten Zustand deutlich besser als bei der Bauelementgröße CR1206, da vergleichsweise geringere thermische Spannungen vorliegen. Im überspritzten Zustand können bei dem Bauelement CR0603 bei verschärften Prüfbedingungen ($-40\text{ }^{\circ}\text{C}/+150\text{ }^{\circ}\text{C}$) gute Ergebnisse mit geringen Ausfallraten erzielt werden. Großen Einfluss hat auch bei der Gehäuseform CR0603 die Bauelementorientierung. Bei senkrechter Ausrichtung der Bauelemente zur zweiten Spritzgusskomponente ist die Zuverlässigkeit ohne Schutz besser. Bei paralleler Orientierung kann die Zuverlässigkeit der überspritzten Schaltungsträger dagegen deutlich gesteigert werden (Abbildung 27, links). Erst nach 600 Zyklen treten die ersten Ausfälle auf. Eine weitere Steigerung der Zuverlässigkeit ist durch den Einsatz von Leitlebmittel als Verbindungsmedium möglich (Anhang B, Abbildung F, rechts). Bei der Gehäuseform SOT23 werden im nicht überspritzten Zustand nahezu keine Ausfälle festgestellt. Eine Optimierung der Zuverlässigkeit ist daher kaum möglich. Durch die Überspritzkomponente sinkt die Zuverlässigkeit sogar beim Layout parallel geringfügig, wobei die Fehlerrate auch nach 1.000 Zyklen Temperaturschocktest ($-40\text{ }^{\circ}\text{C}/+125\text{ }^{\circ}\text{C}$) nur knapp über 10 % liegt (Anhang B, Abbildung F, links). Eine Verbesserung der Zuverlässigkeit bei thermischer Belastung ist demzufolge vor allem bei der Gehäuseform CR1206 durch das Umhausen möglich.

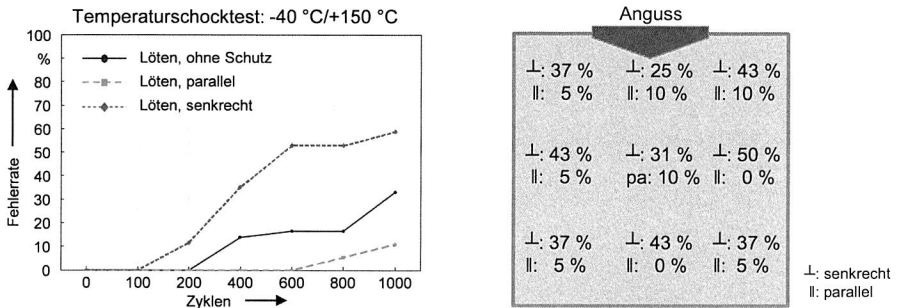


Abbildung 27: Fehlerrate für das Bauelement CR0603 (links) und in Abhängigkeit der Position auf dem Schaltungsträger für das Bauelement CR1206 (rechts)

Bei der Betrachtung der einzelnen Bauteilpositionen zeichnet sich kein aussagekräftiges Ergebnis ab. Eine Abhängigkeit des Abstands von der Bauteilmitte als quasi dehnungsneutraler Punkt ist zu erwarten, allerdings erweist sich dieser Effekt als nicht signifikant. Bei den Baugruppen der Layoutvariante senkrecht und parallel sind die Ausfälle relativ gleichmäßig verteilt (Abbildung 27, rechts). Eine Analyse der angussnahen bzw. angussfernen Ausfallrate sowie eine Betrachtung der Ausfälle im linken, mittleren und rechten Bereich ist ebenfalls ohne erkennbare Auffälligkeiten. Lediglich bei

der Layoutvariante senkrecht weisen die mittleren, angussnahen Positionen kleine Vorteile gegenüber den anderen Positionen auf. Die Auswertung berücksichtigt alle Baugruppen der Layoutvarianten senkrecht und parallel.

Vergleich des thermischen Schutzes durch Montagespritzguss mit Verguss- und Lacksystemen

Ein Vergleich der umspritzten Schaltungsträger mit Baugruppen, die durch temperaturbeständige Verguss- oder Lacksysteme geschützt sind, ist in Abbildung 28 dargestellt. Der Temperaturschocktest (-40 °C/+150 °C) zeigt, dass durch alle drei Schutzarten im Vergleich zu nicht gehauten Schaltungsträgern eine deutliche Verbesserung erreicht werden kann. Das Vergießen zeigt nach 1.000 Zyklen mit 35 % die höchsten Ausfallraten. Zudem ist auffällig, dass die meisten Ausfälle bereits in den ersten 400 Zyklen auftreten. Das Einhausen im Montagespritzguss bietet bei korrekter Ausrichtung der Bauelemente den größten Schutz. Von den analysierten Bauelementen sind im ungeschützten Zustand nach 1.000 Zyklen 78 % ausgefallen, im überspritzten Zustand dagegen nur 15 %. Die lackierten Baugruppen zeigen eine Ausfallrate von 22 %. Ohne Schutz ist die charakteristische Lebensdauer bei Weibull-Auswertung kleiner 1.000 Zyklen, weshalb bei der Verwendung von PA6/6T als Basissubstrat bei Einsatztemperaturen im Bereich von 150 °C ein Schutz erforderlich ist.

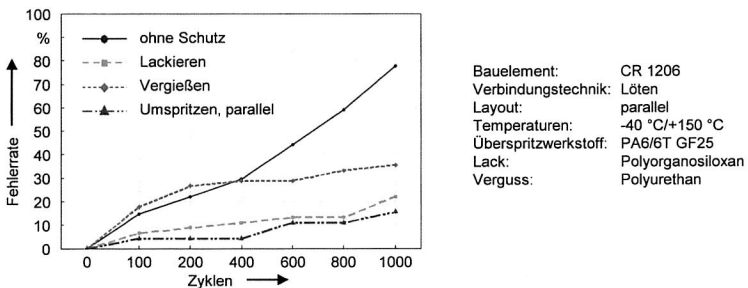


Abbildung 28: Fehllrate unterschiedlicher Schutzmechanismen bei thermischer Belastung im Vergleich zu nicht geschützten Schaltungsträgern

Metallografische Analyse der Baugruppen nach der thermischen Belastung

Nach der thermischen Belastung im Temperaturschocktest zeigt sich bei den Baugruppen ein Ermüdungsbruch im Lotmaterial. Die Rissbildung beginnt dabei meist entweder unter dem Bauelement oder oberen Bereich des Meniskus. Exemplarische Schliffbilder sind in Abbildung 29 abgebildet. Ein Versagen im Bereich der Grenzflächen ist eher selten. Im Gegensatz zu nicht geschützten Baugruppen zeigt sich eine relativ glatte Bruchstelle.

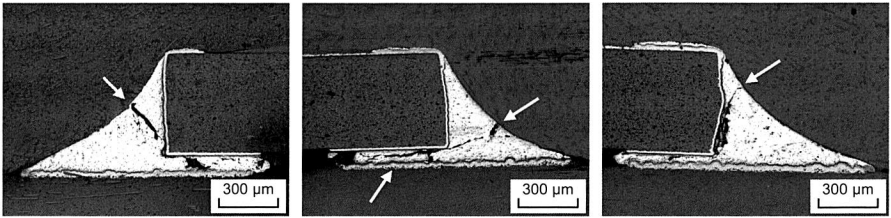


Abbildung 29: Ermüdungsbruch im Lotmaterial der Anschlussstrukturen des Bauelementes CR1206 nach 1.000 Zyklen TST ($-40^{\circ}\text{C}/+125^{\circ}\text{C}$)

Eine Schweißbildanalyse überspritzter und nicht überspritzter Baugruppen vor und nach dem Temperaturschocktest ist in Abbildung 30 für das Bauelement CR0603 dargestellt. Dabei ist ersichtlich, dass im nicht überspritzten Zustand nach 1.000 Zyklen ein Ermüdungsbruch im Lotmaterial auftritt, der vom Verlauf vergleichbar mit dem in Abbildung 29 aufgezeigten Schadensbild bei dem Bauelement CR1206 ist. Im überspritzten Zustand zeigt sich bei dem Bauelement CR0603 kein signifikanter Unterschied der Anschlussstrukturen nach dem Überspritzen und nach 1.000 Zyklen Temperaturschocktest. Durch das Einhausen ist im Gegensatz zu nicht geschützten Lötstellen keine signifikante Veränderung der Gefügestruktur erkennbar und die Bildung von Poren aufgrund der thermischen Belastung ist reduziert.

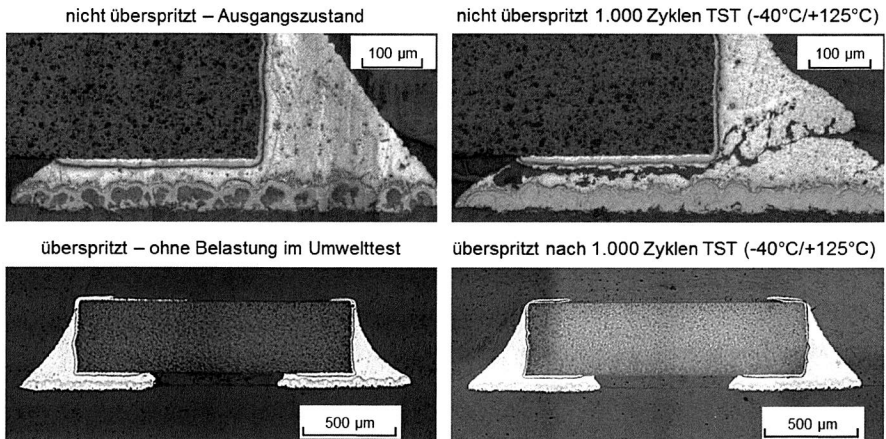


Abbildung 30: Vergleich der Anschlussstrukturen für das Bauelement CR0603 im eingehausten und nicht überspritzten Zustand vor und nach dem Temperaturschocktest

3.3.2 Test auf Mediendichtheit

Der Schutz vor Medieneinflüssen ist ein weiterer wesentlicher Fokus bei der Einhausung der elektronischen Baugruppe. Die Klassifizierung der Schutzanforderungen erfolgt durch die in Tabelle 7 aufgeführten Wasserschutzklassen IPX1 bis IPX8, die in der DIN EN 60529 festgelegt sind. Die durchgeführten Untersuchungen in dieser Arbeit prüfen den Schutz gegen Eintauchen, also IPX7 bzw. IPX8. Dabei werden umspritzte, lackierte, vergossene und als Referenz ungeschützte Schaltungsträger mit Mäanderstruktur gemäß des Layouts in Abbildung 17 schrittweise (Stufe 1 bis 3) in ein Wasserbad getaucht. Die Schaltungsträger werden in definierten Zeitabständen von 20 Minuten jeweils um eine Mäanderstruktureihe nach unten versetzt, um undichte Stellen auch lokal begrenzen zu können. Die Schwachstelle wird bei den umspritzten Baugruppen im angussfernen Bereich erwartet. Nach der letzten Stufe verbleiben die Baugruppen für mindestens 30 Minuten in der Flüssigkeit. Ein Versuch mit je einem lackierten, vergossenen und umspritzten Schaltungsträger wird über 48 Stunden fortgeführt. Zur Detektion eines Kurzschlusses der ineinanderliegenden Kammstrukturen wird ein Gleichsignal mit einer Spannung von 7 V angelegt. Mittels eines zur Kammstruktur in Reihe geschalteten Widerstandes von 1 k Ω wird der Spannungsabfall mit einer Abtastrate von 1 Hz mit einer National Instruments Messbox für jeden Messbereich separat überwacht. Das Schaltbild ist in Abbildung 31 dargestellt. Der Test mit nicht geschützten Baugruppen zeigt, dass es unmittelbar nach Eintauchen der Kammstrukturen in das Wasserbad zu einem sprunghaften Anstieg der Spannung kommt. Aufgrund dieser Tatsache wird auf eine spezielle elektrolytische Flüssigkeit verzichtet.

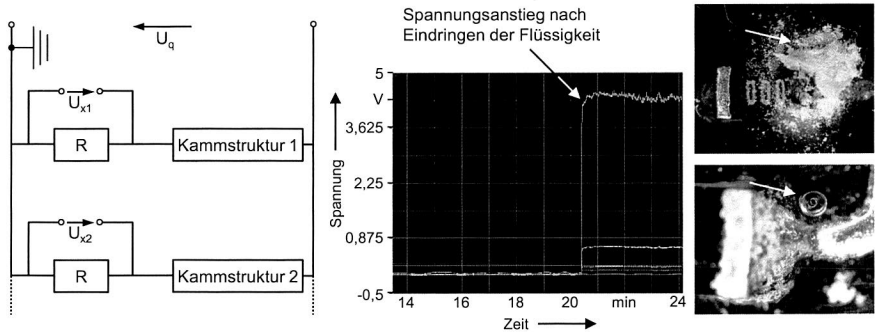


Abbildung 31: Testschaltung, exemplarischer Spannungsverlauf und Fehlerbilder

Alle umspritzten und vergossenen Baugruppen sind auch nach der maximal geprüften Zeitdauer absolut dicht. Es kommt zu keiner Veränderung des aufgezeichneten Spannungssignals. Ein vollständiges Eintauchen führt nur kurzzeitig zu einem Anstieg der Spannungswerte aufgrund der freiliegenden Messstrukturen im oberen Bereich der

Schaltungsträger. Nach dem Herausnehmen aus dem Wasserbad reduziert sich die detektierte Spannungserhöhung umgehend. In das Innere der Baugruppe ist demzufolge auch über die angussferne Seite kein Wasser eingedrungen. Bei den lackierten Schaltungsträgern kommt es vereinzelt zu einem Kurzschluss der Mäanderstruktur. Mittels einer optischen Analyse der Lackschicht konnte festgestellt werden, dass der Lack die Bauelemente nicht vollständig überdeckt und an den Bauelementkanten das Wasser eindringen kann. In diesem Bereich kommt es zu einer metallischen Abscheidung. Des Weiteren kann ein Loch in der Lackschicht festgestellt werden, das vermutlich auf das Entweichen einer Luftblase während des Aushärtens zurückzuführen ist. Anders als bei thermischer Belastung führen entsprechende Fertigungsfehler bei diesem Test unmittelbar zu einem Ausfall der Baugruppe.

Weiterführende Prüfungen zur Mediendichtheit können mit aggressiveren Medien oder in Kombination mit thermischer Belastung durchgeführt werden. Zur Detektion sehr kleiner Leckagen kann die Differenzdruckprüfung eingesetzt werden. Über den Druckverlust wird die ausgetretene Luftmenge berechnet und die Dichtheit gegenüber spezifischen Medien abgeleitet. Bei den lackierten Schaltungsträgern kann durch einen optimierten Beschichtungsvorgang mit größeren Schichtdicken die Zuverlässigkeit gesteigert werden.

3.3.3 Mechanische Belastung im Falltest

Der freie Fall stellt einen Spezialfall eines mechanischen Stoßes dar. Wiederholtes freies Fallen dient zur Nachbildung der Wirkung von ständig wiederkehrenden Stößen. Der Belastungstest ist gemäß DIN EN 60068-2-31 zur beschleunigten Alterung der Baugruppen definiert [22]. Die wesentlichen Parameter sind dabei die Fallhöhe, -folge und -unterlage sowie die Anzahl der durchgeführten Beanspruchungen. Die Tests im Rahmen dieser Arbeit wurden auf einem der Norm entsprechenden Prüfstand durchgeführt. Die rotierende Maschine erzeugt pro Zyklus bzw. pro Umdrehung zwei freie Fälle aus einer Höhe von 0,5 m mit einem anschließenden Aufprall auf einer Stahlplatte. Die wiederholte Fallbeanspruchung wird mit ungeschützten Schaltungsträgern und mit überspritzten (Layout parallel und senkrecht), lackierten und vergossenen Baugruppen mit dem Bauelement CR1206 durchgeführt. Insgesamt werden 1.000 Zyklen gefahren und die elektrische Funktionalität in definierten Abständen (50, 200, 500 und 1.000) überprüft. Fallhöhe und Anzahl entsprechen einem erhöhten Schärfeegrad.

Die elektrische Widerstandsmessung zeigt bei allen Baugruppen nach 50 und 200 Zyklen keinen Ausfall. Nach 500 Zyklen weisen bei der überspritzten Baugruppe (Layout senkrecht) erste Widerstände erhöhte Messwerte auf. Von dem nicht geschützten Schaltungsträger ist ein Bauelement abgebrochen. Nach 1.000 Zyklen sind von der überspritzten Baugruppe mit dem Layout senkrecht 11 % und mit dem Layout parallel 3,7 % der Bauelemente defekt. Von der ungeschützten Baugruppe ist nur der eine Wi-

derstand abgebrochen, erhöhte Werte gibt es nicht. Die lackierten und vergossenen Bauteile sind ohne Defekt.

Prinzipiell folgt aus den Untersuchungen, dass selbst ungeschützte Schaltungsträger eine hohe Zuverlässigkeit im Falltest aufweisen und ein besonderer Schutzmechanismus vor Fallbeanspruchung nur in Kombination mit anderen Belastungsarten erforderlich ist. Bei den überspritzten Schaltungsträgern weist wiederum die Layoutvariante senkrecht eine höhere Ausfallrate auf. Da hier keine thermischen Effekte auftreten, kann die Anisotropie der Materialien keinen Einfluss haben. Der Unterschied ist daher nur mit einer Vorschädigung der Verbindungsstelle aus dem Umspritzprozess zu erklären. Eine optische Betrachtung der lackierten Baugruppen zeigt, dass es zu einem partiellen Abtrag der Silikonlackschicht kommt und dadurch der Schutz vor hohen Temperaturen und Medien beeinträchtigt werden kann. Ebenfalls kommt es bei allen Baugruppen zu einem starken Abrunden der Bauteilkanten, was aber die elektrische Funktionalität nicht beeinträchtigt und daher als unkritisch zu bewerten ist.

3.4 FE-Analyse umspritzter thermoplastischer Schaltungsträger bei thermischer Belastung

Ergänzend zu den experimentellen Untersuchungen wird im Rahmen einer FE-Analyse die Auswirkung thermischer Wechselbelastungen auf die Zuverlässigkeit der Baugruppe untersucht. Die Lebensdauer elektronischer Baugruppen mit gelöteten Bauelementen wird wesentlich durch ein thermisch-mechanisch induziertes Ermüdungsverhalten der Lötstelle bestimmt [178][197]. In der Technologie MID und speziell bei umspritzten Schaltungsträgern wird dieser Effekt durch das anisotrope Materialverhalten verstärkt. Das Vorgehen gliedert sich dabei in eine Verformungsanalyse zur Ermittlung der lokalen Spannungen und Dehnungen in den Lötstellen sowie eine Lebensdauerprognose unter Verwendung eines geeigneten Schädigungsmodells [197]. Für die numerische, thermomechanische Analyse sind zunächst Kennwerte der Werkstoffeigenschaften (z. B. CTE, E-Modul) und ein geometrisches Modell des realen Aufbaus (z. B. Meniskus, Stand-Off) erforderlich. Die Untersuchungen in dieser Arbeit werden mit dem Simulationstool Abaqus von Dassault Systems durchgeführt.

Materialcharakterisierung des Werkstoffverbundes

Die Bauelemente (CR1206, CR0603) werden vereinfacht als homogene Keramikkörper modelliert. Keramische Materialien sind im Vergleich zu den übrigen eingesetzten Materialien um ein Vielfaches steifer und fester. Folglich reicht eine elastische Beschreibung des Materials aus, da die anderen Komponenten vor Erreichen des plastischen Bereichs der Keramik versagen würden. Die Materialdaten des Lotwerkstoffs werden aus dem AiF-Projekt 303 ZBG übernommen bzw. es wird auf Literaturparameter zurückgegriffen [142][178]. Das Kriechverhalten des Lotes wird mit Hilfe der in Abaqus vorhandenen Hyperbolic-sine Funktion dargestellt, die bereits in [157][178] erfolgreich verwen-

det worden ist. Die thermoplastischen Werkstoffe unterscheiden sich gegenüber metallischen Werkstoffen durch das stark temperaturabhängige Verhalten. Mit steigender Temperatur kommt es zu einem deutlichen Abfall des E-Moduls und der maximalen Zugspannung. Eine weitere Besonderheit ist die starke Anisotropie in Abhängigkeit der Fließrichtung. Temperatur- und geometrieabhängige Daten zu dem LDS-Werkstoff PA6/6T werden vom HSG-IMAT und der BASF AG zur Verfügung gestellt bzw. können aus den Datenblättern entnommen werden. Für die Überspritzkomponente PA6/6T GF25 werden die gleichen Werte verwendet. Das komplexe Materialverhalten kann jedoch aufgrund fehlender Messwerte nicht über den gesamten Temperaturbereich ($-40\text{ °C}/+125\text{ °C}$) vollständig abgebildet werden.

Modellaufbau und -annahmen

Für die Modellierung wird auf die vorhandene Probekörpergeometrie zurückgegriffen, um eine gute Vergleichbarkeit mit den realen Ergebnissen zu erzielen. Das Modell wird basierend auf den zur Verfügung stehenden CAD-Daten aufgebaut. Eine Formabweichung durch Verzug oder den Spritzguss verursachte Einfallstellen wird nicht betrachtet. Die Geometrie der Lötstelle wird aus einem Schliffbild ermittelt. Prozessbedingte Schwankungen (z. B. Lotmenge, Lotabfluss) werden nicht analysiert. Die geometrische Ausformung in Abbildung 32 wird als Referenz für die Simulation verwendet.

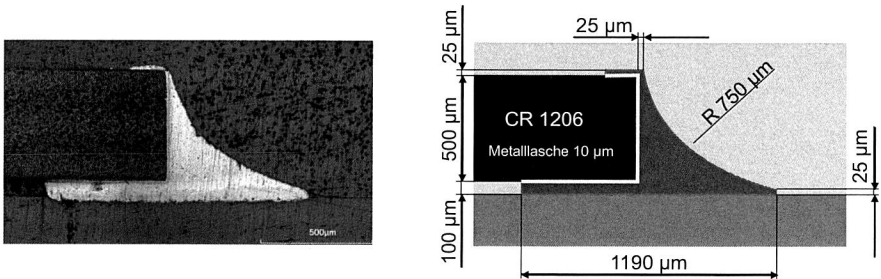


Abbildung 32: Schliffbild (links) und geometrische Auswertung (rechts) einer exemplarischen Verbindungsstelle

Der Widerstand wird zur Reduzierung der Komplexität des Modells als ein Quader aus Keramik abgebildet. Durch diese Vereinfachung ist aufgrund der sehr ähnlichen Steifigkeit von Metall und Keramik davon auszugehen, dass keine signifikanten Fehler auftreten. Die Leiterbahnmetallisierung wird in der Simulation nicht berücksichtigt, da durch die geringe Schichtdicke keine Effekte auf das Verhalten des Verbundes zu erwarten sind. Bei der Modellierung verschiedener Komponenten ist die Definition der Kontaktbedingungen der einzelnen Partner erforderlich (Abbildung 33). Ein Stoffschluss wird zwischen Lot und Bauelement, Lot und Substrat bzw. Metallisierung sowie den beiden

Kunststoffkomponenten definiert. Sowohl zwischen der Überspritzkomponente und dem Lotwerkstoff als auch zwischen Bauelement und Lot wird ein Formschluss festgelegt.

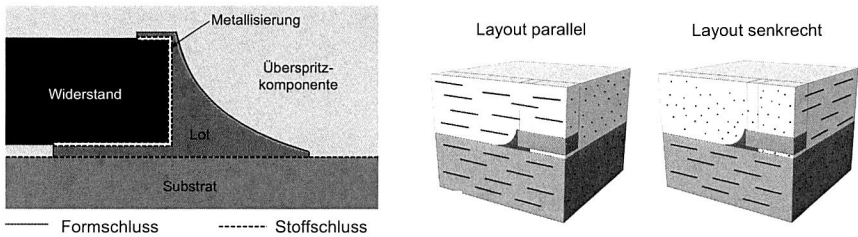


Abbildung 33: Kontaktbedingungen im Modell (links) und Varianten der Faserorientierung (rechts)

Zur Begrenzung der Elementzahlen und des späteren Vernetzungsaufwandes wird der Mittelpunkt der Baugruppe als Festpunkt bestimmt. Hier sind keine Verschiebungen oder Drehungen möglich. In der weiteren Betrachtung kann deshalb mit einem Viertel des Gesamtbauteils gerechnet und dadurch der Rechenaufwand entsprechend reduziert werden. Aufgrund der komplexen Geometrie werden Tetraederelemente verwendet. Im Schlißbild ist neben der Lötstellengeometrie auch die Faserverteilung der Kunststoffkomponenten ersichtlich. Dabei zeigt sich eine andere Orientierung der Umspritzkomponente im Bereich des Bauelementes. Die reale Faserorientierung über das gesamte Bauteil kann mit einer Füllsimulation oder durch die Anfertigung und Auswertung zahlreicher Schlißbilder untersucht werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird jedoch vereinfachend von einer homogenen Orientierung der Fasern ausgegangen. Dabei werden die zwei Varianten der experimentellen Untersuchung näher betrachtet (Abbildung 33). Resultierende Spannungszustände aus dem Umspritzprozess werden in der Analyse ebenso wie eine eventuell vorhandene Vorschädigung vernachlässigt. Die Temperaturverteilung zum Startzeitpunkt wird auf 20 °C festgelegt.

Thermomechanische Analyse

Die thermomechanische Analyse wird entsprechend der thermischen Belastung im Experiment in einem Temperaturbereich von -40 °C bis 125 °C durchgeführt. In Abbildung 34 sind eine Auswertung der Vergleichsspannung nach von Mises in N/mm² und die akkumulierte Kriechdehnung dargestellt. Die Spannungsspitzen deuten auf eine hohe Versagenswahrscheinlichkeit im jeweiligen Bereich hin. Singularitäten können dabei in Bereichen unzulässiger geometrischer Vereinfachung auftreten, sind aber für die Auswertung unkritisch, sofern sie als solche berücksichtigt werden.

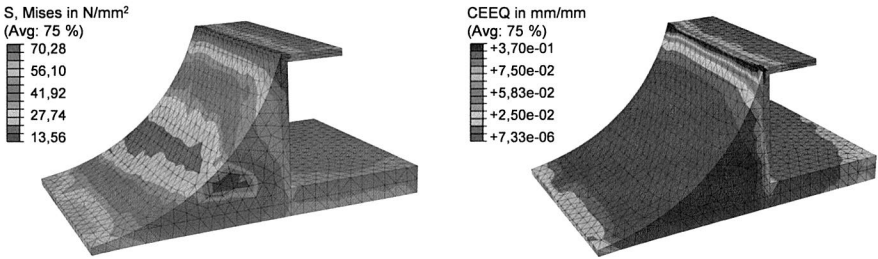


Abbildung 34: *Spannungsintensität (links) und akkumulierte Kriechdehnung (rechts) in der Lötstelle des Bauelementes R1206, Layout senkrecht, 2 mm*

Der dominierende Einflussfaktor auf die Spannungsintensität ist die Faserorientierung der beiden Kunststoffkomponenten. Bei senkrechter Orientierung zwischen Substrat- und Einhausungskomponente werden in der Lötstelle höhere Spannungen induziert als bei paralleler Ausrichtung. Weiterhin ist die Auswahl der Bauelemente wichtig. Bei dem Bauelement CR0603 zeigen sich im Vergleich zu dem Bauelement CR1206 deutlich niedrigere Spannungswerte und deuten auf eine höhere Lebensdauer hin. Eine Betrachtung der Überspritzdicken 2 mm und 4 mm zeigt, dass der Temperatureinfluss bei geringerer Schutzdicke größer ist. Bei dünnerer Einhausung erreicht das Innere des Bauteils schneller die Maximaltemperatur.

Lebensdauerbewertung mit Ausfallursache

Zur Lebensdauerberechnung von Lötverbindungen sind in der Literatur verschiedene Verfahren bekannt. Die Lebensdauerprognose in dieser Arbeit erfolgt auf Basis des Coffin-Manson-Modells, das den Verlauf der Wöhlerlinie im Low-Cycle-Fatigue (LCF) Bereich beschreibt. LCF definiert den Bereich der Kurzzeitfestigkeit mit Schwingspielen im Bereich von 1 bis 10^5 . Bei Lötverbindungen wird davon ausgegangen, dass die plastische (irreversibel nichtelastische) Dehnung die Lebensdauer bestimmt. Die Anzahl der Zyklen α bis zum Bauteilversagen kann dabei nach der Gleichung:

$$\alpha = \theta * (\Delta \varepsilon_{akk})^{-c} \quad \text{Gl. 1}$$

berechnet werden. Die Akkumulation der Kriechdehnungen an der Stelle der zu erwarteten Rissentstehung über einen Temperaturzyklus ergibt den Wert $\Delta \varepsilon_{akk}$. Die Koeffizienten θ und c der Coffin-Manson-Gleichung sind materialabhängig. Für die Lebensdauerabschätzung in dieser Arbeit wurden die Werte $\theta = 4,5$ und $c = 1,295$ nach [178] verwendet.

Die berechneten Lebensdauern sind mit unter 700 Zyklen deutlich kleiner als die real erzielbaren Ergebnisse. Eine exemplarische Untersuchung mit einem feineren Netz

zeigt eine deutliche Erhöhung der Lebensdauer. Die Art der Simulationsdurchführung hat demzufolge einen großen Einfluss auf das erzielbare Ergebnis. Fokus der Lebensdauerberechnung ist daher nicht eine Vorhersage der real erzielbaren Zyklen bis zum Ermüdungsbruch, sondern eine qualitative Betrachtung der unterschiedlichen Aufbauvarianten. Sowohl mit der senkrechten als auch der parallelen Überspritzung kann die Lebensdauer gesteigert werden. Bei paralleler Orientierung der Einhausung ist die Zeit bis zum Ausfall höher. Die Werte sind in Tabelle 12 dargestellt. Dabei ist bei jedem Bauelement der Referenzwert jeweils die Variante ohne Einhausung. Ein Vergleich der Bauelemente, der sich nicht aus der Tabelle ergibt, zeigt deutliche Vorteile für das Bauelement CR0603. Bei 2 mm starker Einhausung und paralleler Faserorientierung ist die Zeit bis zum Ausfall bei dem kleineren Bauelement etwa 1,24-mal so lang. Bei der Betrachtung eines Bauelementes, das nicht im Zentrum, sondern im Randbereich der Baugruppe sitzt, kommt es zu einer leichten Reduzierung der Lebensdauer.

Tabelle 12: Charakteristische Lebensdauer unterschiedlicher Aufbauvarianten im Vergleich

CR1206				CR0603		
Schutz	2 mm	4 mm	ohne (Referenz)	2 mm	4 mm	ohne (Referenz)
parallel	6,64	2,85	1,00	10,13	10,62	1,00
senkrecht	1,41	1,48		7,30	7,62	

Vergleich der berechneten Daten mit dem Experiment

Eine Betrachtung der Ergebnisse zwischen Simulation und realem Experiment zeigt eine hohe Korrelation der erzielten Ergebnisse. Die im Modell berechneten, kritischen Spannungszustände können durch entsprechende Ausfälle im Lotbereich mittels Schliiffbildanalyse (Abbildung 29) nachgewiesen werden. Die Lebensdauerberechnung im Modell spiegelt den real beobachteten Sachverhalt ebenfalls annähernd wider. Zuverlässige Varianten im Experiment erzielen auch die höchste Lebensdauer in der Simulation, allerdings sind die berechneten Werte deutlich niedriger als die charakteristische Lebensdauer der realen Baugruppen. Der Einfluss der Bauteilposition, mit abnehmender Lebensdauer bei Platzierung des Bauelementes außerhalb der Bauteilmitte, kann in den Untersuchungen nicht nachgewiesen werden. Ebenso kann in den durchgeführten Umwelttests durch die dickere Überspritzkomponente aufgrund einer Vorschädigung der Baugruppen keine höhere Zuverlässigkeit erzielt werden.

Die FE-Analyse ist demzufolge zur Detektion kritischer Bereiche oder zum qualitativen Vergleich unterschiedlicher Aufbaumöglichkeiten, Werkstoffe oder Bauelemente geeignet. Eine weitere Optimierung der Ergebnisse kann durch eine Verfeinerung des Modells, eine Reduzierung der angenommenen Vereinfachungen sowie eine umfangreichere Datenbasis über die temperatur- und geometrieabhängigen Kennwerte der

eingesetzten Werkstoffe erzielt werden. Durch eine Kopplung der thermomechanischen Simulation mit einer Spritzgießsimulation könnten die Faserorientierung genauer abgebildet und auch eingefrorene Eigenspannungen mit berücksichtigt werden.

3.5 Herausforderung und Chancen zum Schutz elektronischer Schaltungsträger

Aufgrund der Weiterentwicklung der Technologie MID werden die möglichen Einsatzbereiche kontinuierlich erweitert und damit die Anforderungen an die Zuverlässigkeit der Schaltungsträger steigen. Ein Schutz der elektronischen Baugruppen ist unter anderem mittels Lackieren, Vergießen und Umspritzen möglich. Das Umspritzen bietet besondere Vorteile, insbesondere die Möglichkeit zur Erweiterung der Funktionalität. Vor diesem Hintergrund ist das Ziel der Untersuchungen, die Möglichkeiten zur Realisierung im Montagespritzguss umhauster MID zu evaluieren und die Zuverlässigkeit zu bewerten.

Durch eine kontinuierliche Anpassung des Fertigungsprozesses kann eine haftfeste Verbindung der Kunststoffkomponenten als Basis für einen mediendichten Verbund erzielt werden. Eine Analyse des Einflusses des Umspritzens auf die nasschemisch aufgetragenen Leiterbahnen zeigt, dass die Strukturen nicht beschädigt werden und der Durchgangswiderstand sogar sinkt. Insgesamt kann der Nachweis erbracht werden, dass das Umspritzen elektronischer Bauelemente mit sehr geringen Ausfallraten möglich ist. Der Referenzprozess mit Fertigung des MID-Substrates mittels LDS-Technologie, Montage der Bauelemente mittels Dampfphasenlöten oder Leitkleben sowie Tempern und Plasmabehandlung vor dem Umspritzen führt zu Fehlerraten kleiner 1 % und teilweise sogar zu 0 % Fehlern [195]. Eine Reinigung der Schaltungsträger vor dem Umspritzen ist nicht erforderlich. Dies gilt sowohl für zweipolige Widerstände in den Gehäusegrößen CR1206 und CR0603 als auch für Bauelemente mit Anschlussstrukturen vom Typ Gullwing in der Gehäuseform SOT23. Entscheidend sind neben den Prozesseinstellungen und der Bauelementart auch die Materialauswahl, die Überspritzdicke und die Orientierung der Bauelemente bzw. die Spritzgussrichtung [139]. Bauelemente mit paralleler Ausrichtung zur Faserorientierung der ersten und zweiten Komponente sind optimal ausgerichtet. Eine Analyse der Ausfallursachen verdeutlicht, dass das Abheben der zweiten Komponente, verbunden mit einem Riss in der Leiterbahn oder ein Bruch der Lötstelle, insbesondere bei senkrechter Anspritzung der Bauelemente bzw. unterschiedlicher Faserorientierung der beiden Kunststoffkomponenten, für einen Großteil der Fehler verantwortlich ist.

Die Zuverlässigkeitstests zeigen das Potenzial zum Schutz der elektronischen Schaltung vor Umwelteinflüssen. Insbesondere bei thermischer Belastung kann durch das Einhausen im Montagespritzguss eine erhöhte Zuverlässigkeit realisiert werden. Dabei ist die Orientierung der Bauelemente ebenfalls ein signifikanter Einflussfaktor. Eine parallele Ausrichtung der Bauelemente zu der zweiten Spritzgusskomponente sowie der

ersten und zweiten Komponente führen zu sehr guten Ergebnissen. Vergleichbare thermische Ausdehnungskoeffizienten der beiden Kunststoffkomponenten sind dabei zu beachten. Bei senkrechter Ausrichtung kommt es möglicherweise bereits beim Umspritzen zu einer Vorschädigung der Anschlussstrukturen. Zudem entstehen durch die unterschiedliche Spritzgussrichtung der ersten und zweiten Komponente erhöhte thermomechanische Belastungen der Verbindungsstellen. Der Einsatz von Leitkleber, der einen niedrigeren E-Modul als Lotpaste aufweist, bietet weiteres Optimierungspotenzial. Bei der Gehäuseform CR1206 ist eine deutliche Verbesserung der Zuverlässigkeit gegenüber Baugruppen im nicht geschützten Zustand möglich. Bauelemente mit kleineren Abmessungen zeigen bereits im ungeschützten Zustand eine hohe Zuverlässigkeit. Im Vergleich mit lackierten und vergossenen Baugruppen weisen die im Montagespritzguss geschützten Schaltungsträger die geringsten Ausfallraten auf. Ein Test auf Mediendichtheit zeigt bei allen drei Schutzarten sehr gute Ergebnisse. Der Falltest bestätigt die Robustheit der elektronischen Bauelemente und der Verbindungstechnik bei mechanischen Stößen. Ein Schutz für diese Belastungsart ist bei den untersuchten Bauelementen nur bei kombinierter Belastung erforderlich.

Aus Sicht der Elektronikproduktion existieren weitere Möglichkeiten zur Optimierung der Prozesssicherheit während des Umspritzens und zur Steigerung der Langzeitzuverlässigkeit. Der Einsatz von Underfill kann einer Belastung in z-Richtung und einem Bauelementbruch entgegenwirken. Zudem werden dadurch Hohlräume unter dem Bauelement eliminiert, die bei Temperaturwechsel die Lebensdauer negativ beeinträchtigen können. Durch den Einsatz von Lötstopplack werden ein Abfließen der Lotpaste und somit inhomogene Lötstellen verhindert. Weitere Untersuchungen können auch die Menge und Art des Verbindungsmediums sowie die Auswirkungen auf die Prozess- und Umwelteinflüsse fokussieren. Prozessanpassungen sind dabei stets in Verbindung mit den Auswirkungen auf den Gesamtprozess, insbesondere dem anschließenden Umspritzprozess, zu betrachten. Hier können wichtige Prozessparameter wie Werkzeug- und Masstemperatur, Einspritzgeschwindigkeit oder Nachdruck variiert werden, um eine niedrige Belastung im Prozess, verbunden mit einer hohen Lebensdauer durch einen möglichst spannungsfreien Verbund, zu erreichen [194]. Zu beachten ist hierbei, dass sich die Faktoren wechselseitig beeinflussen und daher eine zielgerichtete Werkstoff- und Bauelementauswahl, eine Bestimmung der Prozessparameter sowie eine geometrische Auslegung des Probekörpers und Schaltungslayouts erforderlich sind.

4 Zuverlässigkeit mikromechatronischer Systeme mit Chip auf MID

Bedingt durch die Entwicklungen in der Elektronikproduktion hinsichtlich Miniaturisierung und höheren Packungsdichten besteht auch in der Technologie MID großer Bedarf zur zuverlässigen Verarbeitung ungehäuseter Silizium-Chips. Ermöglicht wird dies durch eine stetige Verkleinerung der Anschlussstrukturen, insbesondere durch die Laserdirektstrukturierung. Technologisch sind in der Zwischenzeit Strukturen mit minimalen Leiterbahnbreiten bis zu 80 μm möglich [50]. Für die Montage existieren eine Vielzahl unterschiedlicher Fertigungstechnologien [81], die in Anlehnung an die Techniken für planare Systeme auf dreidimensionale Substrate übertragen werden.

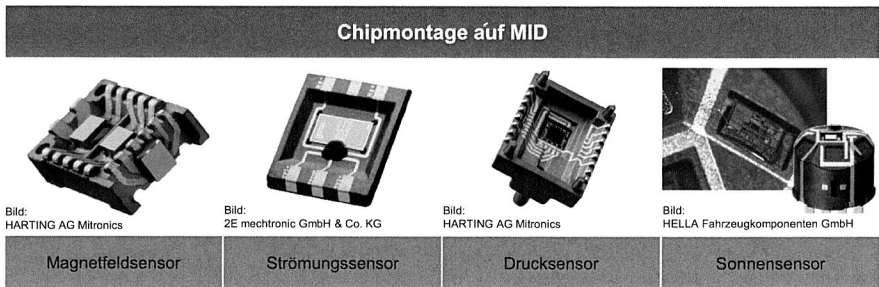


Abbildung 35: Applikationen mit Silizium-Chip auf MID

Die Verarbeitung von Silizium-Chips auf räumlichen Schaltungsträgern ermöglicht eine deutlich höhere Integrationsdichte und eröffnet dadurch komplett neue Anwendungsfelder. Vor allem in der Sensortechnik, aber auch in anderen Bereichen, beispielsweise bei RFID-Anwendungen, sind Applikationen mit Chip auf MID möglich [76][81][162]. In Abbildung 35 sind verschiedene Sensorkonzepte dargestellt. Dabei kann das MID neben der Funktion als Chipträger auch als Interface zum Gesamtsystem (z. B. durch das Abbilden eines Steckgesichtes) agieren, Sensorbausteine in spezifischen Winkeln exakt anordnen und mechanische Anschlüsse (z. B. Fluidkanäle) integrieren [163]. Zudem kann der Chip in Kavitäten platziert werden, wodurch eine Reduzierung des thermomechanischen Stresses möglich ist und Vorteile für den Aufbau (z. B. reduzierte Drahtlängen) erzielt werden können. Industriell werden Chipmontagetechnologien auf MID bereits eingesetzt, wenngleich bislang nur vereinzelte Applikationen bekannt sind.

Bei der Verarbeitung von Silizium-Chips auf thermoplastischen Substratmaterialien ergibt sich ein Verbund mit teils sehr unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten. Die Absicherung der Zuverlässigkeit erfolgt in der Praxis mittels realer Testbaugruppen und beschleunigter Umwelttests, wodurch lange Entwicklungszyklen ent-

stehen. Die Untersuchungen in diesem Kapitel zielen daher darauf ab, Erkenntnisse über den Verbund Chip auf MID zu ermitteln. Schwerpunkt der Untersuchungen ist der Vergleich der Drahtbond- und unterschiedlicher Flip-Chip-Technologien auf industriellen thermoplastischen, spritzgegossenen Substraten. Dabei werden die im Verbund auftretenden Spannungen während der Umwelttests mit einem Stressmesschip in-situ messtechnisch erfasst und ergänzend Lebensdauertests durchgeführt. Die Ergebnisse werden mit den berechneten Daten der begleitenden Simulation zur Erstellung eines Zuverlässigkeitsmodells abgeglichen und ermöglichen dadurch von Beginn an eine zielgerichtete Baugruppenentwicklung.

4.1 Stand der Technik bei der Verarbeitung von Silizium-Chips

Für eine hohe Zuverlässigkeit sind mechanisch stabile und elektrisch leitende Verbindungen erforderlich. Die am häufigsten eingesetzten Verbindungstechnologien sind das Drahtbünden und die Flip-Chip-Technologie mittels Lötten und Kleben. Das Drahtbünden ist eine etablierte, stark verbreitete und wirtschaftliche Verbindungstechnologie. Aufgrund der unter dem Chip liegenden Strukturen kann mit der Flip-Chip-Technologie eine hohe Funktionalität bei geringem Platzbedarf und hervorragenden elektrischen Eigenschaften erreicht werden. Dabei wird die Anzahl der elektrischen Kontaktstellen bei kleinerem Anschlussraster ständig erweitert. Derzeit werden in der Elektronikproduktion bereits Lötstellengeometrien mit 30 μm bei einer großen Vielfalt an Applikationen mit 20 bis 1.000 Bumps verarbeitet. In der MID-Technik werden aktuell Chipgrößen im Bereich $\leq 4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ eingesetzt. Je größer der Chip, desto stärker wirkt sich der Einfluss unterschiedlicher thermischer Ausdehnungskoeffizienten zwischen Chip und Substrat auf die im Verbund induzierte thermomechanische Spannung aus. [6][27][73][179][203]

4.1.1 Chipmontagetechnologien

Drahtbondverbindungen werden entweder rein durch die Ultraschallschwingung (Ultraschall-Wedge-Wedge-Bonden) des Bondwerkzeugs oder durch zusätzliche Erwärmung (Thermosonic-Ball-Wedge-Bonden) hergestellt. Der Vorteil des Drahtbondens mit Ultraschall (US) gegenüber dem Thermosonic-Bonden (TS) ist, dass der Prozess bei Raumtemperatur durchgeführt werden kann. Für das Drahtbünden auf MID wird aufgrund der geringeren Temperaturbelastung der Substrate und der im Vergleich geringen Goldschichtdicken meist das US-Bonden mittels Al-Draht (z. B. 33 μm Durchmesser) zur elektrischen Verbindung des Chips mit dem Substrat eingesetzt. Die mechanische Fixierung des Chips erfolgt mit einem Kleber, zur besseren Ableitung der Verlustwärme in das Substrat meist mit Leitkleber. Die Qualität der Bondbarkeit der Substrate wird bei diesem Prozess durch eine geringe Oberflächenrauheit, eine ausreichende Schichtdicke der Metallisierung (v. a. Ni oder Ni/Pd) und eine gute Ultraschalleinbringung unterstützt. Vor allem bei MID, die mit der Laserdirektstrukturierung hergestellt werden, ist eine werkstoffspezifische Nachbearbeitung zur Planarisierung der Bondflächen (z. B. mittels CO_2 -Schneestrahlsreinigung oder Stempel) erforderlich. Anschließend werden als

Schutz und zur Stabilisierung des Verbundes die Chips und die Drähte mit einem Glob-Top vergossen. [81][129]

Bei der Flip-Chip-Technologie wird die Funktionsseite des Chips zum Substrat gedreht (engl.: flipped) und durch die direkte Kontaktierung der Pads mittels Bumps mit Kontaktflächen auf dem Substrat verbunden. Die mechanische und elektrische Verbindung erfolgt somit im gleichen räumlichen Bereich. In der Technologie MID werden hier vor allem das Löten bei einem Chip mit Lotbumps und das Kleben mit isotrop leitendem Klebstoff (ICA), anisotrop leitendem Kleber (ACA) oder nichtleitendem Klebstoff (NCA) bei einem Chip mit Bonddrahtbumps, sogenannten Stud-Bumps, eingesetzt [81]. Beim Löten und der Verwendung von ICA wird zuerst die elektrische Verbindung durch das Lot oder den Leitkleber und anschließend die mechanische Stabilisierung mit einem Underfill realisiert. Die Verwendung von ACA oder NCA ermöglicht die Kombination aus elektrischer und mechanischer Befestigung in einem Prozessschritt. Elektrisch leitende Verbindungen, die mit nicht leitenden Klebstoffen hergestellt werden, basieren auf der gegenseitigen Berührung der Fügepartner. Während des Aushärtens ist daher eine konstante Anpresskraft erforderlich [103]. Bei der Kontaktierung der Flip-Chips mit Klebstoffen ist eine sehr hohe Bestückgenauigkeit notwendig, da kein Einschwimmen der Chips wie im Lötprozess erfolgt. Die Klebtechniken ermöglichen im Vergleich zum Lötprozess eine Verarbeitung der Silizium-Chips bei niedrigeren Prozesstemperaturen. Die Bonddrahtbumps werden durch das Bonden von Golddraht auf die Chipanschlussflächen und ein definiertes Abreißen hergestellt. Anschließend kann mittels Coining (Leveling) eine einheitliche Höhe der Au-Stud-Bumps für eine einfachere Verarbeitung realisiert werden. [28][65][81][134]

Die Lotbumps der Chips können mit verschiedenen Wafer-Bumping-Technologien appliziert werden, die sich hinsichtlich Metallisierung und Bumpbeschaffenheit unterscheiden. Mögliche Standardverfahren zur Erzeugung von Lotbumps sind das Electroplating, das Jetten und der Schablonendruck. Das Electroplating ermöglicht eine hohe Ausbeute bei sehr feinen Anschlussstrukturen, ist aber aufgrund der Prozesskomplexität relativ teuer. Beim Schablonendruck können Standard-SMT-Anlagen eingesetzt werden. Bei optimaler Abstimmung zwischen Schablonendicke, Lotpulverklasse und Einstellungen des Schablonendruckprozesses (z. B. Druck- und Ablösegeschwindigkeit) ist ein Pitch von 60 µm realisierbar. Das Jetten ist ein sequentieller Prozess und daher flexibel, auch für dreidimensionale Aufbauten, einsetzbar. Weitere Alternativen sind der Wafer-Level-Solder-Sphere-Transfer-Process (WLSST) und der Controlled Collapse Chip Connection New Process (C4NP). [6][160][179]

4.1.2 Zuverlässigkeit von Baugruppen mit Silizium-Chips

Die Zuverlässigkeit bei der Verarbeitung von Silizium-Chips hängt neben der verwendeten Chipmontagetechnologie vor allem von den eingesetzten Materialien, dem Chipplay-

out (I/O) und den Chipabmessungen ab. Unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten zwischen Substratwerkstoff, Verbindungsmedium und Silizium-Chip induzieren bei thermischer Wechselbelastung mechanische Spannungen im Verbund. Dieser Effekt wird in der MID-Technik aufgrund der thermoplastischen Substratwerkstoffe verstärkt. Wie bereits in Kapitel 2.1.2 beschrieben, ist der CTE von Thermoplasten im Vergleich zu FR4-Materialien oder Keramiken signifikant höher, anisotrop und zudem durch den Spritzgussprozess bzw. die Geometrie des Bauteils beeinflusst.

In den Grenzflächen Kunststoff-Leiterbahn, Leiterbahn-Verbindungsmedium und Verbindungsmedium-Bauelement wirken demzufolge höhere Zug-/Druckbeanspruchungen mit einem negativen Einfluss auf die Zuverlässigkeit der Verbindungsstelle. Weiterhin existieren zwischen den für MID geeigneten Kunststoffen auch große Unterschiede. Der CTE-Wert von Silizium ist im Bereich von 2,5-3 ppm/K, von FR4 ca. 15-18 ppm/K, wohingegen die thermischen Ausdehnungskoeffizienten der relevanten MID-Substratwerkstoffe PET+PBT ca. 36/56 ppm/K (parallel/senkrecht zur Spritzgussrichtung), PA 6/6T ca. 30/50 ppm/K und LCP ca. 12/30 ppm/K betragen. Bei einem Temperaturunterschied von 100 K ergibt sich bei der Betrachtung von PET+PBT in Spritzgussrichtung ein CTE-Unterschied von 33 ppm/K im Vergleich zu dem Silizium-Chip. Bei einer Kantenlänge von 4,3 mm folgt eine Längendifferenz von 7,1 μm im Randbereich.

