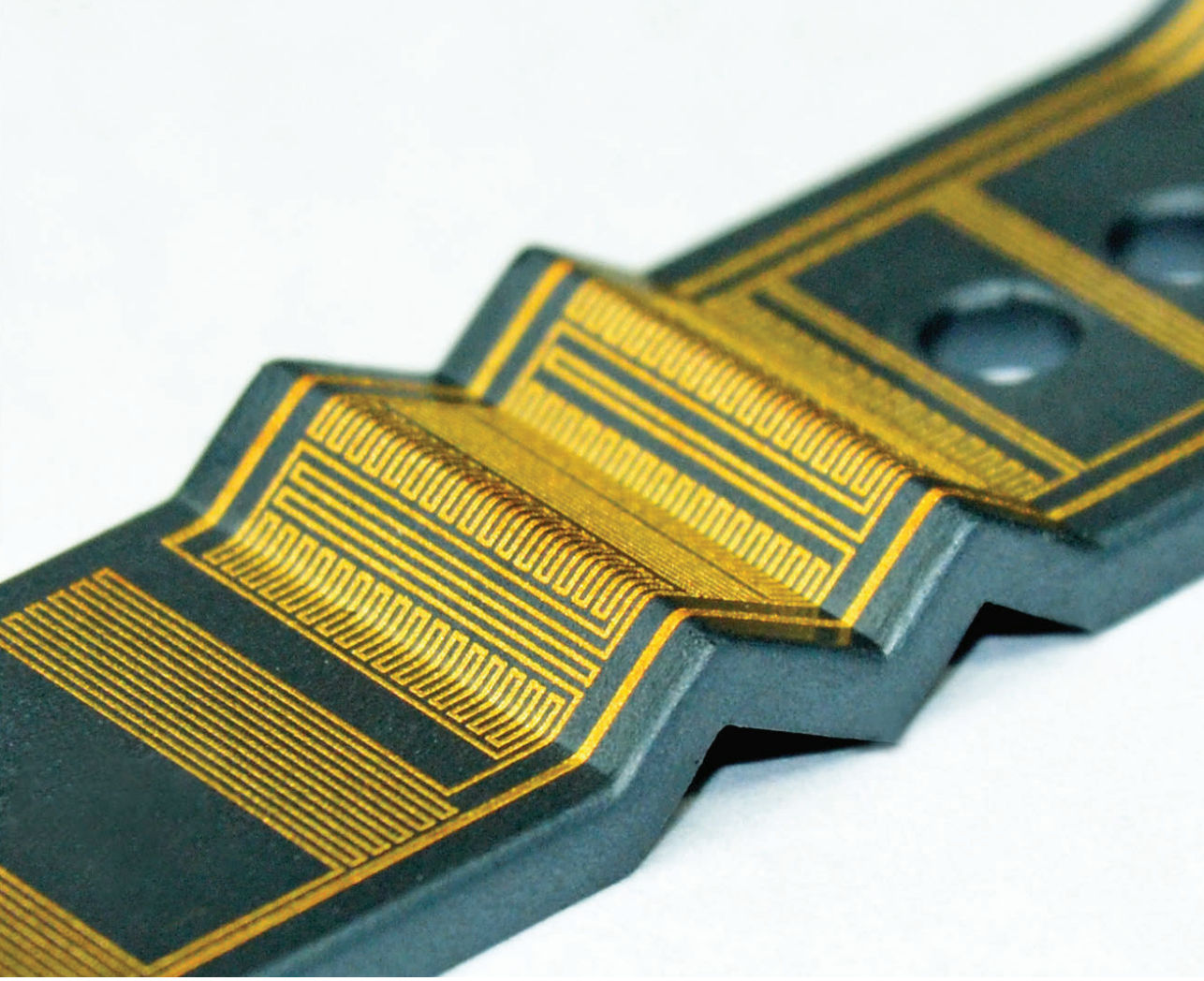




FAU Studien aus dem Maschinenbau 334

Thomas Kuhn

Qualität und Zuverlässigkeit
laserdirektstrukturierter mechatronisch
integrierter Baugruppen (LDS-MID)



Thomas Kuhn

Qualität und Zuverlässigkeit laserdirektstrukturierter
mechatronisch integrierter Baugruppen (LDS-MID)

FAU Studien aus dem Maschinenbau

Band 334

Herausgeber der Reihe:

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Prof. Dr.-Ing. Nico Hanenkamp

Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

Thomas Kuhn

**Qualität und Zuverlässigkeit
laserdirektstrukturierter mechatronisch
integrierter Baugruppen (LDS-MID)**

Dissertation aus dem Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und
Produktionssystematik (FAPS)

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Erlangen
FAU University Press
2019

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

Bitte zitieren als

Kuhn, Thomas. 2019. *Qualität und Zuverlässigkeit laserdirektstrukturierter mechatronisch integrierter Baugruppen (LDS-MID)*. FAU Studien aus dem Maschinenbau Band 334. Erlangen: FAU University Press.
DOI: 10.25593/978-3-96147-253-6.

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

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

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

Druck: docupoint GmbH

ISBN: 978-3-96147-252-9 (Druckausgabe)
eISBN: 978-3-96147-253-6 (Online-Ausgabe)
ISSN: 2625-9974
DOI: 10.25593/978-3-96147-253-6

**Qualität und Zuverlässigkeit
laserdirektstrukturierter mechatronisch
integrierter Baugruppen (LDS-MID)**

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

zur

Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ingenieur

vorgelegt von

Dipl.-Wirtsch.-Ing. (FH) Thomas Kuhn
aus Neu-Ulm

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

Tag der mündlichen Prüfung: 09.07.2019

Vorsitzender des
Promotionsorgans: Prof. Dr.-Ing. Reinhard Lerch

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke
Prof. Dr.-Ing. Roman Dumitrescu,
Universität Paderborn

Vorwort

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

Mein besonderer Dank gilt dem Lehrstuhlinhaber Herrn Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke für die Förderung meiner Forschungsarbeit, den mir gewährten wissenschaftlichen Freiraum und das entgegengebrachte Vertrauen während meiner Tätigkeit als Geschäftsführer der Forschungsvereinigung Räumliche Elektronische Baugruppen (3-D MID) e.V. Des Weiteren danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Feldmann, Gründer des Lehrstuhls FAPS, für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes. Herrn Prof. Dr.-Ing. Roman Dumitrescu, Direktor des Forschungsbereichs Produktentstehung am Fraunhofer-Institut für Entwurfstechnik Mechatronik (IEM), danke ich für die Übernahme des Koreferats. Herrn Prof. Dr.-Ing. Georg Fischer gilt mein Dank für die Beteiligung als weiteres Mitglied des Prüfungskollegiums.

Diese Dissertation beruht in Teilen auf Ergebnissen aus Forschungsprojekten, die durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert wurden. Den an diesen Projekten beteiligten Industriepartnern und Forschungseinrichtungen wie auch den Mitgliedsunternehmen der Forschungsvereinigung 3-D MID e.V. danke ich für die gute Zusammenarbeit. Besonders hervorheben möchte ich Herrn Dr. rer. nat. Wolfgang John, der mein Wirken im Bereich mechatronisch integrierter Baugruppen stets mit beispiellosem Engagement unterstützt hat.

Einen großen Dank richte ich darüber hinaus an alle Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter am Lehrstuhl FAPS. Besondere Anerkennung verdienen die Kollegen und Freunde aus dem Forschungsbereich Elektronikproduktion, insbesondere Thomas M. Braun, Martin Müller, Alexander Hensel, Stefan Härter, Philipp Bräuer, Markus Ankenbrand, Johannes Hörber, Michael Pfeffer, Thomas Stoll, Simone Neermann, Thomas Reitberger, Gerald Gion, Denis Kozic, Siegfried Maly, Horst Schuster, Matthias Scheetz, Dr.-Ing. Christopher Kästle, Dr.-Ing. Aarief Syed-Khaja, Dr.-Ing. René Schramm, Dr.-Ing. Andreas Reinhardt und Dr.-Ing. Christian Goth.

Mein herzlicher Dank gilt ferner meinen Eltern, die mich auf meinem Bildungsweg fortwährend unterstützt haben, sowie meiner Partnerin Svenja für den Rückhalt während der Anfertigung dieser Dissertation.

Nürnberg, im Juli 2019

Thomas Kuhn

Inhaltsverzeichnis

	Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis	vii
1	Einleitung	1
2	Qualität und Zuverlässigkeit im Kontext mechatronisch integrierter Baugruppen.....	5
2.1	Prozessschritte und Qualitätssicherung in der Herstellung von LDS-MID.....	5
2.1.1	Spritzgießen	6
2.1.2	Laserstrukturieren.....	10
2.1.3	Metallisieren.....	13
2.1.4	Montage elektrischer Bauelemente.....	18
2.2	Charakteristische Herausforderungen und Einschränkungen für die Qualität und Zuverlässigkeit von LDS-MID	24
2.2.1	Delamination der Metallisierung	24
2.2.2	Entstehung von Leiterbahnrisen	31
2.2.3	Thermisches Versagen von Leiterbahnen.....	37
2.3	Handlungsfelder zur Bewertung und Steigerung der Qualität und Zuverlässigkeit von LDS-MID	41
3	Bestimmung und Steigerung der Metallisierungshaftfestigkeit	45
3.1	Evaluierung von Haftfestigkeitsprüfverfahren für den Einsatz bei LDS-MID	45
3.1.1	Bewertung konventioneller Prüfverfahren	45
3.1.2	Qualifizierung des Hot-Pin-Pull-Tests.....	52
3.1.3	Experimenteller Vergleich alternativer Prüfverfahren	61

3.2	Zentrale Einflussgrößen auf die Metallisierungshaftfestigkeit	64
3.2.1	Material- und fertigungsbedingte Einflussgrößen	65
3.2.2	Umweltbedingte Einflussgrößen.....	71
3.3	Empfehlungen zur Bestimmung und Steigerung der Metallisierungshaftfestigkeit	78
4	Vermeidung von Leiterbahnrisen bei thermischer Belastung.....	81
4.1	Methodik zur Untersuchung von Leiterbahnrisen	81
4.2	Zentrale Einflussgrößen auf die Rissentstehung	85
4.2.1	Rissanfälligkeit in Abhängigkeit der thermomechanischen Fehlanpassung.....	85
4.2.2	Geometrische und spritzgießbedingte Einflussgrößen	91
4.2.3	Rissentstehung im Lötprozess.....	97
4.3	Maßnahmen zur Vermeidung von Leiterbahnrisen bei thermischer Belastung.....	106
5	Steigerung der Stromtragfähigkeit durch den Einsatz von Metallkern-MID	111
5.1	Herstellung von Metallkern-MID auf Basis von LDS-fähigem Pulverlack	111
5.2	Bestimmung anwendungsrelevanter Eigenschaften von Metallkern-MID im Vergleich zu spritzgegossenen LDS-MID	116
5.2.1	Haftfestigkeit der Metallisierung	117
5.2.2	Stromtragfähigkeit der Leiterbahnen.....	120
5.3	Erschließung neuer Anwendungspotenziale durch Metallkern-MID	122
6	Zusammenfassung	127
7	Summary.....	131
	Literaturverzeichnis	135

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis

<i>Symbol</i>	<i>Einheit</i>	<i>Beschreibung</i>
b	mm	Breite
b	-	Formparameter (Ausfallsteilheit)
d	mm	Dicke
I	A	Stromstärke
L	m	Länge
P	W	elektrische Leistung
$\dot{q}$	W/m ²	Wärmestromdichte
R	Ω	elektrischer Widerstand
T	K	Temperatur
$\text{grad } T$	K/m	Temperaturgradient
T	-	Lageparameter (charakt. Lebensdauer)
γ_l	N/m	Oberflächenspannung Flüssigkeit
γ_{lv}	N/m	Grenzflächenspannung flüssig-gasförmig
γ_s	N/m	Oberflächenenergie Festkörper
γ_{sl}	N/m	Grenzflächenspannung fest-flüssig
γ_{sv}	N/m	Grenzflächenspannung fest-gasförmig
θ	°	Kontaktwinkel
λ	W/(m · K)	Wärmeleitfähigkeit
ρ	$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$	spezifischer elektrischer Widerstand

Abkürzung	Bezeichnung
3D	Dreidimensional
Ag	Silber
Al	Aluminium
AOI	Automatische Optische Inspektion
Au	Gold
AVT	Aufbau- und Verbindungstechnik
Bi	Bismut
CAD	Computer-Aided Design
CH ₂ O	Formaldehyd
CTE	Coefficient of Thermal Expansion
Cu	Kupfer
CuCr ₂ O ₄	Kupfer-Chrom-Spinell
DF	Degrees of Freedom
EDS	Elektrische Doppelschicht
FEM	Finite-Elemente-Methode
FR4	Leiterplattenmaterial aus Epoxidharz mit Glasfasergewebe
LCP	Liquid Crystal Polymer
LDS	Laserdirektstrukturierung
LED	Light-Emitting Diode
MID	Mechatronic Integrated Devices
MS	Mean Square
MTO	Metal Turnover
Ni	Nickel
PA	Polyamid
PA MXD6	Polyamid aus m-Xylylendiamin und Adipinsäure
PBT	Polybutylenterephthalat
PC	Polycarbonat

Pd	Palladium
PES	Polyester
PET	Polyethelenterephthalat
PPA	Polyphthalamid
PU	Polyurethan
SLM	Selective Laser Melting
SMD	Surface Mount Device
Sn	Zinn
SS	Sum of Squares
TMA	Thermomechanische Analyse
TS	Thermosonic
US	Ultraschall

1 Einleitung

Die fortschreitende digitale Vernetzung von Menschen, Gütern und Dienstleistungen wird die Art und Weise, wie wir leben, arbeiten und kommunizieren nachhaltig verändern. Autonomes Fahren, Robotik im Haushalt, eine natürliche Kommunikation mit persönlichen Assistenzsystemen sowie selbstlernende, medizinische Überwachungssysteme sind nur eine Auswahl an Beispielen, die die enormen wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Auswirkungen der technologischen Entwicklungen dieser Zeit aufzeigen. Als zentrale Bausteine der ubiquitären Digitalisierung bedarf es multifunktionaler mechatronischer Systeme, die sensorische Funktionalitäten, elektronische Intelligenz wie auch Möglichkeiten zur Energiegewinnung, -speicherung und Kommunikation vereinen. Angesichts der engen und häufig komplex ausgeprägten Bauräume stoßen konventionelle, modulare Aufbautechnologien unter den hohen Anforderungen an die Funktionsvielfalt und -dichte jedoch an ihre Grenzen. Für die Entwicklung und Herstellung mechatronischer Systeme sind deshalb zunehmend alternative technologische Ansätze gefragt.

Gerade unter diesen anspruchsvollen Rahmenbedingungen können mechatronisch integrierte Baugruppen (Mechatronic Integrated Devices, MID) ihr enormes Potenzial entfalten. Basierend auf der Kombination einer nahezu uneingeschränkten räumlichen Gestaltungsfreiheit mit einer direkten selektiven Oberflächenmetallisierung stellt die MID-Technologie unzählige Möglichkeiten zur Herstellung hochintegrierter mechatronischer Bauteile mit funktionsoptimalem Design bereit. Mechanische, elektrische/ elektronische, thermische, fluidische und optische Funktionalitäten lassen sich alternativ zur konventionellen, vierteiligen Modulbauweise in nur einem MID-Bauteil vereinen. Die Einsparung von Komponenten begünstigt dabei das Gewicht der Baugruppe, reduziert Schnittstellen und minimiert den Montageaufwand. Gleichzeitig werden durch die massiv erweiterten Gestaltungsmöglichkeiten bisherige Grenzen des Produktdesigns überwunden. [1][2][3] Die in Bild 1 exemplarisch dargestellten Detailaufnahmen demonstrieren die vielfältigen Anwendungspotenziale der MID-Technologie.

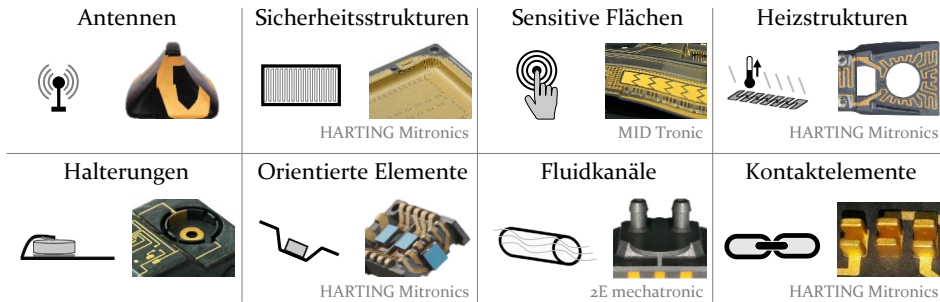


Bild 1: Anwendungspotenziale der MID-Technologie

Der Herstellungsprozess, der sich zur MID-Fertigung in der industriellen Anwendung am weitesten etabliert hat, ist die Laserdirektstrukturierung (LDS) nach dem patentierten Verfahren der LPKF Laser & Electronics AG [4][5][6]. Seit mehr als einem Jahrzehnt belegen unterschiedlichste Anwendungsbeispiele die vielseitigen Einsatzmöglichkeiten LDS-basierter mechatronischer Baugruppen. Im Bereich der Telekommunikationstechnik werden mit dem LDS-Verfahren Antennen für Smartphones, Tablets und Laptops in Millionenstückzahlen direkt in die Gehäuseteile integriert. Im Automotive-Sektor, der Medizintechnik und der Industrieautomatisierung kommen laserdirektstrukturierte mechatronisch integrierte Baugruppen (LDS-MID) insbesondere in Form von Sensoranwendungen, Bedienelementen und räumlichen Schaltungsträgern bei komplexen Bauräumen zum Einsatz. Weitere LDS-Anwendungen finden sich in der Konsumgüterindustrie, der Gebäudetechnik oder der Luftfahrt. [3][7][8][9]

So verschieden die Anwendungsbereiche von LDS-MID sind, so unterschiedlich fallen auch die Anforderungen an ihre Qualität und Zuverlässigkeit aus. Vor allem bei einem Einsatz unter harschen Umgebungsbedingungen sowie in sicherheitsrelevanten Systemen können keine Qualitätsmängel und Funktionsausfälle in Kauf genommen werden. Hier beschränkt sich der Einsatz LDS-basierter Anwendungen bisweilen auf einzelne Ausnahmen. Eine pauschale Aussage über die Grenzen der Belastbarkeit von LDS-MID ist aufgrund ihrer hohen Individualität nicht möglich. Zudem mangelt es an einer ausreichenden Basis fundierter Kenntnisse über technologiespezifische zuverlässigkeitsbeeinflussende Faktoren und einem umfassenden Verständnis der komplexen Wirkzusammenhänge, die zu Schädigungsfällen führen [10]. Infolgedessen gestaltet es sich derzeit ebenso schwierig, spezifische LDS-basierte Anwendungskonzepte hinsichtlich ihrer Eignung für anspruchsvolle Einsatzbereiche hinreichend sicher zu bewerten.

Für eine erfolgreiche Umsetzung der zentralen Digitalisierungsinitiativen werden jedoch gerade auch in diesen hochbelasteten und sicherheitsrelevanten Einsatzbereichen technische Lösungen benötigt. Der rasant zunehmende Bedarf an mechatronischen Systemen erfordert folglich Aufbau- und Fertigungstechnologien, die neben den geeigneten Anwendungspotenzialen auch die Voraussetzungen dazu bieten, stetig höchste Qualitäts- und Zuverlässigkeitsanforderungen zu erfüllen.

Vor diesem Hintergrund liegt der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit in einer systematischen Untersuchung zentraler Aspekte der Qualität und Zuverlässigkeit laserdirektstrukturierter mechatronisch integrierter Baugruppen. Ziel ist es, auf Grundlage der erarbeiteten Methoden und Erkenntnisse bestehende Unsicherheiten in Bezug auf die Eignung von LDS-Anwendungen für ihren Einsatz in anspruchsvollen Applikationsfeldern abzubauen und wertvolle Anhaltspunkte zur effektiven Steigerung der Robustheit von LDS-MID zu liefern.

Zunächst werden hierzu in Kapitel 2 die wesentlichen qualitätsbeeinflussenden Faktoren entlang des mehrstufigen, multidisziplinären Herstellungsprozesses aufgezeigt und erforderliche Maßnahmen zur Qualitätssicherung in der LDS-MID-Fertigung beschrieben. Ausgehend von einer Analyse der charakteristischen Ausfallursachen werden anschließend drei konkrete Handlungsfelder zur Bewertung und Steigerung der Qualität und Zuverlässigkeit von LDS-MID identifiziert.

Zur Absicherung gegen delaminationsbedingte Ausfälle widmet sich das Kapitel 3 der Bestimmung und Steigerung der Haftfestigkeit von LDS-Metallisierungen. Unter Verwendung einer zuvor qualifizierten Prüfmethode werden elementare Einflüsse auf die Haftfestigkeit anhand gezielter Versuchsreihen analysiert. Betrachtet werden hierbei sowohl material- und fertigungsbedingte Aspekte als auch umweltbedingte Faktoren, denen die Baugruppen im Einsatz ausgesetzt sind.

Die vergleichsweise hohe Rissanfälligkeit von LDS-Leiterbahnen unter thermischer Belastung motiviert die Forschungsarbeiten, mit denen sich das Kapitel 4 befasst. Die Untersuchungen zielen zum einen auf eine valide Beurteilung des Ausfallrisikos in Abhängigkeit verschiedener Belastungssituationen, Material- und Fertigungsvarianten sowie Aspekte der Bauteilgestaltung ab. Zum anderen ermöglichen sie die Entwicklung wirksamer Strategien zur Vermeidung von Leiterbahnrisen.

In Kapitel 5 wird mit dem Einsatz von Metallkern-MID ein neuartiger Lösungsansatz zur Überwindung der materialbedingten Einschränkungen konventioneller LDS-MID im Hinblick auf ihre Stromtragfähigkeit untersucht. Neben einer Betrachtung des angepassten Fertigungsprozesses werden basierend auf vergleichenden Untersuchungen anwendungsrelevante Eigenschaften bestimmt. Abschließend werden hieraus die Einsatzpotenziale von Metallkern-MID in Gegenüberstellung zu den bisherigen Möglichkeiten bewertet.

2 Qualität und Zuverlässigkeit im Kontext mechatronisch integrierter Baugruppen

Der konventionelle Aufbau mechatronischer Produkte ist durch eine Kombination separater Funktionseinheiten gekennzeichnet, in der jede Komponente eine spezifische Aufgabe erfüllt. Mechatronisch integrierte Baugruppen vereinen im Gegensatz zu dieser konventionellen Modulbauweise eine Vielzahl unterschiedlicher Funktionalitäten in nur einem Bauteil. Neben den vielfältigen Potenzialen der Integralbauweise gehen mit dem Einsatz der Technologie mechatronisch integrierter Baugruppen allerdings auch eine erhöhte Komplexität mit vielschichtigen Wechselwirkungen einher. Im mehrstufigen Fertigungsprozess sind grundlegende Kenntnisse zu bestehenden Abhängigkeiten für die Qualität und Zuverlässigkeit von entscheidender Bedeutung. Die klassische Prozesskette zur Herstellung mechatronisch integrierter Baugruppen in der LDS-Technologie wird mit einem Fokus auf die spezifischen Aspekte der Qualitätssicherung in den folgenden Abschnitten eingehend beschrieben.

2.1 Prozessschritte und Qualitätssicherung in der Herstellung von LDS-MID

Der Prozessablauf zur Herstellung mechatronisch integrierter Baugruppen in der LDS-Technologie lässt sich, wie in Bild 2 dargestellt, in vier aufeinanderfolgende Schritte unterteilen. Auf die Fertigung der Grundkörper im Spritzgießverfahren folgen die Laserstrukturierung und die chemische Metallabscheidung zur selektiven Metallisierung. Mit Verfahren der Aufbau- und Verbindungstechnik werden im abschließenden Prozessschritt elektronische Bauelemente auf die MID-Schaltungsträger montiert.