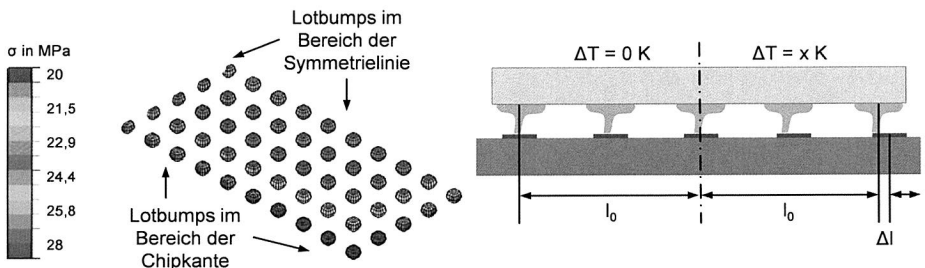


Abbildung 36: Stärkere Stressbelastung der Anschlussstrukturen im Randbereich des Silizium-Chips [72][161]

Zur Erhöhung der Lebensdauer wird der Raum zwischen Substrat und Chip bei der Chipmontage mittels Lötens bzw. mittels Au-Stud-Bumps und isotrop leitendem Kleber mit einem sogenannten Underfill gefüllt. Dieser verteilt die inneren Spannungen im Verbund und reduziert dadurch die lokal an den Verbindungsstellen auftretenden Scherkräfte. In Abbildung 36 (links) ist die Stressbelastung über den Lotballs für einen Silizium-Chip dargestellt. Die Lotballs an den Chipkanten, mit dem größten Abstand (DNP – Distance to Neutral Point) zum dehnungsneutralen Punkt in der Chipmitte, sind einer stärkeren Belastung ausgesetzt. Bei MID-Werkstoffen wird dieser Effekt an den Chipkanten parallel zur Fließrichtung aufgrund des anisotropen CTEs verstärkt. Untersu-

chungen zeigen, dass die Verwendung von Underfill bei der Chipmontage auf organischen Substraten die Lebensdauer bei guter Unterfüllung ohne Lufteinschlüsse deutlich erhöhen kann. Underfiller werden in Capillary-Flow-Underfill (CFU) und No-Flow-Underfill (NFU) unterschieden. NFU ist eine Kombination aus Underfill und Flussmittel und wird vor der Chipmontage in einem festgelegten Muster dispensiert. CFU wird nach der Platzierung des Chips an dessen Kanten aufgetragen und fließt aufgrund der Kapillarwirkung unter den Silizium-Chip. [15][73][158][193][207]

Experimentelle Analysen in [29][133][134] zeigen die Langzeitzuverlässigkeit von Chipaufbauten auf MID. Dabei werden sowohl Aufbauten in Flip-Chip-Technik und als Drahtbondvariante auf unterschiedlichen Substratmaterialien bei Variation der Verbindungsmedien, Chipgrößen sowie Substratdicken untersucht. In [28] werden in weiterführenden Untersuchungen erste Ansätze zur Identifikation von Fehlermechanismen und Einflussfaktoren auf die Zuverlässigkeit von Flip-Chip-Aufbauten mit ICA und NCA mittels FEM-Analysen vorgestellt. Hier zeigt sich beispielsweise, dass eine Optimierung der Verbindungstechnik durch eine Absenkung des Benetzungswinkels zwischen Underfill und LCP-Substrat durch eine Plasmabehandlung und durch die Reduzierung des CTEs des Klebstoffs möglich ist.

4.2 Experimentelle Qualifizierung verschiedener Chipmontagetechnologien auf MID

Zur Erstellung von Lebensdauermodellen sind weitere Erkenntnisse zum Stresseintrag in den Verbund während spezifischer Umweltbelastungen zur Korrelation mit entsprechenden Schadensmechanismen und zur Verifikation der berechneten Daten der Simulation notwendig. Im Folgenden werden zunächst die für die Untersuchungen eingesetzten Chipmontagetechnologien und Substratmaterialien, anschließend die durchgeführte Stressmessung sowie die Lebensdauertests vorgestellt.

4.2.1 Flip-Chip- und Drahtbondtechnologien

Für die Montage von Silizium-Chips auf MID ist aufgrund der allgemein zunehmenden Miniaturisierung die Qualifizierung verschiedener Montagetechnologien von großer Bedeutung. Zum Aufbau der Prüfkörper werden daher das US-Drahtbonds und die Flip-Chip-Montage mittels Löten sowie Kleben mit NCA und ICA Kleber eingesetzt. In Abbildung 37 sind die vier Aufbautechnologien nach [142] schematisch dargestellt.

Bei der Flip-Chip-Montage mittels Löten werden der Chip und das Substrat durch einen Lotbump verbunden, der an der UBM des Chips bzw. an der Metallisierung auf dem Substrat (SM) benetzt. Beim Kleben mit ICA werden die Chips mit Au-Stud-Bumps direkt in den Leitkleber bestückt. Eine elektrisch leitende Verbindung ist auch gewährleistet, wenn kein direkter Kontakt zwischen Bump und Metallisierung des Substrats besteht. Zur Erhöhung der mechanischen Stabilität wird zwischen Chip und Substrat ein

Underfill appliziert. Bei der Montage von Flip-Chips mit NCA müssen die Au-Stud-Bumps dagegen direkten Kontakt zu der Metallisierung des Substrates haben. Mit dem NCA wird der gesamte Bereich zwischen Chip und Substrat ausgefüllt. Bei der Chipmontage mittels Drahtbonden wird der Chip mittels ICA auf das Substrat geklebt und anschließend mit einem AlSi1-Draht mit der Metallisierung des Substrates verbunden.

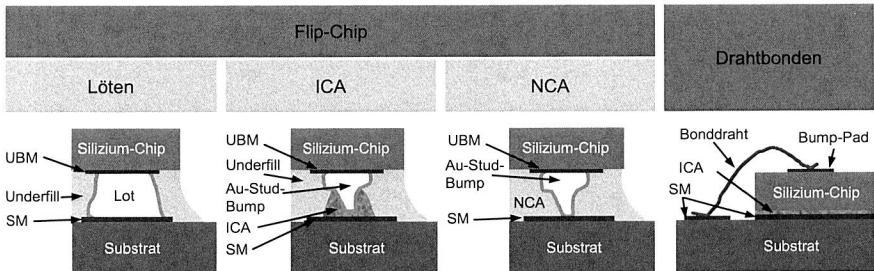


Abbildung 37: Schematische Darstellung der Aufbautechnologien für die Chipmontage

Prozesskette für das Flip-Chip-Löten

Die Prozesskette für das Flip-Chip-Löten ist in Abbildung 38 dargestellt. Zunächst werden die Chips mit sogenannten Bumps versehen. Hierzu werden Lotdepots im Schablonendruck entsprechend dem Chiplayout auf eine nicht metallisierte Leiterplatte mit einem Durchmesser von ca. 280 μm bei einem Abstand von ca. 400 μm , gemessen zwischen zwei Bumps, aufgedruckt. Die Depots werden anschließend im Reflowprozess mit einem an die Lotpaste angepassten Sattelfprofil umgeschmolzen und benetzen die UBM des Chips, aufgrund der fehlenden Metallisierung jedoch nicht die Leiterplatte.

Anschließend werden die Substrate mit Lotpaste bedruckt und der Chip bestückt sowie verlötet. Der Auftrag des Underfills erfolgt mit einer Dispensnadel an zwei Seiten des Substrats (L-förmig). Zur Verbesserung der Fließeigenschaften des Underfills wird das Substrat auf eine definierte Temperatur erwärmt und anschließend der Underfill ausgehärtet. Für die Lebensdauertests werden auch Aufbauten ohne Underfill verwendet.

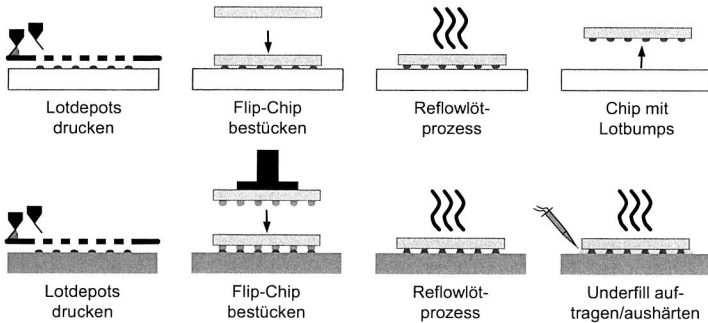


Abbildung 38: Prozessablauf beim Flip-Chip-Löten (oben: Lotbumps auf den Chip; unten: Chip auf das Substrat)

Prozessketten für das Flip-Chip-Kleben

Für die Chipmontage Flip-Chip-Kleben mit leitendem und nicht leitendem Kleber müssen die Silizium-Chips zunächst mit Stud-Bumps aus Golddraht mittels TS-Bonden versehen werden. Die einzelnen Studs werden mit einer Kraft von 40 cN pro Bump aufgebracht und anschließend definiert abgerissen. Die Studs haben einen Balldurchmesser von ca. 100 µm bei einer Höhe im Bereich von 60 µm bis 80 µm.

Der nicht leitende Kleber wird mit einer Dispensnadel in einem bestimmten Muster, hier in Form eines Kreuzes, vor der Platzierung des Chips auf das Substrat aufgetragen. Anschließend wird der Chip bestückt. Der Kleber verteilt sich dabei gleichmäßig unter dem Chip. Das Substrat wird zur direkten Aushärtung des Klebers auf eine bestimmte Temperatur erwärmt. Um ein Abheben des Chips zu vermeiden, wird mit dem Bestückwerkzeug ein definierter Druck auf den Chip ausgeübt. Der NCA schließt alle Verbindungsstellen ein und bietet ausreichend mechanischen Schutz, so dass ein separates Auftragen von Underfill nicht erforderlich ist.

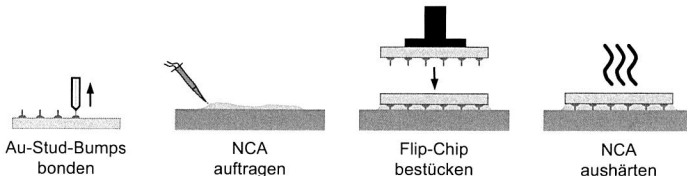


Abbildung 39: Prozessablauf beim Flip-Chip-Kleben mit NCA

Das Flip-Chip-Kleben mit ICA ist in Abbildung 40 dargestellt. Zunächst werden die Substrate im Schablonendruck mit Leitkleber versehen. Anschließend wird der Chip be-

stückt und der Leitkleber thermisch ausgehärtet. Entsprechend der Technologie Flip-Chip-Löten wird Underfill als mechanischer Schutz aufgetragen und ausgehärtet. Der Effekt der Selbstzentrierung tritt beim Flip-Chip-Kleben nicht auf. Daher ist eine höhere Bestückgenauigkeit als beim Flip-Chip-Löten erforderlich.

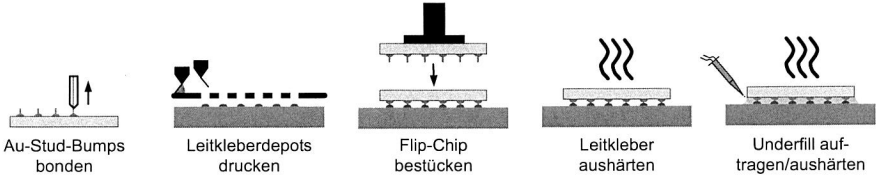


Abbildung 40: Prozessablauf beim Flip-Chip-Kleben mit ICA

Prozesskette für das Drahtbonden

Für den Drahtbondprozess wird vorab die Oberfläche der laserstrukturierten Substrate mit CO₂-Schneestrahlsreinigung bzw. mit einem Stempel vorbehandelt (durchgeführt an der Universität Stuttgart, HSG-IMAT) [142]. Für eine gute Bondverbindung ist eine Reduzierung der Oberflächenrauheit, die für eine haftfeste Metallisierung gezielt strukturiert wird, erforderlich. Im Gegensatz zu den Flip-Chip-Aufbauten wird hier keine Standardmetallisierung Cu/Ni/Au verwendet, sondern auf die Kupfermetallisierung eine Endschicht aus Ni/Pd/Au aufgetragen.

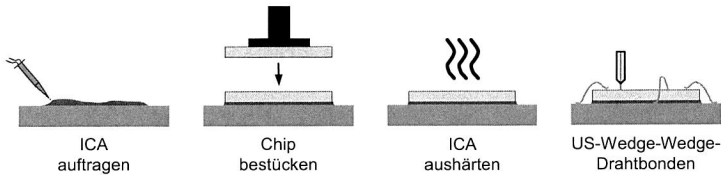


Abbildung 41: Prozessablauf der Chipmontage mittels Drahtbonden

Der Silizium-Chip wird bei der Chipmontage mittels Drahtbonden zunächst mit Leitkleber auf das Substrat geklebt und anschließend die elektrische Verbindung mittels US-Wedge-Wedge-Drahtbonden mit 30 µm AlSi1-Draht erzeugt (Abbildung 41). Für den Aufbau werden eine Drahtverformung von 45 %, eine Bondkraft von 30 cN und eine Ultraschallleistung von 45 % gewählt. Der Chip und die Bonddrähte werden nicht vergossen, so dass die Untersuchungen zur Spannungsermittlung durchgeführt werden können.

4.2.2 Substratmaterialien

Für die Langzeitzuverlässigkeit sind die richtige Substratauswahl und die Abstimmung der Materialpartner im Verbund entscheidend. In der MID-Technik ist dieser Faktor aufgrund der teils hohen thermischen Ausdehnungskoeffizienten und der Anisotropie der Thermoplaste bei der Verarbeitung von Silizium-Chips mit feinen Anschlussstrukturen besonders wichtig. Als Substratmaterial werden die zwei Thermoplaste LCP und PET+PBT untersucht. Als Referenz hierzu werden die verschiedenen Aufbautechnologien auch auf FR4 realisiert. Für den späteren Montageprozess werden die Substrate mit einer Basismetallisierung aus Cu und einer Oberfläche aus chemisch Ni/Au für den Flip-Chip-Prozess bzw. chemisch Ni/Pd/Au für das Drahtbonden aufgebaut. Die relevanten Eigenschaften der Substratmaterialien sind in Tabelle 13 dargestellt. PET+PBT hat im Vergleich zu LCP und FR4 sehr hohe thermische Ausdehnungskoeffizienten. Die Richtungsabhängigkeit ist bei den Thermoplasten sehr hoch. Senkrecht zur Spritzgussrichtung verdoppelt sich der CTE-Wert nahezu. Die Glasübergangstemperatur von PET+PBT ist mit 60 °C sehr niedrig.

Tabelle 13: Kennwerte der für die Chipmontage verwendeten Substratmaterialien

Substratmaterial	FR4	LCP VECTRA® E 840i LDS	PET+PBT POCAN® 7140 LDS
Füllstoff in %	-	40 Mineral	44 Glasfaser/Mineral
CTE (x/y) in ppm/K	12/17	12/27	36/56
E-Modul in MPa	23000	9300	12000
T _g in °C	135	-	60
Dicke in mm	0,85	1,5	1,5
Basismetallisierung	Cu	Cu	Cu
Oberfläche Flip-Chip-Aufbauten	chem. Ni/Au	chem. Ni/Au	chem. Ni/Au
Oberfläche Drahtbonden	-	chem. Ni/Pd/Au	chem. Ni/Pd/Au

Die Verbindungsmedien werden, entsprechend den Aufbautechnologien und basierend auf Vorkenntnissen aus den Untersuchungen in [133][134][135], ausgewählt. Deren Kennwerte sind in Tabelle 14 aufgeführt. Für das Flip-Chip-Löten wird die bleifreie Lotlegierung Sn96,5Ag3Cu0,5 eingesetzt, wohingegen für das Flip-Chip-Kleben mit ICA ein Silberleitkleber mit einer Glasübergangstemperatur von 80 °C ausgewählt wird. Für beide Aufbauten wird ein Underfill auf Epoxidharz-Basis mit einer Glasübergangstemperatur von 150 °C aufgetragen. Das Aushärten des Underfills erfolgt bei 150 °C für 120 min. Die Glasübergangstemperatur des nicht leitenden Klebers ist 146 °C. Dieser Einkomponentenkleber ist für hochfeste Verbindungen konzipiert und schnellhärtend, damit ein Aufschwimmen nach der Montage verhindert wird. Hierbei erfolgt die Aushärtung unter Druck bei 175 °C für 60 sec, anschließend wird der Kleber bei 175 °C für

5 min nachgehärtet. Für die mechanische Befestigung des Chips bei den Drahtbondaufbauten wird ebenfalls der Silberleitkleber als Die-attach verwendet. Dieser weist eine sehr niedrige Glasübergangstemperatur im Vergleich zu den anderen Verbindungsmedien auf.

Tabelle 14: Kennwerte der eingesetzten Verbindungsmedien für die Flip-Chip- und Drahtbondaufbauten

Lotpaste		ICA		NCA	Underfill
Hereaus F640		EPOTEK H20E		DELO MK055	Hysol FP4511
Legierung	Sn96,5Ag3Cu0,5	Matrix	Epoxidharz	Epoxidharz	Epoxidharz
Klasse	Typ 4	Füllstoff	Ag	-	-
Korngröße	20-38 µm	Tg	80 °C	146 °C	150 °C
E-Modul	50000 MPa	E-Modul	5580 MPa	3200 MPa	12500 MPa
Schmelztemperatur	217 °C	CTE (ppm/K)	31 (T < 80 °C)	64 (+30 bis +100 °C)	21 (0 bis +100 °C)
		CTE (ppm/K)	158 (T > 80 °C)	186 (+130 bis +160 °C)	

4.2.3 Stressmesschip und elektrisches Testlayout

Stressmesssysteme zur Charakterisierung von Belastungen mittels spannungssensitiver Elemente (z. B. Festkörperwiderstände, Hall-Elemente, Transistoren) werden in [79][85][104][146][182] aufgeführt. Die Testchips ermöglichen die experimentelle Bestimmung der Belastungen der Bauelementmontage- und Verkapselungsprozesse, um eine mögliche Vorschädigung des Package auszuschließen, sowie bei der Durchführung beschleunigter Umwelttests.

Aufbau und Funktion der verwendeten Silizium-Chips

Für die experimentellen Untersuchungen wird im Rahmen dieser Arbeit ein Silizium-Stressmesschip mit einer Kantenlänge von 4,3 mm * 4,3 mm eingesetzt. Der Sensorchip setzt sich aus vier identischen Einzelsektoren mit einer Kantenlänge von 2,0 mm * 2,0 mm zusammen. Die Dicke des Chips beträgt 300 µm. Das Layout besteht insgesamt aus 48 Pads, wobei sich in jedem Einzelsektor 12 Pads der Größe 200 µm * 200 µm mit einem Abstand von 400 µm befinden.

Der Testchip wird auf einem 100 mm Siliziumwafer gefertigt. Nach den einzelnen Prozessschritten zur Chipherstellung (Maskierung, Orientierung, Diffusion, Kontaktierung und Metallisierung im Sputterprozess mit AlSi) wird der Wafer zum Schutz der Chips vor äußeren Einflüssen passiviert, auf die erforderliche Dicke von 300 µm gedünnt und anschließend mittels Sägen vereinzelt. Die Messchips werden am Institut für Mikro- und Sensorsysteme, Universität Magdeburg, hergestellt. Die Aufbauten Flip-Chip-Kleben (ICA und NCA) mit Au-Stud-Bumps und das Drahtbonden werden dabei auf den AlSi-

Pads des Chips realisiert. Für das Flip-Chip-Löten ist eine Under Bump Metallisierung (UBM) aus Chrom, Nickel und Immersionsgold als lötbare und benetzbare Schicht zur Ausbildung einer intermetallischen Phase zwingend notwendig. Die UBM ist für die Verbindung zwischen den Cu- bzw. Al-Strukturen auf dem Wafer und den Lotbumps bzw. Drahtbondbumps erforderlich (Abbildung 42). Gleichzeitig dient die UBM als Diffusionsbarriere. [142][193]

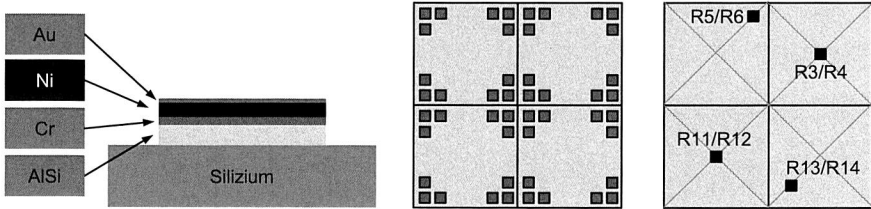


Abbildung 42: Schichtaufbau mit Under Bump Metallisierung sowie Layout des Testchips mit Anschlussflächen und Sensorpositionen [142]

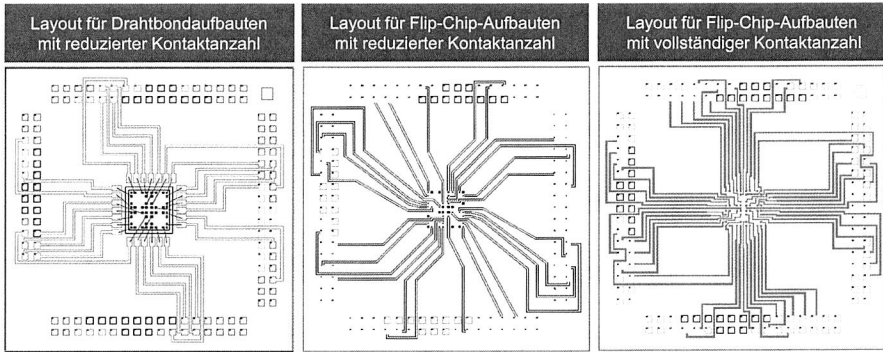
Für die Untersuchungen werden zwei unterschiedliche Chiplayouts verwendet. Der Testchip zur Erfassung der mechanischen Spannungen integriert spannungssensitive Sensorkomponenten, die als Bor-dotierte Festkörperwiderstände ausgebildet sind. Jeder der Einzelsektoren besteht aus 4 paarweise angeordneten Widerständen, die sich aufgrund der longitudinalen und transversalen Ausrichtung im Vorzeichen, aber nicht im Spannungswert unterscheiden. Die Chipverdrahtung dient der automatischen Erfassung der Widerstandswerte, die sich durch eine mechanische Belastung des Widerstandselementes verändern. Zudem ermöglicht die paarweise Anordnung ein Differenzsignal zur Kompensation der starken Temperaturabhängigkeit und erfasst dadurch die Differenz der Spannungswerte der beiden Hauptspannungsrichtungen in der Ebene (σ_x - σ_y). [142]

In Abbildung 42 ist die Zuordnung der für die Spannungsmessung relevanten Widerstandspaare dargestellt. Die Widerstandspaare R3/R4 und R11/R12 liegen in ihren Sektoren jeweils im zentralen Punkt, R5/R6 und R13/R14 sind dagegen außerhalb der Symmetrielinien angebracht. Durch die spiegelsymmetrische Anordnung der Widerstandspaare R3/R4 und R11/R12 bzw. R5/R6 und R13/R14 sind jeweils gleiche Ergebnisse zu erwarten.

Für die Lebensdauertests werden Chips mit Daisy-Chain-Strukturen eingesetzt. Die Chips werden alle mit einer UBM aus Chrom, Nickel und Immersionsgold versehen, da nur die Variante Flip-Chip-Löten untersucht wird. Insgesamt können pro Chip vier Widerstandswerte erfasst werden, wobei die Balls in der Chipecte jeweils mit berücksichtigt sind, da hier die höchste Beanspruchung und somit die frühesten Ausfälle erwartet werden.

Testlayout auf den MID-Substraten und auf FR4

Das Leiterbahnlayout auf den verschiedenen Substrattypen ist gemäß dem Chiplayout sowie der in 4.2.5 beschriebenen Messaufnehmer zur Kontaktierung der Substrate ausgelegt. Die Restriktionen der LDS-Technologie hinsichtlich minimaler Leiterbahnbreite sind berücksichtigt.



Layoutentwurf HSG-IMAT, Universität Stuttgart, IMOS, Universität Magdeburg

Abbildung 43: Leiterbahnlayout für die verschiedenen Substrate und Aufbautechnologien der Spannungsmessung [142]

Aufgrund der in [136] festgelegten Designregeln ist eine Kontaktierung aller auf dem Chip verfügbaren Anschlussflächen bei den MID-Substraten nicht möglich. Während der Umwelttests können daher nur die in Abbildung 42 aufgeführten vier Sensorpositionen ausgelesen werden. In Abbildung 43 ist das Leiterbahnlayout für die Drahtbond- und Flip-Chip-Aufbauten auf MID-Substraten mit reduzierter Kontaktzahl sowie das Layout für die FR4-Aufbauten dargestellt.

4.2.4 Charakterisierung der Aufbautechnologien

Zur Charakterisierung der verschiedenen Aufbautechnologien werden vor der Durchführung des Stressmonitorings und der Lebensdaueranalysen optische (z. B. Röntgen, Mikroskopie) und zerstörende Prüfungen (Schertest, Schlifffbild) der einzelnen Aufbauten sowie der verwendeten Substrate und Silizium-Chips durchgeführt.

Metallisierung der MID-Substrate

Bei den thermoplastischen Substratmaterialien werden Substrate unterschiedlicher Hersteller verwendet. Die Metallisierung zeigt dabei deutliche Unterschiede der Rauheit. In Abbildung 44 ist das Oberflächenprofil der Metallisierung auf LCP dargestellt.

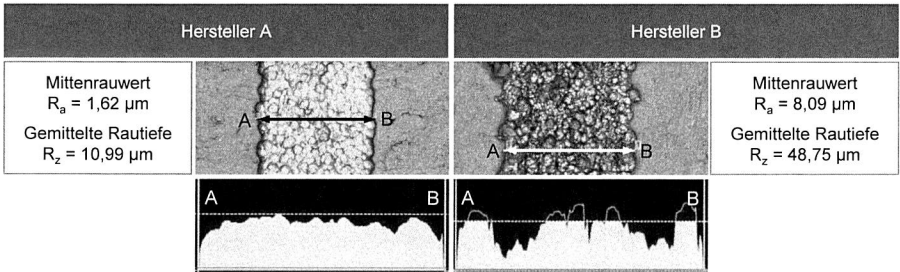


Abbildung 44: Oberflächenprofil der Metallisierung auf LCP

Die Substrate vom Hersteller A haben einen arithmetischen Mittenrauwert von $R_a = 1,62 \mu\text{m}$ bei einer gemittelten Rautiefe von $R_z = 10,99 \mu\text{m}$. Dagegen zeigen die Substrate vom Hersteller B eine wesentlich rauere Oberfläche mit einem Mittenrauwert von $R_a = 8,09 \mu\text{m}$ und einer gemittelten Rautiefe von $R_z = 48,75 \mu\text{m}$. Bei den durchgeführten Zuverlässigkeitsmessungen kann sowohl beim Stressmonitoring als auch bei den Lebensdaueruntersuchungen keine Abhängigkeit zwischen dem Versagen der Verbindungsstellen und der Beschaffenheit der Metallisierung der Substrate abgeleitet werden. Die Oberfläche der Bonds substrate, die ausschließlich von Hersteller A gefertigt werden, wird durch eine entsprechende Planarisierung der Oberfläche geglättet. Die LCP-Substrate werden mittels CO_2 -Schneestrahlnreinigung, die PET+PBT-Substrate mit einem Metallstempel mit Temperatur und Druck bearbeitet.

Baugruppen in Flip-Chip-Technologie

Für die Aufbauten des Flip-Chip-Lötens wird zunächst die Haftfestigkeit der Bumps bestimmt. Hierzu werden mit einem Schertester die Scherkräfte gemessen. Unterschiedliche Chargen zeigen starke Schwankungen. Bei ausreichend guter Haftung (Scherkräfte: Mittelwert 183,54 cN; Standardabweichung: 14,87 cN) kann ein Scherbruch in der Grenzfläche zwischen Ball und Metallisierung beobachtet werden. Bei zu geringer Haftung löst sich der Ball mit der UBM vom Chip bei deutlich geringeren Scherkräften ab. Chips dieser Chargen werden folglich nicht für den Aufbau verwendet.

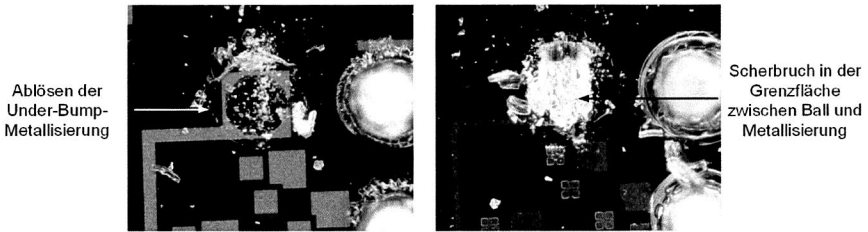


Abbildung 45: Bei geringer Haftung löst sich die UBM vom Chip, bei guter Haftung kommt es zu einem Scherbruch zwischen Ball und Metallisierung,

In Abbildung 46 sind Beispiele für Röntgen- und Schliffbilder für das Flip-Chip-Kleben mit NCA und das Flip-Chip-Löten auf MID-Substraten dargestellt. Ein Versatz der Stud-Bumps zur Metallisierung kann bei diesen Aufnahmen ausgeschlossen werden. In der Röntgenaufnahme ist ein leichtes Abfließen des Lotes zu erkennen. Bei den Folien substraten kann dieser Effekt auch festgestellt werden, bei FR4 dagegen nicht. Das Abfließen des Lotes wird durch das Fehlen von Lötstopplack auf dem Substrat ermöglicht. Bei den MID-Substraten wird das Entnetzen der Lötstelle durch die gute Benetzbarkeit der bewusst erzeugten rauen Oberfläche verstärkt. Deutlich zu erkennen ist der höhere Stand-Off beim Flip-Chip-Löten im Gegensatz zum Kleben mit NCA. Trotz der guten Fließeigenschaften des Underfillmaterials sowie des NCA und der definierten Temperatureinbringung beim Auftragen können einzelne Luftpneinschlüsse im Aufbau nicht verhindert werden. Beide Effekte können sich bei thermischer Belastung negativ auf die Lebensdauer der Baugruppen auswirken.

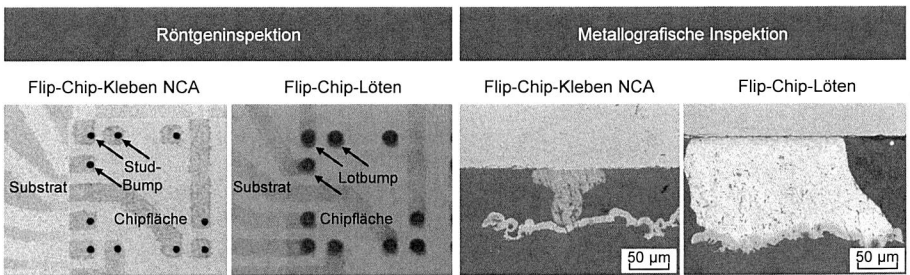


Abbildung 46: Röntgen- und Schliffbildaufnahmen der Flip-Chip-Montage auf MID-Substraten mittels Kleben mit NCA und Löten

Beim Flip-Chip-Kleben zeigt sich, dass die Höhe der Au-Stud-Bumps des Chips zum Teil unterschiedlich ist. Beim Einsatz von isotropem Leitkleber führen die Höhenunterschiede der Stud-Bumps zu keinem Problem, da die Stud-Bumps in die Leitkleberdepots bestückt werden. Für vergleichbare Ergebnisse beim Stressmonitoring ist aller-

dings ein möglichst einheitlicher Stand-off des Chips erforderlich. Bei der Verwendung von nicht leitendem Kleber wird die elektrische Kontaktierung durch den direkten Kontakt der Stud-Bumps mit der Substratmetallisierung realisiert. Bei stark unterschiedlichen Bumphöhen kann es daher zu einer Verdrehung des Chips während der Platzierung oder zu einer Nichtkontaktierung einzelner Bumps kommen.

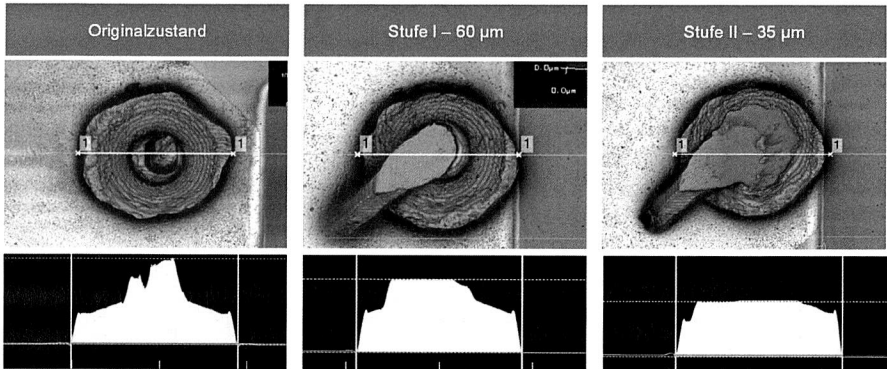


Abbildung 47: Das Coining führt zu sehr einheitlichen Höhen der Stud-Bumps über den gesamten Silizium-Chip bei reduziertem deformierbaren Anteil

Zur Optimierung der NCA-Aufbauten wird daher zusätzlich der Einfluss des Coinings (Leveling der Stud-Bumps) auf die Ausbeute der Aufbauten und die induzierten Spannungen untersucht. Das Coining hat sich in verschiedenen Untersuchungen bereits als sinnvolle Ergänzung zum Standardprozess mit nicht geplätteten Stud-Bumps gezeigt [4][5]. Mittels einer Vorrichtung aus Endmaßen werden die Stud-Bumps mit einem Stempel auf die gleiche Höhe (60 µm und 35 µm) gedrückt. Die Au-Stud-Bumps weisen nach dem Leveling über dem gesamten Silizium-Chip eine sehr einheitliche Höhe auf. In Abbildung 47 ist zu erkennen, dass durch ein zu starkes Glätten der deformierbare Teil der Stud-Bumps so stark reduziert wird, dass während des Platzierens des Chips Unebenheiten des Substrats nicht mehr ausgeglichen werden können. Da insgesamt keine deutliche Verbesserung im Prozess festgestellt werden kann, betrachten die folgenden Auswertungen nur die Untersuchungen mit Au-Stud-Bumps im Originalzustand. Dies ermöglicht auch weitestgehend vergleichbare Aussagen zu den ICA-Aufbauten.

Baugruppen in Drahtbond-Technologie

Die Charakterisierung der Drahtbondverbindungen erfolgt in Anlehnung an das Merkblatt DVS 2811. Für den verwendeten 30 µm AlSi1-Draht mit einer Abreißkraft von 16 cN bis 21 cN wird ein unterer Grenzwert von 7 cN für die Abreißkraft der Drahtverbindung festgelegt. Es werden umfangreiche Bondanproben sowohl auf PET+PBT als

auch auf LCP durchgeführt. Die Prüfung der Bondaufbauten erfolgt bei dem Industriepartner HASEC-Elektronik GmbH.

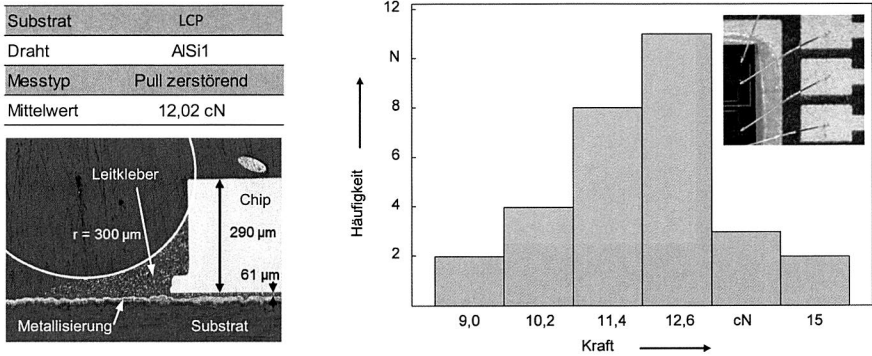


Abbildung 48 Die Vorbehandlung der laserstrukturierten MID-Substrate ermöglicht einen optimierten Drahtbondaufbau

In Abbildung 48 wird beispielhaft in einem Histogramm die Verteilung der Messwerte für eine Bondanprobe auf einem LCP-Substrat gezeigt. Für insgesamt 30 Messwerte ergibt sich bei dem zerstörenden Pulltest bei einer Standardabweichung von 1,46 cN ein Mittelwert von 12,02 cN für alle Bruchcodes, wobei jener nach [111] 50 % der Zerreißkraft des unverformten Drahtes nicht überschreiten sollte. Zudem liegt der Maximalwert bei 14,74 cN, der Minimalwert bei 9,04 cN. Bei 27 % der getesteten Bonds ist das Versagenskriterium Abreißen am 1. Bond, bei 70 % Abreißen am 2. Bond und bei 3 % Abheben am 1. Bond. Das Verhalten ist bei LCP und PET+PBT sehr ähnlich.

4.2.5 Stressmonitoring und Lebensdaueranalysen

Die folgenden Untersuchungen zeigen den Vergleich der verschiedenen Drahtbond- und Flip-Chip-Technologien auf den spritzgegossenen Substraten LCP und PET+PBT sowie auf FR4. Die im Verbund auftretenden Spannungen werden mit einem Sensorchip in-situ erfasst und ausgewertet. Ergänzend werden für die Aufbautechnologie Flip-Chip-Löten Lebensdauertests vorgestellt, die für eine Verifikation der Simulation mit und ohne Underfill durchgeführt werden.

Spannungsmessungen

Der Messaufbau für die Spannungsmessungen besteht aus einem PC mit Messsoftware, einer Messbox, einem Temperaturmessgerät und einem Klimaschrank mit zwei Messaufnehmern für die Prüfkörper (Abbildung 49). Die Messaufnehmer können Substrate mit den Abmessungen 31 mm * 31 mm mittels der im Kontaktsockel integrierten

Federkontakte aufnehmen und über eine Vierleiter-Messmethode auslesen. Die Kontaktsockel sind auf eine Interposerplatine aufgebracht, die der Entflechtung und Verteilung der Leitungen auf zwei SCSI-68 Buchsen und als Anschluss für die Messelektronik dient. Mit der Messbox können bis zu 96 Widerstände mit einer Messrate von 100 Hz und einer Messunsicherheit von 0,01 % vom Messwert bestimmt werden [142]. Die Temperaturen werden mit einem Temperaturfühler direkt am Chip erfasst und im Temperaturmessgerät abgespeichert.

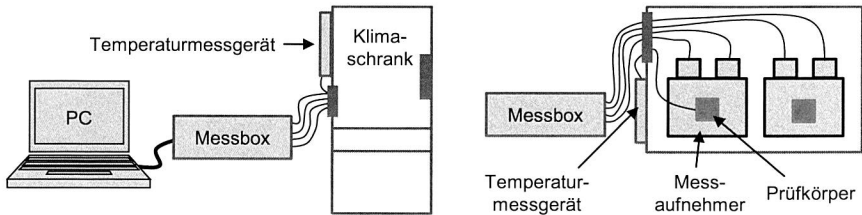
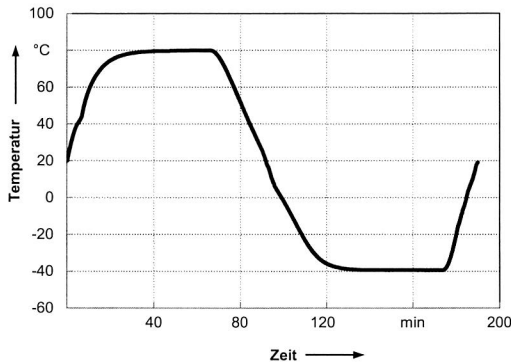


Abbildung 49: Schematische Darstellung des Prüfstandes mit Klimaschrank, Messbox und PC (links) sowie der Messaufnehmer mit Prüfkörpern und Temperaturmessgerät (rechts)

Der PC ist über eine Ethernet-Schnittstelle mit der Messbox verbunden und integriert eine Messsoftware zur Regelung und Auswertung der Messhardware. Der Software müssen (chargen-)spezifische Parameter der Halbleiterwiderstände vorgegeben werden, damit aus den temperaturabhängigen piezoresistiven Koeffizienten die mechanischen Spannungswerte berechnet werden können. Vor dem Start der eigentlichen Messung ist eine Kalibrierung zur Einstellung eines neutralen Punktes der mechanischen Spannung bei Raumtemperatur erforderlich. Dadurch werden Spannungen, die durch die entsprechende Verbindungstechnik bzw. den Messaufbau in den Verbund eingebracht werden, kompensiert.

Die Funktionsprüfkörper werden im Temperaturwechseltest bei Temperaturen von -40 °C bis $+80\text{ °C}$ (durchgeführt in Anlehnung an DIN EN 60 068-2-14) in fünf aufeinander folgenden Zyklen gemessen [21]. Eine Messung entsprechend dem Temperaturprofil in Abbildung 50 mit Aufwärm- und Abkühlzeit dauert ca. 18 Stunden, wobei die Widerstandswerte der einzelnen Messchips im Abstand von 10 Sekunden aufgezeichnet werden. Bei vier Widerstandspaaren und 6.500 Messungen ergeben sich 26.000 Messwerte pro Prüfkörper. Aus den Widerstandswerten werden die resultierenden Spannungen berechnet und mit der Temperaturmessung verknüpft. Diese erfolgt alle 30 Sekunden, im Messzeitraum werden folglich 2.160 relevante Temperaturwerte aufgenommen.



Messaufbau im
Temperaturwechselschrank

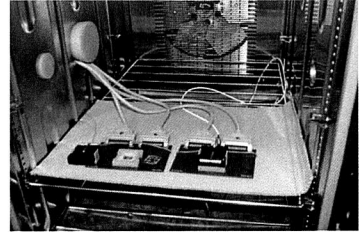


Abbildung 50: Temperaturprofil für die Stresstests mit Temperaturwechsel

Die folgenden Diagramme zeigen alle gemessenen Einzelwerte über fünf Zyklen im Temperaturwechseltest. Abgebildet wird jeweils die Differenzspannung ($\sigma_x - \sigma_y$) im Mittelpunkt der Wheatstonebrücken R3/R4, R5/R6, R11/12 und R13/R14. Da die Widerstandspaare R3/R4 und R11/R12 bzw. R5/R6 und R13/R14 auf dem Silizium-Chip identisch platziert sind, wird nur die Auswertung für eines der spiegelsymmetrischen Paare dargestellt. Dabei ist grundsätzlich ein Verlauf vom Positiven ins Negative bzw. umgekehrt möglich, da das Layout in oder senkrecht zur Fließrichtung des Substratwerkstoffs aufgebracht ist. Die Graphen weisen idealerweise im Bereich der festgelegten Referenztemperatur von 20 °C eine Differenzspannung von Null auf.

Abbildung 51 vergleicht die Differenzspannungen der Aufbautechnologie Flip-Chip-Löten mit und ohne Underfill. Eine Gegenüberstellung der Differenzspannungen für die Aufbautechnologie Flip-Chip-Kleben mit isotrop leitendem Klebstoff (ICA) und nicht leitendem Klebstoff zeigt Abbildung 52. Aufgrund der besseren Ergebnisse im Experiment für alle drei Aufbautechnologien werden bei der ICA-Variante die Widerstandspaare R11/R12 und R13/R14 abgebildet. Bei der NCA-Variante kann trotz guter Ergebnisse der Schlißbildanalyse und der Röntgeninspektion sowie entsprechender Prozessvariationen (z. B. Klebstoffauftrag, Leveling der Stud-Bumps) bei den Spannungsmessungen auf weniger funktionierende Aufbauten zurückgegriffen werden.

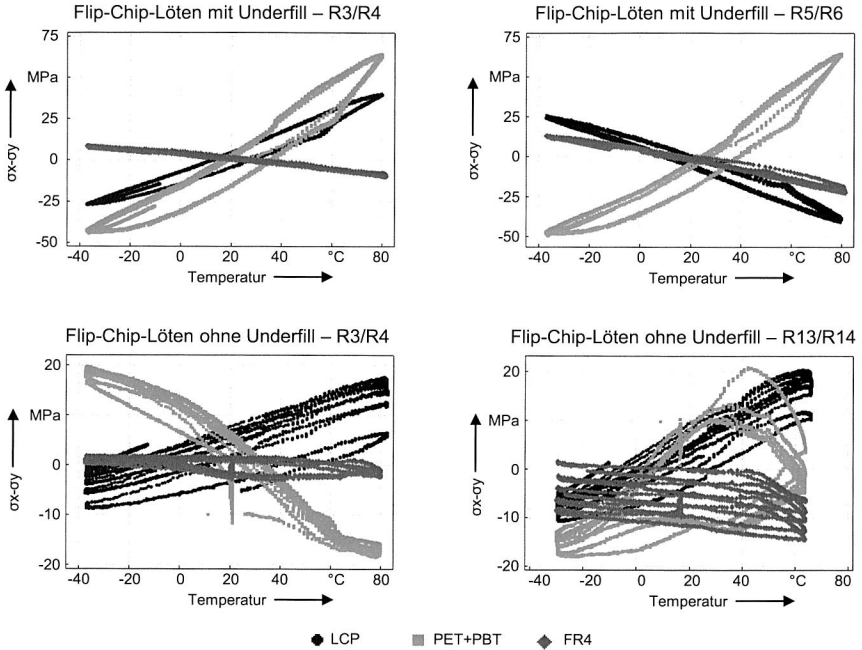


Abbildung 51: Vergleich der Differenzspannungen für die Aufbautechnologie Flip-Chip-Löten mit und ohne Underfill

Die drei Verfahrensvarianten Flip-Chip-Kleben mit NCA und ICA sowie das Flip-Chip-Löten mit Underfill zeigen im Experiment weitestgehend gut übereinstimmende Spannungswerte. Flip-Chip-Löten ohne Underfill hat im Vergleich zu den Aufbauten mit Underfill bzw. nicht leitendem Klebstoff wesentlich geringere Differenzspannungen. Mit Underfill werden die Spannungen gleichmäßig über den gesamten Chip verteilt. Bei den Aufbauten ohne Underfill lokalisieren sich die Spannungen in den Eckballs. Die Flip-Chip-Löten-Aufbauten ohne Underfill zeigen über die fünf erfassten Zyklen größere Schwankungen als die restlichen Aufbauten, vor allem gegenüber der Variante Flip-Chip-Löten mit Underfill. Dies deutet darauf hin, dass bereits im Temperaturbereich von $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ entsprechende mechanische Belastungen und demzufolge auch Veränderungen in der Verbindungsstruktur auftreten. Das anisotrope Materialverhalten durch die unterschiedliche Faserorientierung wird bei den Aufbauten Flip-Chip-Kleben mit ICA und NCA deutlich. Bei LCP ist die Ausrichtung in x-Richtung und bei PET+PBT in y-Richtung zu erkennen.

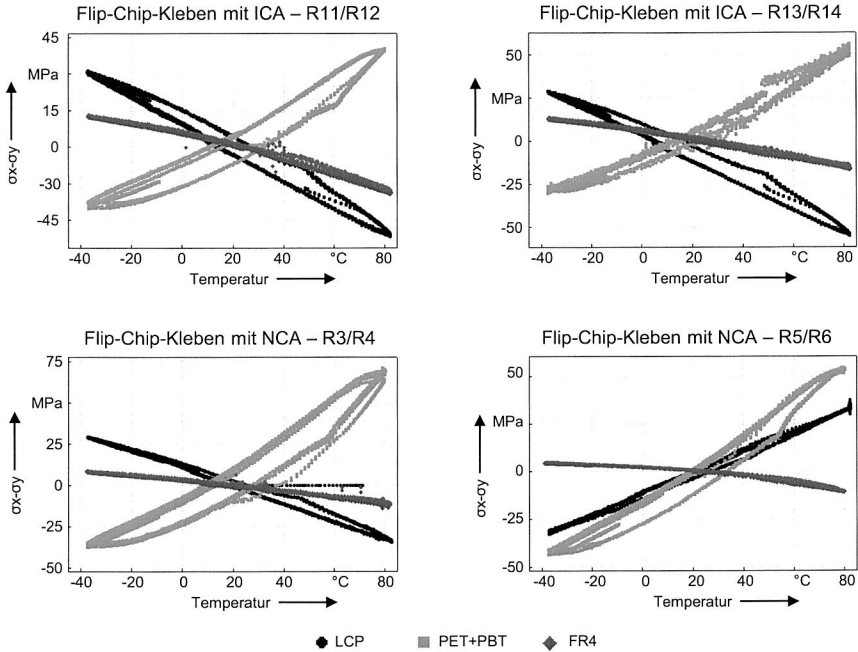


Abbildung 52: Vergleich der Differenzspannungen für die Aufbautechnologie Flip-Chip-Kleben mit isotrop leitendem Klebstoff (ICA) und nicht leitendem Klebstoff

Die MID-Substrate LCP und PET+PBT induzieren deutlich höhere Spannungen als FR4. Die Differenzspannungen bei PET+PBT sind im Vergleich zu den erfassten Werten auf LCP relativ hoch. Insbesondere bei der NCA-Variante sind die Werte von PET+PBT für das Widerstandspaar R3/R4 sehr hoch. Bei fast allen Messkurven ist bei PET+PBT eine Änderung im Spannungsverlauf bei 60 °C zu erkennen. Dies ist auf den Glasübergang des Polymers und den dadurch erhöhten CTE in Fließrichtung zurückzuführen.

Drahtbondaufbauten werden nur mit den MID-Substraten LCP und PET+PBT realisiert. Die Drahtbondtechnologie zeigt, abgesehen von den Aufbauten ohne Underfill, die geringsten gemessenen Differenzspannungen (Abbildung 53). PET+PBT weist im Vergleich zu LCP leicht höhere Werte auf. Gut zu erkennen ist auch hier das Abknicken des Spannungsverlaufs bei PET+PBT bei 60 °C. Ein zusätzlicher Effekt aufgrund des Glasübergangs des Leitklebers ist nur schwach ausgeprägt.