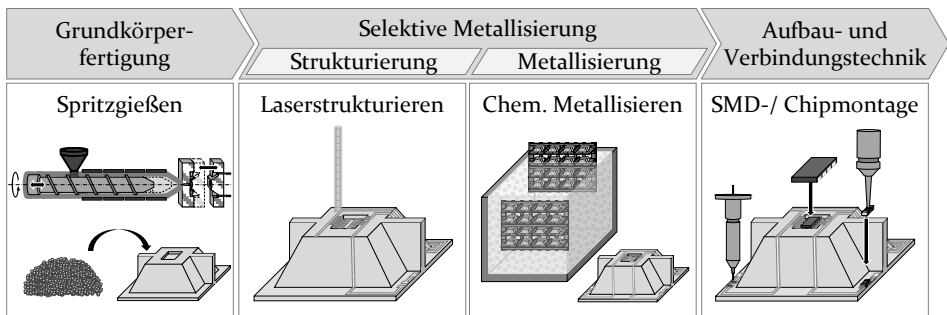


Bild 2: Prozessablauf zur Herstellung von LDS-MID

Die für die MID-Technologie charakteristische individuelle Applikationsgestaltung und die mit mehr als hundert kommerziell verfügbaren LDS-Kunststoffen [11] große Vielfalt an unterschiedlichen Substratmaterialien erfordern eine produktspezifische Auslegung der Fertigungsprozesse. Besondere Herausforderungen ergeben sich dabei durch die interdisziplinäre sowie oftmals auch auf verschiedene Fertigungspartner verteilte Wertschöpfungskette. Für die Produktqualität sind zusätzlich zur Beherrschung der Einzelprozesse weitreichende Kenntnisse und ein geschärftes Bewusstsein hinsichtlich der Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Fertigungsschritten ausschlaggebend. Um mögliche Auswirkungen auf die Gesamtbaugruppe zu berücksichtigen, bedarf die Qualitätssicherung in der Herstellung von LDS-MID demnach stets einer prozessübergreifenden Betrachtung.

2.1.1 Spritzgießen

Im ersten Prozessschritt wird der Grundkörper aus einem laserdirektstrukturierbaren, typischerweise thermoplastischen Kunststoff mittels Einkomponentenspritzgießen gefertigt. Dabei wird der LDS-fähige Kunststoff in Form von Granulat über einen Einfülltrichter der Schnecke zugeführt und von dieser durch Rotation zum Spritzgießwerkzeug befördert. Durch die entstehende Friktion und das Beheizen des Schneckenzyinders plastifiziert der Kunststoff im Förderprozess und sammelt sich schließlich als Schmelze im Schneckenorraum. Ist das erforderliche Dosiervolumen erreicht, wird das geschlossene Werkzeug und das Spritzaggregat mit der Düse zur Angussbuchse gefahren. Unter hohem Druck wird die Schmelze anschließend während der Einspritzphase über eine Düse und den Angusskanal in den formgebenden Hohlraum des Spritzgießwerkzeugs gedrückt, bis die Kavität fast vollständig mit Schmelze gefüllt ist. Während der Nachdruckphase wird zur Kompensation der Materialschrindung im Abkühlprozess weitere Schmelze mit reduziertem Druck nachgeführt. Sobald die Schmelze im Anguss erstarrt ist und somit keine Masse mehr in die Kavität gelangen kann, ist die Nachdruckphase abgeschlossen. Nach Ablauf einer definierten Kühlzeit wird das Spritzgießwerkzeug in der Trennebene geöffnet und das erkaltete und ausreichend stabile Formteil über Auswerfer entformt. In Bild 3 ist der Spritzgießprozess schematisch dargestellt. [12][13]

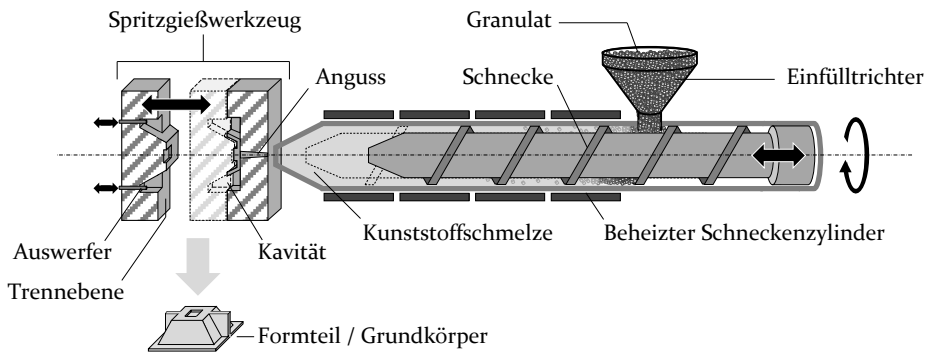


Bild 3: Schematische Darstellung des Spritzgießprozesses

Für die Qualität und Zuverlässigkeit von LDS-MID ist die Beschaffenheit des Grundkörpers von zentraler Bedeutung. Gerade in Bereichen des Schaltungslayouts können unerwünschte Oberflächeneigenschaften des Kunststoffkörpers in den weiteren Prozessschritten Fertigungsfehler verursachen oder zu Ausfällen im Gebrauch der Baugruppe führen. Bereits bei der Auslegung von Bauteil und Spritzgießwerkzeug sind potenzielle Schwachstellen, vor allen Dingen in Funktionsbereichen, durch konstruktive Maßnahmen wie die Gestaltung des Angussystems oder die Positionierung der Auswerfer zu vermeiden. Durch den Einsatz geeigneter Simulationswerkzeuge lassen sich frühzeitig Erkenntnisse zum Füllverhalten, der resultierenden Füllstofforientierung im Bauteil oder der Materialschwindung gewinnen. Im Sinne einer präventiven Qualitätssicherung unterstützen diese Erkenntnisse sowohl die Bauteilkonstruktion als auch die Wahl geeigneter Verarbeitungsparameter.

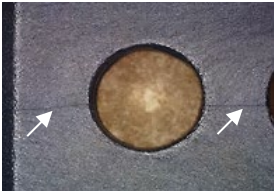
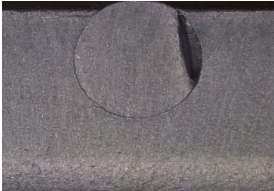
Um die Erzeugung des Leiterbildes in den Folgeprozessen nicht durch Verunreinigungen auf der Bauteiloberfläche zu beeinträchtigen, ist im Spritzgießprozess auf die Verwendung von silikonbasierten Trennmitteln und Schmierstoffen zu verzichten. Des Weiteren sind in regelmäßigen Reinigungsintervallen etwaige Material- und Schmutzablagerungen am Spritzgießwerkzeug sorgfältig zu entfernen. Zur Vermeidung von Verunreinigungen durch Körperfette empfiehlt sich beim manuellen Bauteilhandling das Tragen fussel freier Handschuhe.

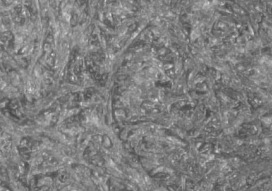
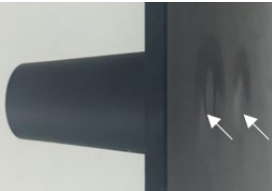
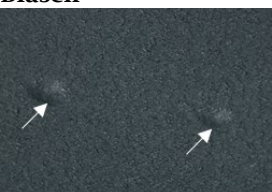
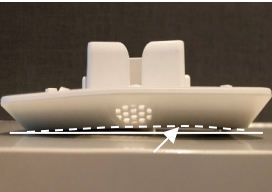
Ein wesentliches Kriterium in Bezug auf die Qualitätssicherung nach dem Spritzgießprozess ist die Maßhaltigkeit der spritzgegossenen Grundkörper. Zur Kontrolle können diverse Messmittel wie beispielsweise Messschieber, Bügelmessschrauben oder Koordinatenmessgeräte eingesetzt werden. Zu beachten ist jedoch der Zeitpunkt, zu dem die Maßhaltigkeit geprüft wird.

Durch das material-, geometrie- und prozessabhängige Schwindungsverhalten des Kunststoffes kann sich die Form des Bauteils nach dem Spritzgießprozess verändern [14]. Aus diesem Grund ist auch eine Zwischenlagerung der spritzgegossenen Bauteile von mindestens 24 Stunden vor der weiteren Laserbearbeitung empfehlenswert. Die durch Nachkristallisationseffekte besonders bei teilkristallinen Thermoplasten verursachte Nachschwindung kann durch einen Tempersschritt nach dem Spritzgießen erheblich beschleunigt werden [15].

Eine sorgfältige optische Prüfung der spritzgegossenen Bauteile ist von besonderer Bedeutung und sollte unter Einsatz geeigneter Lichtmikroskope erfolgen. Alternativ kann sich bei einer Serienfertigung in größerer Stückzahl auch die Implementierung einer Automatischen Optischen Inspektion (AOI) anbieten. Anhand von exemplarischen Fehlerbildern werden in Tabelle 1 qualitäts- und zuverlässigkeitsbeeinträchtigende Effekte nach dem Spritzgießprozess aufgeführt sowie auf die Ursachen und Möglichkeiten ihrer Vermeidung hingewiesen.

Tabelle 1: Fehlerbilder nach dem Spritzgießen sowie potenzielle Ursachen und Maßnahmen [13][14][16][17]

Fehlerbild	Ursache	Maßnahme
Binde-/ Fließnaht 	Unzureichendes Verschmelzen beim Aufeinandertreffen der Fließfronten von mind. zwei Masseströmen	▪ Einspritzgeschwindigkeit erhöhen ▪ Werkzeugtemperatur erhöhen ▪ Zylindertemperatur erhöhen ▪ Nachdruck erhöhen ▪ Anschnitte verlegen ▪ Wanddickenverhältnisse optimieren
Schallplatteneffekt 	Reduzierter Formmassefluss, durch den die wandnahe Schicht einfriert und von heißer Schmelze aus dem Inneren der Fließfront überströmt wird	▪ Einspritzgeschwindigkeit erhöhen ▪ Zylindertemperatur erhöhen ▪ Werkzeugtemperatur erhöhen ▪ Nachdruck erhöhen ▪ Geringe Fließquerschnitte vermeiden ▪ Angusskanal vergrößern
Auswerfermarkierung 	Zu hohe Flächenpressung beim Auswerfen eines meist noch nicht genügend erstarrten Formteils	▪ Nachdruck reduzieren ▪ Nachdruckzeit reduzieren ▪ Abkühlzeit verlängern ▪ Werkzeugtemperatur reduzieren ▪ Entformungsschrägen optimieren ▪ Auswerfer vergrößern

Feuchtigkeitsschlieren 	Entstehender Wasserdampf beim Aufschmelzen des Kunststoffes aufgrund zu hoher Feuchtigkeit des Granulats	▪ Granulat ausreichend vortrocknen / Restfeuchtegehalt kontrollieren ▪ Verweilzeit des Granulats im Materialtrichter reduzieren
Glasfaserschlieren 	Zu schnelles Erstarren von Schmelze mit Glasfasern an der Werkzeugoberfläche	▪ Einspritzgeschwindigkeit erhöhen ▪ Werkzeugtemperatur erhöhen ▪ Zylindertemperatur erhöhen ▪ Nachdruck erhöhen ▪ Anspritzposition verlegen
Gratbildung 	Austritt von Schmelze aus der Kavität, v. a. bei niedrigviskosen Formmassen in der Trennebene sowie an Auswerfern, Entlüftungsstellen, Einsätzen etc.	▪ Schließkraft erhöhen ▪ Einspritzgeschwindigkeit reduzieren ▪ Früheres Umschalten auf Nachdruck ▪ Nachdruck reduzieren ▪ Zylindertemperatur reduzieren ▪ Werkzeugtemperatur reduzieren
Einfallstellen 	In Masseanhäufungen auftretende Schwindung, die in der Nachdruckphase aufgrund bereits erstarrter Bereiche nicht kompensiert werden kann	▪ Nachdruck erhöhen ▪ Nachdruckzeit verlängern ▪ Werkzeugtemperatur reduzieren ▪ Zylindertemperatur reduzieren ▪ Angussquerschnitt vergrößern ▪ Wanddicken/Rippen-Verhältnis optimieren
Blasen 	Bildung von Gasen im Zuge einer therm. Schädigung (Molekülabbau, Zersetzung) des Kunststoffes bei hohen Verarbeitungstemperaturen	▪ Zylindertemperatur reduzieren ▪ Verweilzeit der Masse im Zylinder durch kleineren Zylinderdurchmesser reduzieren ▪ Schnecke mit geringerer Kompression verwenden
Verzug 	Unterschiedliches Schwindungspotenzial verschiedener Formteilbereiche	▪ Nachdruck und Nachdruckzeit reduzieren ▪ Werkzeugtemperatur erhöhen ▪ Einspritzgeschwindigkeit erhöhen ▪ Zylindertemperatur erhöhen ▪ Werkzeugtemperierung optimieren

2.1.2 Laserstrukturieren

Mit dem Laser wird im zweiten Prozessschritt das Schaltungslayout anhand vorgegebener CAD-Daten (Computer-Aided Design) auf der Oberfläche des Grundkörpers strukturiert. Zum Einsatz kommt hierzu ein gepulster Infrarotlaser mit einer Wellenlänge von 1.064 nm. Durch die Strahlungsenergie wird das im Kunststoff eingebettete LDS-Additiv aktiviert. Hierbei werden einerseits geringe Mengen metallischer Keime freigesetzt, die eine nachfolgende, selektive Metallabscheidung an den prozessierten Flächen katalysieren, und andererseits durch einen oberflächlichen Materialabtrag die Voraussetzungen für eine haftfeste Verbindung zwischen Kunststoff und Metallisierung geschaffen. [4][5][6][18][19][20][21]

Die Freisetzung der metallischen Keime erfolgt durch eine laserinduzierte Spaltung von anorganischen Metallverbindungen, welche in Form des LDS-Additivs feinstverteilt als nichtleitende Partikel im Kunststoff vorliegen. In der industriellen Praxis handelt es sich bei diesen Metallverbindungen überwiegend um Mischoxide aus zwei Metallen, die der Kristallstruktur der Spinelle entsprechen. Als besonders geeignete Verbindung hat sich Kupfer-Chrom-Spinell (CuCr_2O_4) erwiesen. Neben ihrer thermischen und chemischen Beständigkeit zeichnen sich die verwendeten Spinelle für den LDS-Prozess durch ihre Unlöslichkeit in wässrigen oder organischen Lösungsmitteln aus. Der Mechanismus der Freisetzung metallischer Keime aus der in den Spinellen vorliegenden oxidischen Bindung basiert auf plasmaähnlichen Zuständen, die während des Laserprozesses lokal für Sekundenbruchteile vorherrschen und die erforderlichen Elektronen zur Reduktion des oxidisch gebundenen Metalls aus der angeregten umgebenden Polymermatrix bereitstellen. Am Beispiel von Kupfer-Chrom-Spinell werden auf diese Weise Spuren von metallischem Kupfer freigesetzt. [4][5][6][18][19][20][21][22]

Der Materialabtrag an der Polymeroberfläche beruht auf einer photochemischen Ablation sowie einer Relaxation. Die Strahlungsenergie wird von den Polymermolekülen absorbiert und versetzt diese in Schwingung. Die Anregung der Elektronen führt im Falle der photochemischen Ablation beim Erreichen einer Mindestenergie dazu, dass die Bindungen zwischen den Molekülketten aufgebrochen werden. Gleichzeitig kommt es aufgrund der Relaxation in einem Sublimationsprozess zum thermischen Verdampfen des Materials. Bei Verwendung modifizierter Polymere mit nicht oder nur schwer ablatierbaren Füllstoffen entstehen durch den Polymerabtrag um diese herum Kavernen und Hinterschneidungen, die eine haftfeste

Verankerung der Metallschicht an der mikrorauen Kunststoffoberfläche ermöglichen. [4][5][18][19][20][21][23] In Bild 4 ist der Prozess der Laserstrukturierung schematisch dargestellt.

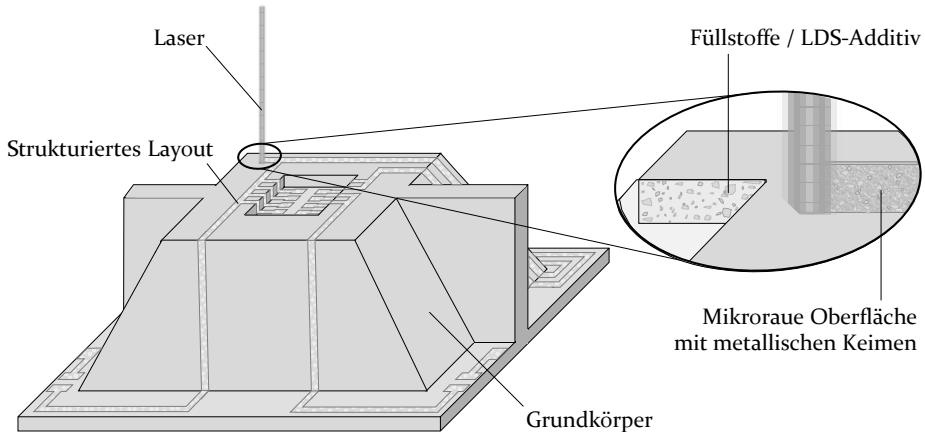


Bild 4: Schematische Darstellung der Laserstrukturierung

Eine grundlegende Voraussetzung für eine fehlerfreie Strukturierung ist die Sauberkeit der Prozessflächen des Bauteils. Vor der Laserbearbeitung sind daher etwaige Verunreinigungen an den zu strukturierenden Oberflächen gründlich zu beseitigen. Als Produktionsumgebung eignet sich ein Sauberraum mit konstanter Temperatur und Luftfeuchtigkeit. Verunreinigungen durch das Personal sind bei manuellen Arbeitsabläufen durch entsprechende Arbeitskleidung zu vermeiden.

Da das Strukturierungsergebnis maßgeblich von den verwendeten Laserparametern abhängt, kommt der applikationsspezifischen Festlegung der zentralen Prozessgrößen eine entscheidende Bedeutung zu. Im Vordergrund stehen hierbei die Laserleistung (P), die Pulswiederholfrequenz (f), die Geschwindigkeit (v) sowie der Hatchabstand. Dieser definiert die Distanz zwischen den Füllvektoren, die bei der Transferierung eines CAD-Layouts in Strukturierungsdaten zusätzlich zu den Layoutkonturen generiert werden und als Strukturierungspfade die Laserfokusbewegung auf der Bauteiloberfläche vorgeben. Eine Eingrenzung geeigneter Parametereinstellungen ist an erster Stelle in Abhängigkeit des jeweiligen Substratmaterials ratsam. In der Regel wird hierzu bei der erstmaligen Verwendung eines LDS-Materials anhand eines Parameterscreenings das Abscheideverhalten und die resultierenden Schichteigenschaften mittels einer Testmetallisierung beurteilt [24]. Neben dem Substratmaterial sind bei der Parameterwahl zusätzlich die minimale Strukturbreite, das abzuschneidende Schichtsystem, die Substratgeometrie hinsichtlich der Einfallswinkel

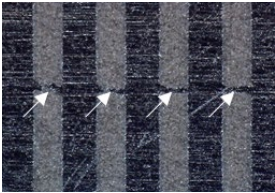
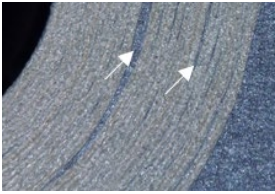
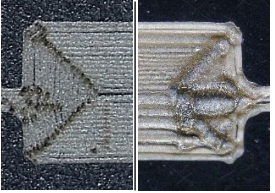
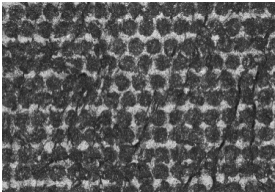
des Lasers auf den Prozessflächen sowie nachfolgende Verfahren der Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) und der geplante Einsatzbereich der Anwendung zu berücksichtigen. Erste Anhaltspunkte für material-spezifische Parametersätze und weitere hilfreiche Hinweise zu Datenaufbereitung und Prozesseinstellungen für den Strukturierungsprozess stellt die LPKF Laser & Electronics AG im entsprechenden Datenblatt [25] und Leitfaden [26] zur Verfügung.

Um die Gefahr anlagenbedingter Qualitätsunterschiede zu minimieren, ist eine regelmäßige Überprüfung der Laserleistung empfehlenswert. Für einen Abgleich mit einem externen Leistungsmessgerät bietet sich ein Bolometer an, dessen Messprinzip auf der strahlungsinduzierten Erwärmung eines temperaturempfindlichen Widerstands in einer Brückenschaltung beruht [27].

Nach erfolgter Laserstrukturierung ist zur Sicherung der Qualität im Herstellungsprozess eine optische Kontrolle durchzuführen. Hierzu sollten geeignete Lichtmikroskope zur Verfügung stehen. Die Begutachtung der Strukturierungsergebnisse durch erfahrene Prüfer ermöglicht es, die Weiterverarbeitung fehlerhafter Bauteile in den Folgeprozessen zu verhindern und Maßnahmen zur Fehlerbeseitigung einzuleiten. Ergänzend zur optischen Prüfung der Bauteile kann eine Topografie- und Rauheitsmessung an den strukturierten Bereichen vorgenommen werden. Um die Oberflächen hierbei nicht zu beschädigen, ist von einem Einsatz taktiler Messverfahren abzuraten. In Tabelle 2 sind typische Fehlerbilder nach dem Laserstrukturieren mit Angabe der jeweiligen Ursachen und möglicher Gegenmaßnahmen dargestellt.

Tabelle 2: Fehlerbilder nach dem Laserstrukturieren sowie potenzielle Ursachen und Maßnahmen

Fehlerbild	Ursache	Maßnahme
Layoutversatz 	Fehlerhafte Bauteilpositionierung bzw. Toleranzkette Bauteil – Aufnahme – Laserprozess	▪ Bauteilaufnahme optimieren ▪ Verwendung eines Vision-Systems (führt zu erhöhten Taktzeiten)

Lokale Fehlstellen 	Abschattung des Laserstrahls durch Verunreinigungen, Haare, Staub o. ä.	▪ Bauteile gründlich reinigen ▪ Vorkehrungen zur Vermeidung von Verunreinigungen prüfen und ggf. optimieren
Unterbrochene Flächenstruktur 	Unzureichende Überlappung der einzelnen Laserpulse	▪ Laserparameter anpassen (Tendenz: $f \uparrow$, $v \downarrow$) ▪ Hatchabstand verringern
Verbrennungen / Wulstbildung 	Thermische Überlastung durch zu hohen lokalen Energieeintrag des Lasers	▪ Laserparameter anpassen (Tendenz: $P \downarrow$, $f \downarrow$, $v \uparrow$) ▪ Hatchabstand erhöhen ▪ Füllvektoren verlängern ▪ Korrekte Fokusslage prüfen
Schwache Strukturen 	Unzureichender Energieeintrag des Lasers	▪ Laserparameter anpassen (Tendenz: $P \uparrow$, $f \uparrow$, $v \downarrow$) ▪ Hatchabstand verringern ▪ Laser-Einfallwinkel prüfen ▪ Korrekte Fokusslage prüfen

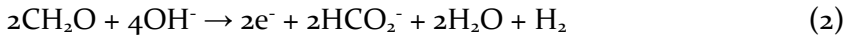
2.1.3 Metallisieren

Die selektive Metallisierung der zuvor strukturierten Bereiche des Grundkörpers erfolgt im dritten Prozessschritt. Bei LDS-Bauteilen hat sich der Schichtaufbau Kupfer-Nickel-Gold (Cu-Ni-Au) als Standard etabliert. Da die Kunststoffe keine elektrisch leitenden Eigenschaften aufweisen, lassen sich die zur Metallabscheidung benötigten Elektronen zunächst nicht galvanisch über äußere Stromquellen bereitstellen. Die Metallisierung erfolgt daher in chemisch-reduktiven Metallisierungsbädern, welche sich im Wesentlichen aus einer Metallsalzlösung, einem Komplexbildner, einem Reduktionsmittel sowie Stabilisatoren im stark alkalischen wässrigen Medium zusammensetzen. Auf den aktivierten Flächen des

Grundkörpers scheidet sich in einer Redox-Reaktion metallisches Kupfer aus den im Bad vorhandenen Kupferionen ab:



Die erforderlichen Elektronen werden vom Reduktionsmittel bereitgestellt. Für die Kupferabscheidung kommt hierfür üblicherweise Formaldehyd (CH_2O) zum Einsatz:



Die Stabilisatoren verhindern in richtiger Dosierung eine unkontrollierte Reduktion im Metallisierungsbad und sorgen für eine gezielte Reaktion auf den aktivierten Substratoberflächen beziehungsweise auf der bereits abgeschiedenen Metallisierung. Durch laterales Wachstum bildet sich dann ausgehend von den im Laserprozess freigelegten katalytisch wirksamen Kupferpartikeln auf den strukturierten Bereichen eine geschlossene Metallschicht. [28][29][30][31] Eine schematische Darstellung der chemisch-reduktiven Kupfermetallisierung ist in Bild 5 zu sehen.

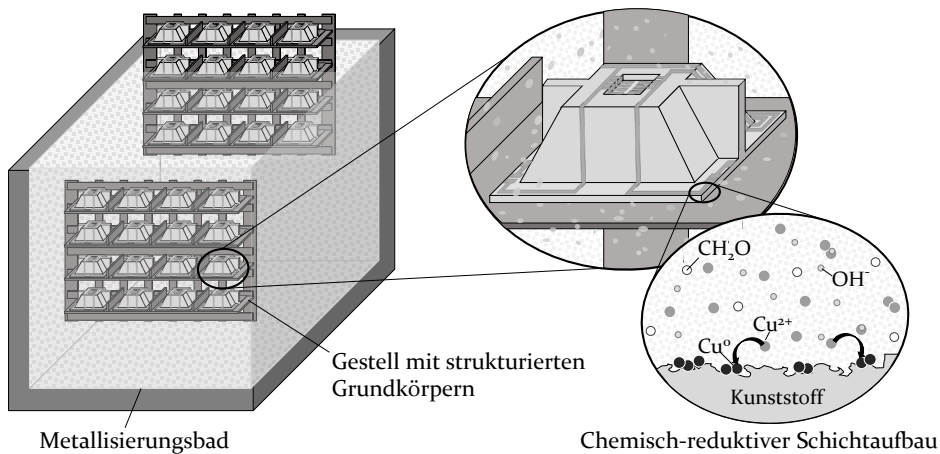


Bild 5: Schematische Darstellung der chemischen Kupfermetallisierung

Mit einer Abscheiderate von etwa fünf Mikrometern pro Stunde erfolgt der chemisch-reduktive Schichtaufbau verhältnismäßig langsam. Für die LDS-Technologie typische Kupferschichtdicken beschränken sich daher aus wirtschaftlichen Gründen auf $3\text{ }\mu\text{m}$ bis maximal $15\text{ }\mu\text{m}$. Sind anwendungsbedingt höhere Schichtdicken gefordert, kann die chemisch-reduktiv abgeschiedene Kupferschicht im galvanischen Verfahren verstärkt werden. Hierzu ist allerdings die erforderliche Ankontaktierung der metallisierten

Strukturen zu berücksichtigen. Unter Umständen sind im Layout Opferstrukturen zur Kontaktierung der eigentlichen funktionellen Leiterbahnen vorzusehen, die nach der galvanischen Metallisierung mechanisch oder mittels Laser entfernt werden müssen. [28][32][33]

Auf die Kupferschicht folgend wird im weiteren Metallisierungsprozess in vergleichbaren Schichtdicken Nickel ebenfalls chemisch-reduktiv und als Endschicht Gold im Sudverfahren in einer Dicke von etwa $0,1\text{ }\mu\text{m}$ abgeschieden. Bei dem Sud- oder auch Tauchverfahren geht ein unedles Metall in einem Elektrolyten mit Ionen eines edleren Metalls in Lösung, wobei die edleren Metallionen reduziert werden. Sobald die Oberfläche vollständig mit dem edleren Metall überzogen ist und damit kein weiteres unedles Metall in Lösung gehen kann, stoppt die Abscheidung. Die Goldoberfläche eignet sich für viele Folgeprozesse der Aufbau- und Verbindungstechnik wie dem Löten und Leitleben von oberflächenmontierbaren Bauelementen (Surface Mount Device, SMD) oder der Chipmontage mittels Drahtbonden. Die Nickelschicht stellt eine Diffusionsbarriere zwischen Kupfer und Gold dar und dient als mechanischer Schutz. [28][29]

Der Metallisierungsprozess umfasst eine Reihe aufeinanderfolgender Einzelschritte. Vor dem Schichtaufbau in den Metallisierungsbädern werden die strukturierten Bauteile einer Reinigung unterzogen, in der die als Debris bezeichneten Rückstände und Ablagerungen der Laserbearbeitung entfernt werden. Als geeignete Verfahren können hierfür eine Wasserstrahlreinigung, eine nasschemische Reinigung mit Ultraschallunterstützung oder eine CO₂-Schneestrahlnreinigung genutzt werden [34]. Auf die Reinigung folgt die chemisch-reduktive Abscheidung der Kupferschicht, die je nach Metallisierungssystem in einem ein- oder zweistufigen Prozess vollzogen werden kann. In einem Mikroätzbad wird anschließend die Oberfläche der abgeschiedenen Kupferschicht von Oxiden befreit und zur Begünstigung der nachfolgenden Palladium-Bekeimung angeraut. Die mit den Palladium-Keimen aktivierte Kupferschicht bietet die erforderlichen Voraussetzungen für das Anspringen der chemisch-reduktiven Nickelabscheidung im nächsten Prozessbad. Nach der Abscheidung der Goldschicht im Sudverfahren endet der Metallisierungsprozess mit dem Heißspülen und Trocknen der Bauteile. Der gesamte Metallisierungsablauf einschließlich der Spülvorgänge nach den einzelnen Prozessbädern ist in Bild 6 dargestellt. [28][29][35]

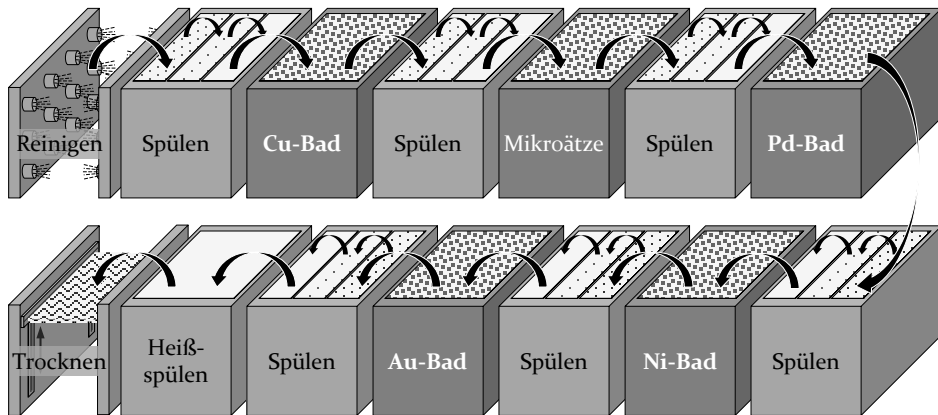


Bild 6: Typischer Prozessablauf für die Metallisierung von LDS-MID

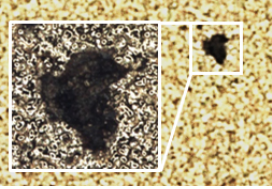
Je nach Größe und Geometrie werden die Bauteile entweder in einer Trommel oder in geeigneten Gestellen prozessiert. Bei einer Metallisierung im Gestell sollten entsprechende Befestigungsmöglichkeiten bereits in der Designphase der Applikation berücksichtigt werden. Die Metallisierung in einer Trommel bietet sich üblicherweise bei kleinen Bauteilen als kostengünstige Variante an. Um Metallisierungsfehler durch ein Aneinanderhaften von Bauteilen zu vermeiden, sollten konstruktive Vorkehrungen wie Bumps oder Dome vorgesehen werden. Beschädigungen der Leiterbahnen durch das Zusammenstoßen und Aneinanderreiben von Bauteilen lassen sich an kritischen Stellen durch vertiefte Strukturen verhindern. Schöpfende Bauteilgeometrien sind nach Möglichkeit zu vermeiden, da sich einerseits im Prozess entstehende Wasserstoffblasen in den Kavitäten festsetzen und damit das Metallisierungsergebnis beeinträchtigen können und andererseits Prozesschemikalien verschleppt werden können. [26][28][29]

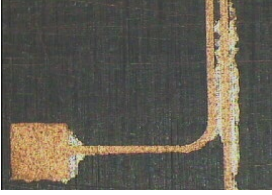
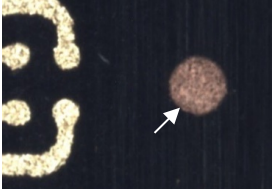
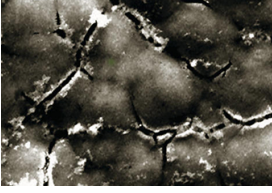
Die Metallisierungsqualität kann die Lebensdauer der mechatronisch integrierten Baugruppe wesentlich beeinflussen [10][29]. Der Prüfung der Bauteile nach dem Metallisierungsprozess kommt daher im Rahmen der fertigungsbegleitenden Qualitätssicherung große Bedeutung zu. Neben einer sorgfältigen optischen Prüfung empfiehlt es sich, qualitätsbestimmende Parameter wie die Schichtdicken, die Oberflächenrauheit und die Metallisierungshaftfestigkeit sowie elektrische Eigenschaften wie den spezifischen Leiterbahnwiderstand, den Isolationswiderstand, die Spannungsfestigkeit und die Stromtragfähigkeit regelmäßig zu bestimmen [29].

In Tabelle 3 sind typische Fehlerbilder dargestellt, auf die bei der manuellen oder automatischen optischen Inspektion zu achten ist. Die jeweils angegebenen potenziellen Ursachen und Maßnahmen beschränken sich ausschließlich auf den Prozessschritt der Metallisierung. Nicht immer haben

jedoch Fehler, die nach der Metallisierung sichtbar werden, ihren Ursprung im Metallisierungsprozess. Oftmals sind fehlerhafte Metallisierungen die Konsequenz unerkannter Mängel aus den vorgelagerten Prozessschritten. So können beispielsweise lokale Fehlstellen in Leiterbahnen eine Folge von Blasen an der Bauteiloberfläche nach dem Spritzgießen oder von Abschattungen durch Fremdpartikel während der Laserstrukturierung sein. Vor allem im Hinblick auf verteilte Wertschöpfungsketten und die Klärung von Verantwortlichkeiten für Produktionsfehler unterstreicht dieser Gesichtspunkt die hohe Relevanz von Qualitätskontrollen im Sinne von Quality Gates nach jedem Prozessschritt.

Tabelle 3: Fehlerbilder nach der Metallisierung sowie potenzielle Ursachen und Maßnahmen

Fehlerbild	Ursache	Maßnahme
Lokale Fehlstellen 	Lokale Störung bzw. Unterbrechung der chemisch-reduktiven Metallabscheidung	- Reinigungsprozess optimieren - Badaktivität erhöhen (Tendenz: Temperatur ↑, Luftzufuhr ↓) - Permanente Badumwälzung und Bauteilbewegung sicherstellen - Aneinanderreiben von Bauteilen verhindern
Fremdmetallisierung 	Metallabscheidung auf unstrukturierten Oberflächen	- Reinigungsprozess optimieren - Badaktivität reduzieren (Tendenz: Temperatur ↓, Luftzufuhr ↑) - Spülvorgänge zwischen den Prozessbädern optimieren
Ausfransungen 	Unkontrollierte Metallisierung über die Layoutkonturen hinweg	- Reinigungsprozess optimieren - Badaktivität reduzieren (Tendenz: Temperatur ↓, Luftzufuhr ↑) - Spülvorgänge zwischen den Prozessbädern optimieren
Inhomogenität 	Ungleichmäßige Metallabscheidung auf den strukturierten Oberflächen	- Reinigungsprozess optimieren - Permanente Badumwälzung und Bauteilbewegung sicherstellen - Badaktivität der einzelnen Prozessbäder prüfen

Über-Palladinierung 	Nickelabscheidung an Palladium-Keimen auf unstrukturierten Flächen (ohne Kupfer- metallisierung)	▪ Prozesszeit und Temperatur im Palladium-Bad reduzieren ▪ Spülprozess nach Palladium-Bekeimung intensivieren ▪ Ggf. Nickel-Bad erneuern (verschleppte Palladium-Keime)
Passivierung 	Oxidation der Metal- lisierung während des Bauteilhandlings	▪ Zeitweise Entnahme der Bauteile aus den Prozessbädern (z. B. zur Messung von Schichtdicken) vermeiden ▪ Ätzprozess nach der Kupfer-metallisierung optimieren
Black-Pad-Effekt [36] 	Säurekorrosion der Nickelschicht im Goldbad	▪ Abscheideparameter prüfen (v. a. Phosphorgehalt und ph-Wert) ▪ Badalter (MTO, Metal Turnover) begrenzen

2.1.4 Montage elektrischer Bauelemente

Die hergestellten Schaltungsträger lassen sich durch die Montage elektronischer Bauelemente zu Baugruppen komplettieren. Grundsätzlich finden hierfür die aus der konventionellen Flachbaugruppenfertigung bekannten Verfahren und Medien der Aufbau- und Verbindungstechnik Einsatz. Für eine Beurteilung der Qualität von Prozessen oder die Prüfung von Kriterien zur Abnahme der gefertigten Baugruppen bilden folglich die bestehenden anerkannten Standards, Richtlinien und Normen die Grundlage. Dominierte AVT-Verfahren in der industriellen MID-Fertigung sind im Speziellen das Reflowlöten oder Leitleben zur SMD-Montage sowie das Aluminium-Dünndrahtbonden zur Chipmontage [7][8]. Bedingt durch die typischerweise räumliche Gestaltung der Schaltungsträger, die verwendeten Substratmaterialien sowie die charakteristischen Eigenschaften der selektiven Metallisierung können allerdings Restriktionen gegenüber konventionellen Aufbautechnologien bestehen und Modifikationen der klassischen Prozesse erforderlich sein. Die besonderen Herausforderungen, die für die Herstellung zuverlässiger LDS-MID im Bereich der AVT zu berücksichtigen sind, werden im Folgenden für die SMD- sowie Chipmontage erläutert. [37]

Die Montage von SMD umfasst den Auftrag des Verbindungsmediums (Lot oder Leitlebster), die Bestückung der Bauelemente und das abschließende Lötten bzw. Aushärten des Klebstoffes. Die Wahl des Verbindungsmediums ist im Hinblick auf die erforderlichen Verarbeitungstemperaturen stets auf das gewählte Substratmaterial abzustimmen, um eine Schädigung des Schaltungsträgers im Verarbeitungsprozess auszuschließen [38]. Der Einsatz einer Standardlotlegierung aus Zinn-Silber-Kupfer (z. B. Sn96,5 Ag3,0Cu0,5) mit einer Liquidustemperatur von 220 °C ist in Kombination mit Hochtemperatur-Thermoplasten wie beispielsweise Liquid Crystal Polymer (LCP) möglich. Bei Kunststoffen, die eine geringere Temperaturbeständigkeit aufweisen, kann auf niedrigschmelzende Lote ausgewichen werden. So lässt sich beispielsweise bei Verwendung einer Zinn-Bismut-Lotlegierung (z. B. Sn42Bi58) mit einer Liquidustemperatur von 138 °C die thermische Belastung des Substratmaterials erheblich verringern.

Ist eine weitere Reduzierung der thermischen Belastung erforderlich, kann auf elektrisch leitende Klebstoffe zurückgegriffen werden. Die Aushärtung von Leitlebsterstoffen erfolgt üblicherweise in einem Temperaturbereich von 80 °C bis 150 °C [39]. Abgesehen von den Verarbeitungstemperaturen sind bei der Wahl des Verbindungsmediums vor dem Hintergrund einer qualitätssicheren Produktion weitere Aspekte zu bedenken. Ohne Verwendung von Lötstopplack muss beim Einsatz von Lotpasten eine weiträumige Benetzung der Metallisierung in Kauf genommen werden. Das Abfließen des Lotes aus der eigentlichen Verbindungszone kann inhomogene Lötstellen mit schlecht ausgebildeten Lötmenisken zur Folge haben und damit die Langzeitzuverlässigkeit der Baugruppe beeinträchtigen [40]. Die durch den Kapillareffekt verursachte Entnetzung kann durch ein angepasstes Design der Anschluss pads mit einem gleitenden Übergang zur Leiterbahn verringert werden [26]. Weiter ist eine Beeinträchtigung etwaiger Folgeprozesse durch Flussmittlrückstände nach dem Lötprozess auszuschließen. Um beispielsweise die Bondbarkeit der Kontaktflächen in der Nähe von Lötstellen sicherzustellen, kann ein Reinigungsschritt im Anschluss an den Lötprozess von Nöten sein. Bei Leitlebsterstoffen besteht weder das Problem des Abfließens aus der Verbindungszone, noch die Gefahr einer Verunreinigung durch Flussmittlrückstände. Auch können prinzipiell lötspezifische Fehler wie Tombstones, Popcorn, Lotkugeln oder Lotbrücken vermieden werden [41]. Grundsätzlich weisen die Verbindungen jedoch geringere mechanische Festigkeiten im Vergleich zu Lötverbindungen auf und stellen aufgrund der ausbleibenden Selbstzentrierung höhere Anforderungen an die Genauigkeit der Bestückssysteme [41].

Zum Auftrag des Verbindungsmediums ist der in der Flachbaugruppenfertigung standardmäßig eingesetzte Schablonendruck nur in Ausnahmefällen geeignet. Aufgrund der in der Regel räumlichen Bauteilgeometrie dominieren im Bereich der MID-Fertigung Dispensverfahren. Ausschlaggebend hierfür ist deren hohe Flexibilität bezüglich der Dosierpositionen. Daneben weisen Dispensverfahren gegenüber Druckverfahren weitere Vorteile wie die flexible Dosierung unterschiedlicher Materialmengen oder die Einsparung von Herstell- und Lagerkosten für layoutspezifische Schablonen auf. Durch den sequentiellen Auftrag und zusätzliche Prozesszeiten für das Verfahren von Substrat und/oder Dispenskopf ist jedoch der Medienauftrag beim Dispensieren gegenüber dem Schablonendruck deutlich zeitintensiver. Je nach Funktionsprinzip erfolgt beim Dispensieren die Dosierung von Lotpaste und Leitkleber aber auch von Fixierkleber, Lötstopplack oder anderen Medien zeit/druck- oder volumengesteuert. Zu den entscheidenden Qualitätsmerkmalen des Medienauftrags zählen die Form und das Volumen des applizierten Mediums sowie dessen Lage. Beeinflusst werden diese Merkmale vor allem von Prozessparametern wie der Nadelgeometrie, der Dosier- und Wartezeit, der Temperatur und dem Dosierwinkel, welche allesamt auf die Eigenschaften der Anlage, des Dosiermediums und des Substrats abzustimmen sind. [38][41]

Die Bestückung von Bauelementen erfordert eine orthogonale Ausrichtung der Prozessfläche zur Fügerichtung des Bestückwerkzeugs. Bei räumlich komplexen MID-Bauteilen, die gemäß der geometrischen Klassifizierung nach [1] den Klassen $n \times 2D$ oder $3D$ zuzuordnen sind, erweitern sich dadurch die Anforderungen an das Bestücksystem hinsichtlich dessen Freiheitsgrade und kinematischen Fähigkeiten. Die verfügbaren $3D$ -fähigen Bestücksysteme unterscheiden sich gemäß ihrem kinematischen Lösungsansatz in zwei Varianten. Bei der ersten Variante verweilt der Schaltungsträger in einer ortsfesten Position, während die Bauelemente durch eine Handhabung des Bestückwerkzeugs lagegerecht zugeführt werden. Bei der alternativen, zweiten Variante wird der Schaltungsträger in seiner Lage so manipuliert, dass die zu bestückende Prozessebene orthogonal zum Bestückwerkzeug ausgerichtet ist, bevor die Bauelemente an den Bestückpositionen abgesetzt werden. Vielfach werden allerdings auch konventionelle SMD-Bestückautomaten in Kombination mit applikationsspezifischen Werkstückträgern zur dreidimensionalen Bestückung genutzt. Die orthogonale Ausrichtung der Prozessflächen zum Bestückwerkzeug wird in diesen Fällen durch eine orientierungsbestimmende Konstruktion der Werkstückträger gewährleistet. Bei räumlichen Schaltungsträgern mit unterschiedlich orientierten Prozessflächen können entweder mehrere

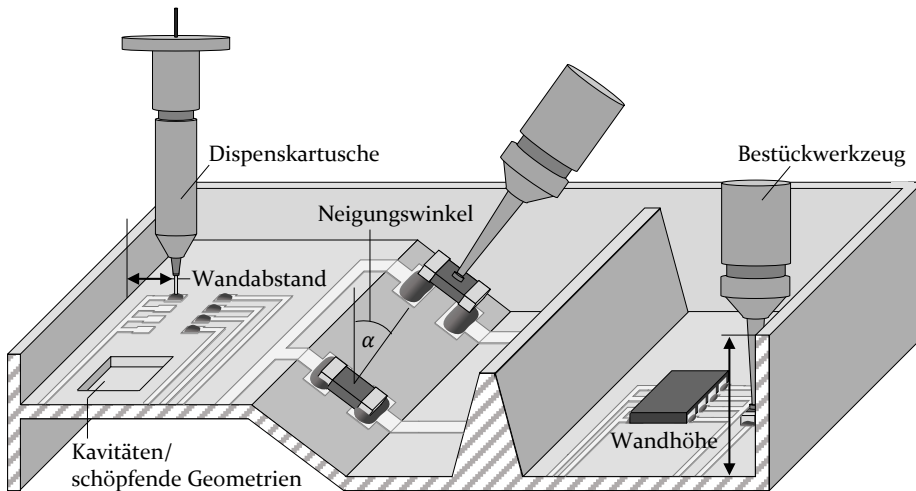
Werkstückträger mit unterschiedlichen Winkellagen oder aber ein Werkstückträger mit veränderbaren Winkellagen eingesetzt werden.

Neben der Fügerichtung gilt es für ein bestückungsgerechtes Design räumlicher Baugruppen auch die Position der Bauelemente auf der Prozessfläche zu berücksichtigen. Im Hinblick auf deren Erreichbarkeit für die Prozesswerkzeuge zur Bestückung sowie zum Dispensieren sind insbesondere Wandhöhen und -abstände kritisch zu prüfen. Eine weitere besondere Anforderung bei der SMD-Montage auf MID-Bauteile stellt die mechanische Fixierung der Bauelemente dar. Vor allem bei großen und schweren Bauelementen mit geringen Kontaktflächen können die Nassklebekräfte in der Lotpaste bzw. im nicht ausgehärteten Klebstoff zu gering sein, um Verschiebungen oder ein vollständiges Abrutschen durch Beschleunigungskräfte während der Baugruppenhandhabung oder bei schrägen Prozessflächen aufgrund ihrer Gewichtskraft zu verhindern. Für eine positionssichere Fixierung der Bauelemente kann unter genannten Umständen ein zusätzlicher Einsatz von Fixierkleber erforderlich sein. [1][38][39][42][43]

Den Abschluss des SMD-Montageprozesses bildet je nach gewähltem Verbindungsmedium entweder das Reflowlöten oder das Aushärten des Leitklebstoffes. Während das Reflowlöten in der klassischen Flachbaugruppenfertigung standardmäßig im Konvektionsverfahren erfolgt, wird im MID-Bereich bevorzugt das Kondensationslöten eingesetzt. Beim Kondensationslöten, welches häufig auch als Dampfphasenlöten (engl. Vapor Phase Soldering) bezeichnet wird, basiert die zum Aufschmelzen der applizierten Lotpaste erforderliche Wärmeübertragung auf der Kondensation von gesättigtem inertem Dampf an der Baugruppe. Gerade für räumliche Baugruppen aus temperatursensiblen Materialien ergeben sich durch dieses Wirkprinzip entscheidende Vorteile gegenüber alternativen Lötverfahren. Die Erwärmung der Baugruppe erfolgt weitestgehend unabhängig von der geometrischen Gestaltung oder von Masseunterschieden gleichmäßig an der gesamten Oberfläche, wobei die maximale Löttemperatur durch die Siedetemperatur des verwendeten Wärmeübertragungsmediums limitiert wird. Einschränkungen ergeben sich lediglich bei schöpfenden Bauteilgeometrien, die sich analog zum Metallisierungsprozess auch beim Kondensationslöten als problematisch erweisen. Neben den Ausschleppverlusten des Wärmeübertragungsmediums kann ein unterbundener Ablauf des Kondensats in Hohlräumen und Taschen zu einer lokalen Verminderung der Wärmeübertragung und damit zu einer ungleichmäßigen Temperaturverteilung führen. [44][45]

Für das thermische Aushärten von Leitlebstoffen werden von den Herstellern materialspezifische Kombinationen aus Härtungstemperaturen und -zeiten vorgegeben. Um die Baugruppen den erforderlichen Verarbeitungskonditionen auszusetzen, können unterschiedliche Anlagentypen verwendet werden. Verglichen mit Umluft-Wärmeschränken und Dampfphasenlötanlagen haben sich in einer Gegenüberstellung verschiedener Alternativen konvektionsbasierte Durchlauföfen durch ihre gute Automatisierbarkeit und ihre hohe Flexibilität bezüglich der Temperaturprofilierung als besonders geeignet erwiesen. [41]

In Bild 7 sind im oberen Bereich zentrale Herausforderungen in der SMD-Montage bei räumlichen mechatronischen Baugruppen schematisch dargestellt. Eine Zuordnung der spezifischen Besonderheiten und Einschränkungen zu den einzelnen Prozessschritten ist im unteren Bereich aufgeführt.