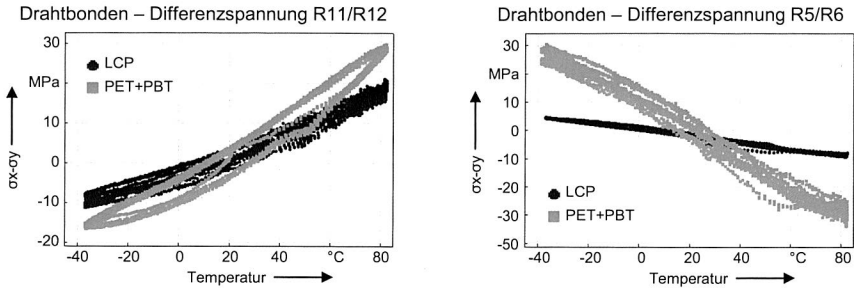


Abbildung 53: Vergleich der Differenzspannungen R11/R12 und R5/R6 für die Drahtbondaufbauten auf den MID-Substraten LCP und PET+PBT

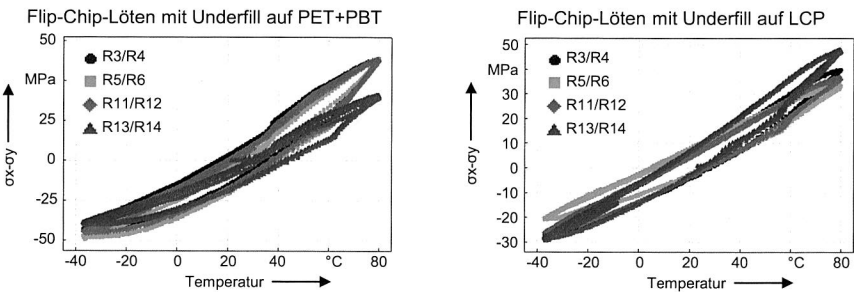


Abbildung 54: Vergleich der vier Differenzspannungen R3/R4, R5/R6, R11/R12 und R13/R14 für die Aufbautechnologie Flip-Chip-Löten mit Unterfill

Ein Vergleich der vier Differenzspannungen R3/R4, R5/R6, R11/R12 und R13/R14 verdeutlicht, dass die gemessenen Werte für alle Widerstandspaare für die Aufbautechnologie Flip-Chip-Löten der beiden MID-Substrate PET+PBT und LCP sehr ähnlich sind (Abbildung 54). Im Experiment ist ein Unterschied der Differenzspannung der Widerstandspaare auf der Symmetrieachse (R3/R4 und R11/R12) und den Widerstandspaaren, die nicht auf der Symmetrieachse (R5/R6 und R13/R14) liegen, nicht ersichtlich. Für FR4 ergibt sich ein ähnliches Bild mit vergleichbaren Differenzspannungen für alle vier Widerstandspaare.

Betrachtet man unterschiedliche Aufbautechnologien auf einem Substrattyp wird wiederum deutlich, dass die Flip-Chip-Technologien nahezu identische Differenzspannungen erzeugen. Abbildung 55 (links) zeigt für PET+PBT die Differenzspannung R3/R4 für die Aufbauten Flip-Chip-Löten mit und ohne Unterfill, für das Flip-Chip-Kleben mit NCA und ICA sowie für das Drahtbonds. Für das Substrat LCP wird der Sachverhalt in Abbil-

dung 60 veranschaulicht. In Abbildung 55 (rechts) sind beispielhaft die Messergebnisse für mehrere Baugruppen für das Flip-Chip-Löten auf PET+PBT dargestellt. Bei den durchgeführten Messungen kann im Allgemeinen eine gute Übereinstimmung der jeweiligen Differenzspannungen nachgewiesen werden. Vereinzelt sind bei den Experimenten auch Abweichungen erkennbar. Ursachen hierfür sind eine mangelnde Kontaktierung in der Messvorrichtung, ein defekter Chip oder auch eine fehlerhafte Verbindungstechnik. Die Messergebnisse können in diesen Fällen relativ einfach als fehlerhaft interpretiert und deshalb nicht für die Auswertung berücksichtigt werden.

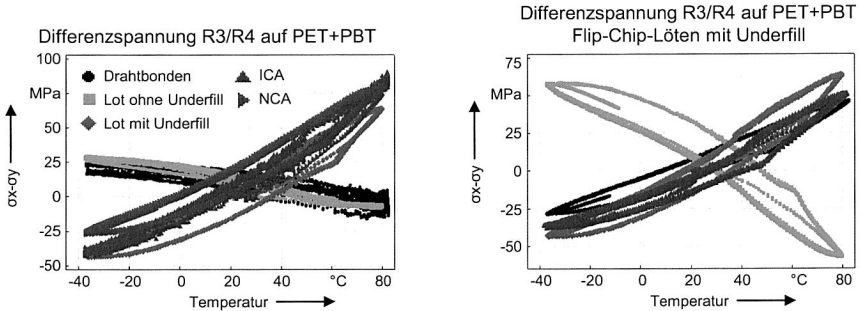


Abbildung 55: Vergleich der Differenzspannung für unterschiedliche Aufbautechnologien (links) bzw. für Flip-Chip-Löten (rechts) auf PET+PBT

Lebensdauerbewertung der Verbindungstechnik Flip-Chip-Löten

Zur Erweiterung der Kenntnisse aus den Spannungsmessungen und zur Verifikation der berechneten Lebensdauer der FEM-Analyse werden Lebensdauertests mit Daisy-Chain verdrahteten Silizium-Chips durchgeführt. Für die nachfolgenden Untersuchungen wird nur die Aufbauvariante Flip-Chip-Löten eingesetzt. Dabei werden wiederum die MID-Substrate PET/PBT und LCP sowie FR4 überprüft. Jede Aufbauvariante wird mit und ohne Unterfill realisiert.

Die Temperaturschocktests (-40 °C/+150 °C) erfolgen in Anlehnung an die Norm DIN EN 60 068-2-14. Insgesamt werden 2.000 Zyklen absolviert, wobei während der ersten 250 Zyklen die Widerstandswerte online erfasst werden. Das Signal der einzelnen Strukturen wird in Abständen von zwei Minuten erfasst und aufgezeichnet. Für jede Daisy-Chain ergeben sich somit 30 Messwerte pro Zyklus. Die permanente Überwachung der Prüflinge ermöglicht eine exakte Bestimmung der Ausfallzeitpunkte [171]. Außerdem wird bei den Aufbauten ohne Unterfill ein vorzeitiger Ausfall erwartet, weswegen eine Überprüfung der Kontaktierung der Verbindungsstellen in definierten Abständen bei Raumtemperatur mit einer elektrischen Widerstandsprüfung nicht ausrei-

chend ist. Während der restlichen Zyklen werden die Substrate zu festgelegten Zeitpunkten entnommen und der Widerstand gemessen.

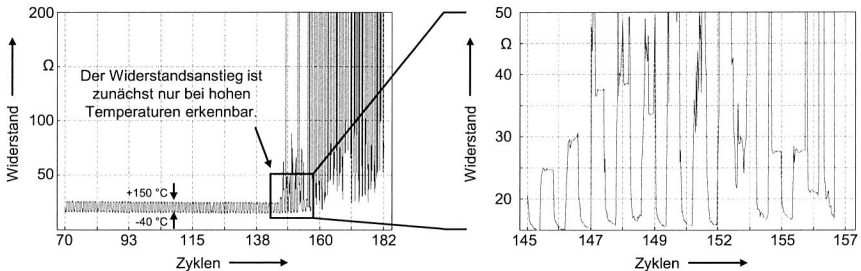


Abbildung 56: Exemplarischer Widerstandsverlauf für eine kontaktierte Daisy-Chain-Struktur während Temperaturschocklagerung (-40 °C/+150 °C)

Als Grenzwert für einen Ausfall wird der doppelte Initialwert des Widerstandes bei Raumtemperatur vorgegeben. Die Struktur gilt als defekt, wenn dieser Widerstandswert in drei aufeinander folgenden Zyklen überschritten wird. In Abbildung 56 ist ein exemplarischer Widerstandsverlauf der Zyklen 70 bis 182 für eine ausgewählte Baugruppe mit Daisy-Chain-Struktur dargestellt. Der Grenzwert ist, basierend auf dem initial gemessenen Wert von 20 Ω , auf 40 Ω festgelegt. Dieser Widerstandswert wird in den Zyklen 147, 148 sowie 149 überschritten und gilt somit als defekt. Die Widerstandserhöhung tritt zunächst nur bei hohen Temperaturen auf. Daher zeigt sich der Temperaturwechsel auch im Widerstandsverlauf. Der Ausfall deutet auf einen Riss in der Verbindungsstelle hin, der sich mit zunehmender Zeit ausweitet und letztlich zu einem Komplettausfall führt.

Zuverlässigkeit der Aufbautechnologie Flip-Chip-Löten ohne Underfill

Mit einer Weibull-Analyse wird, basierend auf diesen Ergebnissen, die charakteristische Lebensdauer bestimmt. Die Auswertung der Ausfallwahrscheinlichkeit der Aufbauten ohne Underfill ist in Abbildung 57 veranschaulicht. Dabei wird jeweils der Formfaktor β und die charakteristische Lebensdauer α für die verschiedenen Substrate angegeben.

Die ersten Ausfälle treten bei den Aufbauten auf dem Substrat PET+PBT bereits nach wenigen Zyklen auf, was im Vergleich zu den anderen Substraten auf die hohen CTE-Werte und die starke Anisotropie zurückzuführen ist. Das MID-Substrat LCP besitzt im Vergleich zu PET+PBT eine wesentlich höhere charakteristische Lebensdauer, die nahezu identisch mit FR4 ist. Bei allen Substraten ist der Formfaktor $\beta > 1$. Die Ausfälle können somit auf eine klassische Ermüdung des Systems zurückgeführt werden.

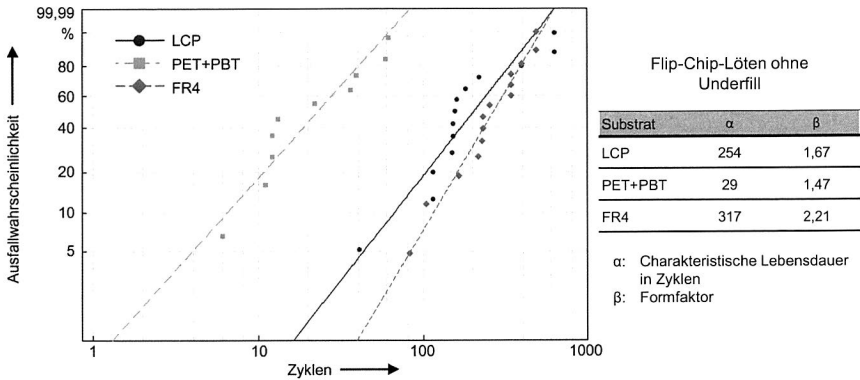


Abbildung 57: Ausfallwahrscheinlichkeit der Flip-Chip-Löten-Aufbauten ohne Underfill auf MID- und FR4-Substraten

Zuverlässigkeit der Aufbautechnologie Flip-Chip-Löten mit Underfill

Durch die Verwendung von Underfill kann die Haltbarkeit der Aufbauten im Flip-Chip-Löten auf allen Substratmaterialien um ein Vielfaches gesteigert werden. Die Spannungen werden durch den Underfill auf die ganze Chipfläche verteilt, wodurch einzelne Balls nicht mehr so stark belastet sind. Bei den Lebensdauertests mit Underfill ist für die MID-Substrate und auch für FR4 nach 2.000 Zyklen noch kein Ausfall aufgetreten. Das Auftragen von Underfill ist folglich absolut erforderlich. Eine weitere Steigerung der Lebensdauer bei den MID-Substraten ist durch die Verwendung von Lötstopplack möglich. Eine starke Entnetzung führt zu einer unsymmetrischen und damit inhomogenen Verbindungsstelle und stellt einen nicht zu vernachlässigenden Faktor dar.

Schliffbildanalysen zur Bestimmung der Ausfallart und -ursache

Nach dem Ausfall der Testbaugruppen wird, basierend auf den elektrischen Messungen, der exakte Schadensort ermittelt, um Rückschlüsse auf das versagende Element ziehen zu können. Zur Ermittlung der Schadensursache werden Schliffbildanalysen der Aufbauten mit und ohne Underfill durchgeführt.

Bei den Aufbauten ohne Underfill weisen die Verbindungsstellen bei LCP im Randbereich des Silizium-Chips einen Ermüdungsbruch im Lotmaterial (Kohäsionsbruch) auf (Abbildung 58). Deutlich zu erkennen ist das Entnetzen der Lötstelle aufgrund des fehlenden Lötstopplacks. Bei noch stärkerem Abfließen kann die Lotmenge in der Verbindungsstelle zu gering werden und dadurch frühzeitig zu einem Ausfall oder im Extremfall zu einer offenen Kontaktstelle führen. Bei dem anderen MID-Substrat, PET+PBT, zeigt sich ein Mischbruch. Häufig kommt es bei PET+PBT aber zu einem reinen Versa-

gen in der Nähe der Chipmetallisierung, also zu einem Adhäsionsbruch. Die Schliffbildanalyse der FR4-Aufbauten ohne Underfill bestätigt, dass die Belastungen in den Bereichen mit dem größten Abstand zu dem dehnungsneutralen Punkt, der Chipmitte, am größten sind. Die Verbindungsstellen zeigen wie bei LCP einen Ermüdungsbruch im Lotmaterial. Die Balls in der Chipmitte sind mit Ausnahmen bei dem Substrat PET+PBT nahezu ohne Schädigung. Der Unterschied des Ausfallverhaltens von PET+PBT im Vergleich zu FR4 und LCP kann mit den hohen und stark richtungsabhängigen CTE-Werten erklärt werden. Dadurch werden vergleichsweise hohe thermomechanische Spannungen induziert, was zu einem frühzeitigen Ausfall führt. Die Schliffbildanalyse der Aufbauten mit Underfill nach 2.000 Zyklen in Abbildung 59 weist noch keine defekten Lötstellen auf. Im Randbereich der Lötstelle zum Siliziumchip ist aber bei den MID-Substraten eine beginnende Rissausbreitung deutlich zu erkennen.

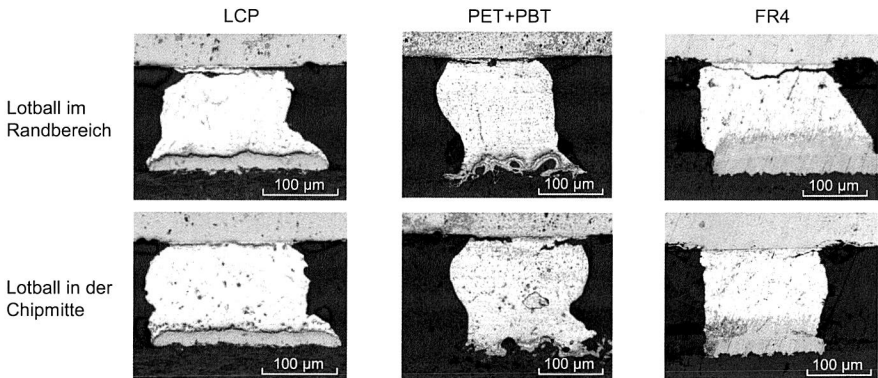


Abbildung 58: Bei den Aufbauten ohne Underfill zeigt sich ein Ermüdungsbruch in den Verbindungsstellen im Randbereich des Siliziumchips

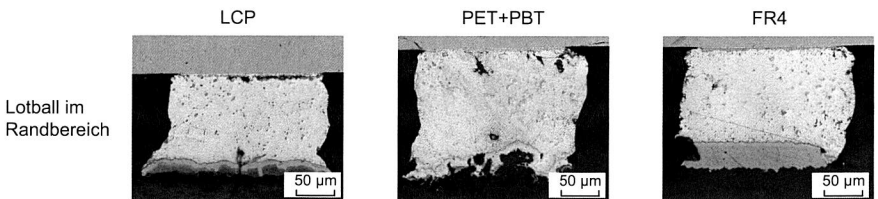


Abbildung 59: Die Baugruppen mit Underfill zeigen nach 2.000 Zyklen eine beginnende Rissausbreitung zwischen Lötstelle und Siliziumchip

4.3 Systematische Analyse der Erkenntnisse für den Verbund Chip auf thermoplastischen Substraten

Die in Kapitel 4.2 durchgeführten Untersuchungen ermöglichen eine optimierte Material- und Prozesswahl sowie Aussagen zu den daraus resultierenden Spannungen für den Verbund bei thermischer Belastung. Parallel zu der experimentellen Qualifizierung erfolgte an der Universität Stuttgart (HSG-IMAT) eine Simulation des Verbundverhaltens mittels einer Finite-Elemente-Analyse (FEA). Die entscheidenden Erkenntnisse werden im Folgenden den experimentell erzielten Erkenntnissen gegenübergestellt.

4.3.1 Verifikation der FE-Analyse mit der experimentellen Qualifizierung

Die Simulation des Verbundverhaltens der Baugruppen umfasst eine Modellierung der Substrat- und Verbindungsmaterialien, die Erstellung und Analyse eines thermomechanischen Modells für die vier verschiedenen Aufbautechnologien sowie Aussagen zur Lebensdauer bzw. zum Ausfallverhalten für die Variante Flip-Chip-Löten.

Die FE-Analyse zeigt, dass, unabhängig vom Substrat auf der Sensorchipfläche bei der Drahtbondtechnologie, insbesondere im hohen Temperaturbereich die geringste Differenzspannung induziert wird. Dies kann mit dem niedrigen Glasübergang des Leitklebers und der größeren Entfernung der Funktionsfläche des Chips vom Substrat erklärt werden. Die Flip-Chip-Technologien weisen vergleichbare Differenzspannungen mit nur geringfügigen Unterschieden ($|\sigma_x - \sigma_y|(\text{ICA}) < |\sigma_x - \sigma_y|(\text{Löten}) < |\sigma_x - \sigma_y|(\text{NCA})$) auf. Die Werkstoffauswahl hat großen Einfluss auf die induzierten Spannungen. Bei FR4 ist die Differenzspannung am geringsten, bei den MID-Substraten erzeugt LCP niedrigere Spannungen als PET+PBT. [142]

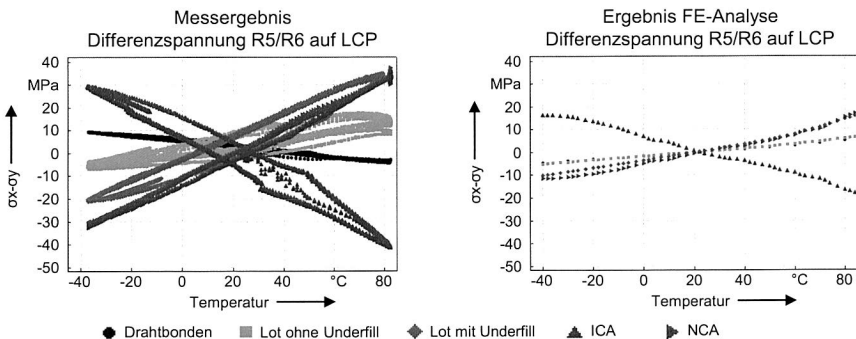


Abbildung 60: Vergleich der Simulations- und Messergebnisse der Differenzspannung R5/R6 auf LCP [142]

Ein Vergleich unterschiedlicher Aufbautechnologien auf einem Substrat bzw. einer Aufbautechnologie auf verschiedenen Substraten ermöglicht eine Gegenüberstellung zwischen der thermomechanischen Berechnung und den experimentellen Untersuchungen. Die Simulations- und Messergebnisse der Differenzspannung R5/R6 auf LCP sind in Abbildung 60 veranschaulicht. Für die Flip-Chip-Technologien Lötén, Kleben mit NCA und ICA ergibt sich eine gut vergleichbare Verteilung der berechneten und experimentell ermittelten Werte, die im Experiment höher sind als in der Simulation. Die Drahtbondaufbauten zeigen in beiden Fällen deutlich niedrigere Spannungen als die Flip-Chip-Aufbauten.

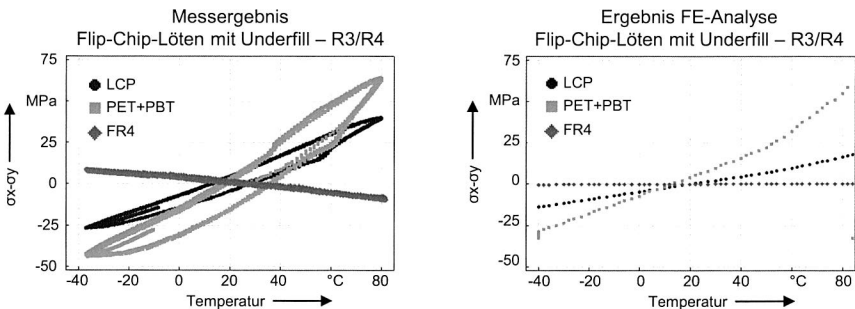


Abbildung 61: Vergleich der Simulations- und Messergebnisse der Differenzspannung R3/R4 für die Aufbautechnologie Flip-Chip-Lötén [142]

Auch bei einer Betrachtung der Differenzspannung R3/R4 bei der Aufbautechnologie Flip-Chip-Lötén werden die experimentell ermittelten Ergebnisse durch die FE-Analyse sehr gut abgebildet (Abbildung 61). Bei PET+PBT sind die induzierten Spannungen am größten, der Glasübergang bei 60 °C ist sowohl im Experiment als auch in der Simulation gut zu erkennen. Die gemessene Differenzspannung von FR4 ist sehr gering, in der Berechnung ist die Differenzspannung $\sigma_x - \sigma_y = 0$.

Die Lebensdauerprognose der Simulation wird, basierend auf Literaturparametern für das sekundäre Lotkriechgesetz und die Coffin-Manson-Gleichung, durchgeführt. Zudem wird die Annahme bestätigt, dass der Ball mit der größten Entfernung zum dehnungsneutralen Punkt am stärksten belastet ist. Daher wird die Lebensdauer mit einem Eckball ermittelt. Die numerische Lebensdauerprognose der Aufbauvarianten Flip-Chip-Lötén mit und ohne Underfill zeigt eine geringfügig niedrigere Lebensdauer als im Experiment. Für den Thermoplasten PET+PBT ergibt sich für die Aufbauten ohne Underfill eine geschätzte Lebensdauer von 13 Zyklen, für LCP von 87 Zyklen und für FR4 von 92 Zyklen. Demzufolge bestätigen die praktischen Untersuchungen die deutlich geringere Lebensdauer von PET+PBT sowie die vergleichbaren Aussagen für LCP und FR4. Im

Gegensatz dazu wird bei den Aufbauten mit Underfill für die drei Substrate jeweils eine Lebensdauer größer als 1.000 Zyklen berechnet, was in einem für die Flip-Chip-Technologie zu erwartenden Bereich liegt und durch das Experiment nachgewiesen werden konnte. [142]

In Tabelle 15 ist eine Gegenüberstellung der experimentell ermittelten und der berechneten charakteristischen Lebensdauer für die verschiedenen Substrattypen aufgeführt. Dabei wird zwischen den Aufbauvarianten mit und ohne Underfill unterschieden. Bei der geschätzten Lebensdauer, basierend auf dem experimentell ermittelten Ausfallverhalten, erfolgt eine Bestimmung der charakteristischen Lebensdauer für alle Daisy-Chains (α_{Exp}) und mit Vorgabe eines Ausfallkriteriums ($\alpha_{Exp,DC}$). Hierbei wird die einzelne Daisy-Chain als Ausfallkriterium vorgegeben. Bei den Lebensdauerwerten der FE-Analyse wurde eine thermische Zeitkonstante berücksichtigt. Dadurch ergeben sich geringfügige Abweichungen gegenüber dem Solltemperaturprofil.

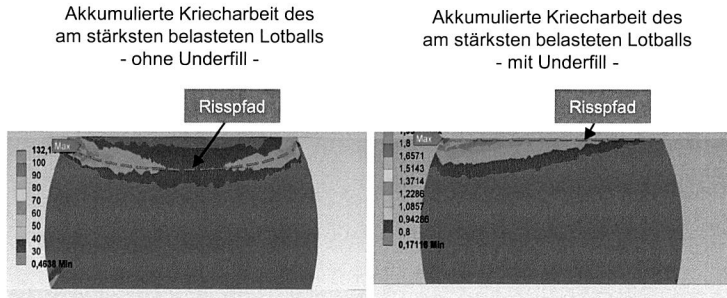
Tabelle 15: Vergleich der experimentell ermittelten und der berechneten charakteristischen Lebensdauer der Aufbautechnologie Flip-Chip-Löten mit und ohne Underfill [142]

	α_{sim}	α_{Exp}	$\alpha_{Exp,DC}$	α_{sim}	α_{Exp}	$\alpha_{Exp,DC}$
	ohne Underfill			mit Underfill		
LCP	87	254	163	1194	> 2000	> 2000
PET+PBT	13	29	25	1510	> 2000	> 2000
FR4	92	318	287	1540	> 2000	> 2000

Die Analyse des Ausfallverhaltens ist in Abbildung 62 dargestellt. Die akkumulierte Kriearbeit deutet bei den Aufbauten ohne Underfill auf einen schalenförmigen Kohäsionsbruch des Lotes im Bereich des Chipinterfaces hin. Bei den Aufbauten mit Underfill zeigt sich ein anderes Ausfallverhalten. Der Risspfad verläuft im Bereich der Chipmetallisierung und lässt einen Adhäsions- oder Mischbruch vermuten. Das Experiment bestätigt bei den Aufbauten ohne Underfill auf FR4 und LCP exakt dieses Ausfallverhalten. Bei den Aufbauten mit Underfill wird aufgrund der beginnenden Rissausbreitung bei LCP und PET+PBT ein Mischbruch im Bereich des Siliziumchips erwartet.

Basierend auf den dargelegten Zusammenhängen wird die Schlussfolgerung getroffen, dass der Einsatz der Simulation für thermoplastische Schaltungsträger geeignet ist, um entwicklungsbegleitend Erkenntnisse über die spätere Robustheit eines Systems bei thermischer Belastung zu gewinnen. Charakteristische Effekte wie beispielsweise anisotrope Materialeigenschaften oder das Überschreiten der Glasübergangstemperatur können sehr gut abgebildet werden. Dadurch erschließt sich von Beginn an eine zielgerichtete Entwicklung mit deutlich reduziertem Aufwand für experimentelle Umwelttests. Die Technologie- und Substratvorauswahl sowie layout- und geometriespezifische

Details können vorab mit der Simulation verifiziert werden. Die geringen quantitativen Abweichungen können mit Unterschieden im Aufbau, z. B. beim Stand-Off, bei der Geometrie der Verbindungsstelle oder bei der Faserausrichtung, erklärt werden. [142]



FE-Analyse, Universität Stuttgart, HSG-IMAT, Dr.-Ing. Marc Schober

Abbildung 62: Auswertung der akkumulierten Kriearbeit für die Aufbautechnologie Flip-Chip-Löten mit und ohne Underfill [142]

4.3.2 Bewertung der Zuverlässigkeit der Chipmontage auf MID

Die Lebensdaueranalyse der Aufbautechnologie Flip-Chip-Löten zeigt eine hohe Zuverlässigkeit für die MID-Substrate LCP und PET+PBT. Durch die Verwendung von Underfill kann die Zuverlässigkeit deutlich gesteigert werden. Eine weitere Steigerung der Zuverlässigkeit ist bei den MID-Substraten durch die Verwendung von Lötstopplack zu erwarten und grundsätzlich für sensible Aufbautechnologien zu empfehlen.

Die Analyse der Differenzspannungen für unterschiedliche Aufbautechnologien zeigt, dass bei der Verarbeitung miniaturisierter Bauelemente auf thermoplastischen Substraten die Wahl des Werkstoffs entscheidend ist. Ein hoher und richtungsabhängiger thermischer Ausdehnungskoeffizient induziert im Verbund vergleichsweise hohe mechanische Spannungen. Dies kann zu einem frühzeitigen Ausfall der Baugruppe führen. Insbesondere bei komplexen 3D-Geometrien kann die Platzierung der elektronischen Komponenten einen großen Einfluss auf die Spannungen und somit auf die Zuverlässigkeit der Baugruppe haben. Durch ein an die Fließrichtung angepasstes Schaltungslayout auf dem Chip kann die Spannungsverteilung im Verbund günstig beeinflusst werden. Als Substratwerkstoff ist LCP dem Einsatz von PET+PBT aus rein technischer Betrachtung vorzuziehen.

Die niedrigsten Spannungen auf MID-Substraten werden bei den Drahtbondvarianten induziert. Das Drahtbonden erfordert allerdings eine Vorbehandlung der Substrate zur Planarisierung der rauen Oberfläche bei laserstrukturierten Bauteilen. Die Spannungswerte der Flip-Chip-Aufbauten sind gut vergleichbar, da diese maßgeblich durch die

spezifischen Eigenschaften des starren Substrates beeinflusst werden. Das Flip-Chip-Löten ist hierbei ein interessantes Verfahren, da es die Verarbeitung weiterer Bauelemente, z. B. Widerstände oder Kondensatoren, in einem Prozess zulässt. Eine geringere thermische Belastung erfährt die Baugruppe beim Flip-Chip-Kleben, wobei hier bei der Verwendung von Leitleber, insbesondere bei einer hohen Anschlusszahl des Flip-Chips, eine höhere Ausbeute erreicht werden kann. Bei den NCA-Aufbauten führen unterschiedliche Stud-Bump-Höhen zu Problemen beim Aufbau und ggf. ist vorab ein Leveling der Stud-Bumps erforderlich. Allerdings ist bei der Verwendung von nicht leitendem Kleber kein zusätzlicher Auftrag von Underfill notwendig, wodurch sich eine vergleichsweise kurze Prozesskette ergibt.

Die vorgestellten Untersuchungen zur thermomechanischen Analyse unterschiedlicher Aufbautechnologien auf thermoplastischen Substraten können in der Prozesskette auch auf die Fertigungsprozesse übertragen werden. Eine Analyse des Stresseintrags während der Chipmontage, z. B. beim Löten oder Aushärten des Klebstoffs, und weiterer Aufbauprozesse, z. B. beim Vergießen oder Umspritzen, ermöglicht durch eine Variation der Substratmaterialien, der Verbindungsmedien, der Ausrichtung des Schaltungslayouts oder durch eine Anpassung der Prozessparameter eine Reduzierung der Belastungen für den Verbund. Insbesondere bei immer kleiner werdenden Anschlussstrukturen und dünneren Silizium-Chips wirkt sich eine größere Chipverformung oder Substratverwölbung negativ auf die Verbindungsstellen und die funktionale Struktur aus. Des Weiteren kann im Bereich des Structural Health Monitoring durch Beobachtung des Stressverlaufs die Entwicklung von Schadensbildern analysiert werden [176].

5 Rapid Prototyping und Manufacturing von 3D-MID

Prototypen sind insbesondere in den frühen Phasen der Produktentstehung ein wichtiges Hilfsmittel für den Entwicklungsprozess. In der Technologie MID können dadurch einerseits Entscheidungsprozesse forciert, zum anderen eine Beschleunigung der Produktentwicklung erreicht und somit vorhandene Barrieren, wie beispielsweise lange Time-to-Market-Phasen, reduziert werden. Durch entsprechende Anschauungs- und Funktionsmodelle lassen sich spätere zeit- und kostenintensive Änderungen vermeiden. Geometrische Modelle werden neben spanenden meist mit generativen Fertigungsverfahren hergestellt, da diese im Vergleich zu klassischen Technologien ohne produktspezifische Werkzeuge auskommen. Rapid Prototyping (RP) dient der Herstellung von physischen Bauteilen ohne Produktcharakter. Beim Rapid Manufacturing (RM) hingegen werden Bauteile mit den Eigenschaften von Endprodukten erzielt. [30][61]

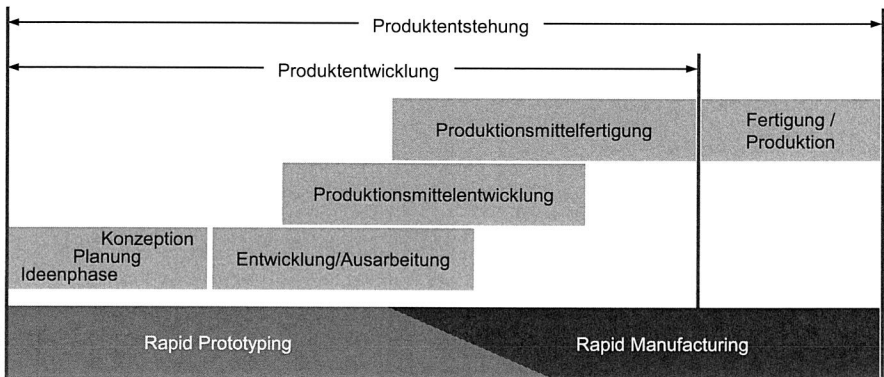


Abbildung 63: Einordnung des Rapid Prototyping und Rapid Manufacturing in den Produktentstehungsprozess nach VDI 2221 [61][164]

Die Einordnung des Rapid Prototyping und Rapid Manufacturing in den Produktentstehungsprozess nach VDI 2221 ist in Abbildung 63 veranschaulicht. Das Rapid Prototyping ist vor allem in den Phasen der Produktentwicklung wichtig. Funktionelle Prototypen sind hingegen für den Entwicklungs- und Ausarbeitungsprozess konkreter Ideen sinnvoll. Das Rapid Manufacturing ist daher insbesondere in den späteren Phasen der Produktentwicklung und der Fertigung von Bedeutung. [164]

5.1 Grundlagen zur Herstellung von Prototypen

Die Technologie MID stellt bei der Generierung von Prototypen hohe Anforderungen, da sowohl geeignete Verfahren zur Herstellung des Grundkörpers als auch eine flexible Gestaltung des elektrischen Layouts zur Verfügung stehen müssen. Für ein endpro-

duktnahes Modell des Grundkörpers müssen die RP-Verfahren vergleichbare konstruktive Gestaltungsfreiheiten zulassen wie die klassischen MID-Fertigungsverfahren. Für die Funktionalisierung mit Leiterbahnen und elektronischen Bauelementen ist eine hohe Oberflächenqualität erforderlich. Idealerweise weisen die RP-Materialien gleiche Eigenschaften wie seriennahe Werkstoffe auf und sind mit den Standardprozessen der Elektronikproduktion (z. B. Dampfphasenlötten bei 230 °C) kompatibel.

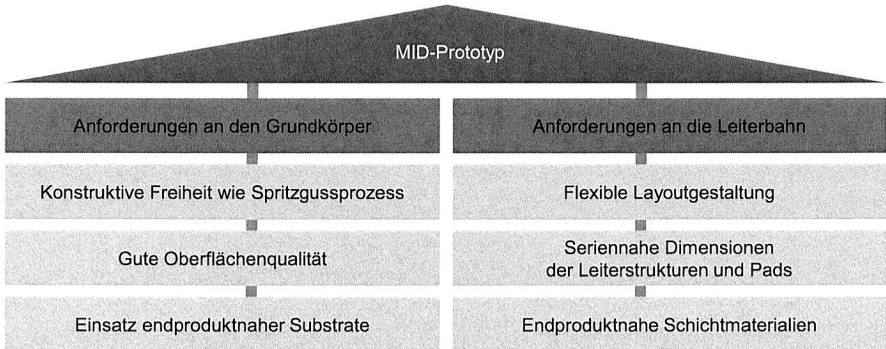


Abbildung 64: Anforderungen an Prototypen für die Technologie MID

Eine hohe Flexibilität der Leiterbahngenerierung ermöglicht in dieser frühen Phase der Produktentstehung eine einfache Anpassung des elektrischen Layouts. Die Dimensionen der Leiterbahnen und Pads müssen entsprechend der für die Serienproduktion relevanten Herstellungsverfahren abbildbar sein. Endproduktnahe Schichtmaterialien sind eine wesentliche Voraussetzung, damit die Prototypen mit den Standardverbindungs-techniken Leitleben oder Lötten kompatibel sind. [1][19][68][69]

5.1.1 Generative Fertigungsverfahren zur mechanischen Formgebung

Generative Fertigungsverfahren erstellen Bauteile meist schichtweise durch Aneinanderfügen von Volumenelementen. Die Generierung der Schichtgeometrie erfolgt dabei direkt aus den 3D-CAD-Daten ohne produktspezifische Werkzeuge. Während des Bau-prozesses, der in jeder beliebigen Orientierung und Skalierung erfolgen kann, werden die mechanisch-technologischen Eigenschaften festgelegt. In z-Richtung entstehen somit stufige dreidimensionale Gebilde. Der Treppenstufeneffekt kann durch eine kleine z-Stufung reduziert werden. Die Schichtstärken sind derzeit im Bereich 0,1-0,5 mm, bei Anlagen für Mikrobauerteile sogar bis 5 nm. [61][196]

In Anlehnung an die DIN 8580 lassen sich generative Fertigungsverfahren nach dem Aggregatzustand des Grundwerkstoffs in Bauteile aus der festen, der flüssigen und der Gasphase klassifizieren (Abbildung 65). Bei der Bauteilherstellung aus festen Materia-

lien können Sinter-/Schmelz- (z. B. selektives Lasersintern (SLS)), Extrusions- (z. B. Fused Deposition Modeling (FDM)), Schicht-Laminat- (z. B. Laminated Object Manufacturing (LOM)) und 3D-Druck-Verfahren unterschieden werden. Hierbei liegt der Ausgangswerkstoff in Form von Pulver, Granulat, Folie oder Platte vor und wird durch An- bzw. Aufschmelzen oder durch Zusetzen von Binder mit der darunterliegenden Schicht verbunden. Die Bauteilgenerierung aus flüssigen oder pastösen Materialien erfolgt dagegen meist durch einen Vernetzungsprozess. Das bekannteste und am häufigsten eingesetzte Verfahren ist die Stereolithografie. Durch Bestrahlung mit einem Laser wird das Ausgangsmaterial (z. B. Epoxydharz) in einem Bad durch Polymerisation ausgehärtet. Aus der gasförmigen Phase können durch Abscheidungsprozesse technologisch bedingt nur sehr dünne Schichten erzeugt werden. Dabei wird zwischen der physikalischen Abscheidung und der chemischen Abscheidung unterschieden. Für den Aufbau von MID-Substraten eignen sich gemäß der dargestellten Anforderungen von den generativen Fertigungsverfahren vorwiegend die Prozesse aus fester Phase und die Polymerisationsverfahren. Damit können ausreichende Abscheidungsraten für die Herstellung des Grundkörpers erzielt und seriennahe Werkstoffe, z. B. PA oder PPS, oder Materialien mit vergleichbaren Eigenschaften verarbeitet werden. [61][94][165][198]

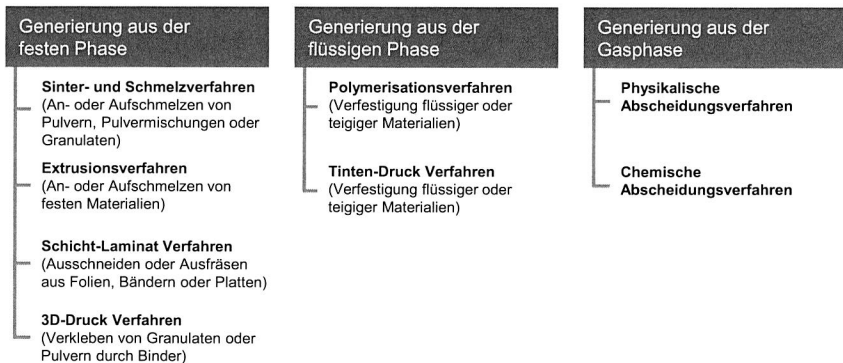


Abbildung 65: Einteilung der generativen Fertigungsverfahren nach dem Aggregatzustand des Grundwerkstoffs [61]

Neben den in Abbildung 65 gegliederten generativen Fertigungsverfahren sind für MID-Prototypen auch indirekte Verfahren möglich. Ein Beispiel ist das Vakuumgießen mit Polyurethanharzen [77]. Auf Basis eines z. B. mit Stereolithografie hergestellten Urmodells wird eine Silikongießform erstellt, in der anschließend die Prototypen im Vakuumgießverfahren erzeugt werden können. Als weitere Alternative können Grundkörper für 3D-MID-Prototypen auch durch spanende Bearbeitung (z. B. Fräsen) hergestellt werden. Hierfür werden entsprechende Halbzeuge (z. B. dicke Plattenmaterialien) bzw. Werkzeuge zur Realisierung der erforderlichen Basisgeometrie eingesetzt. Bei der Ver-

wendung von LDS-Werkstoffen muss der Grundkörper nach der mechanischen Bearbeitung chemisch deaktiviert werden, damit freigelegte Füllstoffpartikel nicht zu einer unerwünschten Aktivierung und somit Metallisierung führen. Dies kann nach der mechanischen Bearbeitung und vor dem Lasern, beispielsweise mit einem sauren Reiniger, erfolgen [50]. Komplexe Geometrien (z. B. starke Hinterschnitten oder Hohlräume) können mit beiden Verfahren nur eingeschränkt erstellt werden.

5.1.2 Funktionalisierung mit elektrischen Leiterbahnen

Zur Funktionalisierung der mechanischen Grundkörper mit Leiterbahnen sind eine flexible Layoutgestaltung und eine feine 3D-Strukturierung erforderlich. Insbesondere Technologien, die durch eine Änderung des CAD-Layouts eine Modifikation der Struktur ermöglichen, eignen sich zur flexiblen Fertigung von Prototypen. Für die Technologie MID bieten direkt-schreibende, kontaktlose Drucktechnologien, plasmabasierte Beschichtungsverfahren oder die Laserstrukturierung großes Potenzial. Die technologischen Prinzipien der Drucktechnologien und plasmabasierten Beschichtungsverfahren sind bereits in Kapitel 2.1.2 ausführlich beschrieben.

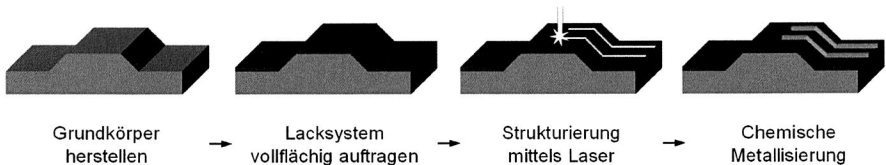


Abbildung 66: Prozesskette der Technologie LPKF-LDS® ProtoPainting

Für die Laserstrukturierung sind Grundkörper mit einem für diesen Prozess geeigneten Additiv erforderlich. Hier eignet sich die bereits aufgeführte mechanische Bearbeitung entsprechender Halbzeuge oder die Beimischung des Additivs in die Ausgangsmaterialien der generativen Fertigungsverfahren. Eine weitere Alternative zur Erzeugung von Leiterbahnen mittels Laserstrukturierung auf Substraten aus nicht modifizierten Thermoplasten ist das LPKF-LDS® ProtoPainting. Das LDS-Additiv, das für den Prozess der Laserstrukturierung notwendig ist, wird einem Polyurethanlack beigemischt. Das Lacksystem lässt sich auf unterschiedlichste Substrattypen aufsprühen und ist somit auch zur Strukturierung von Prototypen geeignet. Bei der Substratauswahl ist die Haftfestigkeit des Lackes zu berücksichtigen (z. B. eingeschränkte Haftung auf LCP). Nach einigen Beschichtungs- und Trocknungsdurchläufen kann die Strukturierung mittels Laser erfolgen. Dabei sind Line/Space-Strukturen von 150 µm möglich. Die Temperaturfestigkeit des Lackes ist nicht für die Verarbeitung mit klassischen Lötprozessen geeignet und daher nur eingeschränkt, beispielsweise unter Verwendung von Leitlebstoff oder niedrigschmelzender Lotpasten, für die Verbindungstechnik einsetzbar. [89][90]

5.1.3 Bewertung der unterschiedlichen Prototyping-Strategien für die Technologie MID

Das Prototyping von MID erfordert eine anforderungsgerechte Verfahrensauswahl zur Fertigung des Grundkörpers und zur Herstellung der elektrischen Leiterbahnen. Ein Überblick über die charakteristischen Eigenschaften der Verfahrensfamilien der generativen Fertigungsverfahren ist in Tabelle 16 dargestellt. Aufgrund der vergleichsweise hohen Oberflächenqualität und dem ausgezeichneten Detaillierungsgrad eignen sich insbesondere Polymerisationsverfahren wie der Stereolithografieprozess für MID-Prototypen. Die realisierbaren Wandstärken werden nur durch den Laserdurchmesser begrenzt. Die Oberflächeneigenschaften der Sinter-/Schmelzprozesse sind dagegen deutlich schlechter. Der Durchmesser der Pulverpartikel und das Anhaften von zufällig aktiviertem Pulver führen zu einer höheren Oberflächenrauheit. Ein Vergleich der Oberflächenrauheit und der Welligkeit für die Stereolithografie und das selektive Lasersintern ist in Anhang C, Tabelle A, dargestellt.

Tabelle 16: Charakteristische Eigenschaften der Verfahrensfamilien der generativen Fertigungsverfahren [61]

Verfahrensfamilie	Detaiils	Oberfläche	Mech.-techn. Eigenschaften	Material	Bauzeit	Preis	Reproduzierbarkeit
Polymerisation	++	++	+	SM	-	--	++
Sintern/Schmelzen	+	+	++	SM	-	-	+
Schicht-Laminat	--	o	-	MM	-	o	-
Extrusion	-	-	+ (+)	SM	-	-	+
3D-Druck	o	o	--	MM	++	++	-

Index: ++ sehr gut (Preis/Bauzeit sehr günstig/sehr kurz), + gut, o neutral, - schlecht, -- sehr schlecht

Material: MM=Modellmaterialien, SM=seriennahe Materialien

Die Verarbeitung laseraktivierbarer thermoplastischer Basismaterialien mittels SLS und FDM ist bereits in Vorgängerstudien erfolgt. Dabei hat sich gezeigt, dass diese Verfahren aufgrund der schlechten Oberflächenqualität nur bedingt für die Herstellung funktionaler MID-Teile anwendbar sind [1][132]. Aktuelle Forschungsaktivitäten betrachten auch die Möglichkeiten zur Integration aktivierbarer Additive in Stereolithografiebauteile. Bei den Extrusionsverfahren ist der Detaillierungsgrad durch Düsen- und Drahtdurchmesser beschränkt. Außerdem weist die Oberfläche durch den Extrusionsvorgang eine lamellenartige Struktur mit Bindenähten auf. Vorteil der Extrusionsverfahren und auch der Sinter-/Schmelz-verfahren ist das verfügbare Materialspektrum. Durch den Einsatz von Konstruktionswerkstoffen (z. B. PPS oder PA) können Funktionsmodelle mit hohen mechanisch-technischen Eigenschaften hergestellt werden. Der Stereolithografiepro-

zess ist dagegen an photosensitive Harze gebunden. MID-typische thermoplastische Werkstoffe können nicht eingesetzt werden. Allerdings lassen neue Materialkombinationen mit Füllstoffen aus Glas- oder Kohlefasern auch die Generierung von Bauteilen mit sehr guten thermischen und mechanischen Eigenschaften zu. Die Schicht-Laminat- und 3D-Druck-Verfahren sind hinsichtlich Oberflächenqualität und Detaillierungsgrad nicht vergleichbar und daher nur sehr eingeschränkt für das Abbilden funktioneller Leiterbahnstrukturen geeignet.

Für die Applizierung des Leiterbildes stehen neben der Haftfestigkeit und den elektrischen Eigenschaften die Flexibilität sowie die realisierbaren Leiterbahngeometrien im Vordergrund. Plasmabasierte Beschichtungsverfahren wie Plasmadust® oder Flamecon® sind vorwiegend für Anwendungen mit Leiterbahnbreiten größer 1 mm relevant [188][190]. Mit den Drucktechnologien Ink-Jet und Aerosol-Jet® können dagegen Leiterbahnbreiten im Bereich 100 µm und sogar darunter realisiert werden.

Tabelle 17: Technische Kennwerte der Aerosol-Jet®- und Ink-Jet-Technologie im Vergleich [64][74][75][92]

	Aerosol-Jet	Ink-Jet
Tintenviskosität	0,7 - 2.500 mPas	< 20 mPas
Minimale Linienbreite	< 10 µm	50 µm
Maximale Linienbreite	3 mm (Wide Area Nozzle)	150 µm
Einfache Schichtdicke	10 nm - 5 µm	2 µm
Schärfentiefe	3 mm	1 mm
Tropfendurchmesser bei Düsenaustritt	1 - 5 µm	< 20 - 100 µm
Tropfenvolumen bei Düsenaustritt	0,01 - 0,1 pL	< 3 - 30 pL
Abstand Düse zu Substratoberfläche	2 - 5 mm variabel	1 mm fix

Tabelle 17 vergleicht die Technologien Aerosol-Jet und Ink-Jet hinsichtlich wesentlicher technischer Kennwerte. Das Aerosol-Jet-Verfahren bietet gegenüber der Ink-Jet-Technologie den Vorteil, dass die Linienbreite durch Variation der Prozessparameter und des Düsenabstandes zum Substrat flexibel gestaltet werden kann. Der fokussierte Aerosolstrahl ermöglicht zudem eine Schärfentiefe von ca. 3 mm. Leichte Vertiefungen oder Stufen des Grundkörpers können folglich auch ohne Veränderung der z-Achse bedruckt werden. Bei dem Ink-Jet-Prozess muss dagegen ein fixer Abstand zwischen Düse und Substrat von 1 mm eingehalten werden, da der Tintenstrahl ungerichtet aus dem Druckkopf emittiert wird. Das Verfahren ist somit für das Drucken auf 3D-Geometrien eingeschränkt. Die Aerosol-Jet-Technologie bietet eine große Freiheit bei der Auswahl der Schichtwerkstoffe. Im Gegensatz zur Ink-Jet-Technologie können hier Tinten oder Pasten in einem breiten Viskositätsbereich verarbeitet werden.

5.2 Aerosol-Jet-Technologie zur dreidimensionalen Strukturierung

Basierend auf den dargestellten technischen Eigenschaften und den relevanten Anforderungen wird die Realisierung von 3D-MID-Prototypen mittels Stereolithografie und Aerosol-Jet-Technologie untersucht. Hochtemperaturbeständige Stereolithografieharze werden mit direkt leitfähigen Werkstoffen bzw. katalytischen Tinten für eine anschließende nasschemische Metallisierung bedruckt. Im Vordergrund steht dabei die Optimierung qualitätsbestimmender Größen wie Leiterbahngeometrie, Haftfestigkeit und elektrische Leitfähigkeit sowie die Qualifizierung der 3D-Fähigkeit. Zur Montage der elektronischen Bauelemente wird eine dem Tinten- und Substratwerkstoff angepasste Verbindungstechnologie ausgewählt.