Auftrag Verbindungsmedium	Bestücken	Löten / Leitleben
▪ Schablonendruck i.d.R. nicht geeignet ▪ Erreichbarkeit der Dispenspositionen	▪ Erreichbarkeit der Bestückpositionen / Orthogonale Zuführung der Bauelemente ▪ Verrutschen von Bauelementen	▪ Abschattung (Konvektion) ▪ Unterbundener Ablauf des Kondensats und Medienverschleppung (Kondensation)

Bild 7: Spezifische Besonderheiten und Einschränkungen in der SMD-Montage bei räumlichen mechatronischen Baugruppen in Anlehnung an [38]

Mit dem Einsatz von Chipmontagetechniken auf räumlichen mechatronisch integrierten Bauteilen werden die bestehenden Potenziale der MID-Technologie hinsichtlich höherer Integrationsdichten bei funktionsgerechter Applikationsgestaltung konsequent erweitert. Vor allem im Bereich

MID-basierter Sensoranwendungen werden die damit einhergehenden Möglichkeiten, Halbleiterchips platzsparend und in einer für die Messung optimalen Lage zu positionieren, Packungsdichten durch eine räumliche Anordnung zu erhöhen und Chipmodule mit erweiterter Funktionalität herzustellen, zunehmend genutzt [39][46]. Das am weitesten verbreitete Kontaktierungsverfahren für die Montage ungehäuster Halbleiterchips ist das Drahtbonden [47]. Die oberseitige Kontaktierung der Fügepartner über eine flexible Drahtverbindung erfolgt dabei in einem Mikrokaltpressschweißverfahren unter Einwirkung von Druck, Temperatur und/oder Ultraschall [47]. Grundsätzlich werden beim Drahtbonden zwei Standardmethoden unterschieden. Im Ultraschall (US)-Wedge/Wedge-Verfahren wird die stoffschlüssige Verbindung zwischen Bonddraht und den Anschlussmetallisierungen rein durch Druck und Ultraschalleinwirkung herbeigeführt, wobei sich beide Kontaktstellen keilförmig ausprägen [48]. Im Thermosonic (TS)-Ball/Wedge-Verfahren, bei dem die erste Kontaktstelle die Form einer Kugel annimmt, wird zur Verbindungsherstellung zusätzlich Wärme eingesetzt [47]. Da im MID-Bereich häufig temperaturempfindliche Substratmaterialien mit geringer Wärmeleitfähigkeit verwendet werden und eine lokale Erwärmung der Kontaktstellen bei räumlich komplexen Bauteilen erheblich erschwert wird, ist die Eignung des letztgenannten Verfahrens für die Chipmontage auf MID eingeschränkt [46][49].

Voraussetzungen für einen zuverlässigen Bondprozess sind eine gute Ultraschalleinbringung, ausreichende Schichtdicken und eine geringe Oberflächenrauheit an den Kontaktstellen. Bei einer unzureichenden Fixierung können sich die Ultraschallschwingungen auf die Baugruppe übertragen, wodurch die Verschweißung des Bonddrahts beeinträchtigt wird. Gerade bei räumlichen Bauteilen können aufwendige Halterungen erforderlich sein, um eine ausreichende Fixierung zu gewährleisten. Außerdem weisen die MID-Substratmaterialien im Vergleich zu den glasfaserverstärkten Duroplasten der Leiterplattentechnik typischerweise eine geringere Steifigkeit und Festigkeit auf. Mit steigender Metallisierungsschichtdicke, insbesondere der Nickelschicht, lässt sich jedoch eine abnehmende Abhängigkeit des Drahtbondprozesses von den mechanischen Eigenschaften des thermoplastischen Grundkörpers feststellen. Weiter begünstigt eine geringe Metallisierungsrauheit den Bondprozess. Eine Reduzierung der Oberflächenrauheit, die unter Umständen auch nur lokal an den Bondstellen vorgenommen werden kann, ist mittels angepasster Fertigungsparameter oder zusätzlicher Verfahren zur Planarisierung in Form eines

Stempelprozesses oder einer CO₂-Schneestrahlsbehandlung möglich. Etwaige Auswirkungen auf andere qualitätsbeeinflussende Eigenschaften wie beispielsweise die Metallisierungshaftfestigkeit sind grundsätzlich stets unter Berücksichtigung sämtlicher Anforderungen an die Baugruppe kritisch zu prüfen. [46][49][50]

2.2 Charakteristische Herausforderungen und Einschränkungen für die Qualität und Zuverlässigkeit von LDS-MID

Bedingt durch die verwendeten Materialien und den beschriebenen Fertigungsprozess weisen laserdirektstrukturierte mechatronisch integrierte Baugruppen spezifische Eigenschaften auf, aus denen sich charakteristische Herausforderungen und Einschränkungen im Hinblick auf deren Qualität und Zuverlässigkeit ergeben. Für den erfolgreichen Einsatz der Technologie ist das Bewusstsein um diese Herausforderungen und Einschränkungen eine elementare Voraussetzung. Besonders in Anwendungsbereichen, in denen mechatronische Baugruppen harschen Umgebungsbedingungen ausgesetzt sind und hohe Zuverlässigkeitsanforderungen an Produkte gestellt werden, kann ein fehlendes Verständnis für die jeweiligen Wirkmechanismen und Zusammenhänge schwerwiegende Folgen haben.

2.2.1 Delamination der Metallisierung

Eine zentrale Herausforderung für die Qualität und Zuverlässigkeit LDS-basierter Baugruppen betrifft die Haftfestigkeit der Metallisierung auf dem Kunststoffsubstrat. Eine unzureichende Verbundhaftung kann zur Delamination der Leiterstrukturen von der Grundkörperoberfläche führen und damit den Ausfall der Baugruppe zur Folge haben. Die hohe Relevanz dieser Problematik bestätigt eine von der Forschungsvereinigung Räumliche Elektronische Baugruppen (3-D MID) e. V. beauftragte Studie zur Zuverlässigkeit bei MID [10] aus dem Jahr 2015. Darin führen die befragten Experten die Delamination der Metallisierung als einen der häufigsten Ausfallmechanismen auf und sprechen der Haftfestigkeit als maßgebliches Qualitätsmerkmal der Metallschicht die höchste Bedeutung für die Zuverlässigkeit der Baugruppe zu. Eine exemplarische Aufnahme einer delaminierten LDS-Leiterbahn ist in Bild 8 zu sehen.

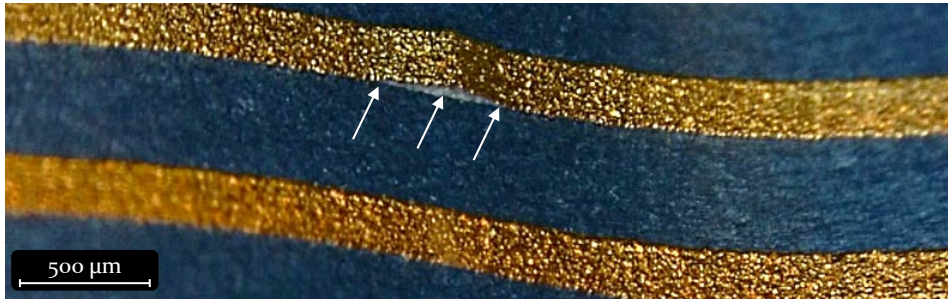


Bild 8: Delaminierte LDS-Leiterbahn

Grundsätzlich können unterschiedliche physikalische, mechanische, thermische und chemische Eigenschaften von Substrat- und Schichtmaterial dazu führen, dass die Verbundpartner in verschiedener Art und Weise auf äußere Einflüsse reagieren. Die Delamination metallisierter Strukturen von ihrer Substratoberfläche wird in diesem Zusammenhang vorwiegend durch thermomechanische Spannungen im Materialverbund hervorgerufen. Als Folge des unterschiedlichen Wärmeausdehnungsverhaltens von Kunststoffsubstrat und Metallisierung werden die Spannungen durch Temperaturbelastungen induziert, denen die Baugruppe in der Fertigung, primär im Lötprozess, oder im späteren Einsatz ausgesetzt ist. Zur Vermeidung von Delaminationserscheinungen ist eine ausreichende Haftung der Metallisierung auf dem Grundkörper entscheidend. Diese ist anwendungsspezifisch unter Berücksichtigung der thermomechanischen Eigenschaften des verwendeten Substratmaterials sowie der für den jeweiligen Fall zu erwartenden Belastungen zu beurteilen. [40][51][52]

Die Haftung zweier Materialien resultiert aus einem komplexen Zusammenspiel einer Vielfalt sich überlappender mechanischer, physikalischer und chemischer Vorgänge. Dabei wirken die verschiedenen Haftmechanismen maßgeblich in den Grenzflächenschichten der Verbundpartner und treten als Widerstand gegenüber einer trennenden Beanspruchung des Verbundes in Erscheinung. Der Zustand einer Grenzflächenschicht, der sich durch den mechanischen Zusammenhalt der beteiligten Phasen auszeichnet, wird als Adhäsion bezeichnet. [53]

Nach [54] lassen sich fünf idealisierte Typen von Grenzflächenschichten unterscheiden, wobei in der Realität üblicherweise Kombinationen mehrerer Typen auftreten. Bild 9 veranschaulicht schematisch die unterschiedlichen Grenzflächenschichten, die im Weiteren näher erläutert werden.

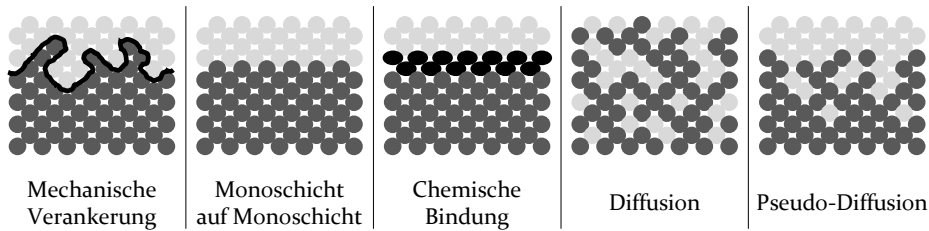


Bild 9: Schematische Darstellung der Grenzflächenschichten zwischen einem Substrat und einer Beschichtung nach [54]

Mechanische Verankerung: Das Modell der mechanischen Verankerung beruht auf formschlüssigen Verbindungen, die aus einem Schichtaufbau in den Kavernen, Hohlräumen und Hinterschneidungen des Grundkörpers resultieren. Bei einer geschlossenen Schicht bestimmen Anzahl, Lage, Form und Größe der Kavernen die resultierende Haftung. Besonders vorteilhaft wirken sich Kavernen aus, die modellgemäß ausgedrückt in Form von Tropfen vorliegen und damit eine Verankerung nach dem sogenannten Druckknopfprinzip [55] ermöglichen. [54][56]

Monoschicht auf Monoschicht: Charakteristisch für diesen Grenzflächenschichttyp ist der abrupte Übergang zwischen den beiden Verbundmaterialien innerhalb weniger Atomlagen. Monolagengrenzschichten entstehen, wenn keine gegenseitige Löslichkeit von Schicht- und Substratmaterial besteht oder eine Verunreinigung des Substrats vorliegt und somit weder eine Diffusion noch eine chemische Bindung der Verbundmaterialien möglich ist. [54]

Chemische Bindung: Eine Verbindungsgrenzflächenschicht entsteht durch chemische Reaktionen von Schicht- und Substratmaterial und weist über mehrere Gitterebenen hinweg eine konstante chemische Zusammensetzung auf. Mit speziellen Beschichtungsparametern, dem Einsatz bestimmter Plasmagase und erhöhten Temperaturen lassen sich gezielte Reaktionen herbeiführen, die intermetallische Phasen, Oxid- oder andere Verbindungen bilden. [54][57]

Diffusion: Eine Diffusionsgrenzflächenschicht ist durch eine Interdiffusionszone mit einem sukzessiven Übergang der chemischen Zusammensetzung und der Gitterstrukturen beider Verbundwerkstoffe gekennzeichnet. Voraussetzung für die Entstehung dieses Grenzflächentyps ist neben einer ausreichenden Erwärmung ein gewisser Grad an gegenseitiger Löslichkeit von Grundwerkstoff und Schichtmaterial. [54]

Pseudo-Diffusion: Eine Pseudo-Diffusionsgrenzflächenschicht bildet sich durch die Implantation von Schichtpartikeln in den Substratwerkstoff. Dabei dringen hochenergetische Ionen oder Neuralatome in Abhängigkeit ihrer Energie bis zu einer bestimmten Tiefe in das Polymer-Gitter ein, wo sie, ohne eine Diffusion einzugehen, steckenbleiben. Dementsprechend setzt die Materialpaarung nicht die Eigenschaft einer gegenseitigen Löslichkeit voraus. [54][57]

Im Falle von LDS-MID weist eine Betrachtung der Grenzflächenschicht zwischen Metallisierung und Kunststoffsubstrat auf die mechanische Verankerung als dominierenden Haftmechanismus hin. Das Schliffbild in Bild 10 zeigt anschaulich die Verzahnung der abgeschiedenen Kupfermetallisierung in den Kavernen, Hohlräumen und Hinterschneidungen der strukturierten Kunststoffoberfläche. Eine entsprechend ausgeprägte Oberfläche des Kunststoffsubstrats begünstigt die Haftung darüber hinaus auch auf weitere Weise. Durch die laserinduzierte Mikrorauheit vergrößert sich mit der Kunststoffoberfläche auch die Grenzfläche zwischen den Verbundpartnern, welche wiederum als potenzielle Wirkfläche für zusätzliche adhäsionsfördernde Mechanismen fungiert. Für die Haftung von Metallschichten auf Polymeren ist in diesem Kontext das Hauptaugenmerk auf die Modelle der grenzflächenenergetischen Wechselwirkungen sowie der elektrostatischen Adhäsion zu richten [52][58].

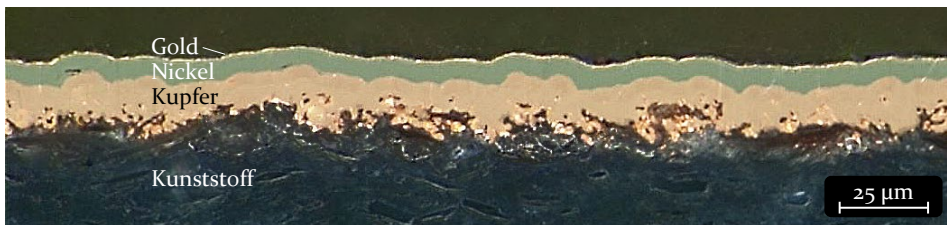


Bild 10: Grenzflächenschicht des Metall-Kunststoff-Verbundes von LDS-MID im Schliffbild

Grundlage für das Adhäsionsmodell der grenzflächenenergetischen Wechselwirkungen ist eine thermodynamische Betrachtung der Benetzung, welche als Ausbreitung einer Flüssigkeit auf der Oberfläche eines Feststoffes zu verstehen ist. Die für die Adhäsion entscheidenden Ober- bzw. Grenzflächenenergien ergeben sich aus dem unterschiedlichen Potenzial zwischen den Molekülen im Inneren eines Substrats und den Molekülen an der Substratoberfläche. Die jeweils wirkenden Bindungskräfte sind schematisch in Bild 11 (links) dargestellt.

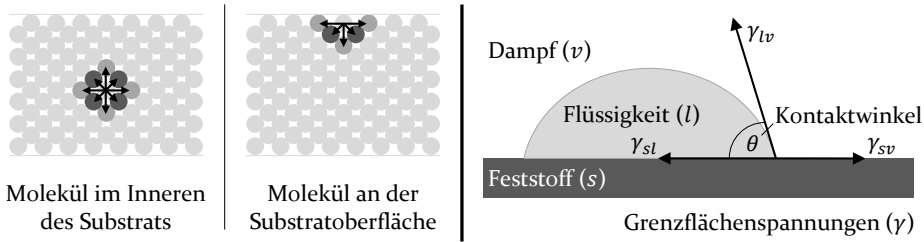


Bild 11: Schematische Darstellungen der Bindungskräfte im Inneren und an der Oberfläche eines Substrats (links) sowie der Benetzung (rechts) nach [61]

Im Inneren eines Substrats besteht ein Gleichgewicht der Kräfte, die auf ein Molekül wirken. An der Substratoberfläche unterliegen Moleküle hingegen nicht allseitig gleichmäßigen Krafteinwirkungen, was eine potenzielle Energie dieser Moleküle zur Folge hat. Kommt ein fester Körper mit anderen Stoffen in Kontakt, nimmt die Energie der Moleküle an den Phasengrenzen durch Absättigung ihrer freien Valenzen ab. [53][59][60]

Metall-Kunststoff-Verbindungen sind im Allgemeinen durch eine energiereiche, chemisch reaktive Metalloberfläche und eine vergleichsweise energiearme Kunststoffoberfläche gekennzeichnet. Eine spezifische Bestimmung von Oberflächenenergien ist experimentell mithilfe der Randwinkelmessung möglich. Nach der Benetzungsmethode wird hierzu ein Tropfen einer Flüssigkeit (l) mit bekannter Oberflächenenergie in einer Dampfatmosfera (v) auf die waagrecht liegende Oberfläche eines Feststoffs (s) appliziert. In Abhängigkeit der Grenzflächenspannungen festgasförmig (γ_{sv}), fest-flüssig (γ_{sl}) und flüssig-gasförmig (γ_{lv}) ergibt sich im Dreiphasensystem ein Gleichgewichtszustand, der die Ausbreitung des Tropfens auf der Feststoffoberfläche und den daraus resultierenden Kontaktwinkel (θ) bestimmt. In Bild 11 veranschaulicht die schematische Darstellung auf der rechten Seite die relevanten Größen der Benetzung. Die Young'sche Gleichung beschreibt den Zusammenhang der Grenzflächenspannungen wie folgt:

$$\gamma_{sv} = \gamma_{sl} + \gamma_{lv} \cos \theta \quad (3)$$

Für Feststoffe mit niedriger Oberflächenenergie, zu denen Polymere wie erwähnt zählen, gilt näherungsweise $\gamma_{sv} = \gamma_s$. Unter der Annahme, dass die Wechselwirkungen zwischen den Flüssigkeitsmolekülen an der Oberfläche und der umgebenden Gasphase vernachlässigbar sind ($\gamma_{lv} = \gamma_l$), kann die Gleichung folgendermaßen umgeformt werden:

$$\gamma_s = \gamma_{sl} + \gamma_l \cos \theta \quad (4)$$

Aus diesem Zusammenhang lässt sich weiterführend nach unterschiedlichen Modellen die thermodynamische Adhäsionsarbeit, die aufgebracht werden muss, um die Fügepartner voneinander zu trennen, berechnen. Weit verbreitet sind hierfür Ansätze von Young, Wu, Neumann sowie Owens und Wendt, welche sich vor allem in der Berücksichtigung verschiedener Wechselwirkungen zwischen Oberfläche und Testflüssigkeit unterscheiden. Da jedoch die bisherigen Versuche, errechnete Adhäsionsarbeiten mit experimentell bestimmten Verbundfestigkeiten quantitativ zu korrelieren, scheiterten, sind für die Praxis vornehmlich die qualitativen Schlussfolgerungen aus dem Adhäsionsmodell der grenzflächenenergetischen Wechselwirkungen von Bedeutung. Von einer guten Adhäsion ist demnach bei möglichst großen Oberflächenspannungen der Verbundpartner und einer geringen Grenzflächenspannung auszugehen. [53][59][60][62]

Gemäß dem elektrostatischen Adhäsionsmodell tragen zur Verbundhaftung außerdem Anziehungskräfte an den Grenzflächen bei, die aufgrund elektrostatischer Wechselwirkungen zwischen entgegengesetzten Ladungen wirken. Bei einer Differenz der thermodynamischen Potenziale von Verbundpartnern kommt es in der Grenzschicht, wie schematisch in Bild 12 dargestellt, zu einer Ladungsträgerdiffusion vom Donator in Richtung Akzeptor. Auf diese Weise bildet sich in der Kontaktzone eine sogenannte elektrische Doppelschicht (EDS). Der Modellvorstellung entsprechend fällt die EDS und damit die resultierende Adhäsion umso größer aus, je unähnlicher die Werkstoffe der beiden Verbundpartner sind. Folglich wird dem Adhäsionsmodell gerade bei Metall-Kunststoff-Verbundsystemen besondere Aufmerksamkeit gewidmet. Praxisrelevante quantitative Aussagen über den Einfluss der elektrostatischen Adhäsion auf Verbundfestigkeiten sind bislang jedoch nicht möglich. [53][60][61][63]

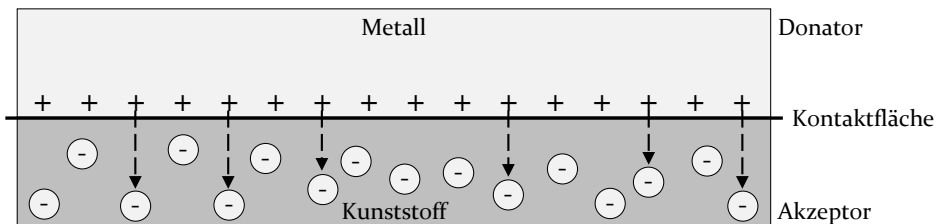


Bild 12: Schematische Darstellung der Ausbildung einer EDS nach [61]

In der Praxis wird mit dem Begriff Haftfestigkeit üblicherweise die Kraft bezeichnet, die bezogen auf eine definierte Fläche aufgebracht werden muss, um den Verbund aus Schicht und Substrat zu trennen. Um zwischen dieser experimentell bestimmten Haftfestigkeit und einer modellspezifischen, theoretischen Adhäsion zu differenzieren, werden in der internationalen Fachliteratur häufig nach [64] die Begriffe “practical adhesion” und “basic adhesion” unterschieden. Im Sinne einer Gesamtfestigkeit des Verbundes berücksichtigt die experimentell ermittelte Haftfestigkeit (practical adhesion) neben der adhäsiven Haftwirkung (basic adhesion) die mechanischen Eigenschaften von Schicht und Substrat, den Einfluss des Bruchmechanismus bei der Trennung des Verbundes sowie die spezifischen Bedingungen und die Messungenauigkeit der eingesetzten Prüfmethode. Essentielle Einflussfaktoren, die sich während der Herstellung, des Einsatzes sowie der Prüfung auf die experimentell ermittelte Haftfestigkeit von LDS-MID auswirken können, sind in Bild 13 aufgeführt. Sie werden im dargestellten Ursache-Wirkungs-Diagramm nach der 5M-Methode den Kategorien Mensch, Material, Maschine, Methode und Milieu zugeordnet.

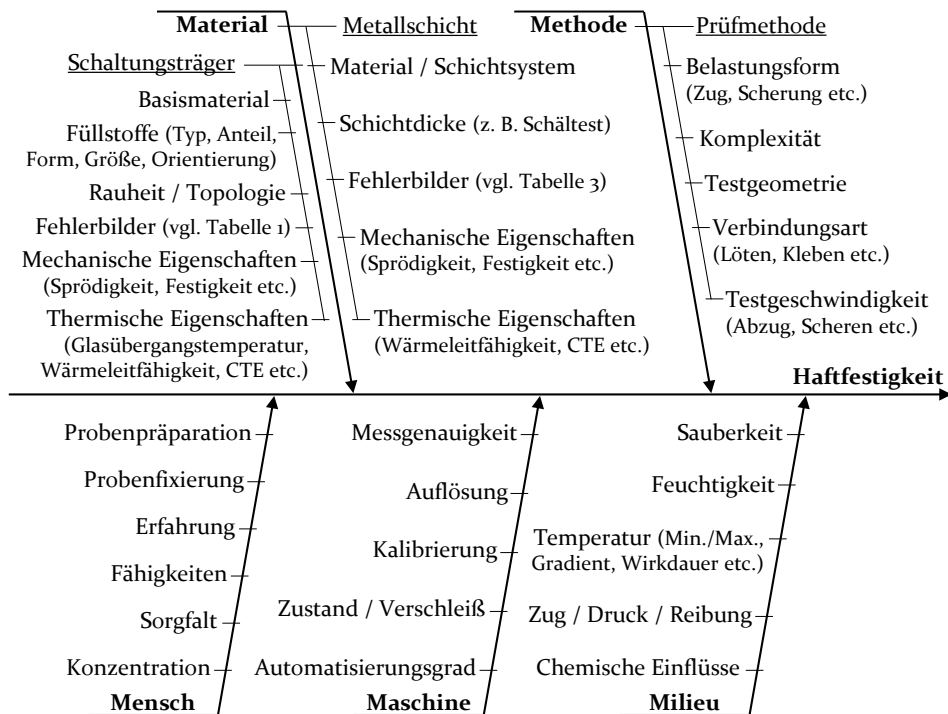


Bild 13: Ursache-Wirkungs-Diagramm mit wesentlichen Einflussfaktoren auf die experimentell ermittelte Haftfestigkeit von LDS-MID

Für die Haftfestigkeitsprüfung steht im Allgemeinen eine Vielzahl unterschiedlicher Verfahren zur Verfügung. Ein Verfahren, das unabhängig vom Verbundsystem ohne Einschränkungen eine eindeutige Charakterisierung der Haftung ermöglicht, existiert jedoch nicht. Die bekannten Prüfungen lassen sich grundsätzlich in qualitative und quantitative Verfahren unterteilen. Qualitative Verfahren kennzeichnen sich durch eine Bewertung der Haftung anhand optischer Merkmale der Verbundkomponenten am Ort des Versagens und erlauben damit Rückschlüsse auf die Versagensart. Durch die Analyse eines Bruchbilds lässt sich beispielsweise ermitteln, ob das Versagen eines Verbundsystems adhäsiv in der Grenzfläche der Komponenten oder kohäsiv im Substrat eingetreten ist. Bewährt haben sich entsprechende Verfahren vor allem in der Produktionskontrolle, in der die Bewertung der Haftungsqualität anhand qualitativer Aussagen häufig als ausreichend erachtet wird. Eine Vergleichbarkeit von Testergebnissen ist jedoch aufgrund der qualitativen und in der Regel subjektiven Ergebnissbewertungen im Gegensatz zu quantitativen Prüfverfahren immens eingeschränkt. Gleichwohl bestehen allerdings auch bei der Haftfestigkeitsbestimmung mittels quantitativer Verfahren Herausforderungen. Erhebliche Schwierigkeiten bereiten im Besonderen dünne und spröde Schichten. In den meisten Fällen halten diese Schichten den Belastungen, die zur Trennung der Verbundkomponenten an der Grenzfläche erforderlich sind, nicht stand. [60] Da eben diese für die Prüfung kritischen Schichtmerkmale charakteristisch für die Leiterbahnen laserdirektstrukturierter mechatronisch integrierter Baugruppen sind, besteht im industriellen Umfeld großes Interesse an geeigneten Lösungsansätzen zur Bestimmung der Metallisierungshaftfestigkeit von LDS-MID [65][66].

2.2.2 Entstehung von Leiterbahnrisen

Neben der Delamination der Metallisierung wird die erhöhte Gefahr von Leiterbahnrisen als maßgebliche Problematik für die Qualität und Zuverlässigkeit MID-basierter mechatronischer Baugruppen angesehen. Besonders deutlich geht das aus der bereits zitierten Studie zur Zuverlässigkeit bei MID [10] hervor. Die befragten Experten stufen darin Metallisierungsrisse noch vor der Delamination als häufigste Ausfallursache von MID-Baugruppen ein. [10][67]

Zu dieser Wahrnehmung haben zweifelsohne auch negative Beispiele aus der Praxis beigetragen, die sowohl die hohe Relevanz des Themas untermauern als auch den bestehenden Handlungsbedarf aufzeigen. So führten im Jahr 2010 defekte Kombischalter zu einer Rückrufaktion von weltweit

mehr als 13.000 Motorrädern [68]. Hervorgerufen wurden die Defekte durch Risse in den Leiterbahnen der MID-basierten Baugruppe.

In Bild 14 sind thermisch induzierte Risse in LDS-Leiterbahnen anhand verschiedener Aufnahmen dargestellt. Die abgebildeten Aufnahmen veranschaulichen nicht nur den charakteristischen Rissverlauf durch die Leiterbahn entlang der Korngrenzen, sondern verdeutlichen auch die mikroskopischen Dimensionen entsprechender Schädigungen. Verbunden mit der Größenordnung von teilweise unter $1\text{ }\mu\text{m}$ erklärt sich die große Herausforderung, mit den heute gängigen Untersuchungsmethoden Risse in den verhältnismäßig dünnen und rauen metallischen Strukturen zu detektieren. Verfahren wie die Ultraschalltechnik, die Magnetpulverprüfung, die Röntgendurchstrahlung oder die Farbeindringprüfung stoßen bei den anspruchsvollen Bedingungen in der Regel an ihre Grenzen. Umso größere Bedeutung kommt daher der Vermeidung von Leiterbahnrisen zu. Wirksame präventive Maßnahmen und eine sichere beanspruchungsgerechte Auslegung von LDS-Schaltungsträgern setzen dabei fundierte Kenntnisse über die Rissentstehung und deren Ursachen voraus.

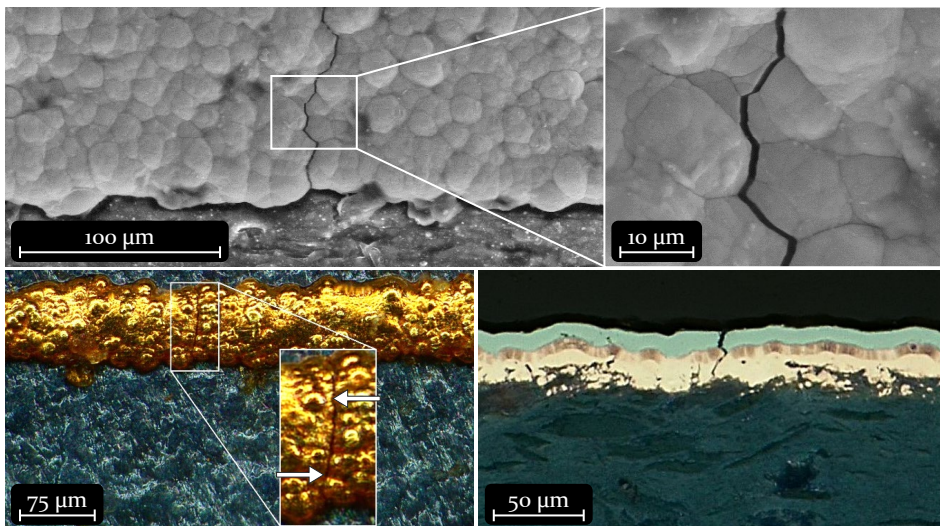


Bild 14: Aufnahmen von Rissen in LDS-Leiterbahnen mit dem Rasterelektronenmikroskop (oben), mit optischer Mikroskopie (unten links) sowie im Schliffbild (unten rechts)

Die Vorgänge bei der Rissentstehung können grundsätzlich aus verschiedenen Ebenen betrachtet werden. Wie in Bild 15 dargestellt, lässt sich eine Klassifikation der Betrachtungsebenen nach dem Verhältnis der Defektgröße zu den Gefügeabmessungen vornehmen. Mit der Größenordnung ändert sich über die verschiedenen Ebenen auch der wissenschaftlich-

technische Schwerpunkt der Betrachtung. Während der ingenieurtechnische Fokus vornehmlich auf dem makroskopischen Bereich liegt, werden die mesoskopischen Prozesse im Werkstoffgefüge und die mikroskopischen Vorgänge in einzelnen Gefügekomponenten bevorzugt materialwissenschaftlich betrachtet. Der Schwerpunkt der physikalischen Betrachtung von Rissvorgängen bewegt sich überwiegend im nanoskopischen Bereich der atomaren Bindungen. [69]

In Abhängigkeit der jeweiligen Betrachtungsebene lässt sich bereits der Anriss als Ausgangspunkt für die Rissentstehung unterschiedlich definieren. Genau genommen kann schon die Trennung atomarer Bindungen als Riss angesehen werden. Für eine anwendungsnahe Betrachtung erweist es sich jedoch als sinnvoller, eine Anrissbildung und deren Ursachen in der Größenordnung der charakteristischen Mikrostruktur (z. B. Korn- oder Porengröße) zu analysieren.

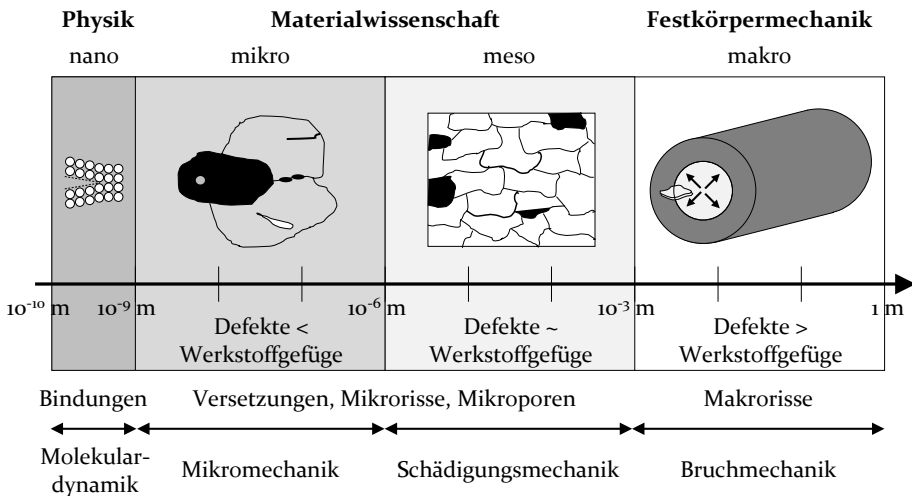


Bild 15: Betrachtungsebenen für Rissvorgänge nach [69]

Im Allgemeinen sind die Auslöser für eine Rissinitiierung lokale Spannungs- bzw. Dehnungskonzentrationen. Diese lassen sich im Wesentlichen auf Oberflächenrauheiten und Kerben, Verwölbungen durch Gleitbänder, nichtmetallische Einschlüsse, Ausscheidungen und Poren sowie Korngrenzen zurückführen. Ausgehend von einem Anriss kann sich im Weiteren zunächst ein sogenannter *mikrostrukturell kurzer Riss* im Werkstoff ausbreiten. Beeinflusst wird die Mikrorissausbreitung von der Mikrostruktur des Werkstoffs und der lokal wirkenden Spannung. Ab einer Risslänge von etwa acht Korndurchmessern schwindet der Einfluss der Mikrostruktur weitgehend. Die weitere Ausbreitung des nun als *mechanisch kurz*

bezeichneten Risses wird vorwiegend von der mechanischen Beanspruchung in der plastischen Zone vor der Rissspitze bestimmt. Sobald die Ausdehnung der plastischen Zone vor der Rissspitze vernachlässigbar wird, gilt der Riss als *physikalisch kurz*. Sein Ausbreitungsverhalten kann fortan durch die linear-elastische Bruchmechanik beschrieben werden. Charakteristisch für sogenannte *lange Risse* ist, dass neben den intrinsischen Faktoren auch extrinsische Rissschließeffekte, die den physikalischen Kontakt der Rissflanken herbeiführen, Einfluss auf ihre Ausbreitung haben. [70][71][72][73]

Im Falle von LDS-MID spielen für die Rissentstehung in Leiterbahnen neben der mechanischen Belastung der Schaltungsträger insbesondere die häufig stark heterogenen thermomechanischen Eigenschaften von Leiterbahn- und Substratmaterial eine zentrale Rolle. Bedingt durch die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten der Verbundpartner ergeben sich unter thermischer Belastung kritische Spannungszustände, die in den vergleichsweise rauen, spröden und dünnen Leiterbahnen lokale Spannungskonzentrationen hervorrufen. Wie ausgeführt sind diese wiederum Auslöser für die Initiierung von Rissen, welche sich im Werkstoff ausbreiten und schließlich zum Ausfall der Baugruppe führen können.

Im Zusammenhang mit der Wärmeausdehnung ist als weitere Besonderheit auf das anisotrope Verhalten thermoplastischer Kunststoffe hinzuweisen. Die Ursache für die Anisotropie liegt in der Ausrichtung der Füllstoffpartikel im Kunststoff. In Abhängigkeit der Strömungsbedingungen der Kunststoffschmelze orientieren sich die Füllstoffe während der Verarbeitung im Spritzgusskörper. Unter der Voraussetzung, dass die Partikel keine sphärischen Geometrien aufweisen, beeinträchtigen sie somit richtungsabhängig das thermische Ausdehnungsverhalten des spritzgegossenen Formteils. Hieraus resultieren generell unterschiedliche CTE (Coefficient of Thermal Expansion, thermischer Längenausdehnungskoeffizient) in Fließrichtung und senkrecht zu dieser, wobei die Ausdehnung des Bauteils in Fließrichtung üblicherweise geringer ausfällt. [40][67][74][75]

Eine Übersicht der linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten gängiger LDS-Substratmaterialien bietet das Balkendiagramm in Bild 16. Als Vergleichswert ist ergänzend der CTE des Standard-Leiterplattenmaterials FR4 aufgeführt. Das jeweilige Ausmaß der Fehlanpassung gegenüber der Wärmeausdehnung der Metallisierung lässt sich anhand der Abweichung zum gestrichelt dargestellten CTE von Kupfer erkennen.

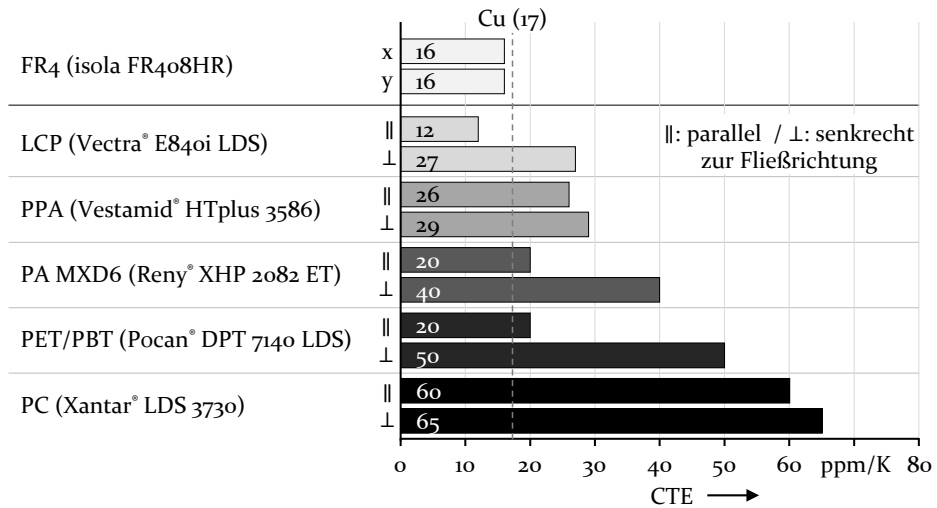


Bild 16: Thermische Längenausdehnung ausgewählter LDS-Kunststoffe im Vergleich zu FR4 [76][77][78][79][80][81][82]

Für eine anforderungsgerechte Materialauswahl ist zusätzlich zu beachten, dass die in Datenblättern angegebenen CTE-Werte nur für einen bestimmten Temperaturbereich Gültigkeit besitzen. Sofern nicht näher spezifiziert, beziehen sich die Angaben der Materialhersteller häufig auf ein verhältnismäßig enges Temperaturintervall ausgehend von der Raumtemperatur (z. B. 23 °C bis 55 °C) [78][83].

Das Wärmeausdehnungsverhalten von Kunststoffen weist jedoch im Gegensatz zum Verbundpartner Kupfer eine hohe Temperaturabhängigkeit auf. Insbesondere bei Überschreitung der Glasübergangstemperatur steigt der CTE vielfach drastisch an. Um für die jeweilige Anwendung eine realistische Einschätzung der thermomechanischen Beanspruchung vornehmen zu können, ist daher das materialspezifische Ausdehnungsverhalten in den für die Applikation relevanten Temperaturbereichen von großer Bedeutung. [75]

In erster Linie ergeben sich die zu berücksichtigenden thermischen Belastungen aus den Einsatzbereichen der Baugruppen. Hohe Anforderungen stellen z. B. die harschen Umgebungsbedingungen für Luftfahrt- oder Automobilanwendungen. Je nach Einbauort sind die mechatronischen Baugruppen hier zum Teil extremen Temperaturbelastungen ausgesetzt. Die Zuverlässigkeitsanforderungen für Anwendungen im Motor- oder Getriebereich eines Automobils erstrecken sich beispielsweise über einen Temperaturbereich von -40 °C bis 140 °C [84].

Neben den Einsatzbedingungen sind jedoch auch die thermischen Belastungen, die bereits im Fertigungsprozess auf die Baugruppen wirken, nicht zu vernachlässigen. Allen voran ist hier auf den Lötprozess zu achten. Bei Verwendung einer typischen SnAgCu-Lotlegierung sind die Baugruppen schon in der Haltephase des Reflowprozesses für wenige Minuten einer Temperatur von etwa 150 °C ausgesetzt. In der Peakphase wirken anschließend für eine Dauer von 30 bis 90 Sekunden Temperaturen um 230 °C auf die Baugruppe ein [85].

Gegenüber konventionellen Leiterplatten erfordert der Einsatz von LDS-MID neben einer erhöhten Sensibilität hinsichtlich thermomechanischer Spannungen auch eine besondere Berücksichtigung des Substratmaterials in Bezug auf seine Feuchtigkeitsaufnahme. Die Aufnahme von Feuchtigkeit in Kunststoffen erfolgt größtenteils durch Diffusion. Das diffundierte Wasser kann zum einen an den Polymerketten durch Wasserstoffbrückenbindungen gebunden werden und sich zum anderen an Stellen geringerer Dichte zwischen den Molekularketten im freien Volumen des Polymers einlagern. Binden sich Wassermoleküle gemäß der erstgenannten Variante an die Polymerstruktur, verursacht dies eine Quellung des Materials. [74] Eine Volumenvergrößerung der Formteile kann wiederum zu kritischen Spannungszuständen in den Leiterbahnen und damit zur Entstehung von Rissen führen. In Abhängigkeit des Kunststofftyps unterscheidet sich das Feuchtigkeitsaufnahmeverhalten zum Teil erheblich. Während beispielsweise flüssigkristalline Polymere sehr gute Barriereigenschaften aufweisen, neigen Polyamide zu besonders hoher Feuchtigkeitsaufnahme [75].

Das Ursache-Wirkungs-Diagramm in Bild 17 bietet eine Übersicht wesentlicher Faktoren, die einen Einfluss auf die Rissentstehung in LDS-Leiterbahnen und deren Detektion haben. Im Fokus der Arbeit stehen Einflussfaktoren, die aufgrund der dargelegten charakteristischen Eigenschaften von LDS-MID besondere Berücksichtigung beim Einsatz dieser Technologie erfordern.

Zusätzlich zur Kenntnis der Einflussgrößen auf die Entstehung von Leiterbahnrisen sind ein hinreichendes Verständnis für die Zusammenhänge sowie die Stärke der wirkenden Effekte für die Sicherung der Zuverlässigkeit von entscheidender Bedeutung. Als Grundlage für eine beanspruchungsgerechte Auslegung und Produktion sind sowohl die Identifizierung qualitätsbestimmender Kenngrößen als auch die anwendungsspezifische Festlegung einzuhaltender Grenzwerte unabdingbar. Voraussetzung hierfür sind übertragbare Ergebnisse aus gezielten Untersuchungen, die die spezifischen Besonderheiten von LDS-MID berücksichtigen.

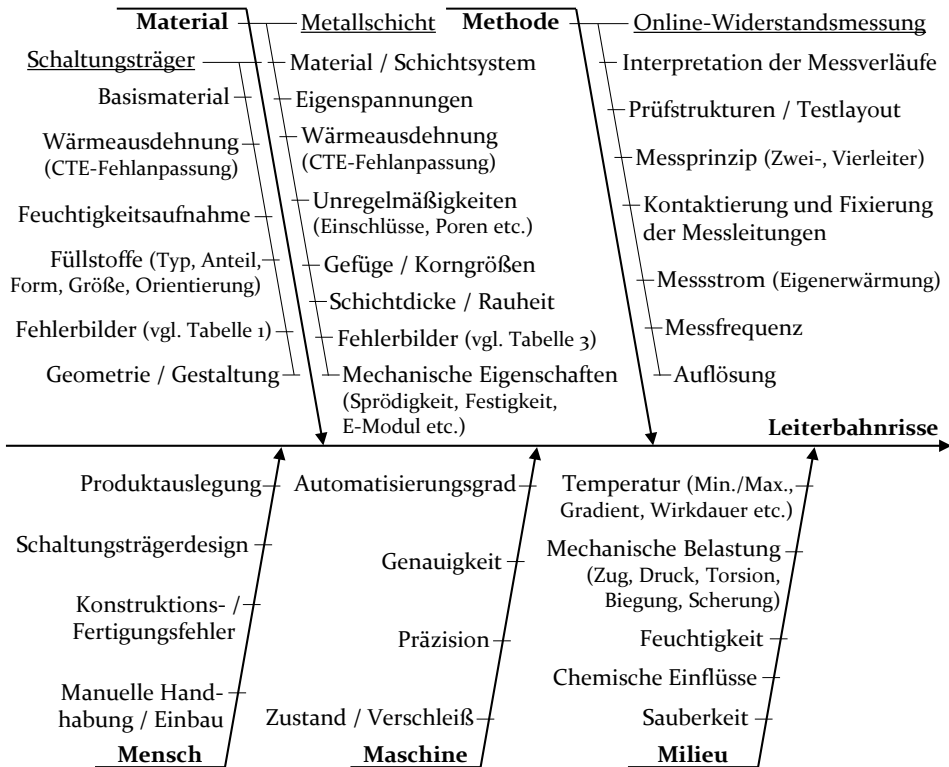


Bild 17: Ursache-Wirkungs-Diagramm mit wesentlichen Einflussfaktoren auf die Entstehung und Detektion von Rissen in LDS-Leiterbahnen

2.2.3 Thermisches Versagen von Leiterbahnen

Die für LDS-MID charakteristische Kombination von dünnen Metallisierungen auf thermoplastischen Grundkörpern schränkt die thermische Belastbarkeit der Leiterbahnen erheblich ein. Gleichzeitig führen die anhaltenden Trends in der Elektronik hinsichtlich steigender Leistungen, zunehmender Packungsdichten sowie einer miniaturisierungsbedingten Reduzierung von Leiterbahnbreiten zu einem Anstieg der erzeugten Abwärme und einem erhöhten Ausfallrisiko durch Überhitzung der Baugruppe. Neben dem Bereich der Leistungselektronik erfordern in diesem Kontext besonders Anwendungen aus der Beleuchtungstechnik erhöhte Aufmerksamkeit. Gerade hier zählt die zuverlässige Ableitung der entstehenden Wärme zu den wesentlichen Herausforderungen im Design und der Auslegung der Produkte. Um die Gestaltungsfreiheiten und Integrationspotenziale der MID-Technologie auch in Einsatzbereichen mit entsprechenden Anforderungen an ein thermisches Management nutzen zu

können, sind die spezifischen Belastungsgrenzen der erzeugten Baugruppen von zentraler Bedeutung.

Eine entscheidende Kenngröße ist in diesem Zusammenhang die Stromtragfähigkeit der Leiterbahnen. Definiert wird diese in [86] als der maximale elektrische Strom, der einen Leiter kontinuierlich durchfließen kann, ohne eine Verschlechterung der elektrischen oder mechanischen Produkteigenschaften hervorzurufen. Bei einer unzureichenden Auslegung der Stromtragfähigkeit droht eine Überhitzung, die eine thermische Schädigung des Grundsubstrats zur Folge hat und schließlich zur Delamination und zum Durchbrennen der Leiterbahnen führt. Exemplarische Aufnahmen von durchgebrannten Leiterbahnen in Folge zu hoher Strombelastung sind in Bild 18 zu sehen.