5.2.1 Funktionsprinzip

Der technische Aufbau des für die Untersuchungen verwendeten Aerosol-Jet®-Systems ist in Abbildung 67 (links) dargestellt. Wesentliche Bestandteile sind der Druckkopf, das Atomizer-System, die Prozesssteuereinheit (PCM) und das Handlingsystem zur Bauteilpositionierung unter dem Druckkopf. In der Anlagenkonfiguration sind als Atomizer-System sowohl ein Ultraschall- als auch ein pneumatischer Zerstäuber vorgesehen. Zudem können als Handlingsystem ein 5-Achs-System oder ein 6-Achs-Roboter eingesetzt werden. Das 5-Achs-System verfügt zur Bewegung des Druckkopfs über zwei translatorische Achsen, die Positionierung des Substrates erfolgt mit einer translatorischen und zwei rotatorischen Achsen. Der Industrieroboter verfügt über sechs Rotationsachsen zur Bewegung des Substrates, der Druckkopf ist in diesem Fall fixiert. Durch die große Reichweite von 855 mm kann der Roboter auch zur Strukturierung großflächiger Teile eingesetzt werden. Bei dem 5-Achs-System ist der Arbeitsraum auf eine Kugel mit einem Durchmesser von ca. 70-80 mm beschränkt.

Der Ultraschallzerstäuber wird vor allem für Tinten mit geringer Viskosität eingesetzt. Dieser besteht aus einem Tintengefäß mit Anschlüssen für den Zu- und Abfluss des Trärgases, der schwenkbar in einem Medienbehälter gelagert ist. In den Behälter ist ein piezoelektrischer Wandler integriert, der hochfrequente Druckwellen erzeugt, welche über ein Medium, meist Wasser, auf die Tinte übertragen werden. Dadurch wird diese so stark in Schwingung versetzt, dass kleine Tröpfchen von der Oberfläche ausgeworfen werden. Ein Trärgasstrom aus Stickstoff, der durch den Tintenbehälter geleitet wird, zieht die schwebenden Partikel mit zum Druckkopf. Für Tinten mit höherer Viskosität ($> 10 \text{ mPas}$) steht der pneumatische Zerstäuber zur Verfügung [95], der aus einem Tintengefäß mit aufgeschraubter Zerstäuberhaube und einer Absaugeinrichtung, dem Virtual Impactor besteht (Abbildung 68). Die Haube dient gleichzeitig als Halterung für den Zerstäuberschäft, durch den das Trärgas in den Tintenbehälter eingeleitet wird. An dessen Ende ist eine Düse aufgeschraubt, mit deren Hilfe das Druckmedium vernebelt wird. Der Anschluss zur Absaugeinrichtung befindet sich ebenfalls in der Zerstäuberhaube. Hier wird überschüssiges Trärgas vom Vernebelungsprozess aus dem Ae-

rosol entfernt. Das Funktionsprinzip des pneumatischen Zerstäubers beruht auf dem Bernoulli-Effekt. Dabei wird ein Trägergas mit hoher Geschwindigkeit durch einen engen Kanal geleitet, der über die Öffnung eines Steigrohres zum Tintenbehälter hinwegführt. Durch den entstehenden Sog zieht der Strahl Tinte aus dem Behälter nach oben und scheidet sie mit hoher Geschwindigkeit in Tröpfchen zwischen 1 bis 5 μm Durchmesser. Partikel mit zu großem Volumen fallen zurück in das Tintenreservoir, während zu kleine Partikel im Trägergas dispergiert bleiben und über den Auslass zu einer Absaugeinrichtung (Virtual Impactor) gelangen. Der Virtual Impactor extrahiert das überschüssige Trägergas von der pneumatischen Zerstäubung aus dem Aerosol. Dadurch wird der Gasdurchfluss auf ein für den Druckkopf geeignetes Maß reduziert. [92][115]

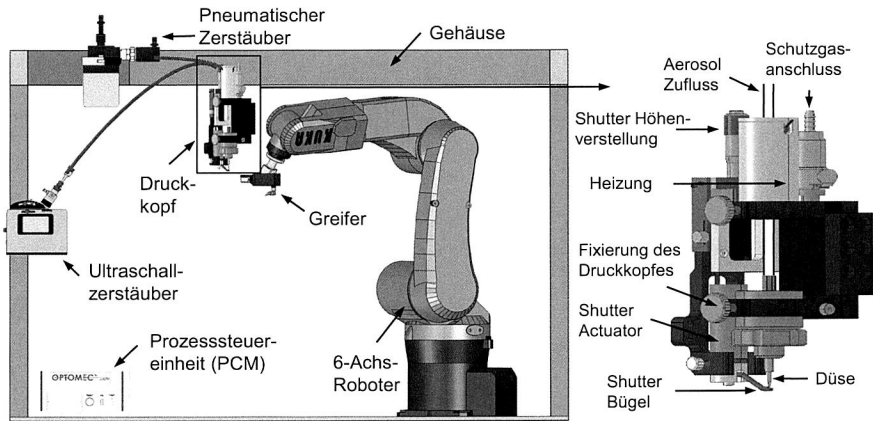


Abbildung 67: Aerosol-Jet®-Anlage mit 6-Achs-Roboter zur Substratführung (links) und Druckkopf (rechts)

Der Virtual Impactor besteht aus zwei kegelförmig zulaufenden Engstellen, die mit geringem Abstand spiegelbildlich zueinander angeordnet sind. In dem dazwischenliegenden Hohlraum wird durch eine Vakuumpumpe Unterdruck erzeugt. Das Gas-Partikelgemisch strömt durch die erste Verengung hindurch und wird aufgrund der Durchmesser verringering beschleunigt (Energieerhaltung). Beim Passieren des Spaltes wird das überschüssige Trägergas zusammen mit Partikeln, deren Impuls zu gering ist, um auf ihrer ursprünglichen Bahn zu bleiben, durch den Unterdruck aus dem Aerosolstrom herausgetragen. Alle übrigen Bestandteile verbleiben durch die hohe Geschwindigkeit bzw. Masse auf der ursprünglichen Bewegungsbahn. Die ausgefilterte Tinte sammelt sich im Hohlraum der Absaugereinrichtung und kann wieder verwendet werden. Nach der Zerstäubung wird das Aerosol zum Druckkopf geleitet. Dieser besteht wiederum aus zwei konisch zulaufenden Einsätzen, die den Aerosolstrahl erneut beschleunigen und mit Schutzgas (Stickstoff) umhüllen. Der Umhüllungsgasstrom verhin-

dert den Kontakt zwischen Aerosol und Düsenwandung im Druckkopf. Dadurch wird die Verschmutzung der Düse reduziert und der Aerosolstrahl fokussiert. Unterhalb der Düse ist ein Shutter zur Unterbrechung des Strahls. Für breite Formelemente oder flächige Strukturen steht alternativ zu dem in Abbildung 67 gezeigten Druckkopf eine Breitstrahldüse mit Öffnungen bis 3 mm Breite und in verschiedenen Geometrien (Schlitzdüse, Rundstrahldüse) zur Verfügung. [115]

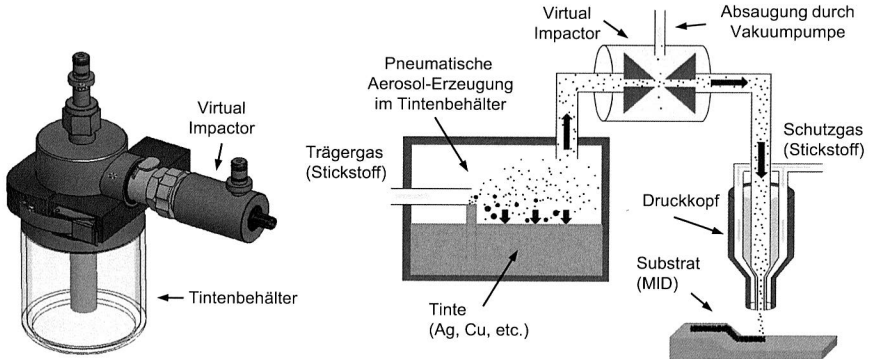


Abbildung 68: Aufbau und Funktionsprinzip des pneumatischen Zerstäubers

Die Gasströme werden über die Prozesssteuereinheit (PCM) geregelt und dadurch die Aerosolerzeugung beeinflusst. Die Einheit umfasst die gesamte Elektronik des Systems (z. B. Durchflussregler, Druckaufnehmer, Shutter- oder Heizungssteuerung) und wird über die Systemsoftware bedient. Über die Benutzeroberfläche des pneumatischen Zerstäubers können beispielsweise die Temperaturregelung für die Heizvorrichtung des Druckkopfes, der Gaskdurchfluss im Zerstäuber, die Absaugung im Virtual Impactor und der Durchfluss des Schutzgases im Druckkopf gesteuert werden. Zur Prozesskontrolle sind alle Gaskreisläufe mit Drucksensoren ausgestattet. Die Breite des Aerosolstrahls und damit die Linienbreite der aufgetragenen Strukturen werden maßgeblich von dem Verhältnis zwischen Schutzgaskdurchfluss und Aerosolstrom im Druckkopf beeinflusst. Je höher der Anteil des Umhüllungsgases ist, desto stärker wird der Aerosolstrahl komprimiert. Dadurch kann der austretende Strahl auf bis zu 10 % des Düsendurchmessers reduziert werden. [68][92][95]

5.2.2 Einflussgrößen auf den Aerosol-Jet-Prozess

Der Aerosol-Jet-Druckprozess unterliegt einer Vielzahl von Einflussgrößen [13][64][74][75][80][91][92][95][115][147][206]. Die Komplexität des Druckprozesses ergibt sich dabei vor allem durch die zum Teil unbekannten Wechselwirkungen zwischen den Einflussgrößen und dem Prozessergebnis. In Abbildung 69 sind die wesentlichen Prozesseinflussgrößen dargestellt.

Das Substrat und die Tinte bestimmen maßgeblich die Haftfestigkeit und die elektrische Leitfähigkeit der gedruckten Struktur. Durch den CTE und die Wärmeformbeständigkeit der Substrate ergeben sich die maximalen Aushärtetemperaturen sowie die thermisch-mechanische Belastung auf die gedruckten Strukturen. Die Rauheit und die Benetzungseigenschaft der Substratoberfläche bestimmen in Abhängigkeit der Tinteneigenschaften (z. B. Viskosität, Fließeigenschaften der Lösungsmittel) die Qualität des Druckbildes. Eine gegenseitige Kompatibilität von Substrat und Tinte muss folglich gegeben sein. Die dritte wichtige Einflussgröße ist die Prozessführung. Die elektrischen Eigenschaften der Leiterstrukturen werden dabei maßgeblich durch die Aushärtebedingungen bestimmt und müssen ggf. an das Substrat angepasst werden. Durch die Drucklayoutgestaltung, Einstellungen wie Düsenabstand zu Substrat, die Anzahl der gedruckten Schichten sowie die Art der Oberflächenvorbehandlung kann das Druckergebnis optimiert werden. Die Umgebungsbedingungen (z. B. Temperatur, Lichteinstrahlung etc.) müssen möglichst konstant sein.

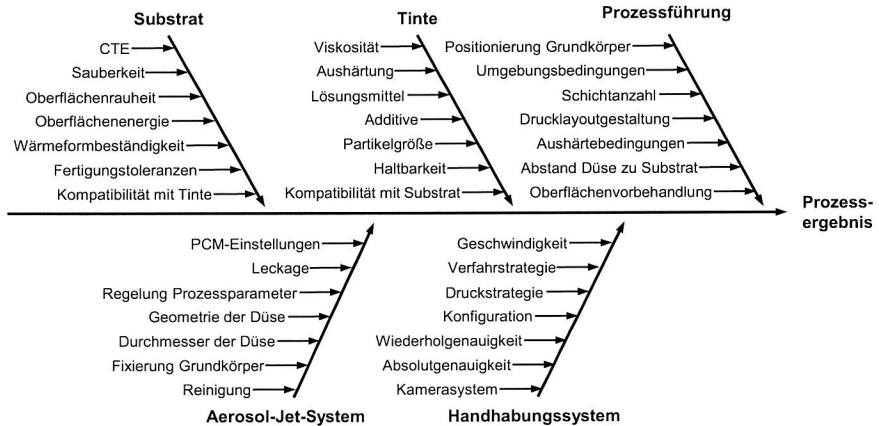


Abbildung 69: Prozesseinflussgrößen auf den Aerosol-Jet-Druckprozess

Wesentliche Einflussgrößen sind auch das Aerosol-Jet- und das Handhabungssystem zur Bewegung der Substrate relativ zur Düse. Erkenntnisse hierzu können zum Teil aus anderen Untersuchungen übertragen werden. Die PCM-Einstellungen sind dabei wichtig, da diese Prozessparameter das Verhältnis zwischen Zerstäuber-, Abluft- und Schutzgasstrom und folglich die Breite des Aerosolstrahls sowie der Leiterbahnstruktur definieren. Diese kann auch durch Düsengeometrie und -durchmesser entscheidend verändert werden. Das Handhabungssystem beeinflusst die Druckqualität vor allem durch die gewählte Vorschubgeschwindigkeit (z. B. positionsgesteuerte oder geschwindigkeitsgesteuerte Bewegung) und die Verfahstrategie (z. B. Drucken von Form-

elementen in einem Zug oder durch mehrfaches Ansetzen, kontinuierliche oder punktuelle Drehung des Bauteils, Anstellwinkel zwischen Substrat und Düse).

Von den betrachteten Einzelfaktoren sind insbesondere die richtige Auswahl der Substrat-Tinten-Kombination, die Aushärtezeit, der Düsenabstand, die Druckgeschwindigkeit, die Benetzungseigenschaft und die Druck- bzw. Verfahrenstrategie von großer Bedeutung. Obwohl die Auswirkungen zahlreicher Einflussfaktoren bekannt sind, ist eine Aussage über das Prozessergebnis für neue Substrat-Tinten-Kombinationen und bei 3D-Geometrien nicht möglich. In diesem Zusammenhang sind für Aerosol-Strukturen auf Stereolithografiebauteilen insbesondere die Haftfestigkeit, die elektrische Leitfähigkeit und die Liniengeometrie zu validieren.

5.2.3 Substratmaterialien, Tintenwerkstoffe und Testlayout

Zielsetzung der Untersuchungen ist die Qualifizierung der Aerosol-Jet-Technik zur Herstellung von Leiterstrukturen auf 3D-Stereolithografie-Bauteilen durch die Auswahl geeigneter Werkstoffkombinationen und die Definition entsprechender Gestaltungsrichtlinien. Dazu werden im Folgenden zunächst die eingesetzten Substratmaterialien, die Tintenwerkstoffe sowie die 2D- und 3D-Teststrukturen vorgestellt.

Substratmaterialien

Als Substratmaterialien werden zur Herstellung der Probekörper die zwei gefüllten Stereolithografieharze Somos® NanoTool™ und Accura® Bluestone™ ausgewählt. Die Substrate müssen den Aushärteprozess der Tinten bei über 200 °C sowie die Prozesse der Aufbau- und Verbindungstechnik (Kondensationslötten bei 230 °C) überstehen. Außerdem sollte die thermische Ausdehnung der Werkstoffe möglichst gering sein, um eine Rissbildung der Strukturen während des Aushärtens zu vermeiden. Die beiden Harze erreichen Wärmeformbeständigkeiten von über 260 °C und zeichnen sich im Vergleich zu anderen hochtemperaturbeständigen Stereolithografiwerkstoffen, beispielsweise Somos® NanoForm™ 15120 (thermische Dehnung: $139 \cdot 10^{-6}$ ppm/K) oder RenShape™ SL5530 (thermische Dehnung: $159 \cdot 10^{-6}$ ppm/K), durch eine geringere Wärmedehnung aus [121][122]. In Tabelle 18 sind die thermischen Kennwerte der Substratwerkstoffe zusammengefasst.

Tabelle 18: Thermische Kennwerte der Substratwerkstoffe [118][123]

	Somos® NanoTool™	Accura® Bluestone™
Wärmeformbeständigkeit	258-263 °C (ISO75, HDT A 0,46)	267-284 °C (ASTM Test D 648)
Thermische Ausdehnung in ppm/K	95-99 (T > 100 °C); 30-32 (T < 50 °C) (ASTM Test E 831-00)	81-98 (T > 90 °C); 33-44 (T < 20 °C) (ASTM Test E 831-93)
Glasübergangstemperatur	57-62 °C	71-83 °C

Tintenwerkstoffe

Als Druckmedien für den Aerosol-Jet-Prozess können alle Arten von Flüssigkeiten oder Suspensionen mit einer Viskosität von 0,7 bis 2.500 mPas und Partikelgrößen bis 500 nm verwendet werden. Die Tintenwerkstoffe können beispielsweise für das Drucken leitfähiger Strukturen mit Kupfer, Silber oder Palladium, oder in Form von isolierenden Polymertinten respektive Biomaterialien eingesetzt werden [75]. Die Tinten sind aus einem Gemisch aus funktionalem Ausgangsstoff (Silber, Palladium, Polymer etc.), Lösungsmittel und Additiven zusammengesetzt. Durch die Zugabe von Additiven werden gezielt die Eigenschaften der Schichtwerkstoffe angepasst und dadurch beispielsweise die Benetzungsfähigkeit oder Haftfestigkeit verbessert. [75][95]

Tabelle 19: Eigenschaften der verwendeten Tintenwerkstoffe [116][119][137]

	Cabot CSD-66	Bayink® TP S 50	MicroCat
Grundwerkstoff	Ag	Ag	Pd
Anteil in Gew.-%	45-55	50,7	35-45 (in Part A)
Viskosität in mPas	50-100	10,8	100
Partikelgröße in nm	< 60	~ 60	-
Lösungsmittel	Ethylen Glykol	Wasser	Isophoron
Aushärtetemperatur in °C/ -zeit in min lt. Herstellerangabe	180/30	180/30	100/8

Für die Untersuchungen werden drei unterschiedliche Tinten, die zwei Silbersuspensionen Cabot CSD-66 und Bayink® TP S 50 sowie das metallisierbare Keimmaterial MicroCat verwendet. In Tabelle 19 ist ein Vergleich der wichtigsten Eigenschaften der Tintenwerkstoffe dargestellt. Die Materialien sind zum Teil noch in der Entwicklung, weshalb von den Unternehmen keine offiziell verfügbaren Datenblätter zur Veröffentlichung freigegeben sind. Der Vorteil der Silbersuspensionen ist, dass diese direkt nach der Aushärtung im Ofen funktionsfähig sind, wobei sich die Herstellerangaben zur Aushärtetemperatur und -zeit auf Voruntersuchungen mit Glassubstraten beziehen und für andere Werkstoffe angepasst werden müssen. Die Partikelgröße im nm-Bereich erleichtert das Aufschmelzen beim Aushärten. Eine chemische oder galvanische Metallisierung ist nicht mehr erforderlich. Die Schichtdicke ist in diesem Fall aber auf die im Aerosol-Jet-Prozess erreichbare Schichtabscheidung begrenzt.

Das Keimmaterial MicroCat dient als Katalysator für die anschließende nasschemische Metallisierung, wobei die Tinte auf Palladiumbasis selbst nicht leitfähig ist. Der Schichtaufbau kann wie bei den klassischen MID-Verfahren (z. B. Cu/Ni/Au) ausgeführt werden. Im Gegensatz zu den Silbertinten ist die Belastung der Substrate durch die Aushärtung bei 100 °C gering. Die Silbersuspensionen werden fertig einsetzbar vom

Hersteller geliefert, wohingegen das Material MicroCat aus drei Komponenten angemischt werden muss. Die Herstellerangaben empfehlen ein Mischungsverhältnis von 97-99,5 Gew.-% der zähflüssigen Palladiumpaste (Part A), 0,5-3 Gew.-% des Vernetzungsmittels (Part B) und nach Bedarf das Lösungsmittel Isophoron (Part C) zur Reduzierung der Viskosität für die pneumatische Zerstäubung. Für die Untersuchungen wird ein Verhältnis von 9,8 mg Part A, 0,2 mg Part B und 10 mg Part C gewählt, wodurch die Tinte eine Viskosität von ca. 100 mPas hat und eine zuverlässige Aerosol-Erzeugung ermöglicht. [137][138]

Testlayout und Prüfkörper

Die Untersuchungen zur Ermittlung grundlegender Kenntnisse über die Aerosol-Jet-Technologie werden mit Hilfe verschiedener 2D- und 3D-Drucklayouts durchgeführt. Das 2D-Testlayout in Abbildung 70 beinhaltet im linken Bereich drei lineare Leiterbahnen, um bei unterschiedlichen Prozessparametern visuelle und elektrische Unterschiede der Strukturen zu bestimmen. Erkenntnisse zur Haftfestigkeit können mit den kreisförmigen Feldern mit einem Durchmesser von 5 mm sowie den rechteckigen Feldern mit 20 mm Kantenlänge mittels Stirnabzug und Gitterschnittprüfung ermittelt werden. Weitere grundlegende Tests sind mit einem einfachen 2D-Layout, bestehend aus vier geraden Linien mit einer Länge von ebenfalls 46 mm und entsprechenden Messpads an den Enden, erfolgt. Diese ermöglichen einen Vergleich ein-, zwei-, drei und vierfach gedruckter Strukturen.

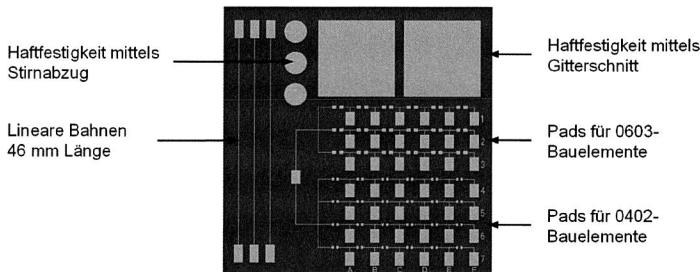


Abbildung 70: 2D-Testlayout auf ebener Platte (60 * 60 * 2 mm)

Ein Vergleich zwischen den beiden Handhabungssystemen und eine Analyse verschiedener Verfahrenstrategien wird mit einem 3D-Testlayout durchgeführt (Abbildung 71). Um ein möglichst breites Spektrum an 3D-MID-relevanten Formelementen abzubilden, sind Schrägen, Stufen und Rundungen integriert, wobei die drei Bahnen der 30°, 45°- und 60°-Schrägen jeweils mit unterschiedlichen Anstellwinkeln zwischen Substratoberfläche und Düse gedruckt werden. Die Winkel zwischen Flächennormale und Substratoberfläche variieren im Bereich 0° bis 70°. Die vier Stufen mit je 0,5 mm Höhendifferenz werden ohne Änderung der z-Koordinaten zur Erprobung der Flexibilität des Verfahrens

zum Überdrucken von Stufen abgefahren. Rundungen mit 4 mm und 1 mm Radius sowie eine rechtwinklige Kante sind ebenfalls integriert. Für eine nachträgliche galvanische Metallisierung sind alle Leiterbahnen mit einem Anschlussfeld als Elektrode verbunden.

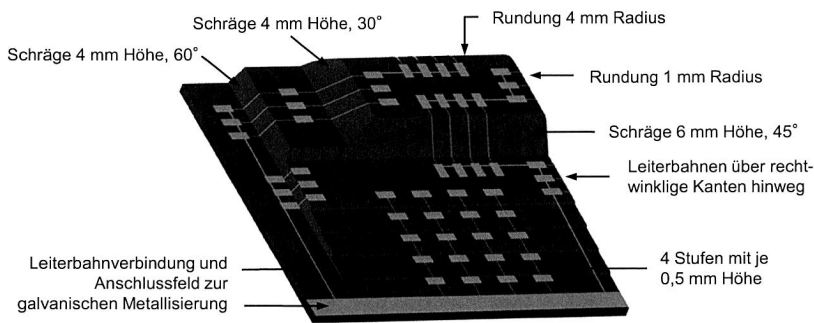


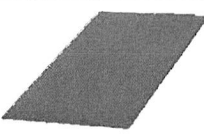



Abbildung 71: 3D-Testlayout

Von dem Werkstoff Accura Bluestone wird ein stehend (senkrecht) und ein liegend (waagrecht) aufgebauter, von Somos Nanotool ein stehend aufgebauter Prüfkörper für die Untersuchungen verwendet. Die senkrecht aufgebauten Substrate weisen eine deutlich höhere Rauheit auf als die waagrecht aufgebauten Substrate. In Tabelle 20 ist die Oberflächenbeschaffenheit der planaren Plättchen dargestellt. R_A ist hierbei der arithmetische Mittenrauwert nach DIN EN ISO 4287, ASME B46.1 und R_z die gemittelte Rautiefe nach DIN EN ISO 4287, ASME B46.1.

Tabelle 20: Oberflächenbeschaffenheit der Substrate (für die Messung verwendete Grenzwellenlänge $\lambda_s = 2,5 \mu\text{m}$; $\lambda_c = 0,8 \text{ mm}$)

	Bluestone™ (senkr. aufgebaut)	Bluestone™ (waagr. aufgebaut)	Nanotool™ (senkr. aufgebaut)
			
Rautiefe R_z in μm	8,58	0,77	12,16
Mittenrauwert R_A in μm	1,51	0,1	1,99

5.3 Untersuchungen zum Aerosol-Jet-Druck auf Stereolithografiebauteilen

Im Folgenden werden die Untersuchungen zum Aerosol-Jet-Druck auf Stereolithografie substraten vorgestellt, um tiefergehende Erkenntnisse zu den in Kapitel 5.2.2 erläuterten Einflussfaktoren zu gewinnen. Die Qualität einer Leiterbahn wird insbesondere durch die Haftfestigkeit und die elektrischen Eigenschaften definiert. Letztere wiederum hängen stark von der Leiterbahngeometrie ab.

5.3.1 Geometrische Eigenschaften der Leiterbahnen

Die Leiterbahngeometrie definiert durch die Leiterbahnbreite und -höhe die Querschnittsfläche A . Die Querschnittsfläche bestimmt nach dem ohmschen Gesetz bei konstanter Leiterbahnlänge l und spezifischem Widerstand ρ den elektrischen Widerstand R einer Leiterbahn:

$$R = \rho * \frac{l}{A}, \quad \text{Gl. 2}$$

der material- und temperaturabhängig ist. Die Leiterbahngeometrie kann vor allem durch die Druckgeschwindigkeit oder die PCM-Settings beeinflusst werden. Bei konstanten Prozessparametern kann durch mehrfaches Drucken der gleichen Struktur die Leiterbahnhöhe/-breite und damit auch der Querschnitt deutlich gesteigert werden. In Abbildung 72 ist die maximale Leiterbahnhöhe und gemittelte Leiterbahnbreite für eine ein-, zwei-, drei- und vierfach gedruckte Struktur für die Tinte TP S 50 auf Somos Nanotool und für die Tinte CSD-66 auf Glas dargestellt, wobei zwischen den einzelnen Druckvorgängen nicht ausgehärtet wird. Für eine gute Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Aufnahmen ist die Höhe des Messbereichs auf $8\text{ }\mu\text{m}$ und die Breite bei TP S 50 auf $285\text{ }\mu\text{m}$ normiert. Bei CSD-66 ist die Breite aus Darstellungsgründen mit unterschiedlichen Maßstäben im Diagramm angegeben. Die maximale Leiterbahnhöhe ist bei TP S 50 bei der vierfach gedruckten Struktur mit ca. $7,3\text{ }\mu\text{m}$ annähernd viermal so groß wie bei der einfach gedruckten Struktur. Die zweifach gedruckte Struktur mit ca. $3,3\text{ }\mu\text{m}$ und die dreifach gedruckte Struktur mit ca. $5,3\text{ }\mu\text{m}$ deuten auf eine lineare Zunahme der Leiterbahnhöhe bei der Tinte TP S 50 hin. Dagegen erhöht sich die gemittelte Leiterbahnbreite mit Werten zwischen $121\text{ }\mu\text{m}$ (einfach) und $154\text{ }\mu\text{m}$ (vierfach) nur gering.

Bei Tinten und Substraten mit besserer Benetzungseigenschaft wächst die Leiterbahnbreite stark an. Das Drucken mit CSD-66 auf dem Referenzsubstrat Glas ergibt insbesondere zwischen einer einfach und zweifach gedruckten Struktur mit einem Wachstum von $378\text{ }\mu\text{m}$ bei einer Leiterbahnbreite von $524\text{ }\mu\text{m}$ nach dem ersten Druck einen großen Unterschied. Das Profil der Leiterbahn mit einer niedrigen Leiterbahnhöhe in der Mitte und Erhebungen im Randbereich deutet an, dass beim zweiten Druck das bereits

vorhandene Tintenmaterial verdrängt wird. Ein Overspray ist hier ab dem zweiten Druckvorgang nicht mehr zu erkennen. Durch das Wachstum der Leiterbahn in die Breite wird der Overspray im Randbereich der ersten Linie überdeckt. Druckergebnisse von CSD-66 auf Stereolithografiesubstraten zeigen ähnliche Ergebnisse wie auf Glas, wenngleich aufgrund der geringeren Benetzung das Verlaufen der Tinte und damit das Breitenwachstum bei gleichen Prozessparametern geringer ist. Bei mehrfach gedruckten Strukturen ergibt sich im Vergleich mit TP S 50 ein deutlicher Anstieg der Leiterbahnbreite bei einem moderaten Wachstum der Leiterbahnhöhe. Eine Schlibbildanalyse bestätigt diesen Effekt. In Abbildung 73 (links) ist eine einfach und vierfach gedruckte Struktur mit TP S 50 aus Somos Nanotool dargestellt. Für das Drucken konturgenauer Strukturen mit guten elektrischen Eigenschaften sollten daher Tinten und Substrate mit nicht zu großer Benetzungsneigung eingesetzt werden. Durch das Drucken paralleler, sich berührender Strukturen kann die Leiterbahnbreite zur Realisierung einer höheren Stromtragfähigkeit gesteigert werden. Untersuchungen auf thermoplastischen Substraten werden hierzu in [80] vorgestellt. Einen entscheidenden Einfluss auf den elektrischen Widerstand hat der Abstand der gedruckten Strukturen, der in Abhängigkeit der Leiterbahnbreite der Einzelstruktur festzulegen ist. Auf Stereolithografiesubstraten sind Untersuchungen hierzu nicht erfolgt, da die Erkenntnisse prinzipiell übertragen werden können. Bei Einsatz der Tinte MicroCat ist der Aufbau einer Kupferschicht mit galvanischer Nachverstärkung möglich. Hierdurch können größere Schichtdicken für eine hohe Stromtragfähigkeit realisiert werden. Im Mittel weist die Schichtdicke in Abbildung 73 (Mitte) eine Schichtdicke von 26 µm auf.

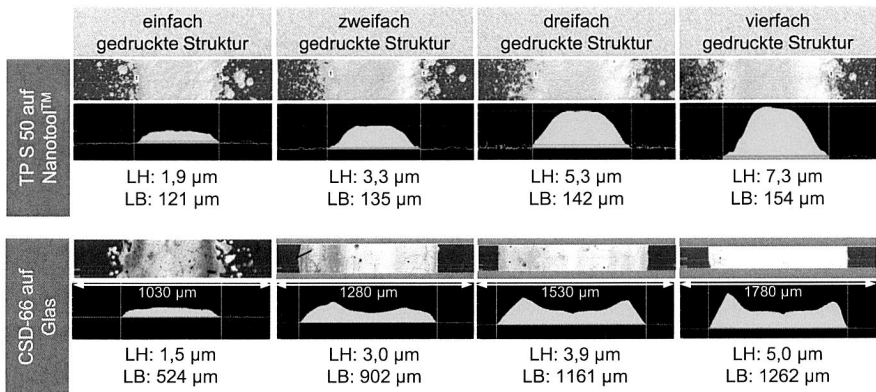


Abbildung 72: Profil der Leiterbahnbreite und -höhe bei einfach und mehrfach gedruckten Strukturen

Eine elektronische Baugruppe erfordert neben leitfähigen Strukturen auch elektronische Bauelemente. Erforscht wird derzeit das Drucken von Widerstandsstrukturen, Konden-

satoren und auch funktioneller Komponenten (z. B. Transistoren). In der Praxis ist eine serientaugliche, dem Substrat- und Tintenwerkstoff angepasste Verbindungstechnik zur Montage der Bauelemente notwendig. Bei dem Einsatz des katalytischen Tintenmaterials MicroCat mit anschließender nasschemischer Metallisierung können die Bauelemente mit Lotpaste und Konvektions- oder Dampfphasenlöt verarbeitet werden. Dagegen können die Bauelemente bei der Verwendung von Silbertinten nur mittels Leitlebkleber montiert werden (Abbildung 73, rechts). [2][64][75][80]

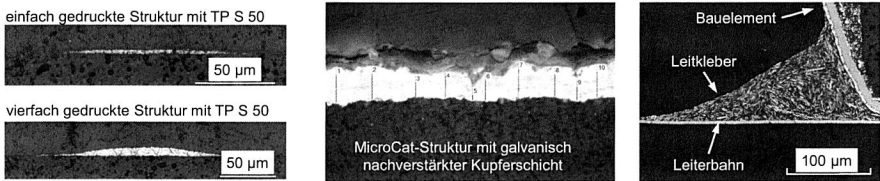


Abbildung 73: Schliffbilder von Leiterbahnstrukturen (links und Mitte) und einer Verbindungsstelle mit Leiterbahn, Leitlebkleber und Bauelement (rechts)

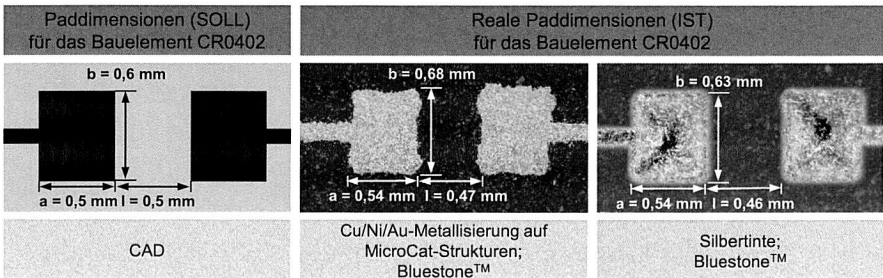


Abbildung 74: Vergleich der Abmessungen der Kontaktpads für das Bauelement CR0402 aus dem CAD-Modell und der gedruckten Strukturen

Ein wesentlicher Faktor für eine qualitativ hochwertige Verbindungsstelle ist die Größe der Kontaktpads. Unterschiedliche Abmessungen der Pads oder Padgrößen, die nicht den CAD-Vorgaben entsprechen, führen speziell bei der Verwendung von Lotpaste zu inhomogenen Verbindungsstellen und somit auch zu unterschiedlichen Scherkräften bzw. Lebensdauern. Die Vorgaben für die Abmessungen und die Bahnplanung werden dabei im CAD-System bzw. in der Steuerungssoftware des Handhabungsgerätes gemacht. Abbildung 74 zeigt die realen Paddimensionen für das Bauelement CR0402 im Vergleich mit den Vorgaben im CAD, entsprechend der Angaben im Datenblatt des Bauelementherstellers. Dargestellt sind die Abmessungen für eine nasschemisch aufgebraachte Cu/Ni/Au-Metallisierung, basierend auf einer gedruckten MicroCat-Schicht,

und für eine Silberstruktur. Das Druckbild eines Pads setzt sich dabei aus einzelnen konzentrischen Rechtecken mit einem Abstand von 0,025 mm zusammen, wobei die Strukturen mit einer Keramikdüse mit 250 µm Durchmesser gedruckt sind. Bei Abweichungen kleiner 0,1 mm der einzelnen Abmessungen ist eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den Soll- und den Ist-Werten vorhanden.

Die Benetzungsfähigkeit der Substratoberflächen und damit auch die Haftfestigkeit der gedruckten Strukturen können bei Bedarf durch eine entsprechende Vorbehandlung der Oberfläche deutlich gesteigert werden. Basierend auf einer Kontaktwinkelmessung kann über eine Bestimmung der Oberflächenenergie der Effekt der Oberflächenfunktionalisierung detektiert werden. Der Kontaktwinkel ergibt sich dabei aus dem Kräftegleichgewicht zwischen der freien Oberflächenenergie des Festkörpers, der Oberflächenspannung der Flüssigkeit und der Grenzflächenspannung zwischen Festkörper und Flüssigkeit. [33][112]

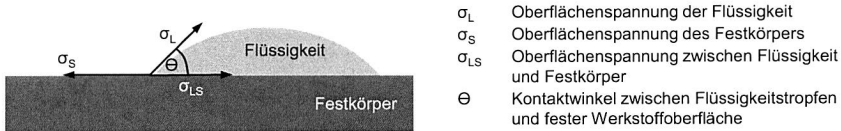


Abbildung 75: Bestimmung der Grenzflächenspannung nach der Methode des liegenden Tropfens [112]

Bei der Methode des liegenden Tropfens wird eine Flüssigkeit mit bekannter Oberflächenspannung auf den Festkörper aufgebracht und der Randwinkel gemessen (Abbildung 75). Die Grenzflächenspannung wird dabei durch die Youngsche Gleichung beschrieben:

$$\sigma_{LS} = \sigma_S - (\sigma_L * \cos\theta) \quad \text{Gl. 3}$$

Ein gute Benetzung liegt demzufolge bei einem kleinen Kontaktwinkel vor, bei einer vollständigen Benetzung resultiert $\cos\Theta = 1$. Voraussetzung dafür ist, dass die Oberflächenspannung des Substrates deutlich größer ist als die Oberflächenspannung der Tinte. Die Auswertung der freien Oberflächenenergie kann u. a. mit den Verfahren nach Wu, Owens, Wendt, Rabel und Naumann erfolgen, die sich in der Berücksichtigung unterschiedlicher Wechselwirkungen zwischen Oberfläche und Testflüssigkeit unterscheiden. [33][112]

Zur Verbesserung der Benetzungsfähigkeit der Substrate werden die Oberflächen einfach und zweifach mit Openair®-Plasma vorbehandelt. Der Nachweis der Oberflächenaktivierung durch die Plasmabehandlung erfolgt bei den durchgeführten Untersuchungen durch eine Kontaktwinkelmessung mit der Testflüssigkeit Wasser. Eine

Bestimmung der freien Oberflächenenergie erfolgt nicht. Die Standzeit des Plasmaeffektes ist abhängig von der Lagerung der behandelten Teile und der Materialzusammensetzung. Diffusionsprozesse im Material reduzieren mit der Zeit die Benetzungsfähigkeit. Die Plasmabehandlung wird daher unmittelbar vor dem Druckprozess durchgeführt. Abbildung 76 zeigt den Effekt der Plasmabehandlung für den Tintenwerkstoff TP S 50 auf unbehandeltem und zweifach plasmabehandeltem Nanotool™. Im Ausgangszustand zeigt Nanotool™ einen Kontaktwinkel von 86°, nach einfacher Plasmabehandlung von 39° und nach zweifacher Plasmabehandlung von 28°. Bei Accura Bluestone ist der Kontaktwinkel auf der unbehandelten Oberfläche zwischen 60° und 70°, nach der Plasmabehandlung bei 44° (einfach) bzw. 25-35° (zweifach). Durch die Plasmabehandlung reduziert sich auf beiden Stereolithografiesubstraten insbesondere die Tropfen- und Rissbildung. Linienbreite und -höhe bleiben bei der Verwendung von TP S 50 nahezu konstant. In Abbildung 76 sind entsprechende Aufnahmen auf Nanotool™ dargestellt. Auf unbehandeltem Nanotool™ entstehen kaum zusammenhängende Linien, da es aufgrund der schlechten Benetzung zu einer tropfenförmigen Ausbildung der Silbertinte kommt. Dagegen zeichnen sich bei den vorbehandelten Substraten klare Leiterbahnen ab. Durch die Plasmabehandlung kann aber auch ein negativer Effekt auftreten. Bei Tinten-Substrat-Kombinationen, die bereits ohne Vorbehandlung eine gute Benetzung aufweisen, führt eine intensive Vorbehandlung der Oberflächen zu einer starken Verbreiterung der gedruckten Strukturen oder zum Verlaufen der Tinte. Der Einsatz von Openair®-Plasma ist daher mit den verwendeten Werkstoffen abzustimmen.

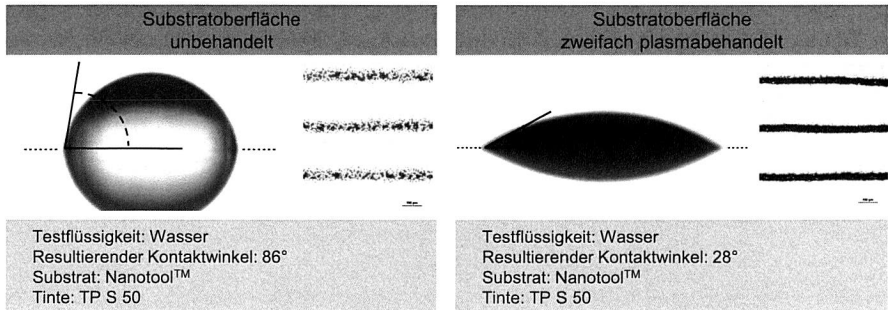


Abbildung 76: Effekt der Plasmabehandlung für die Silbertinte TP S 50 auf unbehandeltem und zweifach plasmabehandeltem Nanotool™

Die Untersuchungen zeigen darüber hinaus, dass sich neben der spezifischen Abstimmung zwischen Tinte und Substrat auch die PCM-Einstellungen zur Definition des Aerosolflusses auf die Qualität der gedruckten Strukturen auswirken [68]. Ein ansteigender Aerosolfluss führt bei dem Tintenwerkstoff CSD-66 bei konstanter Geschwindigkeit zu einer größeren Leiterbahnbreite bei nahezu gleichbleibender Schichtdicke. Die-

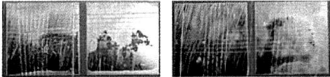
ser Effekt ist zur Erhöhung der Leiterbahnbreite und zur Realisierung sehr feiner Strukturen interessant. Der Aerosolfluss kann dabei maximal so groß sein, dass er vom Schutzgas gerade noch vollständig umschlossen ist und nicht mit der Düsenwandung in Kontakt tritt. Andernfalls kommt es zu einer Verschmutzung der Düse. Die Untergrenze wird durch den Punkt beschrieben, bei dem der Strom an Trägergas gerade noch ausreicht, um ein Aerosol zu erzeugen bzw. es zum Druckkopf zu transportieren.

5.3.2 Haftfestigkeit der gedruckten Strukturen

Die Bestimmung der Haftfestigkeit der gedruckten Strukturen erfolgt mittels Stirnabzug nach DIN EN 582 und Gitterschnittprüfung nach DIN EN ISO 2409 [26][20]. Das Prinzip der Stirnabzugsprüfung zeigt Abbildung 77 (links). Auf eine kreisförmige Silberstruktur wird mit einem Klebstoff ein Abziehstempel befestigt, der mit einer Zug-Prüf-Maschine senkrecht nach oben abgezogen und dabei die Kraft F gemessen wird. Bei der Gitterschnittprüfung werden sechs parallele Schnitte bis auf die Substratoberfläche eingebracht und anschließend mit sechs weiteren Schnitten senkrecht dazu gekreuzt. Bei Schichtdicken bis 60 μm beträgt der Schnittabstand laut Norm 1 mm. Mit einer Bürste oder einem Tape wird die Haftfestigkeit der Strukturen überprüft. Die Auswertung erfolgt visuell anhand einer Vergleichstabelle. Abhängig von der Anzahl der abgelösten Teilstücke oder Quadrate wird dabei ein Gitterschnittkennwert zwischen GT 0 (Schnitttränder vollkommen glatt) und GT 5 (> 65 % abgeplatzt) zugewiesen. Der Stirnabzug ermöglicht quantifizierbare Aussagen, wohingegen bei der Gitterschnittprüfung nur eine rein qualitative Analyse möglich ist.

Die Haftfestigkeit ist sehr stark von der zu bedruckenden Oberfläche abhängig. Eine Oberfläche mit geringer Rauheit weist im Allgemeinen eine niedrigere Haftfestigkeit auf. Bei den untersuchten Substraten kann mit dem senkrechten Aufbau eine höhere Haftfestigkeit als bei den waagrecht aufgebauten Prüfkörpern erzielt werden. Der Effekt wird bereits bei qualitativer Analyse der Haftfestigkeit deutlich (Tabelle 21).

Tabelle 21: Qualitative Bestimmung der Haftfestigkeit auf unterschiedlichen Substratoberflächen im Gitterschnitttest

	Bluestone™ (senkr. aufgebaut)	Bluestone™ (waagr. aufgebaut)	Bluestone™ (waagr. aufgebaut)	Nanotool™ (senkr. aufgebaut)
Vorbehandlung der Oberfläche	-	-	Plasma 1-fach	-
nach Tapetest	0	< 65%	< 5%	0
Bewertung nach DIN EN ISO 2409	GT0	GT4	GT1	GT0
				

Eine quantitative Bestimmung der Haftfestigkeit bestätigt die Ergebnisse des Gitterschnitttests. Die Tinte CSD-66 hat auf dem Substrat Bluestone™ bei senkrechtem Aufbau eine Haftfestigkeit von fast 10 N/mm², bei waagrechtem Aufbau dagegen nur ca. 7,5 N/mm². Bei der Durchführung des Stirnabzugstests ist allerdings darauf zu achten, dass die untersuchten Schichten nicht zu dünn sind. Es besteht die Gefahr, dass Klebstoff durch die Schicht hindurch mit dem Substrat in Kontakt kommt und folglich Teile des Substrates mit herausgerissen werden. Für die Auswertungen sollte daher dieser Schadensmechanismus nicht betrachtet werden. Die Ergebnisse der Stirnabzugsprüfung sind in Abbildung 77 dargestellt. Die Haftfestigkeit der Silberstrukturen ist vergleichbar zu LDS-Strukturen auf dem Werkstoff PA6/6T, aber deutlich besser als bei LCP und PET+PBT [133].

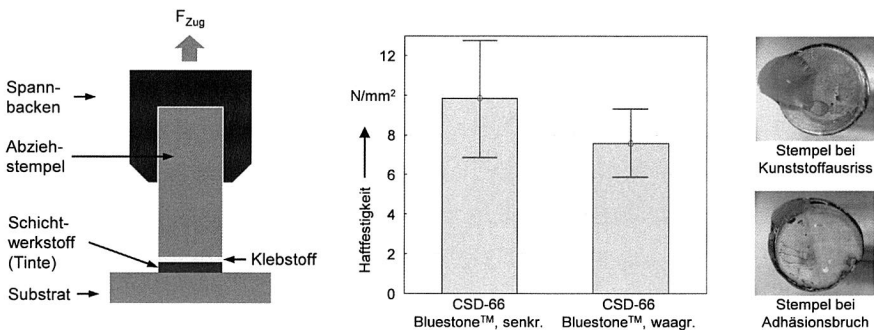


Abbildung 77: Quantitative Bestimmung der Haftfestigkeit im Stirnabzugstest

Zur Bestimmung weiterer wesentlicher Einflussfaktoren auf die Haftfestigkeit der gedruckten Strukturen werden Analysen der Schichtanzahl, der Druckgeschwindigkeit, der Aushärtezeit und der Oberflächenbehandlung durchgeführt. Außerdem wird die Haftfestigkeit der Teststrukturen vor und nach dem Temperaturschocktest gemessen (siehe Kapitel 5.3.4). Die ableitbaren Zusammenhänge zwischen Haftfestigkeit und Einflussfaktor für die Tinte CSD-66 und das Substrat Bluestone™ sind in Abbildung 78 aufgeführt.

Der Einfluss der Schichtanzahl auf die Haftfestigkeit ist nicht entscheidend. Bei mehrfach gedruckten Strukturen ergeben sich minimal schlechtere Werte als bei einer einfach gedruckten Struktur, da sich durch den erhöhten Schichtaufbau Unterschiede bei der Aushärtung ergeben. Der Einfluss der Druckgeschwindigkeit auf die Haftfestigkeit ist ebenfalls nicht entscheidend. Ein Vergleich bei 10 mm/s und 2,5 mm/s zeigt lediglich kleine Unterschiede unter 1 N/mm², wobei die höhere Haftfestigkeit bei geringerer Druckgeschwindigkeit erreicht wird. Die Auswirkung der Aushärtezeit auf die Haftfestigkeit wird nach 120 min und 30 min gemessen. Bei kürzerer Aushärtezeit kann eine um

1 N/mm² (14,3 %) höhere Haftfestigkeit festgestellt werden, da bei längerer Aushärtezeit der Schichtaufbau durch feine Mikrorisse vorgeschädigt werden kann. Ein wichtiger Einflussfaktor auf die Haftfestigkeit ist die Oberflächenbehandlung mittels Plasma. Bereits nach einfacher Plasmabehandlung kann die Haftfestigkeit signifikant gesteigert werden (Tabelle 21). Das Ergebnis lässt sich durch zweifache Plasmabehandlung weiter optimieren, allerdings ist der Effekt nicht linear.

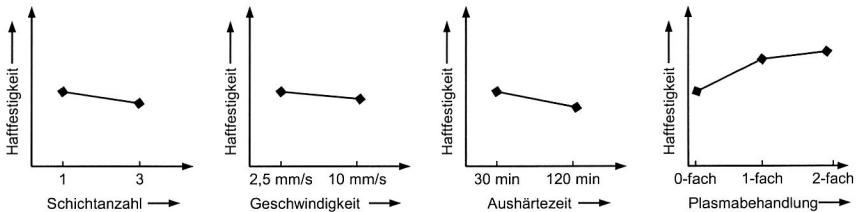


Abbildung 78: Zusammenhänge zwischen der Haftfestigkeit der Aerosol-Jet-Strukturen und den wesentlichen Einflussfaktoren

5.3.3 Elektrische Charakterisierung der gedruckten Strukturen

Zur Bestimmung des elektrischen Widerstandes wird die Vierleiter-Messung eingesetzt, um Fehleranteile aus den Zuleitungen oder dem Kontaktübergang zwischen den Messspitzen und der metallisierten Schicht zu eliminieren. Das Schaltbild der Vierleiter-Messmethode ist in Abbildung 79 veranschaulicht. Die Force- und die Sense-Leitung werden mit dem Widerstand R_X verbunden und die Force-Leitung mit einem konstanten Messstrom durchflossen. Die Sense-Leitung wird durch einen hochohmigen Widerstand nahezu stromlos gehalten, so dass keine Spannung abfällt. Dadurch kann der Widerstand R_X mit Hilfe der beiden gemessenen Spannungen U_X sowie U_V und dem bekannten Widerstandswert R_V eindeutig bestimmt werden.

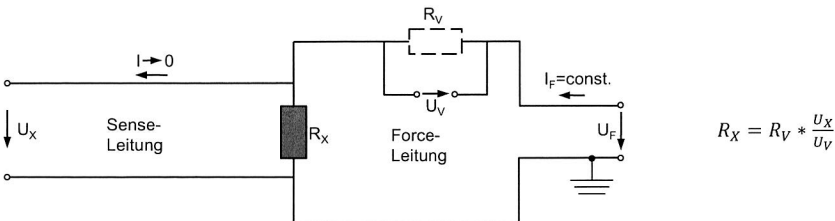


Abbildung 79: Schaltbild der Vierleiter-Messmethode zur Bestimmung des elektrischen Widerstandes [171]

Einen wesentlichen Einfluss auf die elektrische Leitfähigkeit haben die Aushärtetemperatur und -zeit [95]. Bei höherer Temperatur bzw. längerer Aushärtezeit können mehr Lösungsmittel und Additive entweichen und die spezifische Leitfähigkeit nimmt zu. Dabei ist eine substrat- und tintenspezifische Anpassung der Aushärtebedingungen aufgrund unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeiten und Werkstoffvolumina erforderlich. Richtwerte liegen für die verwendeten Silbertinten nur für den Druck auf Glas oder PI-Folie vor [119]. Für spritzgegossene und stereolithografisch aufgebaute Substrate sind vergleichsweise hohe Aushärtetemperaturen und -zeiten erforderlich. [68][154]

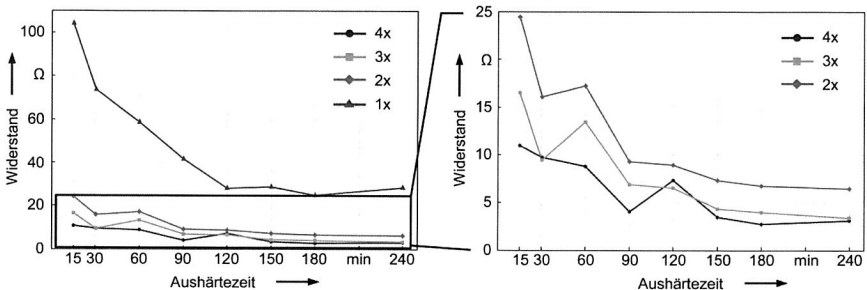


Abbildung 80: Einfluss der Aushärtezeit auf die elektrische Leitfähigkeit bei ein- und mehrfach gedruckten Strukturen

In Abbildung 80 ist der Widerstand für den Tintenwerkstoff CSD-66 auf dem Substrat Accura Bluestone (senkrecht aufgebaut) für unterschiedliche Aushärtezeiten bei ein-, zwei-, drei- und vierfach gedruckten Leiterbahnen dargestellt, wobei die Werte auf einer Leiterbahnlänge von 46 mm bei einer Aushärtetemperatur von 200 °C gemessen sind. Die Strukturen sind mit einer Geschwindigkeit von 2,5 mm/s und der Breitstrahldüse (500 µm Düsendurchmesser) gedruckt. Der Einfluss der Aushärtezeit ist dabei bei einfach gedruckten Strukturen am deutlichsten messbar. Allerdings ist die Auswirkung längerer Aushärtezeiten bei mehrfach gedruckten Strukturen keinesfalls zu vernachlässigen. Ab einer Aushärtezeit von 120 min nimmt der Effekt deutlich ab. Additive und Lösungsmittel sind dann fast vollständig verflüchtigt.

Die Druckgeschwindigkeit wirkt sich ebenfalls signifikant auf das Druckergebnis aus. Durch die veränderte Leiterbahngeometrie und abgeschiedene Materialmenge beeinflusst die Druckgeschwindigkeit folglich auch die elektrische Leitfähigkeit. In Abbildung 81 ist der Effekt für unterschiedliche Geschwindigkeiten bei ein-, zwei-, drei- und vierfach gedruckten Leiterbahnen auf dem Referenzsubstrat Glas für die Tinte CSD-66 aufgetragen. Die besten Ergebnisse werden mit der Druckgeschwindigkeit von 2,5 mm/s erzielt. Dabei sind sowohl für ein- und mehrfach bedruckte Strukturen die Widerstandswerte kleiner 5 Ω. Ab einer Geschwindigkeit von 5 mm/s wird bei der untersuchten Tin-

ten-/Substratkombination mit einem Düsendurchmesser von 500 μm der Einfluss der Schichtanzahl entscheidend. Bereits bei 10 mm/s sind nur noch bei drei- und vierfach gedruckten Strukturen unter 10 Ω möglich.

Die Oberflächenbehandlung mittels Sauerstoffplasma hat auch auf die elektrische Leitfähigkeit einen positiven Einfluss. Dabei ist zu beobachten, dass sich dieser Effekt bei einfach gedruckten Strukturen stärker auswirkt als bei mehrfach gedruckten Strukturen und die Veränderung bei Substraten mit schlechterer Benetzung größer ist. Dies wiederum ist eine logische Konsequenz des in Abbildung 76 dargestellten Zusammenhangs zwischen Plasmabehandlung und Ausbildung der Leiterbahn. Bei unzureichender Benetzung entsteht keine zusammenhängende Struktur und somit nur eine eingeschränkte Leitfähigkeit. Bei mehrfach gedruckten Strukturen wird die schlechte Benetzung zum Teil durch die größere Materialmenge kompensiert. Der erwartete Zusammenhang, dass z. B. eine mit 20 mm/s vierfach gedruckte Struktur eine ähnliche Materialmenge und damit elektrische Leitfähigkeit aufweist wie eine mit 5 mm/s einfach gedruckte Leiterbahn, kann daher nicht beobachtet werden.

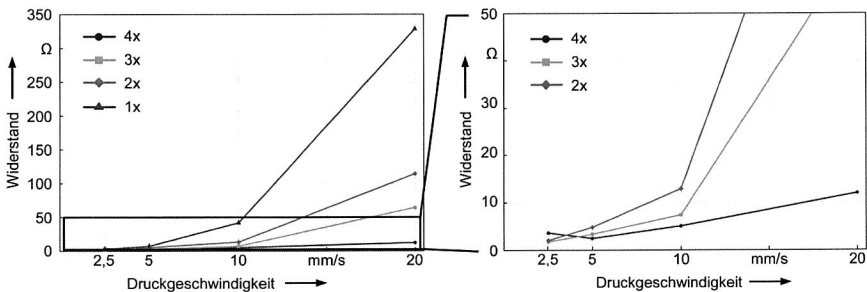


Abbildung 81: Einfluss der Druckgeschwindigkeit auf die elektrische Leitfähigkeit bei ein- und mehrfach gedruckten Strukturen

Die spezifische Leitfähigkeit bzw. der spezifische Widerstand der gedruckten Strukturen entspricht nicht den Werten von reinem Material (Silber: 63 $\text{m}/\Omega\text{mm}^2$; Kupfer: 59,59 $\text{m}/\Omega\text{mm}^2$). Eine Aussage über die tatsächlichen elektrischen Eigenschaften ist nur mit Kenntnis der spezifischen Leitfähigkeit möglich. Daher ist bei der elektrischen Qualifizierung der Aerosol-Jet-Strukturen eine Bestimmung des spezifischen Widerstandes über den Widerstand, die Länge und den Querschnitt der Leiterbahn nach Gleichung 2 erforderlich. Die spezifische Leitfähigkeit ergibt sich dann als Kehrwert aus dem spezifischen Widerstand. In den Diagrammen der durchgeführten Untersuchungen wird dennoch stets der gemessene Widerstand der Leiterbahn angegeben, da somit ein Vergleich zwischen den einzelnen Versuchen sowie zwischen einfach und mehrfach gedruckten Strukturen deutlicher wird.

Bei entsprechend langer Aushärtezeit (> 120 min) lässt sich auf Stereolithografiesubstraten eine spezifische Leitfähigkeit von $2,73 \text{ m}/\Omega\text{mm}^2$ (einfach gedruckte Struktur) bis zu $4,96 \text{ m}/\Omega\text{mm}^2$ (vierfach gedruckte Struktur) realisieren. Die angegebenen Werte beziehen sich auf CSD-66-Strukturen auf senkrecht aufgebauten Probekörper. Im Gegensatz dazu ist die spezifische Leitfähigkeit von Silbervollmaterial fast zwölf Mal so groß. Referenzwerte von den Tintenherstellern liegen für die untersuchten Materialien nur auf Glas vor. Für TP S 50 ist auf Glas demzufolge bereits nach 30 min Aushärtezeit bei 120°C eine spezifische Leitfähigkeit von $27 \text{ m}/\Omega\text{mm}^2$ möglich, dagegen ergibt sich bei CSD-66 bei gleichen Parametern eine spezifische Leitfähigkeit von $20 \text{ m}/\Omega\text{mm}^2$. Folglich ist für die Tinte TP S 50 bei gleichen Prozesseinstellungen eine höhere Leitfähigkeit realisierbar als bei CSD-66. Dieser Effekt hat sich auf den Stereolithografiesubstraten bestätigt. Die allgemein reduzierte Leitfähigkeit auf Stereolithografiebauteilen im Vergleich zu Glas ist auf die raue Oberfläche zurückzuführen. Bei waagrecht aufgebauten Bauteilen mit geringerer Oberflächenrauheit und der Tinte TP S 50 sind deutlich bessere Werte zu erwarten. Ferner zeigt sich der Einfluss der Schichtanzahl auf die elektrische Leitfähigkeit. Bei einfach gedruckten Strukturen trägt nicht das gesamte aufgetragene Material zur Leitfähigkeit bei. Bei dickeren Strukturen relativiert sich dies zunehmend. Des Weiteren ist bei den Materialherstellern auch der Effekt bekannt, dass die Nanopartikel in die Polymermatrix wandern können und somit bei geringen Schichtdicken die Leitfähigkeit deutlich reduziert wird. Für Kupferleiterbahnen, basierend auf dem katalytischen Material MicroCat, kann eine spezifische Leitfähigkeit von $22 \text{ m}/\Omega\text{mm}^2$ ermittelt werden. Dies entspricht etwa 70 % der spezifischen Leitfähigkeit von chemisch abgeschiedenen Kupferschichten auf laserstrukturierten Bauteilen und etwa 40 % von massivem Kupfer. [136]

5.3.4 Zuverlässigkeit im Umwelttest

Für das Rapid Prototyping ist die Langzeitzuverlässigkeit der Baugruppen kein entscheidender Faktor. Aufgrund der vielversprechenden Ergebnisse kann bei weiterer Prozess- und Anlagenoptimierung sowie einer fortschreitenden Materialentwicklung die Kombination aus Stereolithografie und Aerosol-Jet auch für das Rapid Manufacturing eingesetzt werden. Im Folgenden werden daher die Ergebnisse der beschleunigten Umwelttests vorgestellt.

Zur Bewertung der Zuverlässigkeit der Leiterbahnstrukturen bei thermisch-mechanischer Belastung infolge der unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten werden Temperaturschocktests ($-40^\circ\text{C}/+125^\circ\text{C}$, 2.000 Zyklen) in Anlehnung an die Norm DIN EN 60 068-2-14 durchgeführt. Der Leiterbahnwiderstand wird jeweils nach 100, 350, 500, 1.000 und 2.000 Zyklen erfasst. Abbildung 82 (links) zeigt die Ergebnisse für ein-, zwei-, drei- und vierfach gedruckte CSD-66-Strukturen auf dem Substrat Bluestone™ (senkrecht aufgebaut). Die Widerstandswerte sind nach 2.000 Zyklen fast auf Ausgangsniveau, wobei sich die größte Veränderung bei der einfach gedruckten Struk-

tur ergibt. Zwischen dem Ausgangswert und der Messung nach den Schocktests resultiert eine Widerstandserhöhung um ca. 5 %. Auch bei Strukturen mit kurzer Aushärtezeit (z. B. 15 min) kann während des Temperaturschocktests keine Widerstandsveränderung festgestellt werden. Der Widerstand der Leiterbahn bleibt über die 2.000 Zyklen relativ konstant. Ein Nachhärten kann nicht beobachtet werden. Ferner wird nach 1.000 Zyklen Temperaturschocktest die Haftfestigkeit bestimmt. Es kommt zu keiner signifikanten Reduzierung der Haftfestigkeit, die Strukturen weisen nach der thermischen Belastung noch 90 % des Ursprungswertes auf.

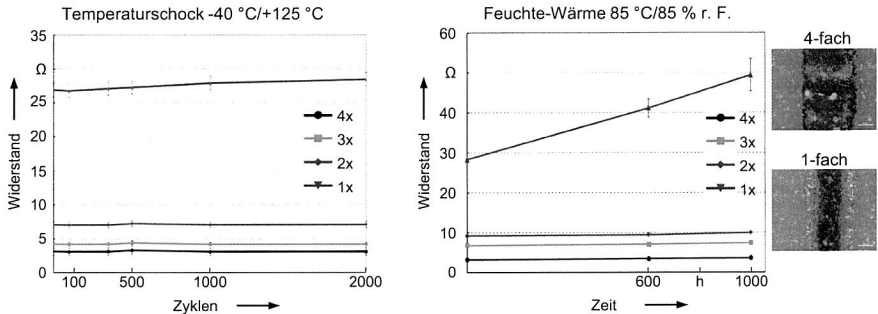


Abbildung 82: Veränderung des Leiterbahnwiderstandes nach beschleunigter Alterung im Temperaturschocktest und Feuchte-Wärme-Test

Im Feuchte-Wärme-Test (85 % rel. Feuchte/85 °C) nach DIN EN 60068-2-67 zeigt sich nach 650 h und 1.000 h kein Einfluss auf die elektrische Leitfähigkeit bei mehrfach gedruckten Strukturen. Bei der einfach gedruckten Struktur verschlechtert sich dagegen der Widerstand. Die Haftfestigkeit der Leiterbahnen wird im Feuchte-Wärme-Test deutlich negativ beeinflusst. Bereits beim Gitterschnitttest sind die Ergebnisse klar schlechter als im unbelasteten Zustand. Der gleiche Effekt kann auch auf thermoplastischen Substraten nachgewiesen werden [9][80]. Ursache für die Abnahme der Haftfestigkeit und die Widerstandserhöhung bei einfach gedruckten Strukturen ist die starke Oxidation der Oberfläche verbunden mit einer Rissbildung in der Struktur. In Abbildung 82 (rechts) ist die Veränderung des Leiterbahnwiderstandes im Feuchte-Wärme-Test und die Oxidation der Silberstruktur dargestellt.

Zur Qualifizierung der Verbindungstechnik werden die Temperaturschocktests (-40 °C/+125 °C) um Baugruppen mit Silberstrukturen und Bauelementen erweitert. Die Widerstände der Gehäuseform CR0402 und CR0603 werden mit Leitlebter fixiert und kontaktiert. Dabei werden die Tinten CSD-66 und TP S 50 auf den Substraten Bluestone™ (waagrecht aufgebaut) und Nanotool™ als Schichtwerkstoff untersucht. Die Scherkräfte werden bei dem Bauelement CR0402 zu Beginn und nach 1.000 Zyklen

gemessen und die Fehlerrate der beiden Bauelemente in definierten Abständen bestimmt. Ein Bauelement wird dabei als fehlerhaft gewertet, wenn eine Verbindungsstelle unterbrochen ist und folglich kein elektrischer Kontakt mehr besteht. In Abbildung 83 (links) ist die Fehlerrate der Bauelemente dargestellt. Die Ausfallraten sind dabei relativ gering. Bei dem Bauelement CR0402 sind in den ersten 250 Zyklen nur 2 % Ausfälle erkennbar, nach 1.000 Zyklen sind dagegen 27 % ausgefallen. Das Bauelement CR0603 weist eine geringfügig höhere Fehlerrate mit 36 % nach 1.000 Zyklen auf. Im Vergleich zu den Untersuchungen in [13] mit gelöteten Bauelementen auf nasschemisch abgeschiedenen Kupferstrukturen auf der katalytischen Tinte zeigt sich diese Verbindungstechnik als sehr robust. Die Scherkräfte sind für das Bauelement CR0402 in Abbildung 83 (rechts) dargestellt. Die Werte im Bereich 8-12 N sind für das Bauelement CR0402 noch ausreichend, jedoch geringer als bei gelöteten Bauelementen auf dem Substrat FR4 mit ca. 12-20 N [168]. Deutlich zu erkennen ist der Abfall der Scherkräfte nach 1.000 Zyklen Temperaturschocktest auf Werte zwischen 2 und 4 N. Das Versagen tritt meist zwischen Leitkleber und Bauelement auf, das Ablösen der Silbertinte vom Substrat ist die Ausnahme. Eine weitere Verbesserung der Scherkräfte ist demzufolge durch eine optimierte Auswahl von Leitkleber, Bauelementmetallisierung und Leitkleberauftrag möglich. Durch eine Verbesserung der Haftfestigkeit der Silbertinte auf dem Substrat wird zunächst keine Steigerung der Scherkräfte erwartet. Die Ursache für die hohen Scherkräfte des Verbundes mit der Tinte CSD-66 und dem Substratwerkstoff Accura Bluestone im Vergleich zu den anderen Werkstoffen kann nicht abschließend geklärt werden.

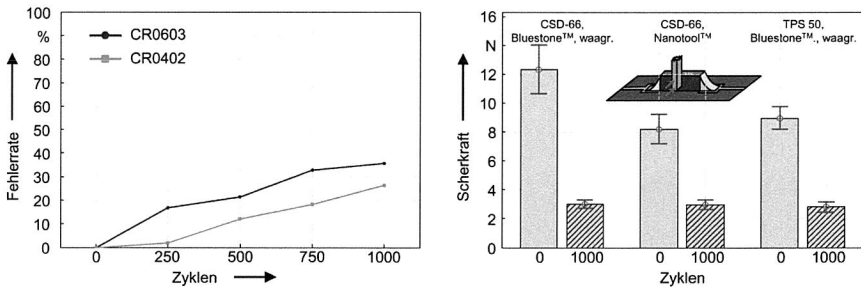


Abbildung 83: Fehlerrate der Bauelemente CR0402 und CR0603 (Temperaturschocktest $-40\text{ }^{\circ}\text{C}/+125\text{ }^{\circ}\text{C}$) und Scherkräfte des Bauelementes CR0402 vor und nach dem Umwelttest (Temperaturschocktest $-40\text{ }^{\circ}\text{C}/+125\text{ }^{\circ}\text{C}$)

5.3.5 Strukturierung dreidimensionaler Oberflächen

Durch das in die Anlage integrierte 5-Achs-System und den 6-Achs-Roboter ist es möglich, komplexe Leiterbahnstrukturen auf dreidimensionale Formkörper zu drucken. Ein

wesentlicher Vorteil des Aerosol-Jet-Verfahrens gegenüber der Ink-Jet-Technologie ist der variable Abstand zwischen Düse und Substrat, wodurch bei der Realisierung von 3D-Strukturen eine größere Freiheit gegeben ist.

Jedoch ist bei der Variation des Düsenabstandes zu beachten, dass bei zunehmender Distanz die Linienbreite anwächst. Bei einer Distanz von unter 1 mm ist die Impulskraft des Aerosolstrahls so hoch, dass die Strukturen auseinandergedrückt werden und anstelle eines gleichmäßigen Leiterbahnprofils ein u-förmiger Querschnitt mit Wülsten an den Außenseiten der Bahnen entstehen kann (Abbildung 84 rechts). Mit zunehmendem Abstand der Düse zum Substrat verringert sich der Impuls der Aerosolpartikel, bis sie schließlich aus ihrer ursprünglich parallel verlaufenden Bahn abdriften. Kleine Partikel verlassen dabei aufgrund der geringeren Masse schneller die Bahn, die größeren Partikel sammeln sich im Zentrum des Strahls [75]. Folglich entsteht ein sogenannter Overspray. Durch das Zusetzen von schwer verflüchtigbaren Lösungsmitteln, z. B. Ethylen Glykol, sowie Anpassen der Prozessparameter kann der Effekt verringert werden. Bei einem Abstand zwischen Düse und Substrat von über 6 mm verlieren die Partikel jedoch so viel Impuls, dass die Bahnen sehr breit verlaufen. Mit der Linienverbreiterung geht eine Abnahme der elektrischen Leitfähigkeit einher. In Abbildung 84 (links) ist die Linienbreite von TP S 50 auf dem Substrat Bluestone™ für einfach und mehrfach gedruckte Strukturen im Düsenabstand von 3 bis 5 mm dargestellt. Die Linienbreite bleibt dabei relativ konstant, wenngleich eine leichte Zunahme bei größerem Düsenabstand und bei mehrfach gedruckten Strukturen erkennbar ist.

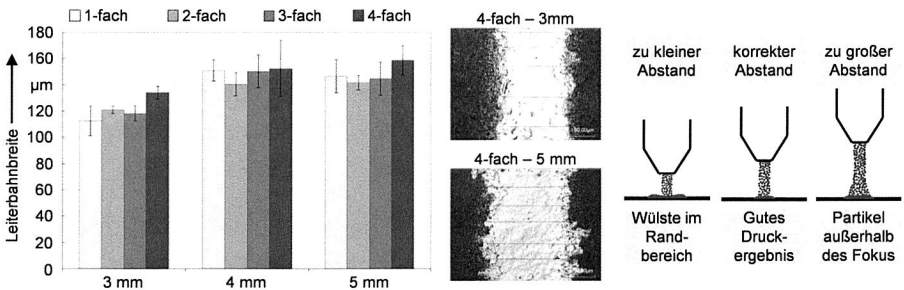


Abbildung 84: Einfluss unterschiedlicher Abstände zwischen Düse und Substrat

Durch den veränderbaren Abstand zwischen Düse und Substrat können niedrige Stufen ohne Veränderung der z-Achse bedruckt werden. Abbildung 85 (links) zeigt das Druckbild mit der Silbertinte TP S 50. Dabei ist die Silbertinte über insgesamt vier Stufen mit jeweils 0,5 mm Höhe ohne Nachführung der Düse oder des Substrates gedruckt. Der Abstand zwischen Düse und Substrat ist auf der obersten Stufe 4 mm, auf der untersten Stufe 6 mm. Die Stufenübergänge haben eine Schräge von 45°. Das Druckbild bleibt

konstant scharf. Über alle Stufen hinweg kann eine Leitfähigkeit der Leiterbahnen nachgewiesen werden. Durch den Treppenstufeneffekt generativ gefertigter Bauteile an Bauteilschrägen besteht jedoch die Gefahr des Verlaufs der Tinte (Abbildung 85 rechts), wodurch es zu einer Unterbrechung der Leiterbahn kommt. Für eine geringe z-Stufe müssen die einzelnen Schichtstärken im Herstellungsprozess möglichst klein sein. Das Verlaufen der Tinte im Bereich der z-Stufe kann auch durch eine Nachbearbeitung des Substrates zur Einebnung der Strukturen reduziert werden. Durch das Vorheizen des Substrates, das direkte Aushärten der Tinte (z. B. induktiv oder mittels Laser) oder einen Verzicht auf Plasmabehandlung im kritischen Bereich können die Strukturen ebenfalls optimiert werden. Eine Reduzierung der Tintenmenge durch eine Anpassung der Druckgeschwindigkeit oder der PCM-Einstellungen führt auch zu einem optisch besseren Druckergebnis, allerdings sinkt dadurch die Leitfähigkeit der applizierten Struktur. Tinten, die nicht zum Verlaufen neigen (z. B. TP S 50), sind gegenüber Tinten mit starker Benetzung (CSD-66) vorzuziehen.

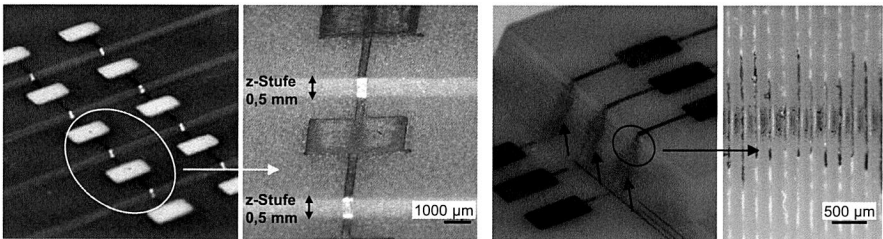


Abbildung 85: Leiterzüge über Stufen von je 0,5 mm ohne Anpassung der z-Achse (links) und Verlaufen der Tinte im Bereich der Treppenstufen (rechts)

Mit dem 5-Achs-System und dem 6-Achs-Industrieroboter ist aber auch die Strukturierung komplexerer dreidimensionaler Geometrien möglich. Die im 3D-Layout vorgesehenen Rundungen bzw. rechtwinkligen Kanten und Schrägen können mit sehr gutem Ergebnis bedruckt werden. Auch bei größeren Anstellwinkeln zwischen Flächennormale und Düse ergibt sich ein konturscharfes Ergebnis. Dabei zeigt sich, dass die Verfahrenstrategie beim 5-Achs-System im Vergleich zum 6-Achs-Roboter nicht entscheidend ist.

Drehungen an Schrägen und Rundungen zur Anpassung der Orientierung der Substratoberfläche zur Düse verursachen beim 6-Achs-Roboter Schwingungen im System. Bei zu starker Orientierungsänderung wird die Linienführung am Drehpunkt kurvig. Für die Leiterbahn 3 erfolgt eine Drehung um 60° , um den Winkel zwischen Bauteiloberfläche und Druckkopf senkrecht zu halten. Die weißen Pfeile in Abbildung 86 (links) markieren jeweils am Übergang zwischen Schräge und gerader Fläche das Verwackeln des Druckbildes. Bei der Leiterbahn 1 mit reduzierter Drehung um 30° kann auch über die

Kanten hinweg ein sehr sauberes Druckergebnis realisiert werden. Selbst rechtwinklig abknickende Flächen lassen sich konturscharf bedrucken, wenn die Roboterdrehung mit Werte $\leq 30^\circ$ erfolgt. Der daraus resultierende große Anstellwinkel zwischen Flächennormale und Düse beeinflusst das Druckergebnis nicht negativ. Bis zu einem Winkel von 70° zwischen Flächennormale und Düse können die Leiterbahnkonturen gleichmäßig abgebildet werden. Für kleine Rundungen gilt dabei die gleiche Vorgehensweise. Größere Radien hingegen erschweren durch die lange Drehbewegung des Roboterarms eine stabile Linienführung. Abbildung 86 (rechts) zeigt unterschiedliche Verfahrrichtungen für eine Rundung mit 4 mm Radius. Bahn 1 ist mit durchgehend lot-rechter Düse zur Substratoberfläche gedruckt. Durch die Drehung kommen auch hier Schwingungen in das System, die sich in einer instabilen Bahnführung mit versetzten Linien äußern. Da der Roboter den Orientierungswechsel über mehrere Bahnpunkte verteilt langsam ausführen kann, ist das Druckbild jedoch gleichmäßiger als bei Bahn 2 und 3. Hier wird das Bauteil an je zwei Bahnpunkten gedreht. Einen gleichmäßigen Verlauf zeigt die Leiterbahn 4, die mit einer einmaligen Drehung um 90° erstellt wird. Der Shutter wird während der Drehung geschlossen.

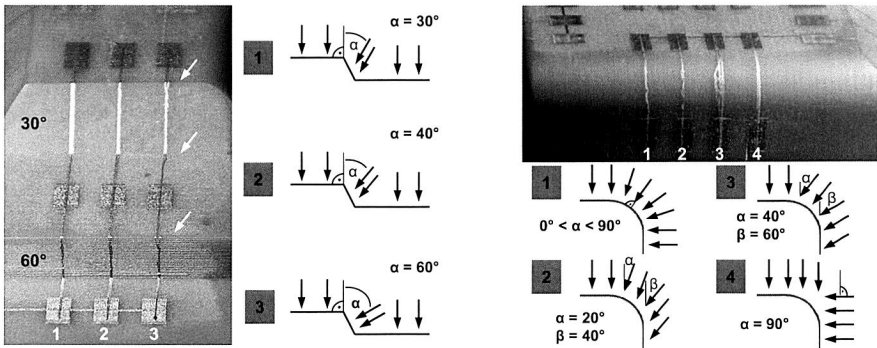


Abbildung 86: Druckbild auf einer 30° und 60° Schräge (links) und bei einer 4 mm Rundung (rechts)

Die dreidimensionale Freiheit des Aerosol-Jet-Systems ist lediglich durch die Konstruktion des Druckkopfes eingeschränkt. In Abbildung 87 (links) ist ersichtlich, dass insbesondere der Shutter die Bewegungsfreiheit des Bauteils unter der Düse begrenzt. Bei konkaven Geometrien besteht Kollisionsgefahr durch den Shutter. Für schmale Kavitäten ist eine Demontage des Bügels erforderlich, damit die Düse nah genug an die Oberfläche herangefahren werden kann. Bei Schrägen und Rundungen ist bei der Bahnplanung gleichfalls darauf zu achten, dass ausreichend Platz für den Shutter zur Verfügung steht und die Öffnungsbewegung nicht zur Schräge ausgerichtet ist (Abbildung 87 rechts). Auch wenn es in dieser Situation vorteilhaft wäre, das Werkstück nicht zu

schwenken und ein Bedrucken der Schräge ohne Änderung des Anstellwinkels β möglich wäre, muss dieser korrigiert werden, um eine Berührung zu vermeiden. Bei einfachen Bauteilen ist die Druckposition meist frei wählbar, bei komplexen Geometrien, z. B. mit Rippenstrukturen, jedoch nicht. Der Abstand zwischen Shutter und Düsen Spitze beträgt dabei ca. 4,5 mm, der Anstellwinkel β muss in Abhängigkeit des Düsenabstandes angepasst werden.

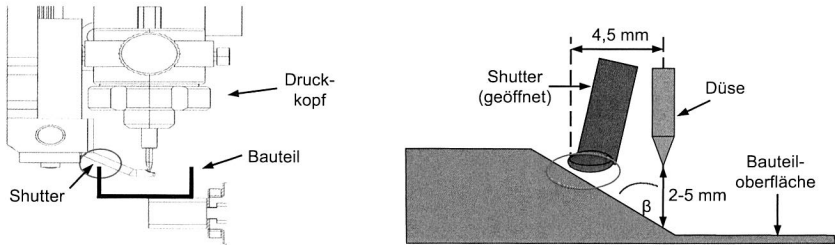


Abbildung 87: Begrenzung der Bewegungsfreiheit durch den Shutter

5.3.6 Prozessstabilität

Ein großer Nachteil der Aerosol-Jet-Technologie ist bislang noch die geringe Prozessstabilität. In Abhängigkeit der eingesetzten Tinte kommt es teilweise zu einem Verstopfen der Düse bzw. zu einer Veränderung der ausgestoßenen Tintenmenge durch das Kondensieren von Tintentropfen an der Schlauch- oder Düseninnenfläche. Insbesondere bei geringen Leiterbahnbreiten sind kleine Düsenöffnungen notwendig, die den Effekt des Verstopfens begünstigen. Bei den untersuchten Silbertinten kann mit CSD-66 deutlich länger stabil gedruckt werden als mit TP S 50. Bei TP S 50, einer wasserbasierten Tinte, verflüchtigt das Lösungsmittel wesentlich schneller als bei der alkoholbasierten Tinte CSD-66. Durch eine Anlagenmodifikation mit der Zuführung von Trägergas mit einem bestimmten Wassergehalt kann dieser Effekt gegebenenfalls reduziert werden.

5.4 Einsatzpotenzial zur Fertigung dreidimensionaler Prototypen

Prototypen sind insbesondere in der Technologie MID das entscheidende Hilfsmittel zur Verifizierung des Entwicklungsprozesses. Basierend auf dem etablierten Prototyping-Verfahren Stereolithografie zur Fertigung der Grundkörper bietet die Aerosol-Jet-Technologie großes Potenzial zum Aufbau des elektrischen Leiterbildes. Grundlegende Prozessuntersuchungen bei zweidimensionalen Substraten wie Glas oder Polyimid-Folie sind bereits erfolgt. Die Untersuchungen dieser Arbeit erweitern die Erkenntnisse für zwei temperaturbeständige Stereolithografie-Werkstoffe und für dreidimensionale Geometrien.

Die Ergebnisse zeigen den Einfluss wesentlicher Prozessparameter wie der Druckgeschwindigkeit, der Aushärtebedingungen und der Oberflächenvorbehandlung auf die zentralen Qualitätskenngrößen wie Haftfestigkeit und elektrische Leitfähigkeit. Die Liniengeometrie ist dabei stark von den eingesetzten Materialien und der Prozessführung abhängig. Das dimensionsgetreue Abbilden der Vorgaben aus dem CAD ist bei substrat-tintenspezifischer Anpassung wesentlicher Einflussgrößen wie PCM-Einstellungen und Düsengeometrie möglich. Die Haftfestigkeit der gedruckten Strukturen ist bei rauen Oberflächen sehr gut und kann durch eine Plasmabehandlung bei glatten Oberflächen deutlich gesteigert werden. Die spezifische Leitfähigkeit der Silberntinten ist auf den untersuchten Materialien mit ca. $5 \text{ m}/\Omega\text{mm}^2$ vergleichsweise gering. Die Ergebnisse zeigen auch, dass mit einer geeigneten Verfahrensstrategie räumliche Geometrieelemente wie Schrägen, Stufen und Rundungen flexibel bedruckt werden können. Sowohl der 6-Achs-Roboter als auch das 5-Achs-System können zum Einsatz kommen. Die Erweiterung der Untersuchungen um beschleunigte Alterungstests zeigt für die verwendeten Tinten-Substrat-Kombinationen sehr gute Ergebnisse. Im Temperaturschocktest bei $-40^\circ\text{C}/+125^\circ\text{C}$ und im Feuchte-Wärme-Test bei $85^\circ\text{C}/85\% \text{ rel. Feuchte}$ kann insbesondere bei mehrfach gedruckten Strukturen kein signifikanter Einfluss auf die elektrische Leitfähigkeit festgestellt werden. Nach 1.000 h Feuchte-Wärme ergibt sich ein negativer Einfluss auf die Haftfestigkeit durch starke Oxidation. Die Scherkraft der Bauelemente ist nach 1.000 Zyklen TST trotz der geringen Ausfallrate im elektrischen Test ebenfalls stark reduziert.

Insgesamt bestätigen die Untersuchungen, dass die Kombination aus Stereolithografie und Aerosol-Jet für das Rapid Prototyping geeignet ist. Die Leiterstrukturen können mit vergleichbaren Eigenschaften wie mit den MID-Standardverfahren abgebildet werden. Eine Erweiterung der Einsatzmöglichkeiten für das Rapid Manufacturing oder für die Fertigung von Kleinserien ist aufgrund der guten Ergebnisse im Zuverlässigkeitstest möglich. Das Aerosol-Jet-Verfahren ist im Gegensatz zu den meisten Drucktechnologien auch zum Drucken auf dreidimensionalen Substraten geeignet.

Eine Optimierung der Prozessstabilität und auch der Druckergebnisse ist durch eine Weiterentwicklung der Tintenwerkstoffe und der Anlagenkonfiguration möglich. Durch die Integration eines Kamerasystems und die Verknüpfung mit echtzeitfähigen Bildverarbeitungssystemen kann das Druckbild während des Strukturierungsprozesses korrigiert werden. Hierdurch ist eine Steigerung der Absolutgenauigkeit der Handhabungssysteme bzw. eine Anpassung der Prozesseinstellungen möglich. Dadurch kann beispielsweise bei mehrfach gedruckten Strukturen ein Versatz der einzelnen Schichten vermieden werden. Eine Erweiterung der Anlage um ein Montagemodul mit integriertem Dispens- und Bestückkopf und um ein Lasersystem ermöglicht die komplette Fertigung eines räumlichen Schaltungsträgers mit Ausnahme des Grundkörpers. Durch das Lasersystem können die Strukturen direkt nach dem Drucken selektiv ausgehärtet wer-

den, was grundsätzlich eine sinnvolle Alternative zu den relativ langen Aushärtezeiten im Ofen ist. Mit dem Montagemodul können nach dem Aushärten der Tinten das Verbindungsmedium aufgetragen und die Bauelemente bestückt werden. Dieser Prozess kann gegebenenfalls bereits vorab erfolgen und die geklebten Bauelemente direkt während des Druckprozesses kontaktiert werden.

6 Strategien zur Integration und Umsetzung von MID im Unternehmen

Die Unternehmen befinden sich heute in einem dynamischen Umfeld mit einem immer schnelleren Wandel der technischen Möglichkeiten, des verfügbaren Wissens und der Marktanforderungen. Insbesondere durch die zunehmende Globalisierung hat sich der Wettbewerb in nahezu allen Marktsegmenten deutlich verschärft. Die Einführung einer neuen Technologie, die bei erforderlichen Investitionen nicht unmittelbar eine hohe Rendite bringt, ist vor allem in Deutschland eine große Herausforderung. Trotz der starken Position im Bereich Hochtechnologie mit vielen Patenten und hohen FuE-Ausgaben existiert eine negative Einstellung zu unternehmerischem Risiko. [58]

Wettbewerbsvorteile können nach M. E. Porter durch die generischen Strategieansätze der Kostenführerschaft oder durch eine Differenzierung vom Wettbewerb erzielt werden [156]. Bei der Strategie der Kostenführerschaft erstreckt sich der Kundennutzen ausschließlich auf einen niedrigeren Preis. Eine Qualitäts-, Kosten- und Zeitoptimierung ist in der Zwischenzeit eine Basisanforderung und nicht zur Erzielung strategischer Wettbewerbsvorteile ausreichend. Die Differenzierungsstrategie steigert den Kundennutzen und damit die Wettbewerbsfähigkeit durch innovative Produktideen, durch die Lösung kundenspezifischer Probleme oder auch durch eine erhöhte Funktionalität. In der Technologie MID ist derzeit aufgrund der geringen Stückzahlen und den noch nicht verfügbaren Massenfertigungsanlagen eine Differenzierung über niedrige Kosten ohnehin kaum möglich. Im Vordergrund steht die Erzielung nachhaltiger Wettbewerbsvorteile durch neue Produkt- und Prozessinnovationen. Entsprechend der marktstrukturellen Betrachtung von Porter existiert der Ressourcen-Ansatz, der die verfügbaren Ressourcen und Fähigkeiten, also die Kernkompetenzen eines Unternehmens, als Basis für Wettbewerbsvorteile betrachtet [156]. Aufgrund der Komplexität der MID-Prozesskette ist diese Sichtweise zwingend zu berücksichtigen.

Das Innovationspotenzial von MID kann dabei nur durch die Beherrschung der Technologiekomplexität und die gleichzeitige Identifizierung erfolgversprechender Produktideen ausgeschöpft werden. In der unternehmerischen Praxis existiert noch eine Lücke zwischen Technology-Push und Market-Pull [49]. Trotz der zahlreichen Vorteile der Technologie und erfolgreicher Serienanwendungen ist der Einstieg für Unternehmen in die Technologie als Anwender oder Hersteller sowie die Umsetzung neuer Produktideen nach wie vor ein schwieriger Prozess. Fokus des Kapitels 6 ist daher eine allgemeine Betrachtung der Potenziale der Technologie MID zur Erzielung unternehmensspezifischer Wettbewerbsvorteile. Basierend auf unternehmensexternen Technologieentwicklungen und einer technologie- und innovationsorientierten Unternehmensanalyse werden Strategien und Schlüsselfaktoren für erfolgreiche MID-Projekte dargestellt.

6.1 Strategisches Technologie- und Innovationsmanagement

Die Bedeutung des Technologie- und Innovationsmanagements (TIM) hat in den vergangenen Jahren beständig zugenommen. Aufgrund steigender Entwicklungskosten, kürzer werdender Produktlebenszyklen und technischem Entwicklungsrisiko wird das Technologie- und Innovationsmanagement mit wachsenden Anforderungen konfrontiert. Aus gesamtwirtschaftlicher Perspektive zeigt sich, dass neben den obligatorischen Produktivitätssteigerungen nur Wachstum, das auf der Schaffung von originär Neuem beruht, zu einer nachhaltigen Vergrößerung des Marktanteils führen kann. [184]

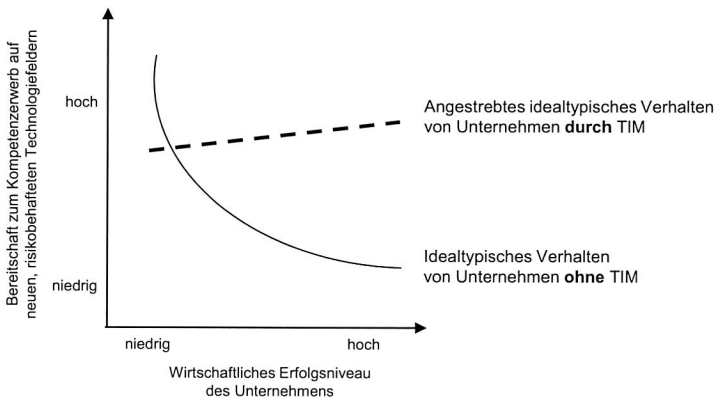


Abbildung 88: Unternehmenserfolg und Bereitschaft zum Kompetenzerwerb auf neuen, risikobehafteten Technologiefeldern [62]

In der unternehmerischen Praxis besteht ein negativer Zusammenhang zwischen dem aktuell erreichten wirtschaftlichen Erfolgsniveau und der Bereitschaft zur Nutzung neuer, risikobehafteter Technologien. In Abbildung 88 ist das wirtschaftliche Erfolgsniveau und die Bereitschaft zum Kompetenzerwerb auf neuen Technologiefeldern dargestellt. Häufig wird erst in Phasen wirtschaftlicher Schwierigkeiten der Versuch unternommen, die eigene Marktposition durch technologische Neuerungen zu verbessern. In Krisensituationen fehlen dann aber häufig die erforderlichen finanziellen Ressourcen. Ein effizientes Technologie- und Innovationsmanagement durchbricht die negative Erfolgsniveau-Risikobereitschafts-Korrelation, so dass technologische Produkt- und Verfahrensinnovationen rechtzeitig identifiziert und umgesetzt werden. Ziel ist die Realisierung einer Technologieposition, die nachhaltig und signifikant zur Sicherung und Verbesserung der wirtschaftlichen Erfolgsposition beiträgt. [62]

Das Management von Neuerungen zur Schaffung und Nutzung technologischer Innovationen stellt nach [62] für viele Unternehmen eine große Herausforderung dar. Bei-

spielsweise zeigt eine Betrachtung der weltweit größten Anbieter des Halbleitermarktes mit Vorgänger-/Nachfolgerprodukten von 1955 bis 1995, dass sich keiner der führenden Anbieter über einen Zeitraum von 40 Jahren behaupten konnte. Ein prominenter Vertreter aus dem Bereich der Computer-Hardware ist IBM. Das Unternehmen war 1972 das umsatzstärkste US-Unternehmen. Gerade 20 Jahre später mussten mehr als 200.000 Mitarbeiter entlassen werden, da eine Distanzierung von erfolgreichen Lösungen und die Integration neuer technologischer Entwicklungen nicht gelungen ist.

Der Begriff Technologie- und Innovationsmanagement umfasst die Planung, Organisation, Führung und Kontrolle aller Aktivitäten und Prozesse eines Unternehmens, die die Bereitstellung neuer Technologien, die Durchsetzung des Einsatzes der Technologie in Produkte und Prozesse innerhalb des Unternehmens sowie die externe Verwertung betrachten. Das Technologiemanagement befasst sich mit neuen und vorhandenen Technologien, d. h. es werden nicht nur technologische Neuerungen betrachtet, sondern auch die Erhaltung und Anwendung der Technologien über den gesamten Lebenszyklus. Ziel des Innovationsmanagements ist die Sicherung und Verbesserung der wirtschaftlichen Erfolgsposition, also der nachhaltige Erfolg des Unternehmens. Das Innovationsmanagement als Schnittmenge mit dem Technologiemanagement betrachtet somit den Bereich der technologischen Innovationen. [187]

Wichtige Bestandteile des Technologie- und Innovationsmanagements sind die strategische Analyse und die Strategieformulierung. Die strategische Analyse umfasst die technologie- und innovationsorientierte Umwelt- und Unternehmensanalyse. Das Ableiten technologischer Innovationsziele und prinzipieller Handlungsoptionen zur Erreichung dieser Ziele komplementiert den strategischen Planungsprozess für neue Technologien. In der Literatur sind eine Vielzahl an Strategieplanungs- und Technologiebewertungsmethoden verfügbar. Nach [63][184] können diese in vier Gruppen eingeteilt werden:

- Empirische Analysen: Anhand der Analysen vergangener und gegenwärtiger Entwicklungen (z. B. Patentanalysen) werden Zukunftsprognosen abgeleitet.
- Kausal- bzw. Systemmodelle: Mittels der Position innerhalb eines Lebenszyklus (z. B. Technologielebenszyklus) werden Entscheidungen hinsichtlich der strategischen Planung getroffen.
- Induktiv-mathematische Methoden: Mit geeigneten Verfahren (z. B. Szenariotechnik, S-Kurven-Modell) wird die Vergangenheit durch Extrapolation in die Zukunft fortgeschrieben.
- Intuitiv-strukturierte Suchverfahren: Mittels Expertenwissen (z. B. Expertenanalysen, Delphi-Methode, Portfoliotechniken) werden durch das systematische und strukturierte Zusammenführen von Informationen Prognosen zukünftiger Entwicklungen abgeleitet.

Die Aufgabenfelder des Technologie- und Innovationsmanagements können in eine problemspezifische Perspektive und eine allgemeine, (management-) prozessorientierte Sichtweise aufgegliedert werden. Problemspezifische Aufgaben sind beispielsweise die Erfassung technologischer Entwicklungen, die Festlegung des Stellenwerts innovativer Technologien, die Bewertung der technologischen Kompetenzen des eigenen Unternehmens und die Auswahl innovativer Technologiefelder. Die Koordination technologischer Innovationsaktivitäten und die Schaffung einer technologie- und innovationsfreundlichen Unternehmenskultur sind prozessorientierte Aufgabenfelder. [62]

6.2 Strategien für den erfolgreichen MID-Innovationsprozess

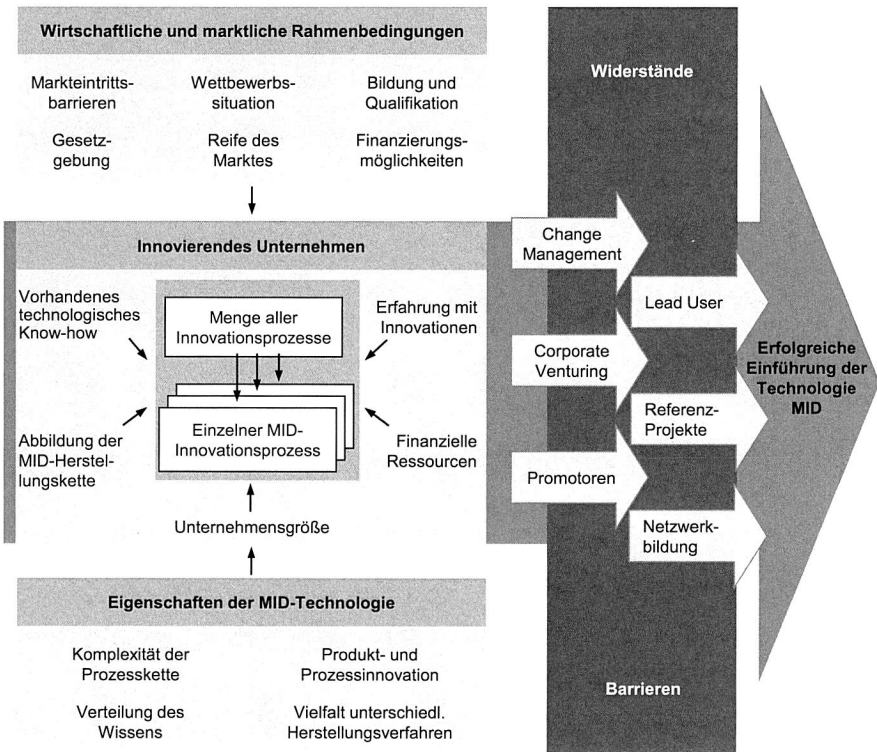


Abbildung 89: Einflussfaktoren und Strategien für den MID-Innovationsprozess

Für die erfolgreiche Einführung der Technologie MID sind umfassende technologie- und innovationsorientierte Umwelt- und Unternehmensanalysen erforderlich. Strategien zur Technologieförderung und für die Überwindung vorhandener Widerstände bzw. für die Beherrschung der Technologiekomplexität sind zu entwickeln. In Abbildung 89 ist die

Komplexität der Beziehungen zwischen den Einflussfaktoren und den relevanten Strategien für den MID-Innovationsprozess veranschaulicht. Das innovierende Unternehmen wird dabei in hohem Maße durch die wirtschaftlichen und marktlichen Rahmenbedingungen beeinflusst. Die Wettbewerbssituation, Markteintrittsbarrieren und andere Faktoren können nur bedingt durch das Unternehmen selbst gesteuert werden. Zudem erfordern die spezifischen Anforderungen der Technologie MID eine ausgeprägte Innovationsbereitschaft.

6.2.1 Unternehmensexterne Technologieentwicklungen

Die Umweltanalyse umfasst die Technologiefrüherkennung und -prognose sowie die technologische Konkurrenten-Analyse. Ziel ist die frühzeitige Identifikation neuer Technologietrends und die Einschätzung der Marktattraktivität alternativer Technologien. Ergebnis der Umweltanalyse ist ein Chancen-Risiko-Profil für neue Technologiefelder. Für die Bewertung zukünftiger Entwicklungen stehen quantitative und qualitative Technologieprognoseverfahren zur Verfügung, die sich wiederum in leistungszyklusbezogene und nachfragezyklusbezogene Modelle unterscheiden. Leistungszyklusbezogene Modelle implizieren, dass die Entwicklung des Leistungsniveaus einer Technologie deren Potenziale zur Erzielung von Wettbewerbsvorteilen bestimmt. Empirische Studien belegen jedoch, dass die Verbreitung technologischer Produktinnovationen zur Marktdurchdringung teilweise enorm viel Zeit in Anspruch nimmt [62]. Deshalb sind zusätzlich zu technologieorientierten auch nachfrageorientierte Ansätze zur Prognose wichtig und eine Verzahnung von Markt- und Technologieplanung im Innovationsprozess erforderlich.