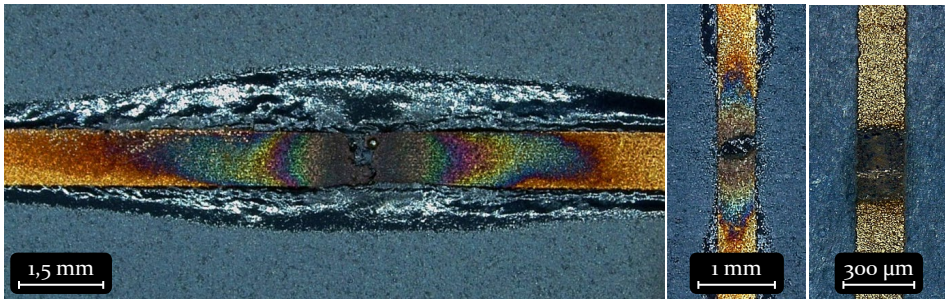


Bild 18: Exemplarische Aufnahmen durchgebrannter LDS-Leiterbahnen in Folge zu hoher Strombelastung

Die Erzeugung von Wärme in stromdurchflossenen Leitern erfolgt nach dem Joule'schen Gesetz proportional zur elektrischen Leistung (P), die sich aus dem Produkt von Spannung und Strom ergibt. Unter Berücksichtigung des Ohm'schen Gesetzes lässt sich daraus folgender Zusammenhang in Abhängigkeit des elektrischen Widerstands des Leiters (R) und der Stromstärke (I) formulieren:

$$P = R \cdot I^2 \quad (5)$$

Der Widerstand eines Leiters (R) kann anhand seiner geometrischen Größen Länge (L), Breite (b) und Dicke (d) und dem spezifischen elektrischen Widerstand des Materials (ρ) bestimmt werden. Dabei ist zu beachten, dass im Allgemeinen eine Abhängigkeit des spezifischen Widerstands von der Temperatur (T) besteht.

$$R(T) = \frac{L}{b \cdot d} \cdot \rho(T) \quad (6)$$

Die resultierende Temperatur eines Leiters ergibt sich jedoch nicht nur aus der stromflussbedingten Erwärmung, sondern ist das Ergebnis des thermischen Gleichgewichts zwischen Heizleistung und Kühlung. Die Kühlung beruht auf der physikalischen Gesetzmäßigkeit der Wärmeübertragung von "warm" nach "kalt" und kann anhand der drei Mechanismen Wärmeleitung, Konvektion und Wärmestrahlung erfolgen. In elektronischen Baugruppen wird die Wärme, die durch den Stromfluss in den Leiterbahnen entsteht, überwiegend durch Wärmeleitung in Richtung des Substrats abgeführt, wo sie weiter gespreizt und durch Konvektion und Wärmestrahlung an die Umgebung abgegeben wird. [87][88][89][90] Eine schematische Darstellung einer stromdurchflossenen Leiterbahn mit den drei Wärmeübertragungsmechanismen zeigt Bild 19.

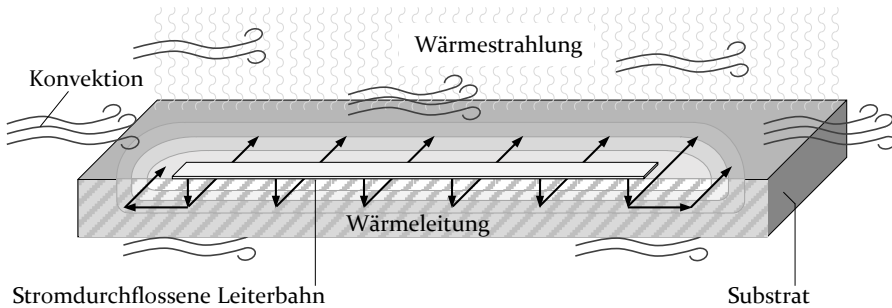


Bild 19: Schematische Darstellung einer stromdurchflossenen Leiterbahn im Querschnitt mit den drei Wärmeübertragungsmechanismen

Quantitativ lässt sich der Vorgang der Wärmeleitung durch die Wärmestromdichte ($\dot{q}$) beschreiben. Der mathematische Zusammenhang für die Wärmeleitung in ruhenden Stoffen ergibt sich nach Fourier wie folgt aus der spezifischen Wärmeleitfähigkeit des Materials (λ) und dem Temperaturgradienten ($\text{grad } T$):

$$\dot{q} = -\lambda \cdot \text{grad } T \quad (7)$$

Entscheidend dafür, wie stark die entstandene Wärme in einem Schaltungsträger geometrisch gespreizt wird, ist demnach die spezifische Wärmeleitfähigkeit des Substratmaterials. Die Wärmeabgabe über Konvektion an die umgebene Luft ist vor allem abhängig von den Strömungsbedingungen, der Grenzflächengeometrie und den vorherrschenden Temperaturen. Die Wärmeabgabe an die Umgebung über Wärmestrahlung basiert auf einem Energietransport durch elektromagnetische Wellen. Eine Abhängigkeit der emittierten Strahlung besteht von den Emissionskoeffi-

zienten und der absoluten Temperatur. Materialparameter und Geometrie-eigenschaften entscheiden darüber, in welchem Verhältnis die emittierte Strahlung von anderen Körpern absorbiert beziehungsweise reflektiert wird. Die hohe Anzahl an Einflussfaktoren, die sich erschwerend vielfach in nichtlinearen Zusammenhängen auf das thermische Gleichgewicht und damit letztlich auch auf die Stromtragfähigkeit von Leiterbahnen auswirken, gestaltet eine hinreichende Berücksichtigung anwendungsspezifischer Gegebenheiten dermaßen komplex, dass eine thermische Auslegung mechatronischer Baugruppen mittels rein analytischer Methoden in der Regel nicht möglich ist. [91][92] Wesentliche Einflussfaktoren auf die ermittelte Stromtragfähigkeit von Leiterbahnen sind im dargestellten Ursache-Wirkungs-Diagramm in Bild 20 aufgeführt.

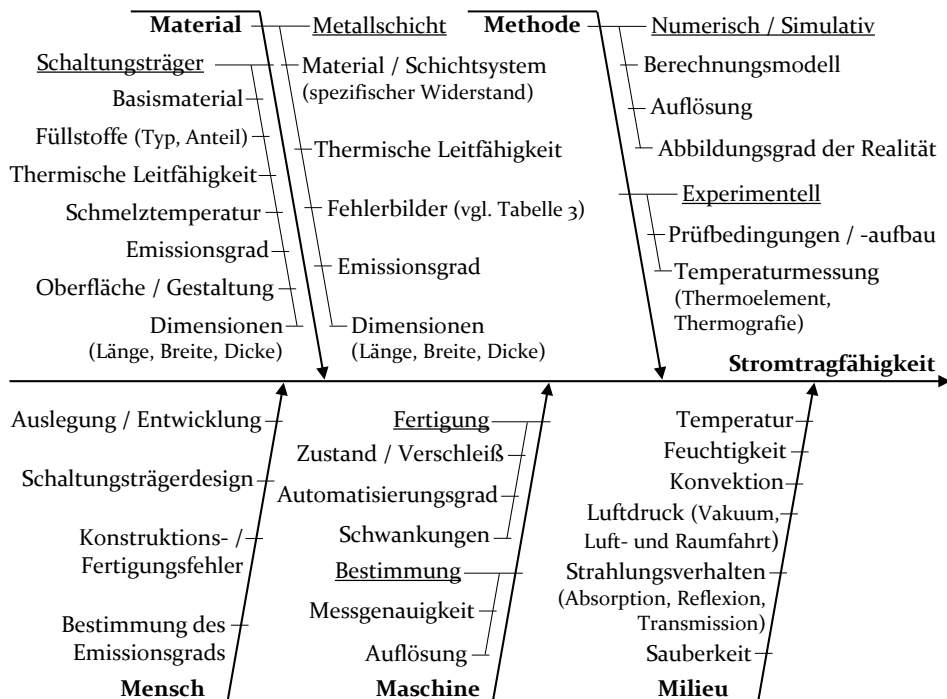


Bild 20: Ursache-Wirkungs-Diagramm mit wesentlichen Einflussfaktoren auf die ermittelte Stromtragfähigkeit von LDS-Leiterbahnen

Ein Vergleich mit konventionellen Ansätzen der Elektronikfertigung verdeutlicht die bestehenden Limitierungen, die sich für LDS-MID aus den eingangs in diesem Kapitel genannten charakteristischen Eigenschaften ergeben. Zum einen führen die verhältnismäßig geringen Schichtdicken der LDS-Leiterbahnen zu einer erhöhten stromflussbedingten Erwärmung der Baugruppe, zum anderen ist die Wärmeabfuhr erheblich durch die

niedrige Wärmeleitfähigkeit typischer thermoplastischer LDS-Materialien eingeschränkt. Gängige Kupferschichtdicken liegen gemäß der Spezifikation für Basismaterialien für starre Leiterplatten und Multilayerleiterplatten bei $17,5\text{ }\mu\text{m}$ ($\frac{1}{2}\text{ oz/ft}^2$), $35\text{ }\mu\text{m}$ (1 oz/ft^2), $70\text{ }\mu\text{m}$ (2 oz/ft^2) und $105\text{ }\mu\text{m}$ (3 oz/ft^2) [93]. Damit betragen sie ein Vielfaches der Kupferschichtdicke üblicher LDS-Leiterbahnen, die typischerweise im Bereich von etwa $7\text{ }\mu\text{m}$ liegt [29]. Bei gleichen Leiterbahnbreiten resultieren daraus entsprechend geringere Leiterbahnquerschnitte, die wiederum direkten Einfluss auf den Widerstand und folglich auf die Erwärmung der stromdurchflossenen Leiter haben. Hinsichtlich der spezifischen Wärmeleitfähigkeit bewegen sich gängige LDS-Substratmaterialien wie LCP, PA oder PET/PBT in einem Bereich von etwa $0,2\text{ W/mK}$ bis $0,4\text{ W/mK}$ [78][80]. Dies entspricht der Größenordnung des Standardmaterials für Leiterplatten FR4 [82]. Bei erhöhten Anforderungen an das Wärmemanagement kommen in der Flachbaugruppenfertigung jedoch üblicherweise spezielle Leiterplattenvarianten zum Einsatz. Durch thermische Vias oder Metallkerne wird bei diesen Leiterplattentypen die Wärmeleitfähigkeit erheblich gesteigert. Beide Faktoren, die geringen Schichtdicken sowie die niedrige Wärmeleitfähigkeit der Substratmaterialien, beeinflussen das thermische Gleichgewicht zwischen Heizleistung und Kühlung zu Ungunsten der Stromtragfähigkeit und schränken somit den Einsatz von LDS-MID in leistungselektronischen Anwendungsbereichen massiv ein.

2.3 Handlungsfelder zur Bewertung und Steigerung der Qualität und Zuverlässigkeit von LDS-MID

Die bisherigen Ausführungen stellen die bestehenden qualitäts- und zuverlässigkeitsbezogenen Herausforderungen dar, die einer verbesserten Ausschöpfung der Potenziale mechatronisch integrierter Baugruppen im Wege stehen. Aus den Hemmnissen und Einschränkungen für einen breiteren Einsatz von LDS-MID lassen sich konkrete Handlungsbedarfe in den folgenden drei Feldern ableiten.

Bestimmung und Steigerung der Metallisierungshaftfestigkeit

Wegen der erhöhten Gefahr einer Delamination der Metallisierung bestehen sowohl bei Herstellern als auch bei Anwendern große Unsicherheiten im Hinblick auf eine ausreichende Haftfestigkeit zwischen Metallisierung und Substrat. In Anbetracht der hohen Individualität der Applikationslösungen und der enormen Anzahl an Einflussgrößen fehlt es in vielen Fällen an Erfahrungswerten für eine valide Zuverlässigkeitseinschätzung. Sind zeit- und kostenintensive Prüfungen für den jeweiligen Einzelfall

erforderlich, können sich die Zielkonflikte im Spannungsfeld aus Kosten, Zeit und Qualität soweit zuspitzen, dass trotz der technologischen Potenziale von einer MID-Lösung Abstand genommen wird.

Aus dieser Sachlage geht der dringende Bedarf an übertragbaren Erkenntnissen über die wesentlichen Einflussgrößen auf die Metallisierungshaftfestigkeit von LDS-MID hervor. Um Ausfälle durch Delamination mit hinreichender Wahrscheinlichkeit ausschließen zu können, sind Kenntnisse über die Möglichkeiten zur Steigerung der Haftfestigkeit ebenso von Nöten wie das Wissen um beeinträchtigende Faktoren. Neben den material- und fertigungsbedingten Einflüssen, die die Ausgangshaftfestigkeit der Metallisierung nach dem Herstellungsprozess bestimmen, betrifft das auch umweltbedingte Faktoren, denen die Baugruppen im Gebrauch ausgesetzt sind.

Grundlage hierfür ist eine geeignete Methode zur Haftfestigkeitsbestimmung. Die spezifischen Gegebenheiten von LDS-MID wie die dünnen sowie spröden Metallschichten oder die in der Regel nur begrenzt vorhandenen planaren Flächen bei Serienteilen schaffen anspruchsvolle Anforderungen an die Prüfmethode. Um aussagekräftige, vergleichbare Ergebnisse generieren zu können, besteht die Notwendigkeit, eine geeignete Prüfmethode zu identifizieren sowie konkrete Testspezifikationen festzulegen.

Vermeidung von Leiterbahnrisen bei thermischer Belastung

Gerade für Anwendungen, die starken Temperaturbelastungen unterliegen, begründen sich Vorbehalte gegenüber LDS-basierten Lösungen auf der Befürchtung rissbedingter Ausfälle von Leiterbahnen. Bekannt gewordene Probleme durch thermisch induzierte Leiterbahnrisse bei Serienprodukten haben das Vertrauen in die Eignung mechatronisch integrierter Baugruppen für einen Einsatz unter harschen Umgebungsbedingungen belastet. Insbesondere die im Unterschied zu konventionellen FR4-Leiterplatten mitunter erhebliche Diskrepanz im Wärmeausdehnungsverhalten zwischen Leiterbahn und Substratmaterial erfordert bei der obendrein sensibleren Metallisierung eine intensive Auseinandersetzung mit dieser Problematik.

Bisherige Forschungsarbeiten zu rissbedingten Ausfällen mechatronischer Baugruppen betrachten im Wesentlichen die Verbindungsstellen zu den elektronischen Bauelementen [51][94][95]. Eine Transferierung der Ergebnisse auf LDS-Leiterbahnen ist wegen der grundlegend unterschiedlichen Eigenschaften nicht möglich. Um valide Aussagen über die Zuverlässigkeit von LDS-Leiterbahnen bei thermischer Belastung treffen zu können, bedarf

es demnach zielgerichteter Untersuchungen. Grundvoraussetzung hierfür ist eine geeignete Methodik, die es ermöglicht, rissbedingte Schädigungen der Leiterbahnen sicher festzustellen. Zur Sicherstellung der Übertragbarkeit der Forschungsergebnisse auf Anwendungsfälle aus der Praxis ist es von zentraler Bedeutung, dass auch MID-spezifische Besonderheiten wie beispielsweise Bindenähte, konvexe oder konkave Bauteilgeometrien berücksichtigt werden.

Steigerung der Stromtragfähigkeit

Die hohe Diversifikation erfolgreicher Serienprodukte in unterschiedlichen Branchen und Anwendungsbereichen demonstriert eindrucksvoll die vielfältigen Potenziale mechatronisch integrierter Baugruppen. Eine genauere Betrachtung der Einsatzfelder deckt allerdings auch bestehende Einschränkungen auf. So finden sich im wachsenden Markt der Leistungselektronik keine Lösungen, die auf der LDS-Technologie beruhen. Ein offensichtlicher Grund hierfür liegt in den Anforderungen an die Schaltungsträger, die mit der Übertragung hoher Ströme einhergehen. Bedingt durch die verwendeten Materialien und charakteristischen Eigenschaften von LDS-MID sind diese in der Regel nicht in der Lage, die entstehende Wärme ausreichend abzuführen und der thermischen Belastung standzuhalten.

Vor allem im Bereich der leistungsstarken Beleuchtungstechnik offerieren MID-Lösungen reizvolle neue Möglichkeiten. Eine intelligente Nutzung der Integrationspotenziale und der Gestaltungsfreiheit lassen komplett neue, funktionsoptimierte Designs für eine gezielte Ausleuchtung in verschiedensten Anwendungsszenarien zu. Um dies zu ermöglichen, bedarf es neuer Lösungsansätze, mit denen die bestehenden Limitierungen der thermischen Eigenschaften von LDS-MID in ausreichendem Maße überwunden werden. Der primäre Fokus liegt hierbei auf einer Steigerung der Stromtragfähigkeit als wesentliches Qualitäts- und Zuverlässigkeitsmerkmal in der Leistungselektronik.

Eine zusammenfassende Übersicht der identifizierten Handlungsbedarfe stellt Bild 21 dar. Strukturiert in die drei übergeordneten Felder werden in den folgenden Kapiteln Untersuchungen vorgestellt, die gezielt die jeweiligen Herausforderungen aufgreifen. Vor diesem Hintergrund liefert die vorliegende Arbeit einen Beitrag zur Steigerung der Qualität und Zuverlässigkeit von LDS-MID und ermöglicht dadurch letztlich eine Erweiterung der Einsatzpotenziale mechatronisch integrierter Baugruppen.

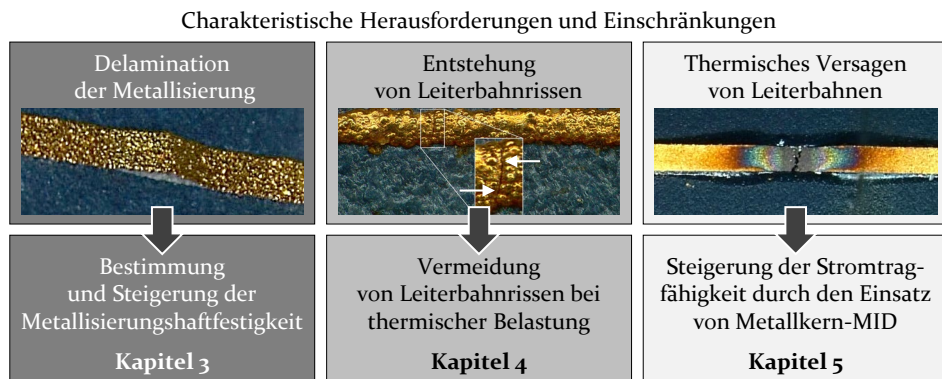


Bild 21: Handlungsfelder zur Steigerung der Qualität und Zuverlässigkeit von LDS-MID

3 Bestimmung und Steigerung der Metallisierungshaftfestigkeit

Im Handlungsfeld zur Metallisierungshaftfestigkeit konzentrieren sich die Forschungsarbeiten zunächst auf die Identifikation eines geeigneten Verfahrens zur Bestimmung der Verbundfestigkeit zwischen Metallisierung und Substrat. Unter Anwendung einer qualifizierten Prüfmethode erfolgt im Anschluss eine systematische Untersuchung zentraler Einflussgrößen auf die Metallisierungshaftfestigkeit. Auf Grundlage der Forschungsergebnisse werden abschließend Empfehlungen zur Haftfestigkeitsbestimmung und -steigerung abgeleitet.

3.1 Evaluierung von Haftfestigkeitsprüfverfahren für den Einsatz bei LDS-MID

Die Anwendbarkeit etablierter Haftfestigkeitsprüfverfahren aus der konventionellen Leiterplattenfertigung lässt sich für LDS-MID aufgrund der grundlegend verschiedenen Herstellungsverfahren und Basiswerkstoffe sowie der räumlichen Gestaltung nicht ohne Weiteres voraussetzen. Zunächst werden daher bekannte Prüfverfahren hinsichtlich ihrer Eignung für ihren Einsatz unter den speziellen, gebotenen Voraussetzungen qualitativ bewertet. Im Weiteren wird der Hot-Pin-Pull-Test als neues, noch nicht etabliertes Testverfahren für die Haftfestigkeitsbestimmung bei LDS-MID qualifiziert. Im letzten Schritt erfolgt eine Evaluierung alternativer Prüfverfahren anhand vergleichender experimenteller Untersuchungen.

3.1.1 Bewertung konventioneller Prüfverfahren

Zur quantitativen Bestimmung von Metallisierungshaftfestigkeiten sind vor allem der Schältest nach DIN EN 60249-1 und der Stirnabzugstest nach DIN EN ISO 4624 weit verbreitet. Darüber hinaus wird für die Haftfestigkeitsprüfung bei LDS-MID auch der Schertest in Anlehnung an DIN EN 62137-1-2 eingesetzt. Die Verfahren unterscheiden sich essenziell in ihren Prüfanordnungen, Abläufen und Belastungsarten, die zur Trennung von Metall und Kunststoff auf die Prüflinge ausgeübt werden. Eine direkte Vergleichbarkeit von Haftfestigkeitswerten, die unter Einsatz verschiedener Prüfverfahren bestimmt wurden, ist demzufolge nicht gegeben.

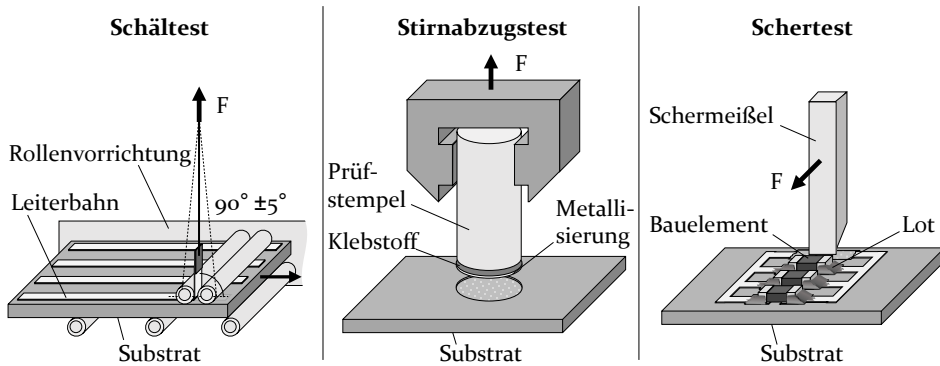


Bild 22: Schematische Darstellungen der Haftfestigkeitsprüfverfahren Schältest, Stirnabzugstest und Schertest

In Bild 22 sind die schematischen Darstellungen der betrachteten konventionellen Prüfverfahren abgebildet. Im Folgenden werden die einzelnen Verfahren näher beschrieben sowie zentrale Aspekte, die sich auf ihre Eignung zum Einsatz bei LDS-MID auswirken, diskutiert. [66][67][96][97][98]

Beim **Schältest** wird die Metallisierungshaftung bestimmt, indem eine Leiterbahn senkrecht zum Basissubstrat abgezogen wird. Die minimal gemessene Abzugskraft, die hierzu aufgebracht werden muss, ergibt im Verhältnis zur Leiterbahnbreite die Haftfestigkeit in N/mm. Die Durchführung der Prüfung erfolgt normgemäß an vier Leiterbahnen mit einer Mindestlänge von 65 mm und einer Breite von $3 \pm 0,2$ mm. Diese werden vor Beginn der Messung an einem Ende auf einer Länge von ca. 10 mm vom Substrat gelöst und über eine Klemmvorrichtung oder einen geeigneten, zuvor angebrachten Abziehkörper in eine Zugvorrichtung eingespannt. Anschließend werden die Leiterbahnen mit einer Geschwindigkeit von 50 ± 5 mm/min vom Substrat abgeschält. Über den gesamten Schälvorgang ist dabei ein senkrechter Abzug mit einer maximal zulässigen Winkelabweichung von $\pm 5^\circ$ einzuhalten. Für die Ermittlung repräsentativer Haftfestigkeitswerte werden die resultierenden Kraft-Weg-Diagramme über eine Mindestlänge von 25 mm ausgewertet, wobei Ausschläge zu Beginn sowie zum Ende der Aufzeichnungen unberücksichtigt bleiben. Um Fehlinterpretationen durch vernachlässigbare lokale Defekte zu vermeiden, hat es sich zudem in der Praxis bewährt, extreme Haftungsgefälle und -anstiege auszublenzen oder abweichend zur Norm anstelle des Kraftminimums den Kraftmittelwert über den gesamten Schälweg für die Haftfestigkeitsberechnung heranzuziehen.