Die Verbreitung einer Technologie lässt sich durch das Wechselspiel aus markt- und technologiegetriebenen Faktoren abbilden. Eine einseitige Markt- oder Technologieorientierung führt zur Fehlallokation der Ressourcen [184]. Die Realisierung einer erfolgreichen Einführung der MID-Technik kann daher nur auf einer gelungenen integrativen Zusammenführung von Market Pull und Technology Push beruhen. Beide wirken vom jeweiligen Zeitpunkt abhängig auf die Entwicklungs- und Produktionskette. In den frühen Phasen spielen insbesondere technologiegetriebene Faktoren eine wichtige Rolle, mit zunehmendem Entwicklungsverlauf werden die Einflüsse des Marktes bedeutender.

Speziell in der MID-Technologie ist ein ausgeprägter Technology Push vorhanden. Für unterschiedliche Anwendungen stehen differenzierte Lösungsmöglichkeiten bzw. auch Herstellverfahren zur Verfügung. Zudem sind ausreichend Unternehmen am Markt vorhanden, die MID-Projekte erfolgreich durchführen können. Die LDS-Technologie ermöglicht kleine Stückzahlen und eine wirtschaftliche Variantenvielfalt. Durch die Kombination mit dem Zweikomponentenspritzguss sind zudem neue Lösungskonzepte und eine Massenproduktion möglich. Durch verbesserte Anlagen zur dreidimensionalen Bestü-

ckung, die Weiterentwicklung der vorhandenen Softwaretools und die Verbesserung der Eigenschaften der Kunststoffe sind auch zukünftig weitere technologiegetriebene Impulse zu erwarten.

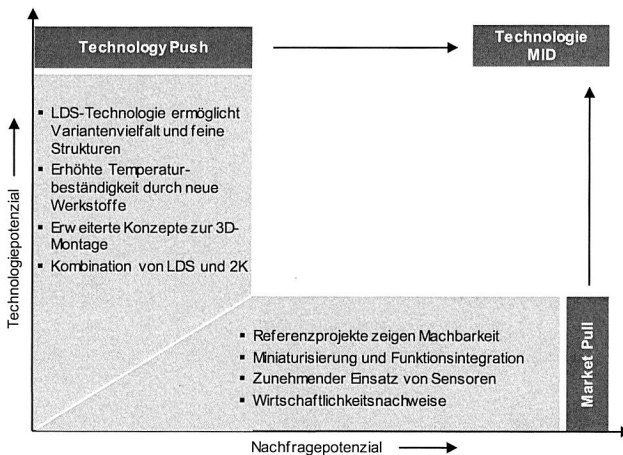


Abbildung 90: Technologie- und Marktpulse räumlicher elektronischer Schaltungsträger

Der Market Pull ist im Bereich der MID-Technologie derzeit noch begrenzt. Durch die steigende Anzahl an Serienprodukten können zunehmend Referenzen und die Wirtschaftlichkeit von MID-Projekten nachgewiesen werden. Allgemein steigt der Bedarf an Produktkombinationen aus Mechanik, Elektrik, Optik, Magnetik usw. In der Elektronikproduktion entsteht ein genereller Trend zur Miniaturisierung und Funktionsintegration. Sich verändernde Rahmenbedingungen steigern den Bedarf an mechatronischen Systemen in Bereichen mit hohem Anwendungspotenzial für räumliche Baugruppen, beispielsweise in der Sensortechnik. Das Zusammenspiel der genannten Faktoren führt zu einem kontinuierlichen Anstieg des Market Pull und eröffnet der Technologie MID neue Marktchancen.

6.2.2 Unternehmensinterne Technologiekompetenzen

Die Unternehmensanalyse umfasst die Technologie- und Innovationspositionsbewertung sowie die Bestimmung von Kernkompetenztechnologien. Ziel ist die relative Bewertung der technologischen Innovationsleistungen des Unternehmens. Diese beinhalten sowohl in der Vergangenheit beobachtete Ergebnisse und Verhaltensmuster des Unternehmens als auch die Fähigkeiten, die von den für technologische Innovationstätigkeiten eingesetzten Ressourcen abhängen und eine Grundlage für die zukünftige Er-

folgsposition des Unternehmens sind. Nachhaltige Wettbewerbsvorteile lassen sich nach dem Ressourcen-Ansatz durch die Konzentration auf die eigenen Kernkompetenzen erzielen. Kernkompetenzen dürfen nur schwer imitierbar sein, müssen dem Unternehmen Zugang zu einer Reihe von Märkten öffnen und einen wesentlichen Beitrag zum durch den Kunden wahrgenommenen Nutzen des Produktes liefern. [84]

Kernkompetenzen bilden sich aus den vorhandenen tangiblen (Maschinen, Gebäude) und intangiblen (Technologien, Wissen) Ressourcen sowie den Fähigkeiten, diese Ressourcen gewinnbringend einzusetzen. Neuentwicklungen basieren meist auf den vorhandenen Kernkompetenzen [53]. Die MID-Technologie ist durch eine Vielzahl an Herstellungsverfahren und eine komplexe Prozesskette geprägt. Der Erfolg eines Unternehmens beim Einstieg in die MID-Technik hängt deshalb maßgeblich von der Auswahl der richtigen Technologiebereiche ab.

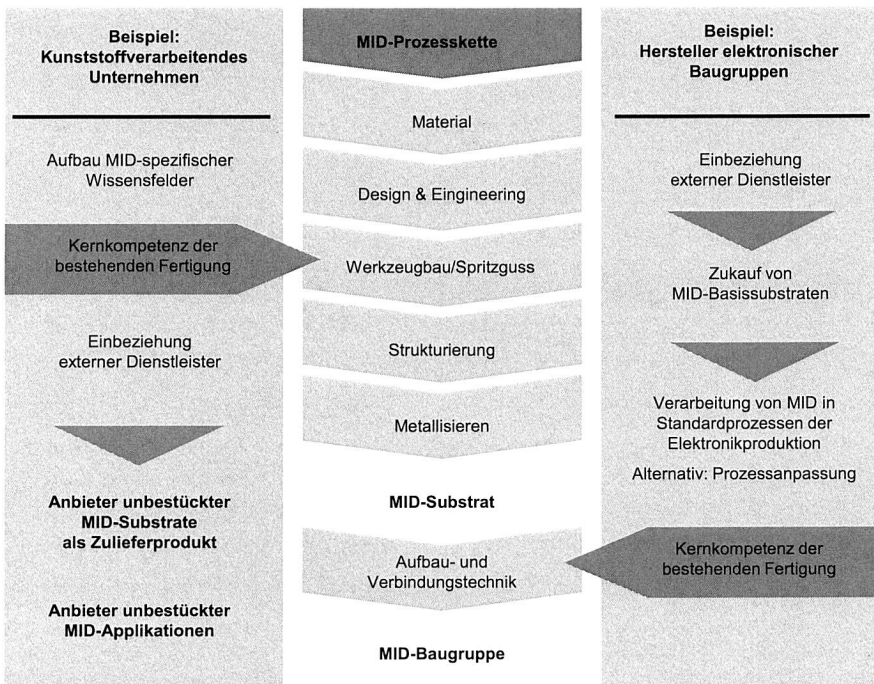


Abbildung 91: Branchenspezifische Vorgehensweise zur Einführung der MID-Technik in das bestehende Technologieportfolio [108]

Die vorhandenen Kernkompetenzen, beispielsweise im Bereich der Kunststofftechnologie oder der Herstellung elektronischer Baugruppen, sind bei der Positionierung im

Technologiefeld MID entscheidend, da jeder einzelne Prozessschritt spezifisches Know-how erfordert. Die Unternehmen können als Hersteller unbestückter MID-Substrate oder als Anbieter kompletter MID-Baugruppen fungieren. Aufgrund der Komplexität der MID-Prozesskette sind die vorhandenen Kernkompetenzen entsprechend der strategischen Zielausrichtung weiterzuentwickeln respektive neue Kompetenzen vor- bzw. nachgelagerter Prozessschritte aufzubauen. Eine weitere Alternative ist die Einbeziehung externer Dienstleister, beispielsweise zur Metallisierung oder für die Aufbau- und Verbindungstechnik.

6.2.3 Markt- und Technologieportfolio zur Integration der Umwelt- und Unternehmensanalyse

Eine integrierte Markt-Technologieportfolio-Analyse ist ein wichtiges Instrument zur strategischen Unternehmensplanung und dient der systematischen Einordnung neuer Technologien zur Unterstützung von Investitionsentscheidungen. Die vielfältigen Informationen der Umwelt- und Unternehmensanalyse werden hier zusammengefasst und sowohl die Technologieattraktivität (Chancen und Risiken) als auch die Ressourcenstärke (Stärken und Schwächen) betrachtet. In technologieorientierten Branchen wie der MID-Technik ist die Betrachtung rein marktorientierter Größen nicht ausreichend. [56][60]

Insgesamt existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Portfoliostrategien [39][60][62][84][187], u. a. das bekannte Marktwachstum-Marktanteil-Portfolio der Boston Consulting Group. Nach [17] wird das technologische und ökonomische Entwicklungspotenzial durch die Technologieattraktivität (Technologiepotenzial und Technologiebedarf) bestimmt und ermöglicht eine Aussage über die technisch-wirtschaftlichen Vorteile einer Technologie und deren Entwicklungsmöglichkeiten. Die Ressourcenstärke bewertet die technologische und ökonomische Beherrschung eines Technologiefeldes relativ zum Wettbewerb. Die wesentlichen Technologiefelder werden dabei als Kreis abgebildet, so dass über die Fläche eine Aussage zu einer entscheidungsrelevanten Variable (z. B. F&E-Aufwendungen) möglich ist. Spitzentechnologien sind durch eine hohe Technologieattraktivität und eine hohe Ressourcenstärke gekennzeichnet. Ergebnis der Markt-Technologie-Portfoliomatrix sind Strategieempfehlungen zur Investition in bestimmte Technologiefelder.

Das dargestellte Portfolio in Abbildung 92 zeigt die unterschiedlichen Möglichkeiten des Unternehmens A in die Technologie MID einzusteigen. Aufgrund der bisherigen Aktivitäten im Bereich der Kunststofftechnik ist eine Fertigung räumlicher elektronischer Schaltungsträger grundsätzlich mit den Verfahren Folienhinterspritzen, Laserdirektstrukturieren und Zweikomponentenspritzguss möglich. Die Ressourcenstärke ist beim Zweikomponentenspritzguss am stärksten, das Folienhinterspritzen und die Laserdirektstrukturierung sind etwa gleich einzustufen. Aufgrund der hohen Technologieattraktivität

der LDS-Technologie ist dieses Verfahren deutlich interessanter. Darüber hinaus besitzt eine mögliche Kombination der beiden Verfahren Laserdirektstrukturieren und Zweikomponentenspritzguss hohes Potenzial. Die spezifischen Vorteile beider Verfahren ermöglichen die Fertigung wirtschaftlicher 3D-MID in hoher Variantenvielfalt und mit feinen Leiterbahnen. In dem aufgeführten Beispiel wird durch die Größe der Kreise der Investitionsbedarf der einzelnen Technologiefelder beschrieben. Als Strategieempfehlung lässt sich ableiten, dass das Laserdirektstrukturieren und der Zweikomponentenspritzguss weiterverfolgt werden sollten und zukünftig vor allem eine Kombination der beiden Verfahren besonders Erfolg versprechend ist. Daher ist trotz des hohen Investitionsbedarfs ein Ausbau der Technologie Laserdirektstrukturieren und ein Verzicht auf das Folienhinterspritzen für MID anzustreben.

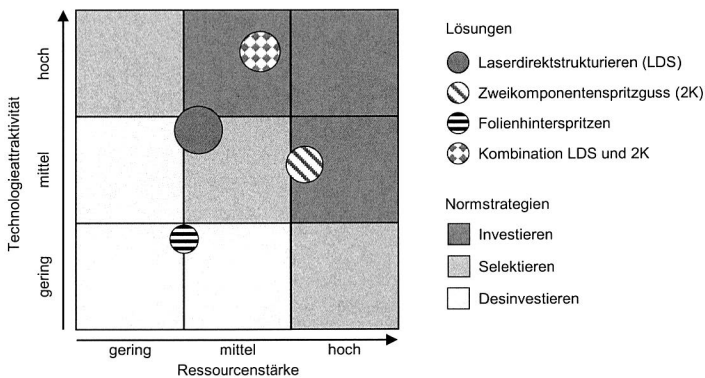


Abbildung 92: Integriertes Markt- und Technologieportfolio für das Unternehmen A zur Einordnung verschiedener MID-Herstellverfahren

Eine umfassende Betrachtung nach McKinsey unterteilt in ein Marktportfolio und ein Technologieportfolio. Aus beiden Portfolios werden die Markt- und Technologiepriorität als Hauptkriterien für die anschließende Nutzwertanalyse bzw. ein integriertes Portfolio abgeleitet. Im Marktportfolio wird dabei die zukünftige Marktattraktivität anhand der Kriterien Marktvolumen, Marktentwicklung und Wettbewerbsintensität sowie die Wettbewerbsstärke basierend auf der Profitabilität, der Differenzierungsstärke und der Umsatzentwicklung bewertet. Im Technologieportfolio wird die Dimension Technologieattraktivität anhand der Position auf der S-Kurve und der Eintrittsbarrieren, die Dimension relative Technologieposition anhand der Ressourcenstärke und Umsetzungsstärke bewertet. [60]

In Abbildung 93 ist das Markt- und Technologie-Portfolio für das Unternehmen B zur Bewertung möglicher MID-Anwendungsbereiche dargestellt. Insbesondere in der Tech-

nologie MID ist für eine erfolgreiche Applikation die richtige Auswahl einer geeigneten Anwendung ein entscheidender Faktor. Eine hohe Marktpriorität alleine reicht nicht aus, damit neue Märkte erschlossen werden können [56]. Der Bedarf an dreidimensionalen Antennenstrukturen für mobile Geräte ist sehr groß, jedoch wird die Massenproduktion in Asien abgewickelt. Trotz der hohen Nachfrage ist daher ein Fokus auf Antennenapplikationen nicht empfehlenswert, bei Bedarf kann diese Funktionalität aufgrund der Ressourcenstärke in die anderen genannten Produktkonzepte integriert werden. Steckverbindungen sind das klassische Produkt des Unternehmens, für MID sind aber die Marktpriorität und auch die Technologieattraktivität eingeschränkt. Die Bereiche Sensor- und RFID-Technik besitzen hohe Technologiepriorität bei mittlerer bis hoher Marktpriorität. Daher ist für das Unternehmen B eine Konzentration auf diese beiden Bereiche als Strategie abzuleiten.

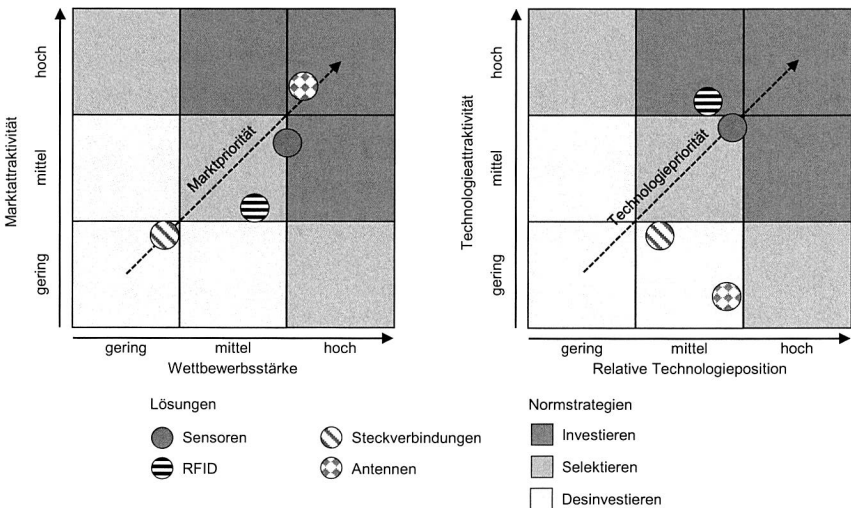


Abbildung 93: Markt- und Technologie-Portfolio für das Unternehmen B zur Bewertung möglicher MID-Anwendungsbereiche

6.2.4 Technologieförderung zur Überwindung bestehender Widerstände

Die Strategien zur Überwindung bestehender Widerstände bzw. Barrieren gegenüber der Technologie MID basieren auf einem Erkenntnisgewinn aus Experteninterviews, die im Rahmen der Arbeit durchgeführt wurden. Die Experten aus differierenden Wertschöpfungsstufen und unterschiedlichen Hierarchieebenen der Unternehmen (u. a. F&E-Leiter, technischer Vertriebsleiter, Geschäftsführer, Entwicklungsingenieur) verfügen über langjährige Erfahrung im Bereich MID.

Corporate Venturing

Das Corporate Venturing umfasst die organisatorische Ausgliederung innovativer Teilbereiche eines Unternehmens, beispielsweise in ein Tochterunternehmen, oder den Zusammenschluss mehrerer rechtlich und wirtschaftlich selbständiger Unternehmen. Durch die organisatorische Trennung können die im Mutterkonzern vorhandenen Innovationsbarrieren und die Vorbehalte gegenüber der MID-Technologie schneller und einfacher überwunden werden. [39][49]

Die Gründung eines Tochterunternehmens oder eines neuen Geschäftsbereiches ist vor allem für Unternehmen interessant, die weite Bereiche der erforderlichen Kompetenzen der MID-Fertigung abdecken können, über ausreichend finanzielle Ressourcen für die notwendigen Investitionen verfügen und im eigenen Unternehmen eine ausgeprägte Innovationsbereitschaft vorhanden ist. Ein Joint Venture führt die innovativen Ausgliederungen mehrerer Unternehmen zusammen. Dadurch können die Risiken und Kosten verteilt, die vorhandenen, idealerweise komplementären Ressourcen gemeinsam genutzt und folglich ein Zugang zu neuen Märkten geschaffen werden. Aufgrund der Komplexität der Technologie MID erleichtert ein Zusammenschluss mehrerer Unternehmen in Form eines Joint Ventures die Beherrschung der Prozesskette.

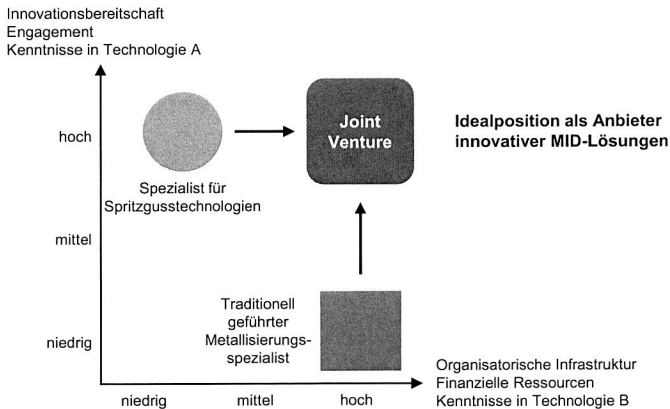


Abbildung 94: Joint Venture im Rahmen der Technologie MID

In Abbildung 94 ist die Kooperation eines Spezialisten aus der Kunststofftechnik mit einem hohen Maß an Innovationsbereitschaft und einem traditionell geführten Metallisierungsspezialisten mit ausreichend finanziellen Ressourcen veranschaulicht. Für das neu gegründete Unternehmen ergibt sich eine Idealposition als MID-Hersteller. Die Produktion unbestückter MID ist in der Zweikomponentenspritzgusstechnologie ohne weitere Investitionen möglich. Durch die Integration eines Lasersystems in die Fertigung

können auch laserstrukturierte MID-Substrate gefertigt werden. Die Montage der Bauelemente kann durch einen externen Dienstleister erfolgen oder durch eine vertikale Kompetenzerweiterung im eigenen Unternehmen abgewickelt werden.

Lead User und Referenzprojekte

Lead User sind in technologieintensiven Marktsegmenten mit hohen Qualitätsstandards sowie technischen Schnittstellenproblemen von besonderer Bedeutung [187]. Sie zeichnen sich durch ihren Expertenstatus, aber auch durch das Gefühl für wichtige Markttrends aus. Für die Marktdurchdringung in der Technologie MID ist der Lead User-Ansatz enorm wichtig. Insbesondere in MID-Marktsegmenten wie der Automobilindustrie und Medizintechnik existieren hohe Anforderungen an die Produktqualifizierung. Lead User tragen durch das Expertenwissen und den meist hohen eigenen Qualitätsanspruch zu einer erfolgreichen Lösung bei und treten oftmals als Innovatoren auf. Die konsequente Fortführung des Ansatzes ist daher die Realisierung erfolgreicher Projekte als positive Referenz speziell durch den Lead User. Serienapplikationen mit hohen Stückzahlen in sicherheitskritischen Funktionen, beispielsweise ein Drucksensor für das Bremsregelsystem oder ein ACC-Sensor zur Abstandskontrolle im Automotive-Umfeld, schaffen Vertrauen und Aufmerksamkeit sowohl intern als auch bei anderen Unternehmen. Für die gesamte Branche entsteht eine Initialwirkung, die in der Technologie MID vor allem durch große Automobilzulieferer und technologieführende OEM angeregt wird.

In den MID-Marktstudien 2003, 2006 und 2011 wird jeweils die Unsicherheit der Unternehmen und die damit verbundene fehlende Risikobereitschaft herausgestellt [50][55][59]. Ursache hierfür sind vor allem fehlende Referenzprojekte und der damit verbundene Nachweis der (Langzeit-)Zuverlässigkeit. Vorbehalte der Lead User, als Referenz zur Verfügung zu stehen, sind in diesem Zusammenhang für die weitere Technologieentwicklung hinderlich. Es existieren jedoch differenzierte Betrachtungsweisen zwischen Anwender und Hersteller in Marktsegmenten mit hoher Wettbewerbsintensität. Für die Anwender der Technologie MID ergibt sich die Chance, einen Wissens- und Technologievorsprung gegenüber Konkurrenten aufzubauen. Erfolgreiche Referenzprojekte zeigen jedoch die Machbarkeit und die Stärken der Hersteller. Dadurch kann ein Market Pull mit erhöhter Nachfrage nach MID-Lösungen generiert werden, der Investitionen in MID-Anlagentechnik bedingt und dadurch das Marktwachstum wiederum positiv und nachhaltig stimuliert.

Technologieorientierte Netzwerkbildung

Neue Produkte und Fertigungsverfahren in innovativen Technologiefeldern sind verstärkt das Ergebnis unternehmensübergreifender Kooperationen. Für die technologieorientierte Zusammenarbeit stehen dabei im Wesentlichen Kunden, Zulieferer, Forschungseinrichtungen aber auch Wettbewerber zur Verfügung. Die Unternehmen

profitieren durch einen Zugang zu den führenden wissenschaftlichen Institutionen und durch FuE-nahe schriftliche Informationsquellen. [42][49]

Eine besondere Initiative ist in diesem Zusammenhang die Kooperation von Unternehmen und Forschungsinstituten entlang der gesamten MID-Prozesskette in der Forschungsvereinigung Räumliche Elektronische Baugruppen 3-D MID. Die beteiligten Unternehmen schaffen sich in einem Netzwerk aus den Bereichen der Kunststoff- und Spritzgusstechnik, der Strukturierung und Metallisierung sowie der 3D-Montage wertvollen Zugang zu externem technologischen Know-how. Ergänzt wird das Netzwerk durch Systemanbieter und Anwender der Technologie MID. Zur Förderung und Weiterentwicklung der Technologie MID werden zahlreiche Projekte zur Gemeinschaftsforschung durchgeführt. Insbesondere kleine und mittlere Unternehmen profitieren durch den großen FuE-Aufwand. Die Forschungsaktivitäten sind hierbei sehr industrienah ausgerichtet. Im Wesentlichen werden vorwettbewerbliche Forschungsfelder entlang der gesamten Prozesskette erschlossen: die Planung und Entwicklung von 3D-MID, die Entwicklung und Modifizierung von Substratmaterialien, die Schaltungsträgerherstellung, die 3D-Montage und Verbindungstechnik sowie der Bereich Qualität und Zuverlässigkeit. Im Mittelpunkt steht die Betrachtung der gesamten Prozesskette mit flexiblen Montagesystemen und hoher Fertigungsgeschwindigkeit. Darüber hinaus wird mit gemeinsamen Informationsaktivitäten zum Technologietransfer und ergänzenden Marketingmaßnahmen die verstärkte Marktdurchdringung dieser attraktiven Technologie angestrebt.

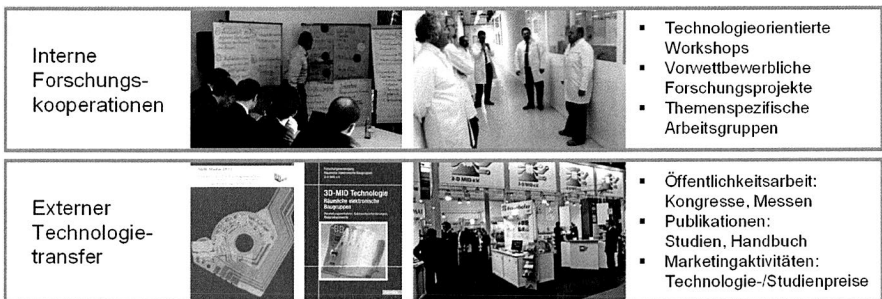


Abbildung 95: Technologieorientierte Netzwerkbildung für vorwettbewerbliche FuE-Aktivitäten und Technologietransfer

Change Management und Promotoren

Ein ausgeprägtes Veränderungsmanagement ist eine wesentliche Basis zur Umsetzung neuer Strukturen und Systeme, besonders zur Einführung neuer Technologien im Unternehmen. Aufgabe des Change Management ist die entsprechende Ausrichtung des Unternehmens durch eine geeignete Unternehmensstrategie, -struktur und -kultur.

Dadurch wird die Implementierungsbereitschaft und -fähigkeit der Mitarbeiter bestimmt sowie die für Veränderungen notwendigen Ressourcen und Kapazitäten bereitgestellt. [186]

Beispiele hierfür sind die Gründung einer eigenständigen Organisationseinheit innerhalb eines Unternehmens, das vorwiegend Steckverbinder herstellt, und eines Unternehmens aus der Spritzgusstechnologie. In beiden Fällen wird der Ansatz verfolgt, die gesamte Prozesskette in-house abzudecken und damit für den Kunden als Komplettanbieter für räumliche Schaltungsträger zu fungieren. Die organisatorische Trennung der Technologie MID ermöglicht eine große Flexibilität mit hoher Konzentration auf den neuen Aufgabenbereich. Entsprechende finanzielle Ressourcen für die erforderlichen Investitionen werden bereitgestellt. Die Mitarbeiter entscheiden sich bewusst für eine Unterstützung des neuen Geschäftsbereiches und zeigen folglich eine hohe Motivation beim Aufbau der MID-Kompetenzen und der Übernahme neuer Aufgaben.

Einen entscheidenden Einfluss für die Initiierung und Umsetzung von Innovationsprozessen haben Promotoren. Promotoren sind Personen, die entsprechende Aktivitäten durch spezifische Fähigkeiten und überdurchschnittlichen Einsatz in einer innovationsfreudigen Organisation vorantreiben. Promotoren können dabei als Macht-, Fach- oder Prozesspromotoren in verschiedenen Rollen und auf verschiedenen Hierarchieebenen auftreten. [45]

Der Machtpromotor agiert auf der obersten Führungsebene und verfügt über entsprechende finanzielle Mittel und Kapazitäten. Durch seine hierarchische Position kann er die Priorität der Technologie MID im eigenen Unternehmen bestimmen bzw. einzelne Mitarbeiter qualifizieren. Der Fachpromotor ist für die Abwicklung der MID-Projekte zuständig. Er zeichnet sich durch ein hohes Verständnis für die MID-Lösung aus, kennt die tatsächlichen Leistungspotenziale und Grenzen der verschiedenen Herstellverfahren. Im Einzelfall kann ein Fachpromotor auch ein externer Spezialist sein. Die Komplexität der Prozesskette kann durch Fachpromotoren aus verschiedenen Bereichen besser beherrscht werden. In diesem Zusammenhang sind geeignete Prozesspromotoren wichtig, die die Kompetenzen mehrerer Fachpromotoren koordinieren.

In der Technologie MID sind zahlreiche Projekte entscheidend durch das große persönliche Engagement von Promotoren geprägt. Die hohe Komplexität räumlicher elektronischer Schaltungsträger führt zunächst häufig zu Widerständen in den Unternehmen. Den Promotoren kommt insbesondere dann eine entscheidende Rolle zu, wenn in der Vergangenheit MID-Projekte aufgrund technischer oder wirtschaftlicher Gründe gescheitert sind. Die positive Weiterentwicklung der Technologie wird aufgrund der negativen Erlebnisse nur noch von einzelnen Personen wahrgenommen, muss bei der Initiierung neuer mechatronischer Produkte aber zwingend berücksichtigt werden.

6.3 Schlüsselfaktoren für erfolgreiche MID-Projekte

Zur Realisierung erfolgreicher Serienapplikationen in der Technologie MID ist es neben einer entsprechenden Struktur und Strategie entscheidend, die Schlüsselfaktoren in der Entwicklungsphase frühzeitig zu beachten. Aus diesem Grund erfolgte im Rahmen der MID-Studie 2011 die Identifizierung der wesentlichen Schlüsselfaktoren [50]. Diese wurden in Zusammenarbeit mit den Technologieführern, basierend auf deren Erfahrungen und durch die Analyse erfolgreicher sowie gescheiterter Projekte, zusammengestellt. Im Wesentlichen konnten die vier Faktoren Komplexität der Prozesskette, korrekte Kostenabschätzung, MID-gerechtes Design und Risikobereitschaft identifiziert werden.

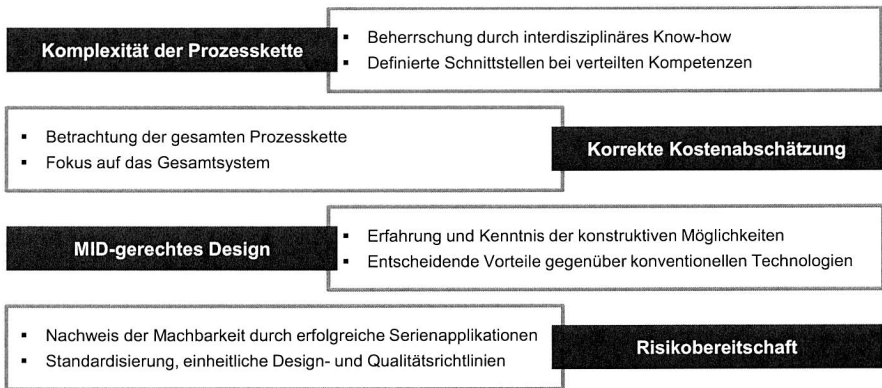


Abbildung 96: Schlüsselfaktoren zur Realisierung erfolgreicher Projekte in der Technologie MID

Komplexität der Prozesskette

Das erforderliche interdisziplinäre Know-how ist in vielen Unternehmen nicht ausreichend vorhanden bzw. wird nicht erfolgreich in den einzelnen Projekten zusammengeführt. Aufgrund der verteilten Kompetenzen sind oft mehrere Unternehmen mit nicht definierten Schnittstellen in einzelne MID-Projekte eingebunden.

Korrekte Kostenabschätzung

In vielen Fällen werden die Kosten im Vorfeld des Projekts nicht richtig abgeschätzt. Die Technologie MID wird fälschlicherweise als Ursache einer Kostenerhöhung identifiziert. Eine korrekte Kostenkalkulation setzt die Betrachtung der gesamten Prozesskette respektive des Gesamtsystems voraus. Hierbei müssen alle Prozessschritte mit Spritzguss, Strukturierung und Metallisierung sowie der Aufbau- und Verbindungstechnik berücksichtigt werden. Bei Betrachtung des Gesamtsystems können nachfolgende

Prozesse vereinfacht bzw. eliminiert und dadurch der Montageaufwand und die Fertigungskomplexität reduziert werden.

MID-gerechtes Design und MID-spezifische Anwendung

Viele Unternehmen erkennen das Potenzial der Technologie und generieren entsprechende Produktideen. Dabei fehlt für eine korrekte Einschätzung, welche konstruktiven Lösungen mit MID realisierbar sind und welches Herstellungsverfahren im Einzelfall auszuwählen ist, aber häufig die notwendige Erfahrung. Entscheidend ist, dass die Anwendung mit der Technologie MID realisierbar ist und gegenüber konventionellen Technologien klare technische Vorteile bietet.

Risikobereitschaft

Gründe für eine geringe Risikobereitschaft sind u. a. fehlende Nachweise der Langzeit-zuverlässigkeit oder MID-spezifische Design- und Qualitätsrichtlinien. Ein Faktor, der zunehmend die Risikobereitschaft einzelner Unternehmen erhöht, ist die steigende Anzahl an Referenzprojekten bzw. erfolgreiche Serienapplikationen in Massenproduktion. Allgemein zeigt die Verbreitung der Laseranlagen die Zurückhaltung der deutschen Industrie gegenüber asiatischen Unternehmern, wenngleich Antennenapplikationen nicht direkt vergleichbar mit komplexen, bestückten MID sind. [50]

7 Zusammenfassung

Die hohe Innovationsdynamik, verbunden mit einer stetigen Zunahme elektronischer Systeme in neuen Anwendungsbereichen und Einsatzorten, erfordert immer kürzer werdende Entwicklungs- und Produktionszyklen. Für die Technologie MID ergeben sich in diesem Zusammenhang grundlegende Herausforderungen hinsichtlich Miniaturisierung, Funktionsintegration, Zuverlässigkeit und Entwicklungszeit. Wesentliche Aspekte wurden im Rahmen dieser Arbeit fokussiert, erforscht und analysiert. Schwerpunkte waren die Entwicklung robuster MID-Systeme für den Einsatz unter extremen Umweltbedingungen, die Zuverlässigkeit mikromechatronischer Systeme, das Rapid Prototyping und Manufacturing sowie die Betrachtung der Chancen und Herausforderungen der Technologie im Innovationsumfeld der Unternehmen.

Die Ergebnisse dieser Arbeit sollen einen Beitrag zur Erweiterung der Einsatzmöglichkeiten von MID in Bereichen mit hoher Umweltbelastung liefern. Das Einhausen der Baugruppen im Montagespritzguss hat sich dabei als eine sehr gute Alternative zu den aus der Elektronikproduktion bekannten Technologien Vergießen und Lackieren erwiesen. Durch eine umfassende Qualifizierung des Fertigungsablaufs können die Schaltungsträger mit einer Ausbeute von bis zu 100 % hergestellt werden. Die Zuverlässigkeitstests zeigen, dass bei entsprechender Materialauswahl sowie Bauelement- und Faserorientierung der Überspritzkomponente bei thermischer Belastung ($-40\text{ °C}/+125\text{ °C}$ und $-40\text{ °C}/+150\text{ °C}$) Ausfallraten von 0 % erreicht werden können. Ideal ist hierbei eine parallele Orientierung der Bauelemente zu der ersten und zweiten Spritzgusskomponente. Weiterhin haben sich übereinstimmende thermische Ausdehnungskoeffizienten der beiden Kunststoffkomponenten und die Überspritzdicke als entscheidende Einflussfaktoren gezeigt. Weitere Optimierungspotenziale ergeben sich durch eine umfassende Betrachtung der identifizierten Ausfallursachen.

Bedingt durch die Möglichkeit zur Realisierung feiner Anschlussstrukturen auf Substratseite resultiert der verstärkte Einsatz von Silizium-Chips auch in der Technologie MID. Gegenstand der Untersuchungen war daher die experimentelle Betrachtung unterschiedlicher Drahtbond- und Flip-Chip-Aufbauten durch die Erfassung der im Verbund auftretenden mechanischen Spannungen bei thermischer Belastung. Die niedrigsten Spannungen werden bei den Aufbauten in Drahtbondtechnologie induziert. Die Spannungswerte der Flip-Chip-Aufbauten (Löten, Kleben mit isotrop und nicht leitenden Klebstoffen) sind vergleichbar, da diese maßgeblich durch die spezifischen Eigenschaften des starren Substrates beeinflusst werden. Bei LCP sind die Spannungen im Chip deutlich geringer als bei PET+PBT. Bei FR4 wird im Gegensatz zu den MID-Substraten eine niedrigere Spannung gemessen. Eine Reduzierung der Spannungen ist insbesondere durch einen kleinen thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Substratwerkstoffe und durch eine Auslegung des Chipdesigns in Fließrichtung möglich. Die experimentell

ermittelten Werte zeigen mit der Finite-Elemente-Analyse eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse. Charakteristische Materialeigenschaften (Anisotropie, Glasübergangstemperatur) können sehr gut abgebildet werden. Ergänzende Lebensdauertests (Temperaturschock $-40\text{ }^{\circ}\text{C}/+150\text{ }^{\circ}\text{C}$) bestätigen, dass die Technologie MID die Zuverlässigkeitsanforderungen, auch im Vergleich mit FR4, erfüllt.

Ein weiterer Fokus dieser Arbeit war die Realisierung von 3D-MID-Prototypen mittels Stereolithografie und Aerosol-Jet. Die geometrischen Eigenschaften der Leiterbahnen werden vor allem durch die Benetzungseigenschaft des Substrates und der Tinte bestimmt. Mit geeigneten Substrat-Tinten-Kombinationen können die im CAD-Layout vorgegebenen Strukturgrößen sehr gut abgebildet werden. Die Haftfestigkeit der gedruckten Strukturen wird stark durch die Oberflächenbeschaffenheit der Substrate beeinflusst. Bei sehr geringer Oberflächenrauheit ist die Haftfestigkeit am geringsten, kann aber durch Plasmabehandlung verbessert werden. Die elektrische Charakterisierung zeigt, dass die Aushärtezeit einen entscheidenden Einfluss auf den Widerstand der Leiterbahn hat. Es konnte eine spezifische Leitfähigkeit bis zu $4,96\text{ m}/\Omega\text{mm}^2$ bei Silberstrukturen und $22\text{ m}/\Omega\text{mm}^2$ für die chemisch abgeschiedenen Kupferleiterbahnen ermittelt werden. Die Zuverlässigkeitsuntersuchungen haben für die gedruckten Strukturen und für die Verbindungstechnik zu guten Ergebnissen geführt. Das Drucken auf dreidimensionalen Bauteilen über Schrägen und Rundungen ist mit der Aerosol-Jet-Technologie möglich. Die geometrische Freiheit wird nur durch den Shutter eingeschränkt.

Die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen in Industrienationen wird mehr und mehr durch die Fähigkeit zur Entwicklung und Beherrschung technischer Innovationen bestimmt. Zum Abschluss der Arbeit wurde daher, basierend auf einer Umwelt- und Unternehmensanalyse, ein Konzept zur erfolgreichen Einführung der Technologie MID im Unternehmen vorgestellt. Für die weitere Technologieförderung sind neben den externen Faktoren, die kaum beeinflusst werden können, unter anderem das Corporate Venturing, Lead User, Referenzprojekte und eine technologieorientierte Netzwerkbildung mögliche Lösungsansätze. Als Schlüsselfaktoren für die erfolgreiche Umsetzung von MID-Projekten wurden die Beherrschung der Komplexität der Prozesskette, eine korrekte Kostenabschätzung, ein MID-gerechtes Design sowie eine gewisse Risikobereitschaft abgeleitet.

Im Rahmen der durchgeführten Forschungsarbeiten konnten neue Erkenntnisse zu räumlichen spritzgegossenen Schaltungsträgern erzielt werden. Durch eine konsequente Integration der vorgestellten Ergebnisse werden die Einsatzmöglichkeiten der Technologie MID in miniaturisierten Systemen und bei hohen Umweltbelastungen deutlich gesteigert. Insbesondere bei Betrachtung der globalen Marktentwicklung wird für den Fertigungsstandort Deutschland durch eine erfolgreiche Überführung der wissenschaftlichen Erkenntnisse in die Entwicklung und Fertigung ein erheblicher Wettbewerbsvorteil entstehen.

Der technologische Fortschritt im Bereich MID ist trotz der hohen Dynamik der vergangenen Jahre weiter zu forcieren. In weiterführenden Forschungsarbeiten können die Aspekte der in dieser Arbeit betrachteten Teilgebiete sinnvoll erweitert werden. Im Fokus sollten dabei die Qualifizierung der Technologie MID für neue Einsatzbereiche stehen. Dies kann beispielsweise durch eine Reduzierung der Strukturgrößen für mikro-mechatronische Systeme, die verstärkte Qualifizierung produktiver Drucktechnologien zur additiven Leiterbilderzeugung, die Herstellung thermisch leitfähiger Werkstoffe für LED-Applikationen, die Erhöhung der Stromtragfähigkeit und angepasste Verbindungstechniken für den Bereich Leistungselektronik oder die Steigerung der Zuverlässigkeit durch die Qualifizierung duroplastischer Materialien für den LDS-Prozess erfolgen.

8 Summary

The high pace of innovation, combined with a steady increase in electronic systems with new application areas demands for shorter development and production cycles. In this context, basic challenges arise in terms of miniaturization, functional integration, reliability and development time for the MID technology. The specified aspects were researched and analyzed in this work. Main focus was the development of robust MID systems for the use under extreme environmental conditions, reliable micro-mechatronic systems, rapid prototyping and manufacturing as well as considering the opportunities and challenges of the technology in the innovative environment of the industries.

The results of this study provide a significant contribution to expand the applications of MID in areas with high environmental impact. Housing of the modules in the injection molding process has proven to be a very good alternative to potting and coating that are well-known manufacturing technologies in standard electronics production. Through a comprehensive qualification of the manufacturing process, the devices can be produced with a yield of up to 100 %. The reliability tests show that with an appropriate choice of materials as well as component and fiber orientation, failure rates of 0 % can be achieved under thermal stress ($-40\text{ }^{\circ}\text{C}/+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $-40\text{ }^{\circ}\text{C}/+150\text{ }^{\circ}\text{C}$). Mainly, the orientation of the components should be parallel to the first and second injection molding component. Furthermore, matching coefficients of thermal expansion of the two polymer components and the thickness of the overmolding component are significant influencing factors. Further potential is derived by a comprehensive analysis of the identified causes of failure.

Due to the possibility of realizing fine electrical structures on the substrate, results an increased use of silicon-chips in the MID technology. Therefore, subject of the investigation was the experimental examination of different wire bonding and flip-chip assemblies through recording of mechanical stresses that occur during thermal load. The lowest stresses are induced in wire bonding assemblies. The stress values of the flip-chip modules (soldering, bonding with isotropic and non-conductive adhesives) are comparable, because they are influenced mainly by the specific properties of the rigid substrate. LCP induced significantly lower stresses in the chip than PET+PBT. A lower mechanical stress in the chip is measured for FR4 in contrast to the MID substrates. Particularly, a reduction of the induced stresses is possible by the use of substrate materials with low coefficients of thermal expansions and by designing of the chip layout in flow direction. The experimentally determined values show a good agreement with the results of the finite element analysis. Characteristic material properties (anisotropy, glass transition temperature) can be represented in the model very well. Additional du-

rability tests (thermal shock $-40\text{ }^{\circ}\text{C}/+150\text{ }^{\circ}\text{C}$) confirm that the technology MID meets the reliability requirements, even in comparison with FR4.

Another focus of this work was the realization of 3D-MID prototypes using Stereolithography and Aerosol jet. The geometrical properties of the conductor tracks are primarily determined by the wetting property of the substrate and the ink. With suitable substrate-ink combinations, the structures of the CAD-layout can be reproduced in the printing tests very well. The adhesive strength of the printed structures is strongly influenced by the surface characteristics of the substrates. At very low surface roughness, the adhesive strength is at its lowest, but can be improved by plasma treatment. The electrical characterization shows that the curing time has a decisive influence on the resistance of the electrical structures. A specific conductivity of $4.96\text{ }\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ for structures with silver ink and $22\text{ }\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ for chemically deposited copper traces was determined. The reliability studies show good results for the printed structures and for the evaluated connection technology. Printing on three-dimensional substrates with bevels and curves is possible with the Aerosol-jet technology. The geometric freedom is limited only by the shutter.

The industrial competition in developed nations is more and more determined by the ability to develop and control technical innovations. Therefore, based on an environmental and industry analysis, a concept for the successful introduction of the MID technology in companies was presented at the end of the work. For the further development of the technology, corporate venturing, lead users, reference projects and a technology-oriented networking are possible solutions, though external factors can hardly be controlled by an individual company. Main topics for the successful implementation of MID projects are managing the complexity of the process chain, an absolute cost estimation, a MID-oriented design and a certain willingness to take risks.

In the context of the performed research work, new insights into spatial molded interconnect devices could be achieved. With a consequent integration of the presented results, the possible applications of the MID technology in miniaturized systems and for high environmental loads can be increased significantly. Considering the global market development, the area of production in Germany will gain a competitive advantage by the successful transfer of scientific knowledge

9 Abkürzungsverzeichnis

2K	Zwei-Komponenten
3D	Dreidimensional
ACA	Anisotropic Conductive Adhesive
ACC	Adaptive Cruise Control
Ag	Silber
Al	Aluminium
AOI	Automatisches optisches Inspektionssystem
ASIG	Autocatalytic Ag/Immersion Au
Au	Gold
CFU	Capillary-Flow-Underfill
CTE	Coefficient of Thermal Expansion
Cu	Kupfer
DIN	Deutsche Institut für Normung e. V.
DNP	Distance to Neutral Point
DOD	Drop on Demand
ED	Electro deposited
EN-EP-IG	Electroless Ni/Electroless Pd/Immersion Au
EN-IG	Electroless Ni/Immersion Au
EN-IG-EG	Electroless Ni/Immersion Au/Electroless Au
EN-IP-IG	Electroless Ni/Immersion Pd/Immersion Au
FC	Flip-Chip
FDM	Fused Deposition Modeling
FEA	Finite-Elemente-Analyse
FuE	Forschung und Entwicklung
GF	Glasfaser
IC	Integrated Circuit
ICA	Isotropic Conductive Adhesive
IEC	International Electrotechnical Commission
IPC	Association Connecting Electronics Industries, ehemals: Industrial Printed Circuits
IR	Infrarot
ISO	International Organization for Standardization

LCP	Liquid Crystal Polymer
LED	Light Emitting Diode
M	Mineral
MID	Molded Interconnect Devices
MIPTEC	Microscopic Integrated Processing Technology
MM	Modellmaterialien
NCA	Non Conductive Adhesive
NFU	No-Flow-Underfill
Ni	Nickel
OEM	Original Equipment Manufacturer
OSP	Organische Schutz Passivierung (Organic Surface Protection)
PA	Polyamid
PBT	Polybutylenterephthalat
PC	Polycarbonat
PCM	Process Control Modul
PET	Polyethylenterephthalat
PPA	Polyphthalamide
PUR	Polyurethan
PVD	Physical Vapour Deposition
RFID	Radio Frequency Identification
RM	Rapid Manufacturing
RP	Rapid Prototyping
SiP	System in Package
SLS	Selektives Laser Sintern
SM	Substratmetallisierung
SMT	Surface Mount Technology
Sn	Zinn
SoC	System on Chip
SoP	System on Package
TIM	Technologie- und Innovationsmanagement
TST	Temperaturschocktest
UBM	Under Bump Metallisierung
UV	Ultraviolett

10 Literatur

- [1] AMEND, P.; PSCHERER, C.; RECHTENWALD, T.; FRICK, T.; SCHMIDT, M.: *A fast and flexible method for manufacturing 3D molded interconnect devices by the use of a rapid prototyping technology*. In: Proceedings: 6th International Conference on Laser Assisted Net Shape Engineering (LANE 2010), Bayerisches Laserzentrum GmbH, Erlangen, 21.-24. September 2010, S. 561-572.
- [2] ANSORGE, F.; STIGLER, T.; HEUMANN, K.; IFLAND, D.; REICHL, H.: *Herausforderung und Chance: Anwendung generativer Verfahren in Aufbau und Kontaktierung Mikro-Mechatronischer Systeme*. In: Tagungsband: 2. Landshuter Symposium Mikrosystemtechnik, Cluster Mikrosystemtechnik und Hochschule Landshut, Landshut, 24.-25. Februar 2010, S. 403-410.
- [3] BECKER, K.-F.; BRAUN, T.; KOCH, M.; BAUER, J.; BADER, V.; MINGE, C.; KURZ, A.: *Verkapselung von mikroelektronischen Aufbauten: Underfilling, GlobTop, Molding, Coating*. Datei: http://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Fachverbaende/Electronic_Components/SGU/Download-AKHT/IZM-Braun_080221_Verkapselung-GlobTop_Molding_Coating.pdf, Zugriff am 14.12.2011.
- [4] BECKER, K.-F.; BRAUN, T.; NEUMANN, A.; OSTMANN, A.; KOCH, M.; BADER, V.; ASCHENBRENNER, R.; REICHL, H.; JUNG, E.: *Duromer MID Technology for System-in-Package Generation*. In: IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing Volume 28, Number 4 (2005), S. 291-296.
- [5] BEER, D.: *Zuverlässige Qualitätssicherung von MID-Produkten*. In: Produktion von Leiterplatten und Systemen (PLUS) 13. Jahrgang, Nummer 4 (2011), S. 927-931.
- [6] BEINE, H.: *Roadmap of Waferbumping*. In: Productronic 26. Jahrgang, Heft 05 (2006), S. 78-80.
- [7] BIRKICHT, A.: *MID Enables New Mechatronics*. In: Proceedings: 8th International Congress Molded Interconnect Devices, 3-D MID e.V., Fürth, 24.-25. September 2008.
- [8] BIRKICHT, A.; MEYEROVICH, A.: *Außenstromlose Kupfer-Zinn-Abscheidung für die 3D-MID-Technologie*. In: inno 48 – Innovative Technik – Neue Anwendungen 16. Jahrgang, Nummer 48 (2011), S.1-2.
- [9] BONADIMAN, R.; SALAZAR, M. M. P.: *Reliability of Ag Ink Jet Printed Traces on Polyimide Substrate*. In: Proceedings: Electronics Systems Integration Technology Conference (ESTC 2010), Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE), Berlin, 13.-16. September 2010.
- [10] BRAND, A.: *Prozesse und Systeme zur Bestückung räumlicher elektronischer Baugruppen (3D-MID)*. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 1997.
- [11] BRAUN, T.; BECKER, K.-F.; BÖTTCHER, L.; BAUER, J.; THOMAS, T.; KOCH, M.; KAHLE, R.; OSTMANN, A.; ASCHENBRENNER, R.; REICHL, H.; BRÜNDEL, M.; HAAG, J. F.; SCHOLZ, U.: *Large Area Embedding for Heterogeneous System Integration*. In: Proceedings: 60th Electronic Components and Technology Conference (ECTC

- 2010), Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE), Las Vegas (USA), 01.-04. Juni 2010, S. 550-556.
- [12] BROCKA, Z.: *Werkstoff- und Einsatzpotential strahlenvernetzter Thermoplaste*. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2008.
 - [13] BROSE, A.; LENEKE, T.; HIRSCH, S.; SCHMIDT, B.: *Aerosol Deposition of Catalytic Ink to Fabricate Fine Pitch Metallizations for Moulded Interconnect Devices (MID)*. In: Proceedings: Electronics Systems Integration Technology Conference (ESTC 2010), Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE), Berlin, 13.-16. September 2010.
 - [14] Buckmüller, P.; Richter, H.: *Untersuchungen zur MID-Kontaktierung mit Rundkontaktstiften*. In: Tagungsband: Innovative Anwendungen der MID-Technik, Hahn-Schickard-Gesellschaft Institut für Mikroaufbautechnik (HSG-IMAT), Stuttgart, 07. Oktober 2009.
 - [15] CHAI, K.; WU, L.: *The Underfill Processing Technologies for Flip Chip Packaging*. In: Proceedings of 1st International IEEE Conference on Polymers and Adhesives in Microelectronics and Photonics (Polytronic 2001), Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE), Potsdam/Brandenburg, 21.-24. Oktober 2001, S. 119-123.
 - [16] CHEN, L.; CRNIC, M.; LAI, Z.; LIU, J.: *Process Development and Adhesion Behavior of Electroless Copper on Liquid Crystal Polymer (LCP) for Electronic Packaging Application*. In: IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing Volume 25, Number 4 (2002), S. 273-278.
 - [17] CORSTEN, H.; GÖSSINGER, R.; SCHNEIDER, H.: *Grundlagen des Innovationsmanagements*. München: Verlag Franz Vahlen, 2006.
 - [18] CÜCÜK, H.: *Reinigung von MID-Baugruppen*. Technischer Bericht, ZESTRON Europe, 06.09.2011.
 - [19] DIETEL, C.: *Funktionale Schaltungsträger mittels Rapid Prototyping (RP) für MID-Anwendungen*. In: Produktion von Leiterplatten und Systemen (PLUS) 09. Jahrgang, Nummer 10 (2007), S. 1964-1966.
 - [20] DIN EN 582:1993: Thermisches Spritzen; Ermittlung der Haftzugfestigkeit. DIN – Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, 1993.
 - [21] DIN EN 60068-2-14:2009: Umgebungseinflüsse – Teil 2-14: Prüfungen – Prüfung N: Prüfverfahren Temperaturwechsel (IEC 60068-2-14:2009). DIN – Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, 2009.
 - [22] DIN EN 60068-2-31:2008: Umgebungseinflüsse – Teil 2-31: Prüfverfahren – Prüfung Ec: Schocks durch raue Handhabung, vornehmlich für Geräte (IEC 60068-2-31:2008). DIN – Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, 2008.
 - [23] DIN EN 60068-2-67:1996: Umweltprüfungen – Teil 2-67: Prüfungen – Prüfung cy: Feuchte Wärme, konstant, beschleunigte Prüfung, vorzugsweise für Bauelemente (IEC 60068-2-67:1995). DIN – Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, 1996.

- [24] *DIN EN 60352-5:2008: Lötfreie Verbindungen – Teil 5: Einpressverbindungen – Allgemeine Anforderungen, Prüfverfahren und Anwendungshinweise* (IEC 60352-5:2008). DIN – Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, 2008.
- [25] *DIN EN 60529:1991: Schutzarten durch Gehäuse (IP-Code)* (IEC 60529:1989 + A1:1999). DIN – Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, 1991.
- [26] *DIN EN ISO 2409:2010: Beschichtungsstoffe – Gitterschnittprüfung* (ISO/DIS 2409:2010); Deutsche Fassung prEN ISO 2409:2010. DIN – Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, 2010.
- [27] DOHLE, R., HÄRTER, S., GOßLER, J., FRANKE, J.: *Accelerated Life Tests of Flip-Chips with Solder Bumps Down to 30 µm Diameter*. In: Proceedings: 44th International Symposium on Microelectronics (IMAPS 2011), International Microelectronics and Packaging Society (IMAPS), Long Beach (USA), 9.-13. Oktober 2011.
- [28] DRESSLER, M.: *Reliability Study of Stud Bump Bonding Flip Chip Assemblies on Molded Interconnect Devices*. Dissertation, Technische Universität Berlin, 2010.
- [29] DRESSLER, M.; WUNDERLE, B.; BECKER, K.-F.; REICHL, H.: *Reliability Study of the Stud Bump Bonding Flip Chip Technology on Molded Interconnect Devices*. In: Proceedings: Electronics Systems Integration Technology Conference (ESTC 2010), Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE), Berlin, 13.-16. September 2010.
- [30] DRUMMER, D.; RIETZEL, D.; KÜHNLEIN, F.: *Additive Fertigung – vom Prototyp zur Serie*. In: Rietzel, D.; Kühnlein, F.; Drummer, D. (Hrsg.): *Fachtagung Additive Fertigung - vom Prototyp zur Serie*. Erlangen, 2009, S. 1-15.
- [31] DRUMMER, D.; SCHMACHTENBERG, E.; HÜLDER, G.; MEISTER, S.: *MK2 – A novel assembly injection molding process for the combination of functional metal surfaces with polymer structures*. In: *Journal of Materials Processing Technology* Volume 210, Issue 14 (2010), S. 1852-1857.
- [32] EBERHARDT, W.; WESER, S.; KÜCK, H.: *Von der Deko in die Industrie: Metallisierung von MID mit nasschemischen Verfahren*. In: *Elektronik – Sonderausgabe Räumliche Elektronische Schaltungsträger*, 2011, S. 24-27.
- [33] EHRENSTEIN, G. W. (Hrsg.): *Handbuch Kunststoff-Verbindungstechnik*. München Wien: Carl Hanser Verlag, 2004.
- [34] EHRENSTEIN, G. W. (Hrsg.): *Mit Kunststoffen konstruieren – Eine Einführung*. 3. überarbeitete Auflage. München Wien: Carl Hanser Verlag, 2007.
- [35] EHRENSTEIN, G. W. (Hrsg.): *Polymer-Werkstoffe – Struktur, Eigenschaft, Anwendung*. 2. völlig überarbeitete Auflage. München Wien: Carl Hanser Verlag, 1999.
- [36] EIGLER, H.: *Die Zuverlässigkeit von Elektronik- und Mikrosystemen und ihr Zusammenhang mit Physik, Chemie und Metallkunde*. Renningen: expert Verlag, 2003.
- [37] EISENBARTH, M.: *Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und Verbindungstechnik für mechatronische Baugruppen*. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2002.

- [38] ENDRES, B.: *Funktionale Metallschichten für MID*. In: Tagungsband: Innovative Anwendungen der MID-Technik, Hahn-Schickard-Gesellschaft Institut für Mikroaufbautechnik (HSG-IMAT), Stuttgart, 07. Oktober 2009.
- [39] EVERSHEIM, W. (Hrsg.): *Innovationsmanagement für technische Produkte*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2003.
- [40] FELDMANN, K.; ALVAREZ, C.; ZHUO, Y.: *Horizontal and Vertical Integration of Product Data for the Design of Molded Interconnect Devices*. In: Proceedings: 5th International Conference on Digital Enterprise Technology, Bath (United Kingdom), 19.-21. September 2007.
- [41] FELDMANN, K.; FRANKE, J.; GOTH, C.: *Advanced Mechatronic Systems using MID (Molded Interconnect Devices) and FPC (Flexible Printed Circuits)*. In: Proceedings: 10th International Conference on Automation Technology (Automation 2009), Institute of Manufacturing Engineering, National Cheng Kung University, Tainan (Taiwan), 27.-29. Juni 2009, S. 7-12.
- [42] FELDMANN, K.; GOTH, C.; KUNZE, A.: *Interdisziplinäre Zusammenarbeit zur spezifischen Förderung der MID-Technologie*. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF) 102. Jahrgang, Heft 9 (2007), S. 558-562.
- [43] FELDMANN, K.; GOTH, C.; SCHÜßLER, F.: *Prospects for Micromechatronic Systems*. In: Kunststoffe international Volume 98. Number 6 (2008), S.70-73.
- [44] FELDMANN, K.; GOTH, C.; SCHÜßLER, F.; CRAIOVAN, D.: *Innovative mechatronische Lösungskonzepte zur Herstellung räumlicher elektronischer Schaltungsträger (MID)*. In: Gausemeier, J.; Rammig, F.; Schäfer, W.; Trächtler, A. (Hrsg.): Entwurf mechatronischer Systeme – 6. Paderborner Workshop. Paderborn: W.V. Westfalia Druck GmbH Verlag, 2009, S. 111-124.
- [45] FOLKERTS, L.: *Promotoren in Innovationsprozessen – Empirische Untersuchung zur personellen Dynamik*. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag, 2001.
- [46] FORSCHUNGSVEREINIGUNG RÄUMLICHE ELEKTRONISCHE BAUGRUPPEN 3-D MID e.V. (Hrsg.): *3D-MID Technologie: Räumliche elektronische Baugruppen; Herstellungsverfahren, Gebrauchsanforderungen, Materialkennwerte*. München: Carl Hanser Verlag, 2004.
- [47] FRANK, E. U.: *Röntgeninspektion in der Elektronik – Umstellung auf bleifreie Lösungen*. In: Elektronik Produktion und Prüftechnik (EPP) 29. Jahrgang, Nummer 6 (2004), S. 84-86.
- [48] FRANKE, J.: *Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3D-MID)*. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 1995.
- [49] FRANKE, J.; FELDMANN, K.; GOTH, C.: *Strategische Wettbewerbsvorteile durch effizientes Technologie- und Innovationsmanagement erzielen – Beispiel MID-Technologie*. In: Gausemeier, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung – 5. Symposium. Paderborn: Hans Gieselmann Verlag. 2009, S. 297-314.
- [50] FRANKE, J.; GAUSEMEIER, J.; GOTH, C.; DUMITRESCU, R.: *MID-Studie 2011 – Markt- und Technologieanalyse*. Eine Studie im Auftrag von Forschungsvereinigung Räumliche Elektronische Baugruppen 3-D MID e.V. (Hrsg.), Erlangen, 2011.

- [51] FRANKE, J.; GOTH, C.; FISCHER, C.; PFEFFER, M.: *Effiziente rechnergestützte Produktentwicklung für räumliche elektronische Baugruppen (3D-MID)*. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF) 104. Jahrgang, Heft 11 (2009), S. 925-930.
- [52] FRANKE, J.; HÄRTER, S.: *Transition of Molded Interconnect to Mechatronic Integrated Devices*. In: Proceedings: 9th International Congress Molded Interconnect Devices, 3-D MID e.V., Fürth, 29.-30. September 2010.
- [53] FRIEDLI, T.: *Technologiemanagement – Modelle zur Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit*. Habilitationsschrift, Universität St. Gallen, 2004.
- [54] FULLER, S. B.; WILHELM, E. J.; JACOBSON, J. M.: *Ink-Jet Printed Nanoparticle Microelectromechanical Systems*. In: IEEE/ASME Journal of Microelectromechanical Systems (JMEMS) Volume 31, Number 1 (2011), S. 54-60.
- [55] GAUSEMEIER, J.; BINGER, V.; PEITZ, T.: *Chancen und Grenzen für den Einsatz der Technologie MID: Markt- und Technologieanalyse*. Eine Studie im Auftrag von Forschungsvereinigung Räumliche Elektronische Baugruppen 3-D MID e.V. (Hrsg.), Paderborn, 2003.
- [56] GAUSEMEIER, J.; EBBESMEYER, P.; KALLMEYER, F.: *Produktinnovation – Strategische Planung und Entwicklung der Produkte von morgen*. München Wien: Carl Hanser Verlag, 2001.
- [57] GAUSEMEIER, J.; FELDMANN, K.: *Integrative Entwicklung räumlicher elektronischer Baugruppen*. München Wien: Carl Hanser Verlag, 2006.
- [58] GAUSEMEIER, J.; GROTE, A.-C.; LEHNER, M.; REYMANN, F.: *Innovationsgeschehen in Deutschland – Bestandsaufnahme und Analyse*. Eine Studie im Auftrag von acatech – Deutsche Akademie für Technikwissenschaften (Hrsg.), München, 2010.
- [59] GAUSEMEIER, J.; PEITZ, T.: *MID-Studie 2006: MID-Markt – Deutschland Analyse von MID-Projekten*. Eine Studie im Auftrag von Forschungsvereinigung Räumliche Elektronische Baugruppen 3-D MID e.V. (Hrsg.), Paderborn, 2006.
- [60] GAUSEMEIER, J.; PLASS, C.; WENZELMANN, C.: *Zukunftsorientierte Unternehmensgestaltung – Strategien, Geschäftsprozesse und IT-Systeme für die Produktion von morgen*. München Wien: Carl Hanser Verlag, 2009.
- [61] GEBHARDT, A.: *Generative Fertigungsverfahren, Rapid Prototyping – Rapid Tooling, Rapid Manufacturing*. 3. Auflage. München Wien: Carl Hanser Verlag, 2007.
- [62] GERPOTT, T. J.: *Strategisches Technologie- und Innovationsmanagement*. 2. Auflage. Stuttgart: Schäffer-Poeschel Verlag, 2005.
- [63] Gerybadze, A.: *Technologie- und Innovationsmanagement: Strategie, Organisation und Implementierung*. München: Verlag Franz Vahlen, 2004.
- [64] GIESER, H. A.; BONFERT, D.; HENGELMANN, H.; WOLF, H.; BOCK, K.; ZOLLMER, V.; WERNER, C.; DOMANN, G.; BAHR, J.; NDIP, I.; CURRAN, B.; OEHLER, F.; MILOSIU, H.: *Rapid Prototyping of Electronic Modules Combining Aerosol Printing and Ink Jet Printing*. In: Proceedings: Electronics Systems Integration Technology Confer-

- ence (ESTC 2010), Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE), Berlin, 13.-16. September 2010.
- [65] GLANTSCHNIG, M.: *Flipchip-Montage: Kleben statt löten*. In: Productronic 23. Jahrgang, Heft 11 (2003), S. 2-3.
- [66] GOTH, C.; FRANKE, J.: *Future Technologies for Mechatronic Products*. In: Kunststoffe international Volume 100, Number 4 (2010), S. 46-51.
- [67] GOTH, C.; FRANKE, J.; FELDMANN, K.: *Molded Interconnect Devices – Progressive Approach for Mechatronic Products and Efficient Manufacturing Processes*. In: Proceedings: Surface Mount Association Pan Pacific Microelectronics Symposium, Surface Mount Association (SMTA), Kauai, Hawaii (USA), 26.-28. Januar 2010.
- [68] GOTH, C.; FRANKE, J.; PUTZO, S.: *Aerosol Jet Printing on Rapid Prototyping Materials for Fine Pitch Electronic Applications*. In: Proceedings: 61st Electronic Components and Technology Conference (ECTC 2011), Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE), Orlando Lake Buena Vista (USA), 31. Mai - 03. Juni 2011, S. 1211-1216.
- [69] GOTH, C.; PUTZO, S.; HOERBER, J.; FRANKE, J.: *Aerosol Jet Printing and Rapid Prototyping Methods for Flexible Structuring of 3D Interconnect Devices*. In: Proceedings: International Conference on Electronics Packaging (ICEP 2011), Nara (Japan), 13.-15. April 2011, S. 324-329.
- [70] GOTH, C.; VETTER, M.; FRANKE, J.; DRUMMER, D.: *Mediendichte Umhausung spritzgegossener, räumlicher elektronischer Schaltungsträger im Montagespritzguss*. In: Produktion von Leiterplatten und Systemen (PLUS) 14. Jahrgang, Nummer 2 (2012), S. 376-385.
- [71] GRÖZINGER, T.; SCHOBER, M.; KÜCK, H.: *Simulationsgestützte Zuverlässigkeitsanalysen von MID-Baugruppen unter Temperaturbelastung*. ZVEI Expertentreffen 2011: Stressarme MST Packages – Arten von Packages in Anwendungen, ZVEI – Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V., Frankfurt, 6.12.2011.
- [72] GU, Y.; NAKAMURA, T.: *Interfacial delamination and fatigue life estimation of 3D solder bumps in flip-chip packages*. In: Microelectronics Reliability Volume 44, Issue 3 (2004), S. 471-483.
- [73] HÄUBERMANN, T.: *Simulation des Underfill-Prozesses bei Flip Chip-Anwendungen*. Dissertation, Universität Stuttgart, 2008.
- [74] HEDGES, M.: *3D Aerosol Jet Printing – An Emerging MID Manufacturing Process*. In: Proceedings: 9th International Congress Molded Interconnect Devices, 3-D MID e.V., Fürth, 29.-30. September 2010.
- [75] HEDGES, M.; KARDOS, M.; KING, B.; RENN, M.: *Aerosol-Jet Printing for 3D Interconnects, Flexible Substrates and Embedded Passives*. In: Proceedings: 3rd SMTA International Wafer Level Packaging Congress IWLCF, Surface Mount Technology Association (SMTA), San Jose (USA), 2.-3. November 2006.
- [76] HEHLGANS, J.: *Auf heißer Spur – MID-Technologie im Extremeinsatz*. In: Produktion von Leiterplatten und Systemen (PLUS) 10. Jahrgang, Nummer 5 (2008), S. 1027-1029.

- [77] HEININGER, N.; JOHN, W.; BOßLER, H.-J.: *Manufacturing of Moulded Interconnect Devices from Prototyping to Mass Production with Laser Direct Structuring*. In: Proceedings: 6th International Congress Molded Interconnect Devices, 3-D MID e.V., Erlangen, 22.-23 September 2004, S. 157-176.
- [78] HENKE, T.; EGGERS, T.; KNABE, J.; THIEMANN, R.; NIEMANN, T.: *Three-dimensional Combination Sensor in MID Technology*. In: Proceedings: 7th International Congress Molded Interconnect Devices, 3-D MID e.V., Fürth, 27.-28. September 2006, S. 35-43.
- [79] HÖLL, S.; MAJCHEREK, S.; HIRSCH, S.; SCHMIDT, B.: *Development of a mechanical stress-analysing-tool to characterize packaging processes*. In: Proceedings: Electronics Systems Integration Technology Conference (ESTC 2010), Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE), Berlin, 13.-16. September 2010.
- [80] HÖRBER, J.; GOTH, C.; FRANKE, J.; HEDGES, M.: *Electrical Functionalization of Thermoplastic Materials by Aerosol Jet Printing*. In: Proceedings: 13th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC 2011), Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE), Singapur, 7.-9. Dezember 2011, S. 813-818.
- [81] HUNZIKER, W.: *Chip Assembly on MID (Molded Interconnect Device) - A Path to Chip Modules with Increased Functionality*. HARTING tec.News Ausgabe 13 (2005). Datei: <http://www.harting.de/aktuelles/kundenzeitschrift-tec-news/>, Zugriff am 15.08.2011.
- [82] IMMLE, M.: *Anti-Corrosion 3D-MID*. In: Proceedings: 8th International Congress Molded Interconnect Devices, 3-D MID e.V., Fürth, 24.-25. September 2008.
- [83] ISLAM, M. A.: *Two component micro injection moulding for moulded interconnect devices*. Ph.D. Thesis. Technical University of Denmark, Department of Mechanical Engineering, 2008.
- [84] JABERG, H.; STERN, T.: *Erfolgreiches Innovationsmanagement*. 3. Auflage. Wiesbaden: Dr. Th. Gabler Verlag, 2005.
- [85] JAEGER, R. C.; SUHLING, J. C.; RAMANI, R.; BRADLEY, A. T.; JIANPING X.: *CMOS stress sensors on (100) silicon*. In: IEEE Journal of Solid-State Circuits Volume 35, Number 1 (2000), S. 85-95.
- [86] JILLEK, W.; LESYUK, R.; SCHMITT, E.: *Ink-Jet Printing of Functional Structures for Electronic Devices*. In: Proceedings: 2007 Shanghai Conference on Electronics Plating, Shanghai (China), 20.-22.11.2007.
- [87] JOHN, W.: *3-D MID – Quo Vadis?* In: Tagungsband: Kunststoffe in der Elektronik – Vom innovativen Werkstoff zum multifunktionalen Elektronikbauteil, Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut, Regensburg, 08.-09. Dezember 2008.
- [88] JOHN, W.: *Fertigungsgerechte Konstruktion dreidimensionaler Schaltungsträger*. In: Produktion von Leiterplatten und Systemen (PLUS) 10. Jahrgang, Nummer 6 (2008), S. 1259-1263.
- [89] JOHN, W.: *Neueste Entwicklungen rund um die LDS Technologie*. In: Tagungsband: Innovative Anwendungen der MID-Technik, Hahn-Schickard-Gesellschaft Institut für Mikroaufbautechnik (HSG-IMAT), Stuttgart, 05. Oktober 2011.

- [90] JOHN, W.: *New Possibilities for MID Engineers based on LPKF-LDS ProtoPainting*. In: Proceedings: 9th International Congress Molded Interconnect Devices, 3-D MID e.V., Fürth, 29.-30. September 2010.
- [91] JOO, S.; BALDWIN, D. F.: *Advanced Package Prototyping Using Nano-Particle Silver Printed Interconnects*. In: IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing Volume 33, Number 2 (2010), S. 129-134.
- [92] KAHN, B. E.: *The M3D Aerosol Jet System, an Alternative to Inkjet Printing for Printed Electronics*. In: Organic and Printed Electronics Volume 1, Number 2 (2007), pp.14-17.
- [93] KAISER, I.: *Systematik zur Entwicklung mechatronischer Systeme in der Technologie MID (Molded Interconnect Devices)*. Dissertation, Universität Paderborn, 2009.
- [94] KAMRANI, A. K.; NASR, E. A. (Hrsg.): *Rapid Prototyping – Theory and Practice*. New York: Springer-Verlag, 2006.
- [95] KING, B.; RENN, M.: *Aerosol Jet Direct Write Printing for Mil-Aero Electronic Applications*. Datei: <http://www.lockheedmartin.com/data/assets/ssc/atc/2009-04-09article.pdf>, Zugriff am 02.01.2012.
- [96] KREBS, T.: *MID, Flex or Printed Circuit? Technology Selection Based on Virtual Prototypes*. In: Proceedings: 9th International Congress Molded Interconnect Devices, 3-D MID e.V., Fürth, 29.-30. September 2010.
- [97] KRIEBITZSCH, I.: *3-D MID Technologie in der Automobilelektronik*. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2002.
- [98] KRIMI, S.: *Analyse und Optimierung von Montagesystemen in der Elektronikproduktion*. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2001.
- [99] KÜCK, H.; EBERHARDT, W.: *Multifunktionale 3D MID Packages für die Mikrosystemtechnik*. In: GMM – VDE/VDI-Gesellschaft Mikroelektronik, Mikro- und Feinwerktechnik (Hrsg.): *Potenziale und Trends der Mikro- und Nanotechnik*. Berlin, VDE-Verlag, 2006.
- [100] KURTH, M.: *Reel to Reel Technologie: Neue Wege zur Fertigung innovativer MID Produkte*. In: Tagungsband: Innovative Anwendungen der MID-Technik, Hahn-Schickard-Gesellschaft Institut für Mikroaufbautechnik (HSG-IMAT), Stuttgart, 05. Oktober 2011.
- [101] LEIPE, E.; RÖSENER, B.: *Leistungshalbleiter-Controller in MID-Technik*. Datei: http://www.lpkf.de/_mediafiles/1278-mid-package-fuer-leistungshalbleiterelektronik.pdf, Zugriff am 01.10.2011.
- [102] LENEKE, T.; HIRSCH, S.; SCHMIDT, B.: *A multilayer process for the connection of fine-pitch-devices on molded interconnect devices (MIDs)*. In: Circuit World Volume 35, Issue 2 (2009), S. 23-29.
- [103] LUCHS, R.: *Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT*. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 1998.

- [104] MAJCHEREK, S.; LENEKE, T.; HIRSCH, S.: *A silicon test chip for the thermomechanical analysis of MEMS packagings*. In: Microsystem Technologies Volume 15, Number 1 (2009), Berlin Heidelberg: Springer Verlag, S. 191-200.
- [105] MANGER, O.; SCHWEIGART, H.: *Wie sauber muss es sein? – Normen für die Reinigung von elektronischen Baugruppen*. In: Productronic 27. Jahrgang, Heft 07 (2007), S. 18-21.
- [106] MATZNER, C.: *Konzeption produktspezifischer Lösungen zur Robustheitssteigerung elektronischer Systeme gegen die Einwirkung von Betauung im Automobil*. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2010.
- [107] MAYER, V.; EBERHARDT, W.; WESER, S.; WILLECK, H.; SCHÖBER, M.; FISCHER, A.; KÜCK, H.: *Umspritzen von Si-Nacktchips mit Thermoplast und deren Kontaktierung mit der LPKF-LDS Technik*. In: Tagungsband: 22. Stuttgarter Kunststoff-Kolloquium, Universität Stuttgart – Institut für Kunststofftechnik, Stuttgart/Baden-Württemberg, 16.-17. März 2011.
- [108] MEIER, R.: *Strategien für einen produktorientierten Einsatz räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)*. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2002.
- [109] MELAMIES, I. A.: *Aus einer Hand – Reinigen, Aktivieren und Beschichten mit atmosphärischem Plasma*. In: Galvanotechnik 98. Jahrgang, Nummer 7 (2007), S. 1734-1737.
- [110] MELAMIES, I. A.: *Mit Plasma zur Serienreife*. In: Kunststoffe Jahrgang 101, Nummer 10 (2011), S. 163-165.
- [111] Merkblatt DVS 2811: *Prüfverfahren für Drahtbondverbindungen*. Deutscher Verband für Schweißtechnik e. V., Düsseldorf, 1996.
- [112] MOCK, U.: *Über das Benetzungsverhalten polymermodifizierter Grenzflächen*. Dissertation, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2004.
- [113] MOSER, D.; KRAUSE, J.: *3D-MID – Multifunctional Packages for Sensors in Automotive Applications*. In: Valldorf, J.; Gessner, W.: Advanced Microsystems for Automotive Applications. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2006, S. 369-375.
- [114] N. N.: *3D-Raumsparelektronik/Effiziente Antennenproduktion mit LDS-Technologie*. LPKF Laser & Electronics AG (Hrsg.), Datei: <http://www.lpkf.de/presse/pressemitteilungen/560/130.htm>, Zugriff am 18.11.2011.
- [115] N. N.: *Aerosol Jet Deposition System Manual (9000038)*. Optomec Inc. (Hrsg.), Albuquerque, 2006.
- [116] N. N.: *Bayink formulations*. Bayer Technology Services GmbH (Hrsg.), Leverkusen, 2011.
- [117] N. N.: *CAMPUS® datasheet Elastollan® 1185 A*. Datei: <http://www.campusplastics.com/campus/de/datasheet/Elastollan%C2%AE+1185+A/BASF+Polyurethanes+GmbH/59/65a16011>. Zugriff am 19.04.2012.
- [118] N. N.: *Datenblatt Accura Bluestone™ Werkstoff*. Ausgabe 2007. Datei: http://www.3dsystems.com/products/materials/sla/datasheets.asp#Accura_Bluestone, Zugriff am 11.01.2012.

- [119] N. N.: *Datenblatt CSD-23, 32, & 66 Cabot Fine Particle Silver Ink*. Ausgabe 04/2012. Cabot Printed Electronics Materials (Hrsg.), Albuquerque (USA), 2012.
- [120] N. N.: *Datenblatt Poca[®] DP T 7140 LDS 000000*. Ausgabe 14.10.2011. Datei: http://techcenter.lanxess.com/scp/asiapacific/de/products/datasheet/LANXESS_Poca_DP_T_7140_LDS_000000_ISO_DE.pdf?docId=12449760, Zugriff am 16.11.2011.
- [121] N. N.: *Datenblatt RenShape[™] SL 5530*. Ausgabe 2004. Datei: <http://www.protocom.com>, Zugriff am 08.06.2010.
- [122] N. N.: *Datenblatt Somos NanoForm[™] 15120*. Ausgabe 11/2005. Datei: http://www.dsm.com/en_US/downloads/dsms/PDS15120-Ger.pdf, Zugriff am 11.01.2012.
- [123] N. N.: *Datenblatt Somos[®] NanoTool[™]*. Ausgabe 5/2004. Datei: http://www.dsm.com/en_US/downloads/dsms/nanotool_gr2.pdf, Zugriff am 11.01.2012.
- [124] N. N.: *Datenblatt Ultramid[®] T 4381 LDS sw 23271*. Ausgabe 11/2010. Datei: http://www.plasticsportal.com/contest/UltramidTK4381_ProductDatasheet.pdf, Zugriff am 16.11.2011.
- [125] N. N.: *Datenblatt Ultramid[®] T KR 4350*. BASF SE (Hrsg.), Ausgabe 04/2012.
- [126] N. N.: *Datenblatt Ultramid[®] T KR 4355 G5*. BASF SE (Hrsg.), Ausgabe 04/2012.
- [127] N. N.: *Datenblatt Ultramid[®] T KR 4355 G7*. BASF SE (Hrsg.), Ausgabe 04/2012.
- [128] N. N.: *Datenblatt Vectra[®] E 840i LDS LCP Mineral Reinforced*. Ausgabe 16.11.2011. Datei: <http://tools.ticona.com/tools/mcbasei/product-tools.php?sPolymer=LCP&sProduct=VECTRA>, Zugriff am 16.11.2011.
- [129] N. N.: *Drahtbonden auf MID – Untersuchungen zur Einsetzbarkeit der Ultraschall-Drahtbondtechnik zur Kontaktierung in miniaturisierten MID-Gehäusen für die Mikrosystemtechnik*. Abschlussbericht des AiF-Projektes 12417, 2002.
- [130] N. N.: *Gestaltungsrichtlinie MID-LDS*. HARTING AG Mitronics (Hrsg.), Ausgabe 1.2, Stand 30.09.2009.
- [131] N. N.: *Gestaltungsrichtlinien MID-2K*. HARTING AG Mitronics (Hrsg.), Ausgabe 1.2, Stand 30.09.2009.
- [132] N. N.: *Herstellung funktionaler Prototypen für MID-Anwendungen mittels RP-Verfahren*. Abschlussbericht des AiF-Projektes 15684, Stand 25.08.2010.
- [133] N. N.: *IMDAKT – Innovative Mikrodrehgeber für die Automatisierungs- und Kraftfahrzeugtechnik*. Abschlussbericht des BMBF-Vorhabens V2386, 2006.
- [134] N. N.: *Flip-Chip auf MID – Untersuchungen zur Einsetzbarkeit der Flipchip-Technik für die Kontaktierung von Nacktchips in miniaturisierten MID-Gehäusen in der Mikrosystemtechnik*. Abschlussbericht des AiF-Projektes 13258, 2004.
- [135] N. N.: *Kontaktierung LDS-MID – Untersuchungen zur Verbesserung der Kontaktierung von LDS-MID durch Planarisierung*. Abschlussbericht des AiF-Projektes 15664, 2009.
- [136] N. N.: *LDS-MID Designregeln – Technische Information*. LPKF Laser & Electronics AG (Hrsg.), Version 2.0, Stand 10.11.2010, Garbsen, 2010.

- [137] N. N.: *MicroCat Catalytic Ink Nano – Palladium Ink to Initiate Electroless Plating*. MacDermid Inc. (Hrsg.), Stand 30. September 2008, Waterbury, 2008.
- [138] N. N.: *MicroCat MID Process Cycle*. MacDermid Inc. (Hrsg.), Ausgabe 2010, Waterbury (USA), 2010.
- [139] N. N.: MID-Einhausung – Einhausung von MID-Baugruppen im Montagespritzguss für den Einsatz unter extremen Umweltbedingungen. Abschlussbericht des AiF-Projektes 16591 N, 2012.
- [140] N. N.: *Neuer Markt: LDS-Antennen in Laptops*. LPKF Laser & Electronics AG (Hrsg.), Datei: <http://www.lpkf.de/newsletter/mid/2011/maerz/271.htm>, Zugriff am 18.11.2011.
- [141] N. N.: *The International Technology Roadmap for Electronic Interconnections 2008-2009*. IPC – Association Connecting Electronics Industries, 2009.
- [142] N. N.: ZUMIKROSYS – Zuverlässigkeit mikromechatronischer Systeme mit Chip auf MID und flexiblen Substraten. Abschlussbericht des AiF-Projektes 303 ZBG, 2011.
- [143] NAUNDORF, G.; WISSBROCK, H.: *Leiterbahnstrukturen auf einem nichtleitenden Trägermaterial und Verfahren zu ihrer Herstellung*. Deutsches Patent DE 197 23 734.7, Anmeldetag 06.06.1997, Offenlegungstag: 10.12.1998.
- [144] NAUNDORF, G.; WISSBROCK, H.: *Leiterbahnstrukturen auf einem nichtleitenden Trägermaterial, insbesondere feine Leiterbahnstrukturen und Verfahren zu ihrer Herstellung*. Deutsches Patent DE 197 31 346 A1, Anmeldetag 22.07.1997, Offenlegungstag: 04.03.1999.
- [145] NAUNDORF, G.; WISSBROCK, H.: *Neuartige Wirkprinzipien und Werkstoffe zur Lasergestützten Fertigung elektronischer Schaltungsträger*. In: Produktion von Leiterplatten und Systemen (PLUS) 03. Jahrgang, Nummer 3 (2000), S. 387-390.
- [146] NIEHOFF, K.; SCHREIER-ALT, T.; SCHINDLER-SAEFKOW, F.; ANSORGE, F.; KITTEL, H.: *Thermo-mechanical stress analysis*. In: Proceedings: 17th European Microelectronics and Packaging Conference (EMPC 2009), International Microelectronics and Packaging Society (IMAPS), Rimini (Italien), 15.-18. Juni 2009.
- [147] OBLIERS-HOMMICH, B.; FISCHER, A.; WILLECK, H.; EBERHARDT, W.; KUECK, H.: *Single- and multi-layer conductive patterns fabricated using M3D technology*. In: Proceedings: 4th International Conference on Multi-Material Micro Manufacture (4M 2008), 4M | Multi Material Micro Manufacture Network of Excellence, Cardiff (Irland), 9.-11. September 2008.
- [148] OPPERMAN, M.: *Blick in das Package – Möglichkeiten und Grenzen der zerstörungsfreien Charakterisierung mittels Röntgenmikroskopie*. In: Produktion von Leiterplatten und Systemen (PLUS) 13. Jahrgang, Nummer 7 (2011), S. 1611-1627.
- [149] ORSCHEL, H.: *Vorbehandlungsmethoden zur haftfesten Beschichtung von Kunststoffen*. In: Berichtsband: Fortschritte bei der Kunststoffmetallisierung und Oberflächenbeschichtung von Glas, Keramik und Silizium, 24. Ulmer Gespräch, Neu-Ulm (Donau), 2.-3. Mai 2002, S. 22-30.

- [150] PAPROTH, A.; WOLTER, K.-J.; FRIEDRICH, J.; DELTSCHIEW, R.: *Metal-Polymer Composites for Molded Interconnect Devices (MID)*. In: Proceedings: 55th Electronic Components and Technology Conference (ECTC 2005), Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE), Las Vegas (USA), 31. Mai - 03. Juni 2010, S.1891-1894.
- [151] PEITZ, T.: *Methodik zur Produktoptimierung mechanisch elektronischer Baugruppen durch die Technologie MID (Molded Interconnect Devices)*. Dissertation, Universität Paderborn, 2008.
- [152] PFEFFER, M.; CRAIOVAN, D.; GOTH, C.; FRANKE, J.: *3D Assembly with a Multiple Workpiece Carrier in a SMT Assembly Machine*. In: Proceedings: 9th International Congress Molded Interconnect Devices, 3-D MID e.V., Fürth, 29.-30. September 2010.
- [153] PFEFFER, M.; GOTH, C.; CRAIOVAN, D.; FRANKE, J.: *3D-Assembly of Molded Interconnect Devices with Standard SMD Pick & Place Machines Using an Active Multi Axis Workpiece Carrier*. In: Proceedings: International Symposium on Assembly and Manufacturing (ISAM 2011), Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE), Tampere (Finland), 23.-25. Mai 2011.
- [154] PLOURDE, R.: *Aerosol Jet® (AJ) Direct Write Technology: A Manufacturing Tool for Printed Electronics*. In: Proceedings: Passive Wireless Sensor-Tag Workshop, Houston (USA), 27.-28. Juli 2011.
- [155] PÖHLAU, F.: *Entscheidungsgrundlagen zur Einführung räumlicher spritzgegosener Schaltungsträger (3-D MID)*. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 1998.
- [156] PORTER, M.: *Wettbewerbsvorteile – Spitzenleistung erreichen und behaupten (Competitive Advantage)*. Frankfurt, New York: Campus Verlag, 2000.
- [157] QIAN ZHANG; DASGUPTA, A.; HASWELL, P.: *Viscoplastic constitutive properties and energy-partitioning model of lead-free Sn3.9Ag0.6Cu solder alloy*. In: Proceedings: 53rd Electronic Components and Technology Conference (ECTC 2003), Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE), New Orleans (USA), 27.-30. Mai 2003, S. 1862-1868.
- [158] QUINONES, H.; BABIARZ, A.: *Flip Chip, CSP and WLP Technologies: A Reliability Perspective*. In: Proceedings: 38th IMAPS Nordic Annual Conference, International Microelectronics and Packaging Society (IMAPS), Oslo (Norwegen), 23.-26. September 2001, S. 148-152.
- [159] RANFT, F.: *Optoelektronische Systeme auf Basis wärmeleitfähig modifizierter MIDs*. In: Tagungsband: Innovative Anwendungen der MID-Technik, Hahn-Schickard-Gesellschaft Institut für Mikroaufbautechnik (HSG-IMAT), Stuttgart, 05. Oktober 2011.
- [160] REICHL, H. (Hrsg.): *Direktmontage: Handbuch für die Verarbeitung ungehäuster ICs*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 1998.
- [161] REINHARDT, A.; FRANKE, J.; GOTH, C.: *Reliability of Micromechatronic Systems with Chip on Molded Interconnected Devices and Flexible Substrates*. In: Proceedings: 12th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC 2010), In-

- stitute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE), Singapur, 8.-10. Dezember 2010, S. 79-83.
- [162] REMER, U.: *Innovativer, miniaturisierter 3D MID-Strömungssensor*. In: Tagungsband: : Internationales Forum Mechatronik, Cluster Mechatronik & Automation e.V., Cham, 21.-22. September 2011, S. 61-70.
 - [163] RICHTER, H.; LAPPER, S.; EBERHARDT, W.; KÜCK, H.: *Heiße Technik – Heißprägen – Schneller Fertigungsprozess für MID-Baugruppen*. In: Elektronik – Sonderausgabe Räumliche Elektronische Schaltungsträger, 2011, S. 17-20.
 - [164] Richtlinie VDI 2221: *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1993.
 - [165] Richtlinie VDI 3404: *Generative Fertigungsverfahren-Rapid Technologien (Rapid Prototyping). Grundlagen, Begriffe, Qualitätskenngrößen, Liefervereinbarungen*. VDI-Verlag, Düsseldorf, 2007.
 - [166] ROHDE, H.: *Durchgängige Qualitätssicherung für den LPKF-LDS®-Prozess*. In: Tagungsband: Innovative Anwendungen der MID-Technik, Hahn-Schickard-Gesellschaft Institut für Mikroaufbautechnik (HSG-IMAT), Stuttgart, 10. Oktober 2007.
 - [167] ROHDE, H.: *MID Drucksensor für die Fahrzeugtechnik*. In: Tagungsband: Innovative Anwendungen der MID-Technik, Hahn-Schickard-Gesellschaft Institut für Mikroaufbautechnik (HSG-IMAT), Stuttgart, 05. Oktober 2011.
 - [168] RÖSCH, M.: *Potenziale und Strategien zur Optimierung des Schablonendruckprozesses in der Elektronikproduktion*. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2011.
 - [169] SCHEEL, W. (Hrsg.): *Baugruppenttechnologie der Elektronik – Montage*. 2. Auflage. Berlin: Verlag Technik, Eugen G. Leuze Verlag, 1999.
 - [170] SCHERL, R.: *Klimatische Anforderungen und Prüfungen von elektronischen Baugruppen im Automobilbereich*. In: Reichl, H. (Hrsg.): Systemintegration in der Mikroelektronik – Fertigung elektronischer Baugruppen für die Automobil-elektronik. Nürnberg: VDE Verlag GmbH, 2008, S. 19-32.
 - [171] SCHIMPF, C.: *Optimierung von Zuverlässigkeitsuntersuchungen, Prüfabläufen und Nacharbeitsprozessen in der Elektronikproduktion*. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2009.
 - [172] SCHLÜTER, R.; KICKELHAIN, J.; HÜSKE, M.: *Laserunterstützte volladditive Metallisierung hochtemperaturbeständiger Kunststoffe für 3D-MIDs*. In: Berichtsband: Fortschritte bei der Kunststoffmetallisierung und Oberflächenbeschichtung von Glas, Keramik und Silizium, 24. Ulmer Gespräch, Neu-Ulm (Donau), 2.-3. Mai 2002, S. 81-90.
 - [173] SCHLÜTER, R.; RÖSNER, B.; KICKELHAIN, J.; NAUNDORF, G.: *LPKF-LDS-technology – A Laser Supported Fully Additive Process for Mechatronic Applications*. In: Proceedings: 5th International Congress Molded Interconnect Devices, 3-D MID e.V., Erlangen, 25.-26. September 2002, S. 123-130.

- [174] SCHMID, B.: *Leiterplatte und Leiterbahnen im Spritzguss – 3D-Schaltungsträger im Zwei-Komponenten-Spritzgussverfahren*. In: *Elektronik – Sonderausgabe Räumliche Elektronische Schaltungsträger*, 2011, S. 9-11.
- [175] SCHNEIDER-RAMELOW, M.; WILDE, J.; JANZ, D.: *Physics-of-failure-Modelle für Ausfallmechanismen*. In: Wilde, J.: *Methoden zur Zuverlässigkeitsqualifizierung neuer Technologien in der Aufbau- und Verbindungstechnik – Herausforderungen und Möglichkeiten*. Templin: Dr. Markus A. Detert Verlag, 2006, S. 55-82.
- [176] SCHREIER-ALT, T.: *Fahrtenschreiber – Stress- und Dehnungsmessung in der Mikroelektronik-Produktion*. In: *Productronic* 29. Jahrgang, Heft 10 (2009), S. 50-51.
- [177] SCHREIER-ALT, T.; SCHINDLER-SAEFKOW, F.; WITTLER, O.; KITTEL, H.: *Encapsulation of Systems in Package – Process Characterization and Optimization*. In: *Proceedings: 2nd Electronics Systems Integration Technology Conference (ESTC 2008)*, Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE), London Greenwich (Großbritannien), 01.-04. September 2008.
- [178] SCHUBERT, A.; DUDEK, R.; AUERSWALD, E.; GOLLBARDT, A.; MICHEL, B.; REICHL, H.: *Fatigue life models for SnAgCu and SnPb solder joints evaluated by experiments and simulation*. In: *Proceedings: 53rd Electronic Components and Technology Conference (ECTC 2003)*, Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE), New Orleans (USA), 27.-30. Mai 2003, S. 603-610.
- [179] SCHÜßLER, F.: *Verbindungs- und Systemtechnik für thermisch hochbeanspruchte und miniaturisierte elektronische Baugruppen*. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2010.
- [180] SCHÜßLER, F.; FRANKE, J.; RICHTER, H.; BUCKMÜLLER, P.; SCHOBER, M.; LAPPER, S.; EBERHARDT, W.; GARDOCKI, A.; BROCKA-KRZEMINSKA, Z.; DRUMMER, D.: *Hot-Embossed MID Modules for Enhanced Thermal Requirements*. In: *Kunststoffe international* Volume 99, Number 11 (2009), S. 72-76.
- [181] SCHWEIGART, H.: *Wenn der Lack abgeht! Mindestreinheit der Oberfläche vor der Schutzbeschichtung*. In: *Elektronik Produktion & Prüftechnik (EPP)* 31. Jahrgang, Nummer 10 (2006), S. 30-32.
- [182] SCHWIZER, J.; WAN HO SONG; MAYER, M.; BRAND, O.; BALTES, H.: *Packaging test chip for flip-chip and wire bonding process characterization*. In: *Proceedings: 12th International Conference on Solid State Sensors, Actuators and Microsystems*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Boston (USA), 8.-12. Juni 2003, S. 440-443.
- [183] Siemens AG (Hrsg.): *Pictures of the Future – Die Zeitschrift für Forschung und Innovation*. Ausgabe Frühjahr 2011. Datei: www.siemens.de/pof, Zugriff am 26.09.2011.
- [184] SPECHT, G.; BECKMANN, C.; AMELINGMEYER, J.: *F&E-Management. Kompetenz im Innovationsmanagement*. Stuttgart: Schäffer-Poeschel Verlag, 2002.
- [185] STAMPFER, S.: *Heißprägen auf spritzgegossenen Schaltungsträgern*. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 1999.
- [186] STEINLE, C.; EGGERS, B.; AHLERS, F.: *Change Management: Wandlungsprozesse erfolgreich planen und umsetzen*. Mering: Rainer Hampp Verlag, 2008.

- [187] STREBEL, H. (Hrsg): *Innovations- und Technologiemanagement*. Wien: WUV Universitätsverlag, 2003.
- [188] SÜß-WOLF, R.: *Thermokinetic Process Flamecon® for Large Scale MID*. In: Proceedings: 9th International Congress Molded Interconnect Devices, 3-D MID e.V., Fürth, 29.-30. September 2010.
- [189] SÜß-WOLF, R.: *Wiring the Future: New Materials and Processes Materials in Next Generation Automobile Manufacturing*. In: Proceedings Material Science and Engineering Seminar Series, University of Maryland, Maryland (USA), 13. April 2007.
- [190] THEOPHILE, E.: *The plasmadust process: An innovative process for metal coatings on a wide variety of substrates*. In: Proceedings: 9th International Congress Molded Interconnect Devices, 3-D MID e.V., Fürth, 29.-30. September 2010.
- [191] TIEDERLE, V.; WILDE, J.: *Rahmenbedingungen beim Einsatz im KFZ*. In: Wilde, J.: Methoden zur Zuverlässigkeitsqualifizierung neuer Technologien in der Aufbau- und Verbindungstechnik – Herausforderungen und Möglichkeiten. Templin: Dr. Markus A. Detert Verlag, 2006, S. 3-17.
- [192] TRÖGER, L.: *Niedertemperaturlöten ermöglicht neue Anwendungen für 3D-MID Substrate*. ZVEI Expertentreffen 2011: Stressarme MST Packages – Arten von Packages in Anwendungen, ZVEI – Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V., Frankfurt, 6.12.2011.
- [193] VANDECASTEELE, B.; VANFLETEREN, J.; MANESSIS, D.; OSTMANN, A.; HAGEDORN, H.-W.; WIESE, J.: *Lead-free Flip-Chip: a comparison between lead-free solder and adhesives*. In: Proceedings: 15th European Microelectronics and Packaging Conference (EMPC 2005), International Microelectronics and Packaging Society (IMAPS), Brügge (Belgien), 12.-15. Juni 2005, S. 434-439.
- [194] VETTER, M.; DRUMMER, D.: *Stress im Prozess – Belastung elektronischer Bauelemente im Montage-Spritzguss*. In: Plastverarbeiter 63. Jahrgang, Nummer 4 (2012), S. 62-66.
- [195] VETTER, M.; GOTH, C.; DRUMMER, D.; FRANKE, J.: *Housing of Molded Interconnect Devices (MID) by Assembly Moulding for Applications with high Environmental Impact*. In: Proceedings: 10th International Congress Molded Interconnect Devices, 3-D MID e.V., Fürth, 19.-20. September 2012.
- [196] WARTZACK, S.; WITTMANN, S.; STUPPY, J.; TREMMEL, S.: *Auslegung und Gestaltung additiv gefertigter Bauteile*. In: Rietzel, D.; Kühnlein, F.; Drummer, D. (Hrsg.): Fachtagung Additive Fertigung - vom Prototyp zur Serie. Erlangen: Lehrstuhl für Kunststofftechnik, 2009, S. 139-150.
- [197] WILDE, J.; ZUKOWSKI, E.: *Einsatz der Simulation zur Qualifizierung zuverlässiger Produkte*. In: Wilde, J.: Methoden zur Zuverlässigkeitsqualifizierung neuer Technologien in der Aufbau- und Verbindungstechnik – Herausforderungen und Möglichkeiten. Templin: Dr. Markus A. Detert Verlag, 2006, S. 55-82.
- [198] WILKENING, C.: *Lasersintern als Rapid Prototyping Verfahren – Möglichkeiten und Grenzen*. Dissertation, Technische Universität München, 1997.

- [199] WILLECK, H.: *Aufbau und Charakterisierung eines neuen Messgerätes zur direkten Bestimmung der Haftfestigkeit von strukturierten Metallschichten*. Dissertation, Universität Stuttgart, 2009.
- [200] WIEßBROCK, H.: *Laser-Direkt-Strukturieren von Kunststoffen – Ein neues Verfahren im Spiegel eingeführter MID-Technologien*. In: *Kunststoffe* Jahrgang 92, Nummer 11 (2002), S. 101-105.
- [201] WURZER, A.; REINHARDT, D. F.: *Handbuch der Patentbewertung*. 2. Auflage. Köln, Carl Heymanns Verlag, 2009.
- [202] YAGI, Y.; YOSHIN, M.; HARAZONO, F.: *Flip Chip bonding technology to Molded Interconnect Device*. In: *Proceedings: SPIE – The International Society for Optical Engineering* Volume 5288, Boston, (USA), S. 256-261.
- [203] ZERNA, T.: *Aufbau- und Verbindungstechnik für Elektronikbaugruppen der Höchstintegration*. Templin: Verlag Dr. Markus A. Detert, 2008.
- [204] ZERNA, T.; WOLTER, K.-J.: *Aktueller Forschungs- und Handlungsbedarf zur Produktionstechnik für die Elektronik und Mikroelektronik*. Studie, Technische Universität Dresden, 2009.
- [205] ZHANG, Y.; HANSEN, H. N.; DE GRAVE, A.; TANG, P. T.; NIELSEN, J. S.: *Laser Machined Polymer Surface for Future Plating and Characterization Using Bearing Area Curve Parameters*. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* Volume 55, Issue 5 (2011), S. 573-580.
- [206] ZHANG, Y.; LIU, C.; WHALLEY, D.: *Direct-write techniques for maskless production of microelectronics: A review of current state-of-the-art technologies*. In: *Proceedings: Electronic Packaging Technology & High Density Packaging Conference (ICEPT-HDP 2009)*, Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE), Peking (China), 10.-13. August 2009, S.129-134.
- [207] ZHANG, Z.; WONG, C. P.: *Recent advances in flip-chip underfill: materials, process, and reliability*. In: *IEEE Transactions on Advanced Packaging* Volume 27, Number 3 (2004), S. 515-524.
- [208] ZIMMERMANN, M.: *Aufbau- und Verbindungstechnik auf LDS-MID*. In: *Produktion von Leiterplatten und Systemen (PLUS)* 11. Jahrgang, Nummer 3 (2009), S. 622-632.
- [209] ZIPPMANN, V.: *Montagespritzgießen für die MID-Technologie*. In: *Tagungsband: Fachtagung Montagespritzgießen, Lehrstuhl für Kunststofftechnik, Fürth*, 20.-21. November 2007, S.158-164.