Die Anwendbarkeit des Schältests hängt maßgeblich von den Eigenschaften der Metallisierung ab. Als wesentliche Voraussetzungen gelten eine hinreichende Duktilität und eine Mindestschichtdicke von $10\text{ }\mu\text{m}$. Zu beachten ist in diesem Kontext, dass sich die Kraft, die zum Abschälen einer Leiterbahn aufgebracht werden muss, aus zwei Komponenten zusammensetzt. Eine zur Überwindung der wirkenden Haftmechanismen und eine zweite zur Deformation der Leiterbahn. Da die zur Deformation der Leiterbahn erforderliche Kraft in direktem Zusammenhang mit der Schichtdicke steht, wirkt sich diese folglich auch auf die Ergebnisse des Schältests aus. Gemäß einer in [96] empirisch ermittelten Normierungsformel lässt sich der Einfluss unterschiedlicher Schichtdicken auf die gemessenen Schälwiderstände mit näherungsweise $0,017\text{ N/mm}$ je Mikrometer Abweichung von einer definierten Bezugsschichtdicke quantifizieren. [96][99][100]

Im Falle von LDS-MID erfüllen die Metallisierungen für gewöhnlich nicht die Anforderungen, die der Schältest an die Leiterbahnen stellt. Die hohe Sprödigkeit der dünnen Metallschichten führt dazu, dass die Leiterbahnen unter der wirkenden Belastung reißen und verhindert damit bei einer üblichen Beschaffenheit der Metallisierung die Anwendbarkeit des Tests. Abhilfe kann eine galvanische Verstärkung der Metallisierung schaffen. Der zusätzliche Prozessschritt ermöglicht es, ausreichend dicke Schichten aufzubauen, die robust genug sind, sich in der erforderlichen Länge vom Substrat abschälen zu lassen. Bei einer entsprechenden Modifikation der Metallisierung zu Testzwecken ist allerdings die Aussagekraft der Ergebnisse für Bauteile im unveränderten Zustand kritisch zu hinterfragen, da eine Beeinflussung der Haftfestigkeit durch den Galvanikprozess nicht ausgeschlossen werden kann. Weiter spricht der Bedarf an verhältnismäßig großen planaren Flächen für die erforderlichen Prüfstrukturen gegen eine Anwendung des Schältests bei MID. Nur in wenigen Ausnahmefällen bieten die Formteile realer MID-Applikationen die benötigten ebenen Flächen, um Testleiterbahnen in den vorgegebenen Dimensionen aufbringen zu können. Im Normalfall wird dadurch nicht nur die direkte Prüfung der Haftfestigkeit an Serienprodukten ausgeschlossen, sondern auch eine serienbegleitende Herstellung anwendungsnaher Probekörper eingeschränkt. Bild 23 zeigt auf der linken Seite die Aufnahme eines Schältests an einem Probekörper mit galvanisch verstärkten LDS-Leiterbahnen sowie rechts daneben ein resultierendes Kraft-Weg-Diagramm.

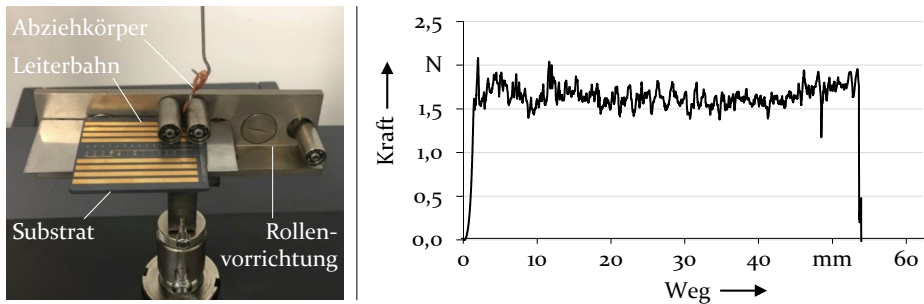


Bild 23: Schältest an galvanisch verstärkten LDS-Leiterbahnen (links) und resultierendes Kraft-Weg-Diagramm (rechts)

Der **Stirnabzugstest** zählt zu den am häufigsten eingesetzten Verfahren für die Bestimmung von Haftfestigkeiten dünner Oberflächenbeschichtungen. Das Testprinzip beruht darauf, in einem Zugprüfgerät die erforderliche Zugspannung zu ermitteln, die zur Trennung des zu prüfenden Materialverbundes aufgewendet werden muss. Für die Prüfung der Metallisierungshaftfestigkeit auf starren Basissubstraten wird hierzu ein zylindrischer Stahl- oder Aluminiumstempel mit ebener Stirnfläche auf die Testmetallisierung geklebt. Für den Durchmesser des Prüfstempels ist in der Norm ein Wert von 7 mm angegeben. Ergänzend wird darauf hingewiesen, dass mit abnehmendem Prüfstempeldurchmesser die Anzahl der Messungen zu erhöhen ist, um die Präzision der Prüfung beizubehalten. Nach Ablauf der Aushärtezeit des Klebstoffes wird die Prüfanordnung in das Zugprüfgerät eingespannt. Um Biegemomente während der Prüfung zu vermeiden, ist auf eine präzise senkrechte Ausrichtung des eingespannten Prüfstempels zur Substratebene zu achten. Unter Beaufschlagung einer ansteigenden Zugkraft von maximal 1 N/mm^2 je Sekunde wird die Prüfanordnung schließlich derart belastet, dass innerhalb von 90 Sekunden ein Versagen des Materialverbundes eintritt. Die Haftfestigkeit ergibt sich aus dem Quotienten der ermittelten Abreißkraft zur Prüfstempelfläche in N/mm^2 . Als Resultat der Prüfung ist aus allen gültigen Messwerten der errechnete Mittelwert einschließlich der Standardabweichung anzugeben. Zusätzlich sind die Art des Bruches, wie beispielsweise ein Kohäsionsbruch im Substrat oder ein Adhäsionsbruch in der Grenzfläche zwischen Substrat und Beschichtung, und gegebenenfalls für jede Bruchart der geschätzte Flächenanteil auf 10 % gerundet zu spezifizieren. [96][101]

Aufgrund der üblicherweise begrenzten planaren Flächen von MID-Formteilen erfordert die Anwendung des Stirnabzugstests oftmals eine deutliche Reduzierung des Prüfstempeldurchmessers und damit auch der Abzugsflächen. In der Praxis werden die Durchmesser auf 5 mm oder sogar bis auf

3 mm verringert [66][97]. Dies hat zur Folge, dass sich sowohl ein gleichmäßiger Auftrag des Klebstoffes in geeigneter Dosierung als auch das zentrierte, senkrechte Aufsetzen der Prüfstempel auf die deckungsgleichen Testmetallisierungen zunehmend schwieriger gestalten. Typische Fehlerbilder, die hieraus resultieren, sind anhand exemplarischer Aufnahmen in Bild 24 dargestellt.

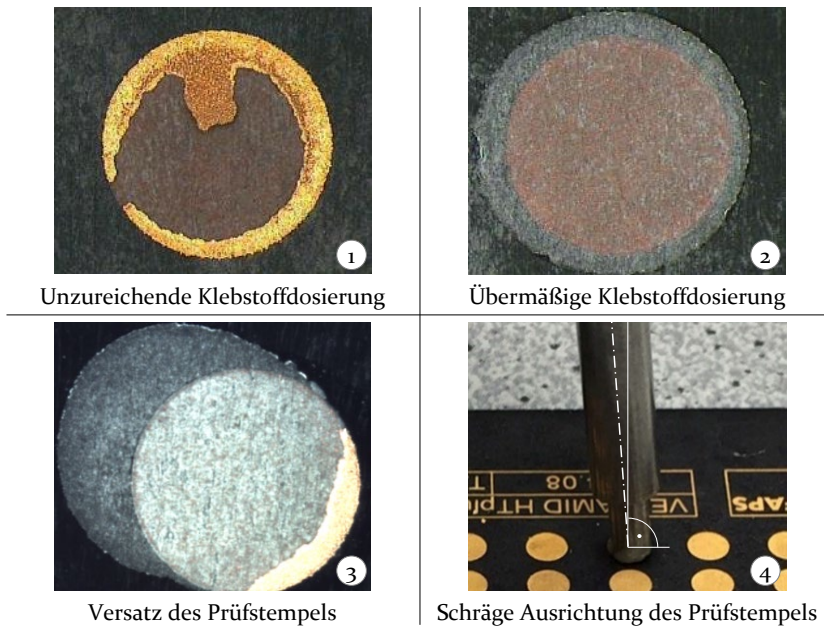


Bild 24: Typische Fehler beim Stirnabzugstest [98]

Aufnahme 1 zeigt Rückstände einer Testmetallisierung nach Abzug des Prüfstempels. Bedingt durch eine zu geringe Dosierung des Klebstoffes wurde nur ein Teil der Testmetallisierung unkontrolliert aus der gesamten Abzugsfläche ausgerissen. Eine Überdosierung des Klebstoffes führt, wie in Aufnahme 2 illustriert, zu einer Verbindung des Prüfstempels mit der umliegenden Substratoberfläche. Eine beschädigungsfreie Entfernung von überschüssigem Klebstoff erweist sich in der Praxis gerade bei kleinen Testmetallisierungen als Herausforderung. Während Aufnahme 3 einen Versatz von Prüfstempel und Testmetallisierung im Zuge der Probenpräparation zeigt, ist in Aufnahme 4 deutlich zu erkennen, dass der Prüfstempel nicht orthogonal zur Abzugsfläche steht. Die Ursache hierfür liegt überwiegend in der Ungenauigkeit einer manuellen Positionierung. Doch selbst bei einer zunächst präzise senkrechten Ausrichtung kann eine ungleichmäßige Aushärtung des Klebstoffes eine Neigung des Prüfstempels hervorrufen [96].

Zu einer folgenschweren Konsequenz führt bereits eine leichte Schräglage des Prüfstempels. Sie verhindert ein momentfreies Einspannen der Probe im Zugprüfgerät und führt damit ebenso wie die in den Aufnahmen 1 bis 3 dargestellten Fehlerbildern zu einer Verfälschung des Messergebnisses. Durch geeignete Hilfsmittel, die bis zur vollständigen Aushärtung des Klebstoffes die Position und Ausrichtung der Prüfstempel sichern, kann das Risiko von Versatz und Schräglage zwar gemindert werden, jedoch erhöht sich hierdurch auch der Präparationsaufwand für das Prüfverfahren. Der große Anteil an manuellen, teils anspruchsvollen Tätigkeiten erfordert vom Personal ein hohes Maß an Sorgsamkeit, Geschick und Erfahrung und schränkt zugleich die Reproduzierbarkeit des Prüfverfahrens erheblich ein.

Der **Schertest** wird in der Elektronikfertigung entsprechend der Norm DIN EN 62137-1-2 primär zur Bestimmung der mechanischen Festigkeit von Lötverbindungen oberflächenmontierter Bauelemente eingesetzt. Mithilfe einer mechanischen Scherbeanspruchung wird der Verbund zwischen den Bauteilanschlüssen und den Anschlussflächen auf dem Substrat bewertet. Da eine Anwendung der Prüfung bei LDS-basierten Baugruppen in vielen Fällen zu einem Versagen des Verbundsystems zwischen Substrat und den Anschlusspads führt, findet das Verfahren in diesem Anwendungsbereich jedoch auch vielfach Einsatz, um Metallisierungshaftfestigkeiten zu bestimmen. Für die Durchführung des Prüfverfahrens wird ein Probekörper mit oberflächenmontierten Bauelementen in einem Schertester so eingespannt, dass der Schermeißel eine Vorschubbewegung parallel zum Substrat und senkrecht zur Mantelfläche der Bauelemente ausführen kann. Um zu gewährleisten, dass die Messergebnisse nicht durch zusätzlich wirkende Schälkräfte verfälscht werden, ist auf eine präzise Ausrichtung der Stirnfläche des Schermeißels parallel und mittig zur Kontaktfläche sowie auf eine Scherhöhe von weniger als ein Viertel der Höhe des Bauelements zu achten. Für ein Versagen der Verbindungsstelle innerhalb einiger zehn Sekunden bis einiger Minuten wird die Vorschubgeschwindigkeit üblicherweise im Bereich zwischen 0,5 mm/min und 9 mm/min festgelegt. Unter Aufzeichnung der resultierenden zunehmenden Scherkraft fährt der Schermeißel mit konstanter Vorschubgeschwindigkeit gegen das Bauelement, bis der Versagensfall eintritt. Die Maximalkraft, die dabei gemessen wird, entspricht der Scherfestigkeit in N. Als Ergebnis der Prüfung ist zusätzlich zu dieser die Ausfallart anzugeben. Während ein Abreißen der Anschlussflächen vom Substrat eine direkte Bewertung der Metallisierungshaftfestigkeit erlaubt, lassen alternative Ausfallarten wie ein Versagen des Bauteils, ein Versagen im Lot und dessen Schnittstellen oder Mischbrüche nur indirekte Rückschlüsse auf diese zu. [67][97][98][102]

Bild 25 zeigt anhand exemplarischer Aufnahmen unterschiedliche Bruchbilder, die bei Schertests auf LDS-MID häufig auftreten. In Aufnahme 1 ist eindeutig zu erkennen, dass der Schermeißel beim Abscheren des Bauelements in das Kunststoffsubstrat eingedrungen ist. Dieses Fehlerbild tritt vor allem bei einer fehlerhaften Einspannung der Probekörper und einer Verwölbung der Bauteile auf. Die augenscheinlich verfälschten Ergebnisse entsprechender Messungen sind zu verwerfen. Das Bruchbild in Aufnahme 2 zeigt ein Versagen im Bauelement. Ein exemplarisches Bild von einem Bruch im Lot am Übergang zum Bauelement ist in Aufnahme 3 zu sehen. Ein Mischbruch, bei dem auf der linken Seite das Versagen im Lot und auf der rechten Seite ein Adhäsionsbruch zwischen Anschlussmetallisierung und Substrat eingetreten ist, wird in Aufnahme 4 abgebildet. In allen drei zuletzt genannten Fällen können die ermittelten Scherfestigkeiten nur bedingt zur Beurteilung der Metallisierungshaftfestigkeit herangezogen werden. Lediglich bei einem ausschließlichen Versagen in der Grenzschicht zwischen Substrat und den Anschlusspads, wie er in Aufnahme 5 dargestellt ist, wird die Haftfestigkeit des Metall-Kunststoff-Verbundes direkt bestimmt.

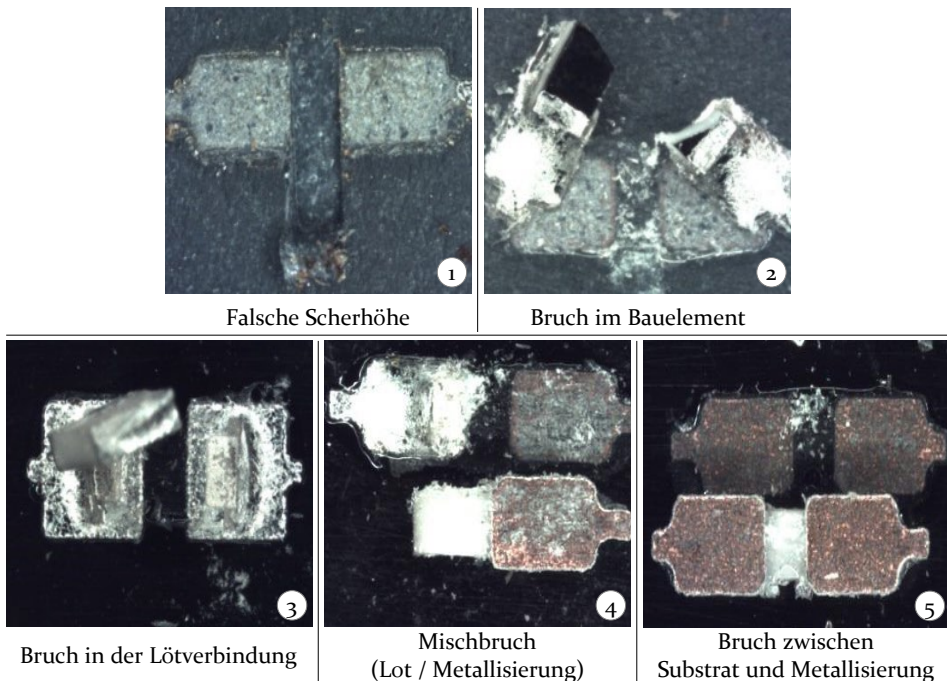


Bild 25: Unterschiedliche Bruchbilder beim Schertest [98]

Sowohl die Eigenschaften der Prüfkörper (Bauelement, Verbindungsmedium, Schichteigenschaften, Substratmaterial etc.) als auch die spezifischen Prüfbedingungen (Schermeißelgeometrie, Scherhöhe, Schergeschwindigkeit, Einspannung und Ausrichtung der Probekörper etc.) haben Auswirkungen auf die Ausfallart und damit auf die Anzahl verwendbarer Messergebnisse zur Bestimmung der Metallisierungshaftfestigkeit. In Abhängigkeit der Einflussfaktoren kann die gewünschte Ausfallart zwischen Metallisierung und Kunststoff unter Umständen nur selten eintreten oder gar vollständig ausbleiben. Eine weitere, wesentliche Einschränkung des klassischen Schertests an elektronischen Bauelementen besteht darin, dass diese zunächst mittels Verbindungstechniken wie Löten oder Leitleben auf den Anschlussmetallisierungen montiert werden müssen. Zu berücksichtigen ist dabei, dass die Haftung durch die thermische Beanspruchung des Metall-Kunststoff-Verbundes in den Montageprozessen beeinflusst werden kann. Eine Bestimmung der initialen Haftfestigkeit nach dem Metallisierungsprozess ist nicht möglich.

3.1.2 Qualifizierung des Hot-Pin-Pull-Tests

Der Hot-Pin-Pull-Test stellt eine spezielle Variante des Stirnabzugstests dar, die mit dem Multifunktionstester 4000Plus des Prüfanlagenherstellers Nordson DAGE durchgeführt werden kann. Die wesentliche Besonderheit des Verfahrens basiert auf einer beheizbaren Messdose, über die sich ein benutzerdefiniertes Temperaturprofil auf den Abzugskörper übertragen lässt. Bei Verwendung von Lotpaste als Verbindungsmedium ist es auf diese Weise möglich, unter reproduzierbaren Bedingungen eine Verbindung zwischen dem Abzugskörper und der metallischen Testfläche herzustellen. Als Abzugskörper kommen zylindrische Kupferstifte (Pins) mit einem Durchmesser von 900 µm und einer Länge von 38 mm zum Einsatz. Die Pins können über den Anlagenhersteller in verschiedenen Varianten mit unterschiedlicher Ausprägung ihrer Spitze bezogen werden. Eine schematische Darstellung des Hot-Pin-Pull-Tests und der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Pin-Variante zeigt Bild 26.

Für die Durchführung des Tests wird ein Pin manuell in die Messdose eingeführt und in die gefederte Fixiervorrichtung geschoben. Mithilfe einer vertikalen Bilderfassung lässt sich der Arbeitstisch über motorisierte Achsen so in x- und y-Richtung verfahren, dass die Pin-Spitze zentral über der Testmetallisierung mit der zuvor applizierten Lotpaste positioniert ist.

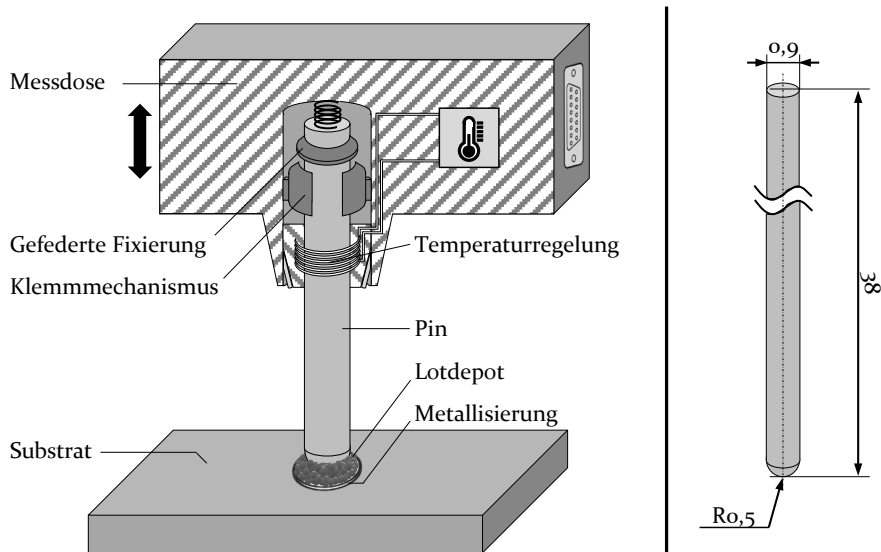


Bild 26: Schematische Darstellung des Hot-Pin-Pull-Tests (links) und der verwendeten Pin-Variante (rechts)

Durch das Absenken der Messdose wird der Pin anschließend in das Lotdepot gefahren, bis dieser sanft auf der Testmetallisierung aufliegt. Nach Start des Testvorgangs wird der Pin gemäß dem ausgewählten Temperaturprofil aufgeheizt, wodurch das Lot aufschmilzt und die Testmetallisierung sowie den Pin benetzt. Die Abkühlung erfolgt mittels Druckluft, die über die Messdose am Pin entlang auf den Probekörper geleitet wird. Während der Ausführung des Temperaturprofils kompensiert die Prüfanlage automatisch thermisch bedingte Längenänderungen des Kupfer-Pins durch geringfügige Ausgleichsbewegungen der Messdose. Sobald der Lötprozess abgeschlossen und die vorgegebene Testtemperatur erreicht ist, wird der Pin über einen Klemmmechanismus in der Messdose arretiert und die Testmetallisierung unter Beaufschlagung einer ansteigenden vertikalen Kraft vom Substrat abgezogen. Ebenso wie beim klassischen Stirnabzugstest ergibt sich die Haftfestigkeit in N/mm^2 aus dem Quotienten der erforderlichen Zugkraft zur Abzugsfläche.

Der Aufbau und Ablauf des Hot-Pin-Pull-Tests ist in Bild 27 dargestellt. Die sieben Einzelaufnahmen zeigen das Absenken des Pins auf die mit Lot versehene Testmetallisierung (1 und 2), den Lötprozess (3 bis 6) sowie den Abzug der Teststruktur (7) im Detail.

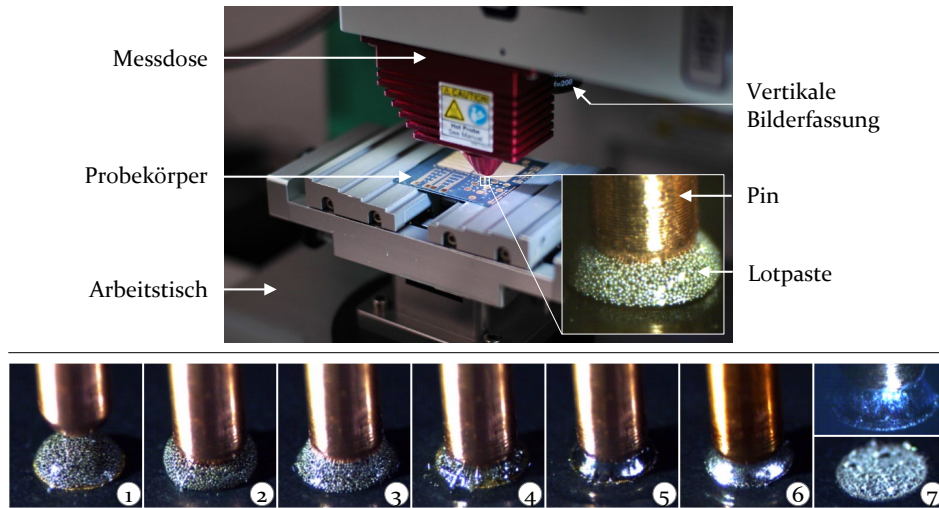


Bild 27: Aufbau und Ablauf [98] des Hot-Pin-Pull-Tests

Zur Qualifizierung des Hot-Pin-Pull-Tests als neues Haftfestigkeitsprüfverfahren für LDS-MID werden anhand verschiedener Versuchsreihen die potenziellen Einflüsse zentraler Prüfparameter analysiert. Ziel ist es, durch eine systematische Variation von Einstellungen und Randbedingungen wesentliche Erkenntnisse zu den resultierenden Auswirkungen auf den Prüfablauf und die Testergebnisse zu gewinnen. Basierend darauf wird ein Standard für eine einheitliche und reproduzierbare Durchführung des Prüfverfahrens festgelegt, der die Voraussetzung für die Vergleichbarkeit ermittelter Haftfestigkeitsergebnisse schafft.

Um ein reproduzierbares Abzugsverhalten der Prüfstrukturen gewährleisten zu können, ist eine vollständige Benetzung der Testmetallisierungen mit dem als Verbindungsmedium eingesetzten Lot erforderlich. Entscheidenden Einfluss auf das Benetzungsverhalten haben, abgesehen vom Typ und der Menge der verwendeten Lotpaste sowie dem ausgewählten Temperaturprofil, auch die Eigenschaften der Metallisierung (Rauheit, Verunreinigungen etc.). In einer Versuchsreihe wurde der Hot-Pin-Pull-Test unter Verwendung von niedrigschmelzender SnBi-Lotpaste an Prüfstrukturen im Durchmesser von 2 mm auf verschiedenartigen Probekörpern angewandt. Die Versuchsreihe lässt in Abhängigkeit des Benetzungszustands der Testmetallisierungen ein differenzierbares Abzugsverhalten erkennen, das sich gemäß der drei links in Bild 28 veranschaulichten Fälle darstellt.