11 Anhang

Anhang A: Schertest nicht überspritzter Schaltungsträger

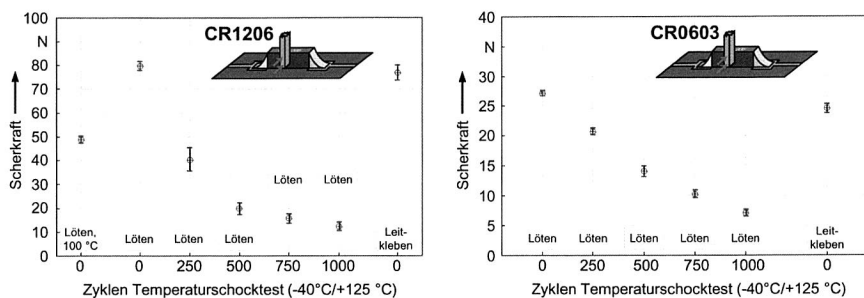


Abbildung A: Scherkräfte mit Mittelwert und Standardabweichung für die Bauelemente CR1206 (links, Löten gemessen bei Raumtemperatur nach 0, 250, 500, 750 und 1.000 Zyklen TST -40 °C/+125 °C und bei 100 °C nach 0 Zyklen sowie Leitkleben) und CR0603 (rechts, Löten gemessen bei Raumtemperatur nach 0, 250, 500, 750 und 1.000 Zyklen TST -40 °C/+125 °C und Leitkleben)

Anhang B: Thermische Belastung im Temperaturschocktest

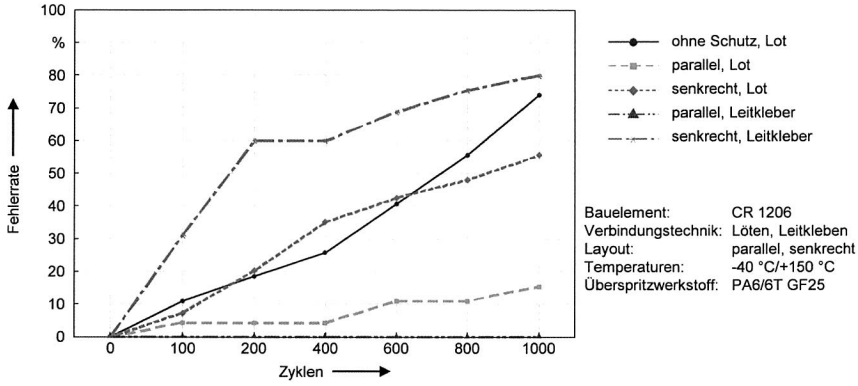


Abbildung B: Ausfallraten gelöteter und leitgeklebter Bauelemente im Vergleich (Temperaturschocktest -40 °C/+150 °C)

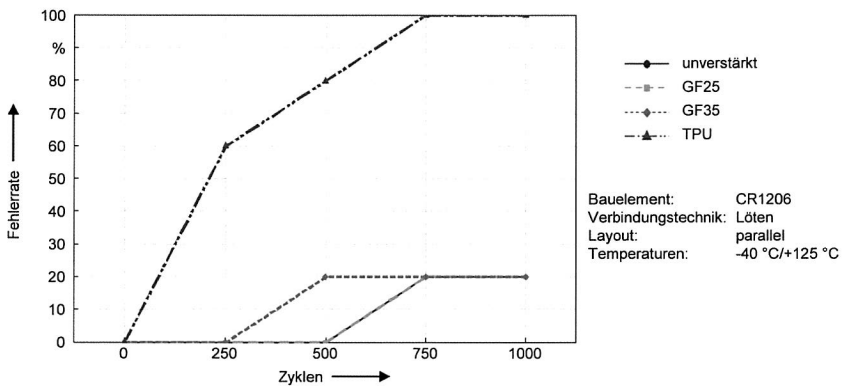


Abbildung C: Ausfallraten der Baugruppen in Abhängigkeit des Überspritzwerkstoffs (Temperaturschocktest -40 °C/+125 °C)

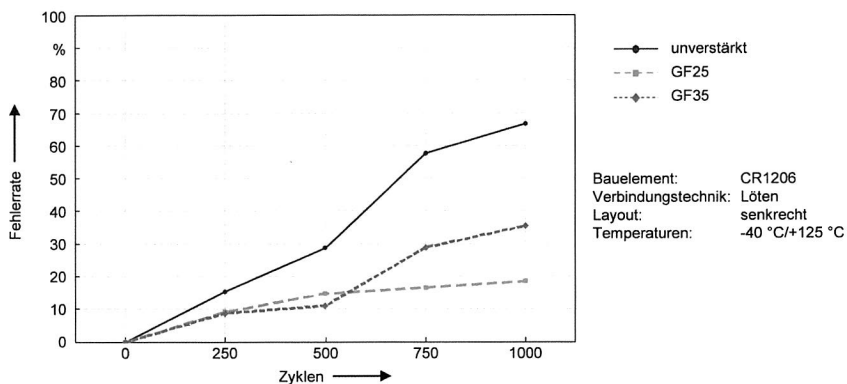


Abbildung D: Ausfallraten der Bauelemente in Abhängigkeit des Überspritzwerkstoffs (Temperaturschocktest -40 °C/+125 °C)

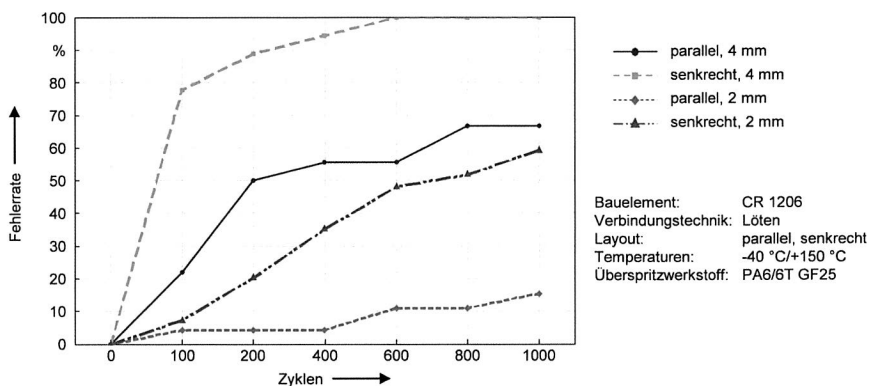


Abbildung E: Ausfallraten der Bauelemente in Abhängigkeit der Überspritzdicke (Temperaturschocktest -40 °C/+150 °C)

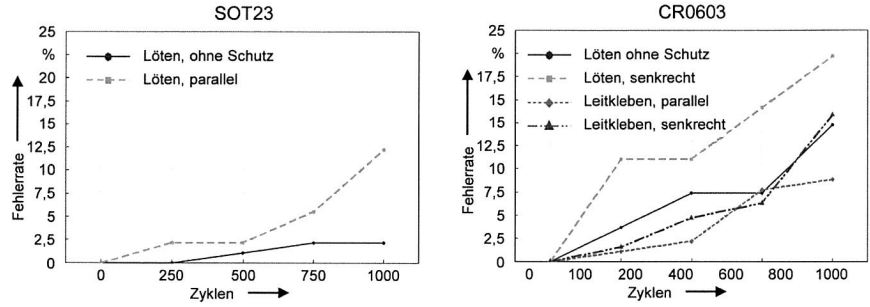


Abbildung F: Ausfallraten für die Bauelemente SOT23 und CR0603 (Temperaturschocktest -40 °C/+125 °C, Überspritzkomponente PA6/6T GF25)

Anhang C: Vergleich Stereolithografie und selektives Lasersintern

Tabelle A Vergleich der Oberflächenrauheit R_A und der Welligkeit W_T zweier gleicher Bauteile, hergestellt mittels Stereolithografie (Schichtstärke: 0,125 mm) und selektivem Lasersintern (Schichtstärke: 0,127 mm) [61]

	R_A in μm	W_T in μm		R_A in μm	W_T in μm
Horizontale Fläche			Vertikale Fläche		
Stereolithografie	6,44	93,2	Stereolithografie	3,13	10,40
Selektives Lasersintern	16,70	147,50	Selektives Lasersintern	43,70	140,00

Reihe Fertigungstechnik - Erlangen

www.mb.uni-erlangen.de/diss

Band 1 - 52
Carl Hanser Verlag, München

ab Band 53
Meisenbach Verlag, Bamberg
45,-- Euro

Band 1: Andreas Hemberger
**Innovationspotentiale in der rechnerintegrierten Produktion
durch wissensbasierte Systeme**
208 Seiten, 107 Bilder. 1988.

Band 2: Detlef Classe
**Beitrag zur Steigerung der Flexibilität automatisierter Montagesysteme
durch Sensorintegration und erweiterte Steuerungskonzepte**
194 Seiten, 70 Bilder. 1988.

Band 3: Friedrich-Wilhelm Nolting
Projektiertung von Montagesystemen
201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tabelle. 1989.

Band 4: Karsten Schlüter
**Nutzungsgradsteigerung von Montagesystemen
durch den Einsatz der Simulationstechnik**
177 Seiten, 97 Bilder. 1989.

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

Band 6: Rudolf Nuss
**Untersuchungen zur Bearbeitungsqualität
im Fertigungssystem Laserstrahlschneiden**
206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tabellen. 1989.

Band 7: Wolfgang Scholz
**Modell zur datenbankgestützten Planung
automatisierter Montageanlagen**
194 Seiten, 89 Bilder. 1989.

Band 8: Hans-Jürgen Wißmeier
**Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhaltens
von Hartmetall-Fließpreßmatrizen**
179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tabellen. 1989.

Band 9: Rainer Eisele
**Konzeption und Wirtschaftlichkeit
von Planungssystemen in der Produktion**
183 Seiten, 86 Bilder. 1990.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

- Band 28: Martin Hoffmann
**Entwicklung einer CAD/CAM-Prozesskette
für die Herstellung von Blechbiegeteilen**
149 Seiten, 89 Bilder. 1992.
- Band 29: Peter Hoffmann
**Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und –schweißen :
Prozessführung und Systemtechnik in der 3D–Laserstrahlbearbeitung
von Blechformteilen**
186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tabellen. 1992.
- Band 30: Olaf Schröder
Flexible Werkstattsteuerung mit objektorientierten Softwarestrukturen
180 Seiten, 84 Bilder. 1992.
- Band 31: Hubert Reinisch
**Planungs- und Steuerungswerkzeuge
zur impliziten Geräteprogrammierung in Roboterzellen**
XI u. 212 Seiten, 112 Bilder. 1992.
- Band 32: Brigitte Bärnreuther
**Ein Beitrag zur Bewertung des Kommunikationsverhaltens
von Automatisierungsgeräten in flexiblen Produktionszellen**
XI u. 179 Seiten, 71 Bilder. 1992.
- Band 33: Joachim Hutfless
**Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik
in der Strahlführung einer CO₂-Hochleistungslaseranlage**
175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tabellen. 1993.
- Band 34: Uwe Günzel
**Entwicklung und Einsatz eines Simulationsverfahrens für operative
und strategische Probleme der Produktionsplanung und –steuerung**
XIV u. 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tabellen. 1993.
- Band 35: Bertram Ehmann
**Operatives Fertigungscontrolling durch Optimierung
auftragsbezogener Bearbeitungsabläufe in der Elektronikfertigung**
XV u. 167 Seiten, 114 Bilder. 1993.
- Band 36: Harald Kolléra
**Entwicklung eines benutzerorientierten Werkstattprogrammiersystems
für das Laserstrahlschneiden**
129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tabelle. 1993.
- Band 37: Stephanie Abels
**Modellierung und Optimierung von Montageanlagen
in einem integrierten Simulationssystem**
188 Seiten, 88 Bilder. 1993.
- Band 38: Robert Schmidt–Hebbel
Laserstrahlbohren durchflußbestimmender Durchgangslöcher
145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tabellen. 1993.
- Band 39: Norbert Lutz
**Oberflächenfeinbearbeitung keramischer Werkstoffe
mit XeCl–Excimerlaserstrahlung**
187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tabellen. 1994.
- Band 40: Konrad Grapp
**Rechnerunterstützung bei Test und Schulung
an Steuerungssoftware von SMD–Bestücklinien**
178 Seiten, 88 Bilder. 1995.
- Band 41: Martin Koch
**Wissensbasierte Unterstützung der Angebotsbearbeitung
in der Investitionsgüterindustrie**
169 Seiten, 68 Bilder. 1995.
- Band 42: Armin Gropp
**Anlagen- und Prozeßdiagnostik
beim Schneiden mit einem gepulsten Nd:YAG–Laser**
160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tabellen. 1995.

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

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

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

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

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

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

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

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

Band 51: Franz-Josef Zeller
Sensorplanung und schnelle Sensorregelung für Industrieroboter
190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tabellen. 1995.

Band 52: Michael Solvie
**Zeitbehandlung und Multimedia-Unterstützung
in Feldkommunikationssystemen**
200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tabellen. 1996.

Band 53: Robert Hopperdietzel
Reengineering in der Elektro- und Elektronikindustrie
180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tabelle. 1996.
ISBN 3-87525-070-2

Band 54: Thomas Rebhan
**Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung mit Excimerlasern –
Systemkomponenten und Verfahrensoptimierungen**
148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tabellen. 1996.
ISBN 3-87525-075-3

Band 55: Henning Hanebuth
Laserstrahlhartlöten mit Zweistrahltechnik
157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tabellen. 1996.
ISBN 3-87525-074-5

Band 56: Uwe Schönherr
**Steuerung und Sensordatenintegration für flexible Fertigungszellen
mit kooperierenden Robotern**
188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tabellen. 1996.
ISBN 3-87525-076-1

Band 57: Stefan Holzer
Berührungslose Formgebung mit Laserstrahlung
162 Seiten, 69 Bilder, 11 Tabellen. 1996.
ISBN 3-87525-079-6

Band 58: Markus Schultze
**Fertigungsqualität beim 3D–Laserstrahlschweißen
von Blechformteilen**
165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-080-X

Band 59: Thomas Krebs
**Integration elektromechanischer CA–Anwendungen
über einem STEP–Produktmodell**
198 Seiten, 58 Bilder, 8 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-081-8

Band 60: Jürgen Sturm
**Prozeßintegrierte Qualitätssicherung
in der Elektronikproduktion**
167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-082-6

Band 61: Andreas Brand
**Prozesse und Systeme zur Bestückung
räumlicher elektronischer Baugruppen (3D-MID)**
182 Seiten, 100 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-087-7

Band 62: Michael Kauf
**Regelung der Laserstrahlleistung und der Fokusparameter
einer CO₂-Hochleistungslaseranlage**
140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-083-4

Band 63: Peter Steinwässer
**Modulares Informationsmanagement
in der integrierten Produkt– und Prozeßplanung**
190 Seiten, 87 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-084-2

Band 64: Georg Liedl
**Integriertes Automatisierungskonzept
für den flexiblen Materialfluß in der Elektronikproduktion**
196 Seiten, 96 Bilder, 3 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-086-9

Band 65: Andreas Otto
Transiente Prozesse beim Laserstrahlschweißen
132 Seiten, 62 Bilder, 1 Tabelle. 1997.
ISBN 3-87525-089-3

Band 66: Wolfgang Blöchl
**Erweiterte Informationsbereitstellung an offenen CNC–Steuerungen
zur Prozeß– und Programmoptimierung**
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**
186 Seiten, 125 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-092-3

Band 68: Frank Backes
Technologieorientierte Bahnplanung für die 3D–Laserstrahlbearbeitung
138 Seiten, 71 Bilder, 2 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-093-1

Band 69: Jürgen Kraus
Laserstrahlumformen von Profilen
137 Seiten, 72 Bilder, 8 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-094-X

Band 70: Norbert Neubauer
Adaptive Strahlführungen für CO₂-Laseranlagen
120 Seiten, 50 Bilder, 3 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-095-8

Band 71: Michael Steber
**Prozeßoptimierter Betrieb flexibler Schraubstationen
in der automatisierten Montage**
168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-096-6

Band 72: Markus Pfestorf
Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen in der Umformtechnik
162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-097-4

Band 73: Volker Franke
**Integrierte Planung und Konstruktion
von Werkzeugen für die Biegebearbeitung**
143 Seiten, 81 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-098-2

Band 74: Herbert Scheller
**Automatisierte Demontagesysteme und recyclinggerechte
Produktgestaltung elektronischer Baugruppen**
184 Seiten, 104 Bilder, 17 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-099-0

Band 75: Arthur Meßner
**Kaltmassivumformung metallischer Kleinstteile
– Werkstoffverhalten, Wirkflächenreibung, Prozeßauslegung**
164 Seiten, 92 Bilder, 14 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-100-8

Band 76: Mathias Glasmacher
Prozeß- und Systemtechnik zum Laserstrahl-Mikroschweißen
184 Seiten, 104 Bilder, 12 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-101-6

Band 77: Michael Schwind
**Zerstörungsfreie Ermittlung mechanischer Eigenschaften
von Feinblechen mit dem Wirbelstromverfahren**
124 Seiten, 68 Bilder, 8 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-102-4

Band 78: Manfred Gerhard
**Qualitätssteigerung in der Elektronikproduktion durch Optimierung
der Prozeßführung beim Löten komplexer Baugruppen**
179 Seiten, 113 Bilder, 7 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-103-2

Band 79: Elke Rauh
**Methodische Einbindung der Simulation
in die betrieblichen Planungs- und Entscheidungsabläufe**
192 Seiten, 114 Bilder, 4 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-104-0

Band 80: Sorin Niederkorn
**Meßeinrichtung zur Untersuchung der Wirkflächenreibung
bei umformtechnischen Prozessen**
99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-105-9

Band 81: Stefan Schubert
**Regelung der Fokusslage beim Schweißen mit CO₂-Hochleistungslasern
unter Einsatz von adaptiven Optiken**
140 Seiten, 64 Bilder, 3 Tabellen. 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**
216 Seiten, 86 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-109-1

Band 83: Otto Meedt
**Effizienzsteigerung bei Demontage und Recycling
durch flexible Demontage Technologien und optimierte Produktgestaltung**
186 Seiten, 103 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-108-3

Band 84: Knuth Götz

**Modelle und effiziente Modellbildung
zur Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion**
212 Seiten, 129 Bilder, 24 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-112-1

Band 85: Ralf Luchs

**Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe
zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT**
176 Seiten, 126 Bilder, 30 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-113-7

Band 86: Frank Pöhlau

**Entscheidungsgrundlagen zur Einführung
räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)**
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
128 Seiten, 58 Bilder, 11 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-115-6

Band 88: Gerhard Luhn

**Implizites Wissen und technisches Handeln
am Beispiel der Elektronikproduktion**
252 Seiten, 61 Bilder, 1 Tabelle. 1999.
ISBN 3-87525-116-4

Band 89: Axel Sprenger

Adaptives Streckbiegen von Aluminium-Strangpreßprofilen
114 Seiten, 63 Bilder, 4 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-117-2

Band 90: Hans-Jörg Pucher

**Untersuchungen zur Prozeßfolge Umformen, Bestücken
und Laserstrahllöten von Mikrokontakten**
158 Seiten, 69 Bilder, 9 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-119-9

Band 91: Horst Arnet

Profilbiegen mit kinematischer Gestalterzeugung
128 Seiten, 67 Bilder, 7 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-120-2

Band 92: Doris Schubart

**Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung
beim Abtragen mit CO₂-Laserstrahlung**
133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-122-9

Band 93: Adrianus L. P. Coremans

**Laserstrahlsintern von Metallpulver – Prozeßmodellierung,
Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahlgesinterter Metallkörper**
184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-124-5

Band 94: Hans-Martin Biehler

**Optimierungskonzepte für Qualitätsdatenverarbeitung
und Informationsbereitstellung in der Elektronikfertigung**
194 Seiten, 105 Bilder. 1999.
ISBN 3-87525-126-1

Band 95: Wolfgang Becker

**Oberflächenausbildung und tribologische Eigenschaften
excimerlaserstrahlbearbeiteter Hochleistungskeramiken**
175 Seiten, 71 Bilder, 3 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-127-X

Band 96: Philipp Hein

**Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren:
Modellierung, Prozeßauslegung und Prozeßführung**
129 Seiten, 57 Bilder, 7 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-128-8

Band 97: Gunter Beitinger
**Herstellungs- und Prüfverfahren
für thermoplastische Schaltungsträger**
169 Seiten, 92 Bilder, 20 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-129-6

Band 98: Jürgen Knoblach
**Beitrag zur rechnerunterstützten verursachungsgerechten Angebotskalkulation von
Blechteilen mit Hilfe wissensbasierter Methoden**
155 Seiten, 53 Bilder, 26 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-130-X

Band 99: Frank Breitenbach
**Bildverarbeitungssystem zur Erfassung der Anschlußgeometrie
elektronischer SMT-Bauelemente**
147 Seiten, 92 Bilder, 12 Tabellen. 2000.
ISBN 3-87525-131-8

Band 100: Bernd Falk
**Simulationsbasierte Lebensdauervorhersage
für Werkzeuge der Kaltmassivumformung**
134 Seiten, 44 Bilder, 15 Tabellen. 2000.
ISBN 3-87525-136-9

Band 101: Wolfgang Schlögl
**Integriertes Simulationsdaten-Management
für Maschinenentwicklung und Anlagenplanung**
169 Seiten, 101 Bilder, 20 Tabellen. 2000.
ISBN 3-87525-137-7

Band 102: Christian Hinsel
**Ermüdungsbruchversagen hartstoffbeschichteter
Werkzeugstähle in der Kaltmassivumformung**
130 Seiten, 80 Bilder, 14 Tabellen. 2000.
ISBN 3-87525-138-5

Band 103: Stefan Bobbert
**Simulationsgestützte Prozessauslegung
für das Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren**
123 Seiten, 77 Bilder. 2000.
ISBN 3-87525-145-8

Band 104: Harald Rottbauer
**Modulares Planungswerkzeug
zum Produktionsmanagement in der Elektronikproduktion**
166 Seiten, 106 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-139-3

Band 105: Thomas Hennige
Flexible Formgebung von Blechen durch Laserstrahlumformen
119 Seiten, 50 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-140-7

Band 106: Thomas Menzel
**Wissensbasierte Methoden für die rechnergestützte Charakterisierung
und Bewertung innovativer Fertigungsprozesse**
152 Seiten, 71 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-142-3

Band 107: Thomas Stöckel
**Kommunikationstechnische Integration der Prozeßebene
in Produktionssysteme durch Middleware-Frameworks**
147 Seiten, 65 Bilder, 5 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-143-1

Band 108: Frank Pitter
**Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen
durch Einsatz mechatronischer Sensorlösungen**
158 Seiten, 131 Bilder, 8 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-144-X

Band 109: Markus Korneli
**Integration lokaler CAP-Systeme
in einen globalen Fertigungsdatenverbund**
121 Seiten, 53 Bilder, 11 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-146-6

Band 110: Burkhard Müller
Laserstrahljustieren mit Excimer-Lasern – Prozeßparameter und Modelle zur Aktorkonstruktion
128 Seiten, 36 Bilder, 9 Tabellen. 2001
ISBN 3-87525-159-8

Band 111: Jürgen Göhringer
Integrierte Telediagnose via Internet zum effizienten Service von Produktionssystemen
178 Seiten, 98 Bilder, 5 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-147-4

Band 112: Robert Feuerstein
Qualitäts- und kosteneffiziente Integration neuer Bauelementetechnologien in die Flachbaugruppenfertigung
161 Seiten, 99 Bilder, 10 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-151-2

Band 113: Marcus Reichenberger
Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten alternativer Elektroniklote in der Oberflächenmontage (SMT)
165 Seiten, 97 Bilder, 18 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-152-0

Band 114: Alexander Huber
Justieren vormontierter Systeme mit dem Nd:YAG-Laser unter Einsatz von Aktoren
122 Seiten, 58 Bilder, 5 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-153-9

Band 115: Sami Krimi
Analyse und Optimierung von Montagesystemen in der Elektronikproduktion
155 Seiten, 88 Bilder, 3 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-157-1

Band 116: Marion Merklein
Laserstrahlumformen von Aluminiumwerkstoffen - Beeinflussung der Mikrostruktur und der mechanischen Eigenschaften
122 Seiten, 65 Bilder, 15 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-156-3

Band 117: Thomas Collisi
Ein informationslogistisches Architekturkonzept zur Akquisition simulationsrelevanter Daten
181 Seiten, 105 Bilder, 7 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-164-4

Band 118: Markus Koch
Rationalisierung und ergonomische Optimierung im Innenausbau durch den Einsatz moderner Automatisierungstechnik
176 Seiten, 98 Bilder, 9 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-165-2

Band 119: Michael Schmidt
Prozeßregelung für das Laserstrahl-Punktschweißen in der Elektronikproduktion
152 Seiten, 71 Bilder, 3 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-166-0

Band 120: Nicolas Tiesler
Grundlegende Untersuchungen zum Fließpressen metallischer Kleinstteile
126 Seiten, 78 Bilder, 12 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-175-X

Band 121: Lars Pursche
Methoden zur technologieorientierten Programmierung für die 3D-Lasermikrobearbeitung
111 Seiten, 39 Bilder, 0 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-183-0

Band 122: Jan-Oliver Brassel
Prozeßkontrolle beim Laserstrahl-Mikroschweißen
148 Seiten, 72 Bilder, 12 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-181-4

Band 123: Mark Geisel

**Prozeßkontrolle und –steuerung beim Laserstrahlschweißen
mit den Methoden der nichtlinearen Dynamik**

135 Seiten, 46 Bilder, 2 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-180-6

Band 124: Gerd Eßer

**Laserstrahlunterstützte Erzeugung metallischer Leiterstrukturen auf
Thermoplastsubstraten für die MID-Technik**

148 Seiten, 60 Bilder, 6 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-171-7

Band 125: Marc Fleckenstein

**Qualität laserstrahl-gefügter Mikroverbindungen
elektronischer Kontakte**

159 Seiten, 77 Bilder, 7 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-170-9

Band 126: Stefan Kaufmann

**Grundlegende Untersuchungen zum Nd:YAG- Laserstrahlfügen
von Silizium für Komponenten der Optoelektronik**

159 Seiten, 100 Bilder, 6 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-172-5

Band 127: Thomas Fröhlich

**Simultanes Löten von Anschlußkontakten elektronischer Bauelemente
mit Diodenlaserstrahlung**

143 Seiten, 75 Bilder, 6 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-186-5

Band 128: Achim Hofmann

**Erweiterung der Formgebungsgrenzen beim Umformen von
Aluminiumwerkstoffen durch den Einsatz prozessangepasster Platinen**

113 Seiten, 58 Bilder, 4 Tabellen
ISBN 3-87525-182-2

Band 129: Ingo Kriebitzsch

3 - D MID Technologie in der Automobilelektronik

129 Seiten, 102 Bilder, 10 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-169-5

Band 130: Thomas Pohl

**Fertigungsqualität und Umformbarkeit laserstrahlgeschweißter
Formplatinen aus Aluminiumlegierungen**

133 Seiten, 93 Bilder, 12 Tabellen. 2002
ISBN 3-87525-173-3

Band 131: Matthias Wenk

**Entwicklung eines konfigurierbaren Steuerungssystems für die
flexible Sensorführung von Industrierobotern**

167 Seiten, 85 Bilder, 1 Tabelle. 2002.
ISBN 3-87525-174-1

Band 132: Matthias Negendanck

**Neue Sensorik und Aktorik für Bearbeitungsköpfe
zum Laserstrahlschweißen**

116 Seiten, 60 Bilder, 14 Tabellen
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**

167 Seiten, 90 Bilder, 43 Tabellen
ISBN 3-87525-176-8

Band 134: Stefan Trautner

**Technische Umsetzung produktbezogener Instrumente der
Umweltpolitik bei Elektro- und Elektronikgeräten**

179 Seiten, 92 Bilder, 11 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-177-6

Band 135: Roland Meier

**Strategien für einen produktorientierten Einsatz räumlicher
spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)**

155 Seiten, 88 Bilder, 14 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-178-4

Band 136: Jürgen Wunderlich

**Kostensimulation – Simulationsbasierte Wirtschaftlichkeitsregelung
komplexer Produktionssysteme**

202 Seiten, 119 Bilder, 17 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-179-2

Band 137: Stefan Novotny

**Innenhochdruck-Umformen von Blechen aus Aluminium- und
Magnesiumlegierungen bei erhöhter Temperatur**

132 Seiten, 82 Bilder, 6 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-185-7

Band 138: Andreas Licha

**Flexible Montageautomatisierung zur Komplettmontage flächenhafter
Produktstrukturen durch kooperierende Industrieroboter**

158 Seiten, 87 Bilder, 8 Tabellen. 2003.
ISBN 3-87525-189-X

Band 139: Michael Eisenbarth

**Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und Verbindungstechnik
für mechatronische Baugruppen**

207 Seiten, 141 Bilder, 9 Tabellen. 2003.
ISBN 3-87525-190-3

Band 140: Frank Christoph

**Durchgängige simulationsgestützte Planung von
Fertigungseinrichtungen der Elektronikproduktion**

187 Seiten, 107 Bilder, 9 Tabellen. 2003.
ISBN 3-87525-191-1

Band 141: Hinnerk Hagenah

**Simulationsbasierte Bestimmung der zu erwartenden
Maßhaltigkeit für das Blechbiegen**

131 Seiten, 36 Bilder, 26 Tabellen. 2003.
ISBN 3-87525-192-X

Band 142: Ralf Eckstein

**Scherschneiden und Biegen metallischer Kleinstteile –
Materialeinfluss und Materialverhalten**

148 Seiten, 71 Bilder, 19 Tabellen. 2003.
ISBN 3-87525-193-8

Band 143: Frank H. Meyer-Pittroff

**Excimerlaserstrahlbiegen dünner metallischer Folien
mit homogener Lichtlinie**

138 Seiten, 60 Bilder, 16 Tabellen. 2003.
ISBN 3-87525-196-2

Band 144: Andreas Kach

**Rechnergestützte Anpassung von Laserstrahlschneidbahnen
an Bauteilabweichungen**

139 Seiten, 69 Bilder, 11 Tabellen. 2004.
ISBN 3-87525-197-0

Band 145: Stefan Hierl

**System- und Prozeßtechnik für das simultane Löten mit
Diodenlaserstrahlung von elektronischen Bauelementen**

124 Seiten, 66 Bilder, 4 Tabellen. 2004.
ISBN 3-87525-198-9

Band 146: Thomas Neudecker

**Tribologische Eigenschaften keramischer Blechumformwerkzeuge-
Einfluss einer Oberflächenendbearbeitung mittels Excimerlaserstrahlung**

166 Seiten, 75 Bilder, 26 Tabellen. 2004.
ISBN 3-87525-200-4

Band 147: Ulrich Wenger

Prozessoptimierung in der Wickeltechnik durch innovative maschinenbauliche und regelungstechnische Ansätze

132 Seiten, 88 Bilder, 0 Tabellen. 2004.

ISBN 3-87525-203-9

Band 148: Stefan Slama

Effizienzsteigerung in der Montage durch marktorientierte Montagestrukturen und erweiterte Mitarbeiterkompetenz

188 Seiten, 125 Bilder, 0 Tabellen. 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

122 Seiten, 51 Bilder, 9 Tabellen. 2004.

ISBN 3-87525-206-3

Band 150: Martino Celeghini

Wirkmedienbasierte Blechumformung: Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss von Werkstoff und Bauteilgeometrie

146 Seiten, 77 Bilder, 6 Tabellen. 2004.

ISBN 3-87525-207-1

Band 151: Ralph Hohenstein

Entwurf hochdynamischer Sensor- und Regelsysteme für die adaptive Laserbearbeitung

282 Seiten, 63 Bilder, 16 Tabellen. 2004.

ISBN 3-87525-210-1

Band 152: Angelika Hutterer

Entwicklung prozessüberwachender Regelkreise für flexible Formgebungsprozesse

149 Seiten, 57 Bilder, 2 Tabellen. 2005.

ISBN 3-87525-212-8

Band 153: Emil Egerer

Massivumformen metallischer Kleinstteile bei erhöhter Prozesstemperatur

158 Seiten, 87 Bilder, 10 Tabellen. 2005.

ISBN 3-87525-213-6

Band 154: Rüdiger Holzmann

Strategien zur nachhaltigen Optimierung von Qualität und Zuverlässigkeit in der Fertigung hochintegrierter Flachbaugruppen

186 Seiten, 99 Bilder, 19 Tabellen. 2005.

ISBN 3-87525-217-9

Band 155: Marco Nock

Biegeumformen mit Elastomerwerkzeugen

Modellierung, Prozessauslegung und Abgrenzung des Verfahrens am Beispiel des Rohrbiegens

164 Seiten, 85 Bilder, 13 Tabellen. 2005.

ISBN 3-87525-218-7

Band 156: Frank Niebling

Qualifizierung einer Prozesskette zum Laserstrahlsintern metallischer Bauteile

148 Seiten, 89 Bilder, 3 Tabellen. 2005.

ISBN 3-87525-219-5

Band 157: Markus Meiler

Großserientauglichkeit trockenschmierstoffbeschichteter Aluminiumbleche im Presswerk

Grundlegende Untersuchungen zur Tribologie, zum Umformverhalten und Bauteilversuche

104 Seiten, 57 Bilder, 21 Tabellen. 2005.

ISBN 3-87525-221-7

Band 158: Agus Sutanto

**Solution Approaches for Planning of Assembly Systems
in Three-Dimensional Virtual Environments**

169 Seiten, 98 Bilder, 3 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-220-9

Band 159: Matthias Boiger

**Hochleistungssysteme für die Fertigung elektronischer Baugruppen
auf der Basis flexibler Schaltungsträger**

175 Seiten, 111 Bilder, 8 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-222-5

Band 160: Matthias Pitz

Laserunterstütztes Biegen höchstfester Mehrphasenstähle

120 Seiten, 73 Bilder, 11 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-223-3

Band 161: Meik Vahl

**Beitrag zur gezielten Beeinflussung des Werkstoffflusses
beim Innenhochdruck-Umformen von Blechen**

165 Seiten, 94 Bilder, 15 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-224-1

Band 162: Peter K. Kraus

**Plattformstrategien – Realisierung einer varianz- und
kostenoptimierten Wertschöpfung**

181 Seiten, 95 Bilder, 0 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-226-8

Band 163: Adrienn Cser

Laserstrahlschmelzabtrag – Prozessanalyse und -modellierung

146 Seiten, 79 Bilder, 3 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-227-6

Band 164: Markus C. Hahn

**Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung von
Leichtbauverbundstrukturen mit Aluminiumschaumkern**

143 Seiten, 60 Bilder, 16 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-228-4

Band 165: Gordana Michos

Mechatronische Ansätze zur Optimierung von Vorschubachsen

146 Seiten, 87 Bilder, 17 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-230-6

Band 166: Markus Stark

Auslegung und Fertigung hochpräziser Faser-Kollimator-Arrays

158 Seiten, 115 Bilder, 11 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-231-4

Band 167: Yurong Zhou

**Kollaboratives Engineering Management in der integrierten virtuellen
Entwicklung der Anlagen für die Elektronikproduktion**

156 Seiten, 84 Bilder, 6 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-232-2

Band 168: Werner Enser

**Neue Formen permanenter und lösbarer elektrischer
Kontaktierungen für mechatronische Baugruppen**

190 Seiten, 112 Bilder, 5 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-233-0

Band 169: Katrin Melzer

**Integrierte Produktpolitik bei elektrischen und elektronischen
Geräten zur Optimierung des Product-Life-Cycle**

155 Seiten, 91 Bilder, 17 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-234-9

Band 170: Alexander Putz

**Grundlegende Untersuchungen zur Erfassung der realen Vorspannung von
armierten Kaltfließpresswerkzeugen mittels Ultraschall**

137 Seiten, 71 Bilder, 15 Tabellen. 2006.
ISBN 3-87525-237-3

- Band 171: Martin Prechtl
Automatisiertes Schichtverfahren für metallische Folien – System- und Prozesstechnik
 154 Seiten, 45 Bilder, 7 Tabellen. 2006.
 ISBN 3-87525-238-1
- Band 172: Markus Meidert
Beitrag zur deterministischen Lebensdauerabschätzung von Werkzeugen der Kaltmassivumformung
 131 Seiten, 78 Bilder, 9 Tabellen. 2006.
 ISBN 3-87525-239-X
- Band 173: Bernd Müller
Robuste, automatisierte Montagesysteme durch adaptive Prozessführung und montageübergreifende Fehlerprävention am Beispiel flächiger Leichtbauteile
 147 Seiten, 77 Bilder, 0 Tabellen. 2006.
 ISBN 3-87525-240-3
- Band 174: Alexander Hofmann
Hybrides Laserdurchstrahlsschweißen von Kunststoffen
 136 Seiten, 72 Bilder, 4 Tabellen. 2006.
 ISBN 978-3-87525-243-9
 ISBN 3-87525-243-8
- Band 175: Peter Wölfflick
Innovative Substrate und Prozesse mit feinsten Strukturen für bleifreie Mechatronik-Anwendungen
 177 Seiten, 148 Bilder, 24 Tabellen. 2006.
 ISBN 978-3-87525-246-0
 ISBN 3-87525-246-2
- Band 176: Attila Komlódi
Detection and Prevention of Hot Cracks during Laser Welding of Aluminium Alloys Using Advanced Simulation Methods
 155 Seiten, 89 Bilder, 14 Tabellen. 2006.
 ISBN 978-3-87525-248-4
 ISBN 3-87525-248-9
- Band 177: Uwe Popp
Grundlegende Untersuchungen zum Laserstrahlstrukturieren von Kaltmassivumformwerkzeugen
 140 Seiten, 67 Bilder, 16 Tabellen. 2006.
 ISBN 978-3-87525-249-1
 ISBN 3-87525-249-7
- Band 178: Veit Rückel
Rechnergestützte Ablaufplanung und Bahngenerierung Für kooperierende Industrieroboter
 148 Seiten, 75 Bilder, 7 Tabellen. 2006.
 ISBN 978-3-87525-250-7
 ISBN 3-87525-250-0
- Band 179: Manfred Dirscherl
Nicht-thermische Mikrojustiertechnik mittels ultrakurzer Laserpulse
 154 Seiten, 69 Bilder, 10 Tabellen. 2007.
 ISBN 978-3-87525-251-4
 ISBN 3-87525-251-9
- Band 180: Yong Zhuo
Entwurf eines rechnergestützten integrierten Systems für Konstruktion und Fertigungsplanung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3D-MID)
 181 Seiten, 95 Bilder, 5 Tabellen. 2007.
 ISBN 978-3-87525-253-8
- Band 181: Stefan Lang
Durchgängige Mitarbeiterinformation zur Steigerung von Effizienz und Prozesssicherheit in der Produktion
 172 Seiten, 93 Bilder. 2007.
 ISBN 978-3-87525-257-6
- Band 182: Hans-Joachim Krauß
Laserstrahlinduzierte Pyrolyse präkeramischer Polymere
 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**
173 Seiten, 75 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-259-0

Band 184: Rainer Kohlbauer
**Wissensbasierte Methoden für die simulationsgestützte Auslegung
wirkmedienbasierter Blechumformprozesse**
135 Seiten, 50 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-260-6

Band 185: Klaus Lamprecht
**Wirkmedienbasierte Umformung tiefgezogener Vorformen unter besonderer
Berücksichtigung maßgeschneiderter Halbzeuge**
137 Seiten, 81 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-265-1

Band 186: Bernd Zolleiß
**Optimierte Prozesse und Systeme für die Bestückung
mechatronischer Baugruppen**
180 Seiten, 117 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-266-8

Band 187: Michael Kerausch
**Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Umformen lokal
wärmebehandelter Aluminiumplatten**
146 Seiten, 76 Bilder, 7 Tabellen 2007.
ISBN 978-3-87525-267-5

Band 188: Matthias Weber
**Unterstützung der Wandlungsfähigkeit von Produktionsanlagen
durch innovative Softwaresysteme**
183 Seiten, 122 Bilder, 3 Tabellen 2007.
ISBN 978-3-87525-269-9

Band 189: Thomas Frick
**Untersuchung der prozessbestimmenden Strahl-Stoff-Wechselwirkungen
beim Laserstrahlschweißen von Kunststoffen**
104 Seiten, 62 Bilder, 8 Tabellen 2007.
ISBN 978-3-87525-268-2

Band 190: Joachim Hecht
**Werkstoffcharakterisierung und Prozessauslegung für die wirkmedienbasierte
Doppelblech-Umformung von Magnesiumlegierungen**
107 Seiten, 91 Bilder, 2 Tabellen 2007.
ISBN 978-3-87525-270-5

Band 191: Ralf Völkl
**Stochastische Simulation zur Werkzeuglebensdaueroptimierung und
Präzisionsfertigung in der Kaltmassivumformung**
178 Seiten, 75 Bilder, 12 Tabellen 2008.
ISBN 978-3-87525-272-9

Band 192: Massimo Tolazzi
Innenhochdruck-Umformen verstärkter Blech-Rahmenstrukturen
164 Seiten, 85 Bilder, 7 Tabellen 2008.
ISBN 978-3-87525-273-6

Band 193: Cornelia Hoff
**Untersuchung der Prozesseinflussgrößen beim
Presshärten des höchstfesten Vergütungsstahls 22MnB5**
133 Seiten, 92 Bilder, 5 Tabellen 2008.
ISBN 978-3-87525-275-0

Band 194: Christian Alvarez
**Simulationsgestützte Methoden zur effizienten Gestaltung von
Lötprozessen in der Elektronikproduktion**
149 Seiten, 86 Bilder, 8 Tabellen 2008.
ISBN 978-3-87525-277-4

Band 195: Andreas Kunze
**Automatisierte Montage von makromechatronischen
Modulen zur flexiblen Integration in hybride Pkw-Bordnetzsysteme**
160 Seiten, 90 Bilder, 14 Tabellen 2008.
ISBN 978-3-87525-278-1

Band 196: Wolfgang Hußnätter
Grundlegende Untersuchungen zur experimentellen Ermittlung und zur Modellierung von Fließortkurven bei erhöhten Temperaturen
152 Seiten, 73 Bilder, 21 Tabellen 2008.
ISBN 978-3-87525-279-8

Band 197: Thomas Bigl
Entwicklung, angepasste Herstellungsverfahren und erweiterte Qualitätssicherung von einsatzgerechten elektronischen Baugruppen
175 Seiten, 107 Bilder, 14 Tabellen 2008.
ISBN 978-3-87525-280-4

Band 198: Stephan Roth
Grundlegende Untersuchungen zum Excimerlaserstrahl-Abtragen unter Flüssigkeitsfilmen
113 Seiten, 47 Bilder, 14 Tabellen 2008.
ISBN 978-3-87525-281-1

Band 199: Artur Giera
Prozesstechnische Untersuchungen zum Rührreibschweißen metallischer Werkstoffe
179 Seiten, 104 Bilder, 36 Tabellen 2008.
ISBN 978-3-87525-282-8

Band 200: Jürgen Lechler
Beschreibung und Modellierung des Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen
154 Seiten, 75 Bilder, 12 Tabellen 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
120 Seiten, 68 Bilder, 9 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-287-3

Band 202: Andreas Schaller
Modellierung eines nachfrageorientierten Produktionskonzeptes für mobile Telekommunikationsgeräte
120 Seiten, 79 Bilder, 0 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-289-7

Band 203: Claudius Schimpf
Optimierung von Zuverlässigkeitsuntersuchungen, Prüfabläufen und Nacharbeitsprozessen in der Elektronikproduktion
162 Seiten, 90 Bilder, 14 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-290-3

Band 204: Simon Dietrich
Sensoren zur Schwerpunktslagebestimmung der optischen Prozessemissionen beim Laserstrahltiefschweißen
138 Seiten, 70 Bilder, 5 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-292-7

Band 205: Wolfgang Wolf
Entwicklung eines agentenbasierten Steuerungssystems zur Materialflussorganisation im wandelbaren Produktionsumfeld
167 Seiten, 98 Bilder, 2009.
ISBN 978-3-87525-293-4

Band 206: Steffen Polster
Laserdurchstrahlschweißen transparenter Polymerbauteile
160 Seiten, 92 Bilder, 13 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-294-1

Band 207: Stephan Manuel Dörfler

Rührreißschweißen von walzplattiertem Halbzeug und Aluminiumblech zur Herstellung flächiger Aluminiumschaum-Sandwich-Verbundstrukturen
190 Seiten, 98 Bilder, 5 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-295-8

Band 208: Uwe Vogt

Seriennahe Auslegung von Aluminium Tailored Heat Treated Blanks
151 Seiten, 68 Bilder, 26 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-296-5

Band 209: Till Laumann

Qualitative und quantitative Bewertung der Crashtauglichkeit von höchstfesten Stählen
117 Seiten, 69 Bilder, 7 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-299-6

Band 210: Alexander Diehl

Größeneffekte bei Biegeprozessen- Entwicklung einer Methodik zur Identifikation und Quantifizierung
180 Seiten, 92 Bilder, 12 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-302-3

Band 211: Detlev Staud

Effiziente Prozesskettenauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter und geschweißter Aluminiumbleche
164 Seiten, 72 Bilder, 12 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-303-0

Band 212: Jens Ackermann

Prozesssicherung beim Laserdurchstrahlsschweißen thermoplastischer Kunststoffe
129 Seiten, 74 Bilder, 13 Tabellen 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
144 Seiten, 67 Bilder, 11 Tabellen 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
133 Seiten, 83 Bilder, 11 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-308-5

Band 215: Christian Matzner

Konzeption produktspezifischer Lösungen zur Robustheitssteigerung elektronischer Systeme gegen die Einwirkung von Betauung im Automobil
165 Seiten, 93 Bilder, 14 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-309-2

Band 216: Florian Schüßler

Verbindungs- und Systemtechnik für thermisch hochbeanspruchte und miniaturisierte elektronische Baugruppen
184 Seiten, 93 Bilder, 18 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-310-8

Band 217: Massimo Cojutti

Strategien zur Erweiterung der Prozessgrenzen bei der Innhochdruck-Umformung von Rohren und Blechpaaren
125 Seiten, 56 Bilder, 9 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-312-2

Band 218: Raoul Plettke

Mehrkriterielle Optimierung komplexer Aktorsysteme für das Laserstrahljustieren
152 Seiten, 25 Bilder, 3 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-315-3

Band 219: Andreas Dobroschke
**Flexible Automatisierungslösungen für die Fertigung
wickeltechnischer Produkte**
184 Seiten, 109 Bilder, 18 Tabellen 2011.
ISBN 978-3-87525-317-7

Band 220: Azhar Zam
**Optical Tissue Differentiation for Sensor-Controlled
Tissue-Specific Laser Surgery**
99 Seiten, 45 Bilder, 8 Tabellen 2011.
ISBN 978-3-87525-318-4

Band 221: Michael Rösch
**Potenziale und Strategien zur Optimierung des
Schablonendruckprozesses in der Elektronikproduktion**
192 Seiten, 127 Bilder, 19 Tabellen 2011.
ISBN 978-3-87525-319-1

Band 222: Thomas Rechtenwald
**Quasi-isothermes Laserstrahlsintern von Hochtemperatur-Thermoplasten -
Eine Betrachtung werkstoff- prozessspezifischer Aspekte am Beispiel PEEK**
150 Seiten, 62 Bilder, 8 Tabellen 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**
165 Seiten, 85 Bilder, 8 Tabellen 2011.
ISBN 978-3-87525-324-5

Band 224: Kay Wagner
**Beanspruchungsangepasste Kaltmassivumformwerkzeuge durch lokal optimierte
Werkzeugoberflächen**
147 Seiten, 103 Bilder, 17 Tabellen 2011.
ISBN 978-3-87525-325-2

Band 225: Martin Brandhuber
**Verbesserung der Prognosegüte des Versagens von Punktschweißverbindungen bei
höchstfesten Stahlgüten**
155 Seiten, 91 Bilder, 19 Tabellen 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, Prozesssimulation
und funktionale Untersuchung**
195 Seiten, 97 Bilder, 60 Tabellen 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**
109 Seiten, 56 Bilder, 8 Tabellen 2012.
ISBN 978-3-87525-330-6

Band 228: Indra Pitz
Beschleunigte Simulation des Laserstrahlumformens von Aluminiumblechen
137 Seiten, 45 Bilder, 27 Tabellen 2012.
ISBN 978-3-87525-333-7

Band 229: Alexander Grimm
Prozessanalyse und -überwachung des Laserstrahlhartlötens mittels optischer Sensorik
125 Seiten, 61 Bilder, 5 Tabellen 2012.
ISBN 978-3-87525-334-4

Band 230: Markus Kaupper
Biegen von höhenfesten Stahlblechwerkstoffen - Umformverhalten und Grenzen der Biegebarkeit
160 Seiten, 57 Bilder, 10 Tabellen 2012.
ISBN 978-3-87525-339-9

Band 231: Thomas Kroiß

Modellbasierte Prozessauslegung für die Kaltmassivumformung unter Berücksichtigung der Werkzeug- und Pressenauffederung

169 Seiten, 50 Bilder, 19 Tabellen 2012.

ISBN 978-3-87525-341-2

Band 232: Christian Goth

Analyse und Optimierung der Entwicklung und Zuverlässigkeit räumlicher Schaltungsträger (3D-MID)

173 Seiten, 102 Bilder, 22 Tabellen 2012.

ISBN 978-3-87525-340-5