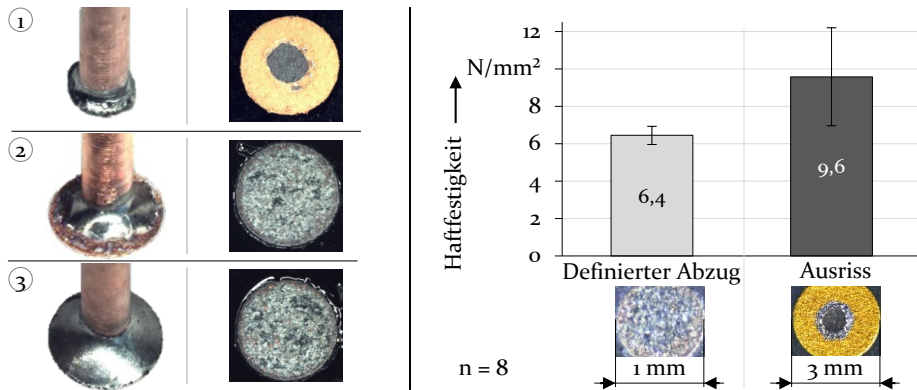


Bild 28: Exemplarische Aufnahmen abgezogener Prüfstrukturen bei unterschiedlichem Benetzungszustand (links) und Haftfestigkeitsergebnisse definierter Abzüge gegenüber unkontrollierter Ausrisse bei gleicher Lotmenge (rechts) [98]

Liegt keine vollständige Benetzung der Prüfstruktur vor, hat dies, wie in Fall 1 zu sehen, überwiegend einen unkontrollierten Ausriss einer Teilfläche aus der gesamten Testmetallisierung zur Folge. Alternativ ist bei einer nur partiellen Benetzung der Testmetallisierung unter gewissen Umständen allerdings auch ein vollständiger Abzug der Prüfstruktur möglich. Ein entsprechendes Abzugsverhalten, wie es in Fall 2 abgebildet ist, lässt sich insbesondere bei höheren Schichtdicken beobachten. Durch die ungleichmäßig und nur auf eine Teilfläche wirkende Zugkraft ist in diesem Fall jedoch von einer Schälbelastung in den Randbereichen der Metallisierung und einer nicht reproduzierbaren Beeinflussung der Messung auszugehen. Lediglich Fall 3 ermöglicht mit der vollständigen Benetzung der Prüfstrukturen ein definiertes und reproduzierbares Abzugsverhalten.

In einer weiterführenden Testreihe wurde das Abzugsverhalten in Form von Ausrissen gemäß Fall 1 gezielt vollständigen Abzügen von Prüfstrukturen gemäß Fall 3 gegenübergestellt. Auf einem Probekörper wurden zu diesem Zweck bei gleichen Prüfbedingungen Hot-Pin-Pull-Tests mit einheitlicher Lotmenge auf Testmetallisierungen in einer Größe von 1 mm sowie 3 mm Durchmesser durchgeführt. Das für eine vollständige Benetzung der 1 mm Kreise in Voruntersuchungen festgelegte Lotvolumen von $0,045 \pm 0,01 \text{ mm}^3$ wurde mittig auf alle Prüfstrukturen dispenst. Die Ergebnisse zeigen, dass die Testmetallisierungen mit einem Durchmesser von 1 mm erwartungsgemäß vollständig mit ihrer definierten Fläche von $0,79 \text{ mm}^2$ vom Substrat abgezogen werden. Die ausgerissenen Flächen auf den 3 mm Kreisen variieren hingegen im Bereich von $0,52 \text{ mm}^2$ bis $0,86 \text{ mm}^2$ mit einem Mittelwert von $0,62 \text{ mm}^2$. Wie die Auswertung auf der rechten Seite in Bild 28 zeigt, weichen die resultierenden Haftfestigkeiten

in den beiden betrachteten Fällen noch deutlicher voneinander ab. Mit einem Mittelwert von $9,6 \text{ N/mm}^2$ liegt die Haftfestigkeit für die herausgerissenen Metallisierungen um 50 % höher als der Mittelwert der definierten, vollflächigen Abzüge mit $6,4 \text{ N/mm}^2$. Erklären lassen sich die höheren Werte bei den Ausrissen zum einen damit, dass die Metallisierungen vielfach in einem größeren Bereich vom Substrat gelöst werden, als es die abgerissenen, messbaren Flächen in den Ergebnissen berücksichtigen lassen. Zum anderen fließen durch die kohäsive Trennung der Metallisierung zusätzliche Kräfte in die Haftfestigkeitsergebnisse mit ein, die in Abhängigkeit der Schichtdicke und der Duktilität in unterschiedlichem Ausmaß ausfallen. Das aus diesen Umständen uneinheitliche und nicht reproduzierbare Abzugsverhalten spiegelt sich in der hohen Standardabweichung der Testergebnisse wider. Im Rahmen der Testreihe beträgt diese bei den Ausrissen mit 27,3 % mehr als das 3,5-fache im Vergleich zur relativen Standardabweichung in Höhe von 7,5 % bei den definierten Abzügen.

Da die erforderliche Größe der Prüfstrukturen Einfluss auf die Eignung des Testverfahrens für LDS-MID hat, befasst sich eine weitere Versuchsreihe mit diesem Aspekt. Beim konventionellen Stirnabzugstest wird aufgrund der in Abschnitt 3.1.1 geschilderten Beeinträchtigungen von einer Anwendung an Testmetallisierungen mit einem Durchmesser von weniger als 3 mm abgesehen. Der Hot-Pin-Pull-Test hat hingegen das Potenzial, auch an deutlich kleineren Prüfstrukturen angewendet zu werden. Mit einem maschinellen Auftrag der Lotpaste, der präzisen, kameraunterstützten Positionierung des Probekörpers zum Pin über den Arbeitstisch sowie dem hohen Automatisierungsgrad des Prüfprozesses lassen sich die vom Stirnabzugstest bekannten Komplikationen weitestgehend ausschließen. Um die Anwendbarkeit des Hot-Pin-Pull-Tests an kleinen Prüfstrukturen zu verifizieren und etwaige damit einhergehende Auswirkungen zu untersuchen, wurden im Rahmen der Versuchsreihe kreisförmige Metallisierungen in variierender Größe abgezogen. Die hierfür verwendete Testplatte aus dem Material LCP Vectra® E840i LDS verfügt über Testmetallisierungen, die in 0,5 mm Schritten bis zu einem Durchmesser von 3 mm mit identischen Fertigungsparametern strukturiert und metallisiert wurden. Als Verbindungsmedium kam erneut eine niedrigschmelzende SnBi-Lotpaste mit einer Liquidustemperatur von 138°C zum Einsatz. Für eine vollständige Benetzung aller Testmetallisierungen wurde die dispenste Lotmenge an die jeweilige Abzugsfläche angepasst. Die ausgewerteten Versuchsergebnisse sind in Bild 29 dargestellt.

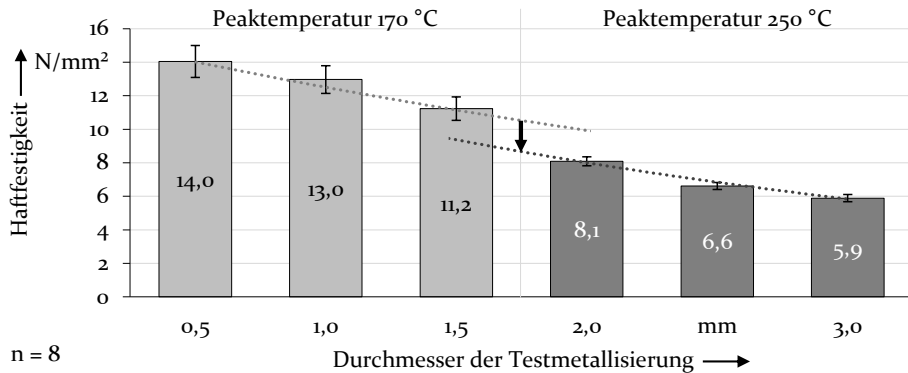


Bild 29: Haftfestigkeitsergebnisse im Hot-Pin-Pull-Test bei unterschiedlicher Größe der Testmetallisierung

Für die Abzüge der Testmetallisierungen bis zu einem Durchmesser von 1,5 mm wurde ein Temperaturprofil mit einer Peaktemperatur von 170 °C und einer Haltezeit von 20 Sekunden verwendet. Da mit diesem Profil die über den Pin zugeführte Wärme jedoch nicht mehr ausreichte, um für die Testmetallisierungen ab einem Durchmesser von 2 mm ein vollständiges Aufschmelzen der Lotpaste und eine vollflächige Benetzung der Abzugsflächen zu gewährleisten, wurde die Peaktemperatur für die weiteren Abzüge auf 250 °C erhöht.

Die Versuchsreihe belegt die grundsätzliche Anwendbarkeit des Hot-Pin-Pull-Tests an Metallisierungen mit Durchmessern von 0,5 mm bis 3 mm. Ab einer Größe von 1 mm ist die Anwendung des Prüfverfahrens als unproblematisch zu bewerten. Lediglich auf den kleinsten Abzugsflächen mit 0,5 mm Durchmesser ist das präzise Dispensieren der Lotpaste sowie die optische Überprüfung der korrekten Positionierung des Pins auf der Abzugsfläche als nennenswerte Herausforderung zu betrachten.

Die auffällige Abnahme der ermittelten Haftfestigkeiten mit zunehmender Größe der Testfläche folgt einem bekannten Effekt. Als Erklärung für den inversen Zusammenhang zwischen unterschiedlich dimensionierten Testflächen und den resultierenden Haftfestigkeitsergebnissen wird sowohl auf die Existenz von Defektstellen im Materialverbund als auch auf eine ungleichmäßige Spannungsverteilung an der Abzugsfläche verwiesen. Zum einen steigt demnach mit einer Vergrößerung der Testfläche grundsätzlich die Wahrscheinlichkeit respektive die Anzahl darin vorhandener festigkeitslimitierender Fehlstellen. Zum anderen zeigen FEM-Analysen (Finite-Elemente-Methode) in [103] und [104], dass die Belastung bei Abzugstests keineswegs gleichmäßig über die Testfläche verteilt ist. Aus der in der

Praxis nicht vollständig kontrollierbaren Vielzahl an Einflussfaktoren wie beispielsweise der Ausprägung der Verbindungsstelle (z. B. Lötstelle, Klebstoffverteilung) resultieren bei der Testdurchführung heterogene Belastungszustände, die zusätzlich zu den Fehlstellen erhebliche Spannungskonzentrationen im Materialverbund hervorrufen können. Der tatsächliche Spannungspegel, der schließlich aufgrund einer lokalen Überbeanspruchung das Versagen des Testverbunds auslöst, kann den errechneten Haftfestigkeitswert, der sich auf die gesamte Testfläche bezieht, um ein Vielfaches übersteigen. Nominal nimmt somit die Haftfestigkeit bei zunehmender Testfläche als Bezugsgröße für die Berechnung der Testergebnisse ab. [103][104][105][106][107]

Eine nähere Betrachtung der in Bild 29 dargestellten Ergebnisse zeigt, dass die deutlichste Haftfestigkeitsabnahme in der durchgeführten Versuchsreihe mit der Erhöhung der Peaktemperatur von 170 °C auf 250 °C eintritt. Während sich die Haftfestigkeitswerte im Übrigen von einer Prüfstruktur zur nächstgrößeren um durchschnittlich 12,5 % verringert, reduziert sich die ermittelte Haftfestigkeit bei den Testmetallisierungen mit 2 mm Durchmesser (250 °C Peaktemperatur) gegenüber den 1,5 mm Kreisen (170 °C Peaktemperatur) von 11,2 N/mm² auf 8,1 N/mm² und damit um 28 %.

Um dem naheliegenden Verdacht der Beeinflussung der Messergebnisse durch die gesteigerte Peaktemperatur nachzugehen, wurde in einer zusätzlichen Versuchsreihe der Einfluss des Temperaturprofils auf den Hot-Pin-Pull-Test untersucht. Über die Bedienoberfläche der Prüfanlage lassen sich anhand von sechs Temperatur- und Zeitparameter benutzerdefinierte Profile für den Hot-Pin-Pull-Test erstellen. Entscheidend für die Festlegung eines Temperaturprofils ist in erster Linie die eingesetzte Lotpaste. Daneben sind allerdings auch weitere Faktoren wie die Konvektion in der Prüfumgebung, die thermischen Eigenschaften des Substratmaterials, das Benetzungsverhalten der Testmetallisierung oder, wie die vorangegangene Versuchsreihe zeigt, die Größe der Abzugsfläche und das applizierte Lotvolumen zu berücksichtigen. Ausgangspunkt für die Versuchsreihe zum Einfluss des Temperaturprofils ist das in Bild 30 dargestellte Profil. Voruntersuchungen haben gezeigt, dass sich dieses bei Verwendung von SnBi-Lotpaste für eine robuste Prüfung der Haftfestigkeit an Metallisierungen mit 1 mm Durchmesser auf gängigen LDS-Kunststoffen eignet.

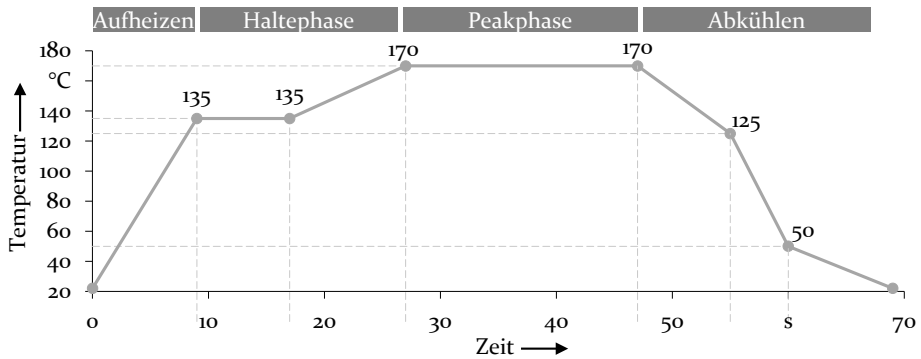


Bild 30: Exemplarisches Temperaturprofil für den Hot-Pin-Pull-Test bei Verwendung von SnBi-Lot

Unter Einhaltung der genannten Bedingungen erfolgte die Versuchsdurchführung an Probekörpern aus dem LCP-Material Vectra® E840i LDS. Mit einer Steigerung der Peaktemperatur um jeweils 40 K wurde im Rahmen der Versuchsreihe das abgebildete Temperaturprofil in vier Schritten verschärft. Die in Bild 31 dargestellten Ergebnisse bestätigen den Einfluss des Temperaturprofils auf die ermittelten Haftfestigkeiten. Mit zunehmender Peaktemperatur ist eine stetige Abnahme der Haftfestigkeitswerte festzustellen. Bei den gewählten Testbedingungen verringert sich die ermittelte Haftfestigkeit mit jeder Temperaturerhöhung um durchschnittlich 5,0 %. Gleichzeitig lässt sich mit steigender Peaktemperatur eine Zunahme der Standardabweichung beobachten. Bei 170 °C liegt diese bezogen auf den Mittelwert bei lediglich 1,5 %. Verglichen damit steigt die relative Standardabweichung für die Messungen bei einer Peaktemperatur von 330 °C auf den mehr als vierfachen Wert von 6,2 % an.

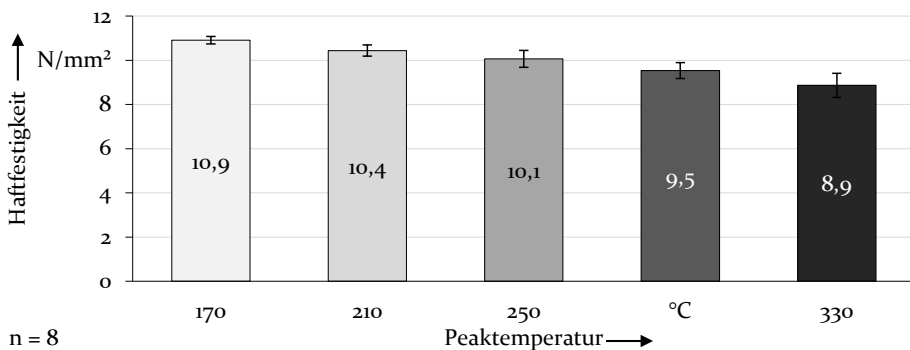


Bild 31: Haftfestigkeitsergebnisse im Hot-Pin-Pull-Test bei Temperaturprofilen mit unterschiedlichen Peaktemperaturen

In Bild 32 sind Schliffbilder, die den Metall-Kunststoff-Verbund unmittelbar vor dem Abzug im Hot-Pin-Pull-Tests zeigen, sowie Aufnahmen von Abzugsflächen nach erfolgter Prüfung für Peaktemperaturen von 170 °C und 330 °C gegenübergestellt. Bei der Peaktemperatur von 170 °C sind bei einer Begutachtung der Aufnahmen keine Auffälligkeiten festzustellen. Im Falle der wesentlich höheren thermischen Prüfbelastung zeigen die Aufnahmen hingegen eine erhebliche temperaturbedingte Schädigung des Substratmaterials.

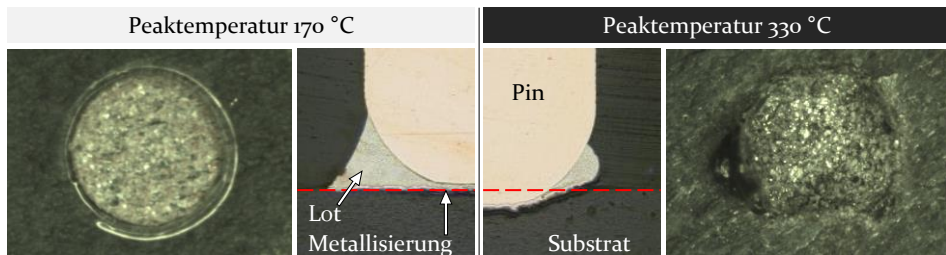


Bild 32: Gegenüberstellung exemplarischer Schliffbilder und Abzugsflächen für den Hot-Pin-Pull-Test mit 170 °C und 330 °C Peaktemperatur [98]

Hierbei ist zu beachten, dass die dargestellten Untersuchungen zum Einfluss des Temperaturprofils an LCP-basierten Probekörpern vorgenommen wurden. Bei einer Durchführung des Hot-Pin-Pull-Tests an thermisch sensibleren Kunststoffen ist davon auszugehen, dass die nachgewiesenen Effekte verstärkt und bereits bei geringeren Temperaturen auftreten. Um die Messergebnisse nicht unnötig durch den Prüfprozess zu beeinflussen, ist das Temperaturprofil daher so schonend wie möglich auf die Messaufgabe auszulegen.

Basierend auf den Erkenntnissen aus den einzelnen Versuchsreihen wird für den Hot-Pin-Pull-Test ein Prüfstandard definiert, der die Gestaltung der Prüfstrukturen, die einzusetzende Lotpaste, das zu verwendende Temperaturprofil und den Zustand der Benetzung der Prüfstrukturen spezifiziert. Des Weiteren werden für einen einheitlichen und reproduzierbaren Prüfprozess die Probekörperfixierung, die Methode des Lotpastenauftrags, die zu verwendende Pin-Variante und die Einstellung der Abzugsgeschwindigkeit vorgegeben. Die konkreten Spezifikationen für die Haftfestigkeitsprüfung im Hot-Pin-Pull-Test sind in Bild 33 aufgeführt.

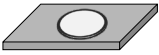
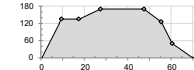
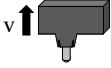
Prüfstruktur	Lotpaste	Temperaturprofil	Benetzung
			
Kreisförmige Metallisierung mit 1 mm Durchmesser	SnBi-Lotpaste (Schmelztemperatur 138 °C)	Peaktemperatur 170 °C Haltezeit 20 s (vgl. Abbildung 30)	Vollständige Lot-Benetzung der Prüfstruktur
Probekörperfixierung	Lotpastenauftrag	Pin-Variante	Abzugsgeschwindigk.
			
Niederhalter	Maschinelles Dispensieren	Spitzenradius 500 µm	0,1 mm/s

Bild 33: Prüfstandard für die Bestimmung der Metallisierungshaftfestigkeit bei LDS-MID im Hot-Pin-Pull-Test

3.1.3 Experimenteller Vergleich alternativer Prüfverfahren

Für eine abschließende Bewertung der Prüfverfahren wurden in einer vergleichenden Versuchsreihe die Metallisierungshaftfestigkeiten verschiedener LDS-Probekörper mit alternativen Methoden bestimmt. Ausgewählt wurden hierfür der konventionelle Stirnabzugstest, der Schertest und der Hot-Pin-Pull-Test, da all diese Verfahren im Gegensatz zum Schältest bei LDS-typischen Schichteigenschaften prinzipiell anwendbar sind. Die Durchführung der Versuche erfolgte an vier unterschiedlichen Varianten von Probekörpern (V₁ bis V₄) aus den Materialien LCP (Vectra® E840i LDS) und PPA (Vestamid® HTplus TGP 3586). Durch eine gezielte Variation der Fertigungsparameter wurden je Material sowohl eine Variante mit glatten als auch eine mit vergleichsweise rauen Prüfstrukturen hergestellt. Eine Übersicht der vier Probekörpervarianten ist Tabelle 4 zu entnehmen. Die angegebenen gemittelten Rautiefen R_z wurden mittels konfokaler Laser-scannmikroskopie bestimmt.

Tabelle 4: Übersicht der Probekörper im experimentellen Vergleich alternativer Prüfverfahren [98]

V ₁	LCP (Vectra® E840i LDS)	$R_z = 11,0 \mu\text{m}$
V ₂	LCP (Vectra® E840i LDS)	$R_z = 35,8 \mu\text{m}$
V ₃	PPA (Vestamid® HTplus TGP 3586)	$R_z = 14,0 \mu\text{m}$
V ₄	PPA (Vestamid® HTplus TGP 3586)	$R_z = 32,7 \mu\text{m}$

Der Stirnabzugstest wurde an kreisförmigen Testmetallisierungen mit einem Durchmesser von 3 mm durchgeführt. Die Verbindung der zylindrischen Prüfstempel erfolgte mithilfe eines Zweikomponenten-Epoxid-Klebstoffes mit einer Aushärtezeit von 30 Minuten bei 100 °C. Um die Prüfstempel möglichst präzise auf den deckungsgleichen Metallisierungen zu positionieren und während der Aushärtung des Klebstoffes zu stabilisieren, wurden im Rahmen der Präparationsarbeiten Haltevorrichtungen eingesetzt. Für den Schertest wurden SMD-Widerstände der Bauform 0402 unter Verwendung von SnAgCu-Lot im Kondensationsverfahren auf entsprechende Anschlussmetallisierungen gelötet. Das anschließende Abscheren der Bauelemente erfolgte mit einem 400 µm breiten Schermeißel auf einer Scherhöhe von 50 µm. Für die Vorbereitungen und die Durchführung des Hot-Pin-Pull-Tests wurden die Spezifikationen entsprechend dem festgelegten Prüfstandard (siehe Bild 33) berücksichtigt. Zur Vermeidung ungleicher Bedingungen erfolgte die Durchführung aller Tests, nachdem die Probekörper den für den Schertest erforderlichen Lötprozess bei 230 °C im Konvektionsofen durchlaufen hatten.

Die in Bild 34 dargestellten Versuchsergebnisse geben auf den ersten Blick zu erkennen, dass sich mit allen angewandten Prüfverfahren die Haftfestigkeitsunterschiede zwischen den verschiedenen Probekörpervarianten ermitteln lassen. In gewissem Maße kann damit jedem der drei Verfahren die grundsätzliche Eignung zur Haftfestigkeitsprüfung von LDS-MID attestiert werden. Bei genauerer Betrachtung der Ergebnisse fallen jedoch eklatante Unterschiede zwischen den einzelnen Verfahren auf. Besonders sticht in diesem Zusammenhang die Varianz der erzielten Standardabweichungen hervor. Während im Hot-Pin-Pull-Test Werte von etwa 5 % erreicht werden, liegen sie im Schertest mit rund 10 % auf etwa doppelt so hohem Niveau. Im Stirnabzugstest überschreiten die Standardabweichungen in zwei von vier Fällen sogar den Wert von 25 %. Beim Schertest lassen sich die wechselhaften Messergebnisse vor allem auf das stark variierende Bruchverhalten der Verbundsysteme aus Kunststoff, Metallisierung, Lotverbindung und Bauelement zurückführen. Beim Stirnabzugstest sind die teilweise erheblichen Ergebnisschwankungen in erster Linie die Folge der fehleranfälligen Versuchsvorbereitung, die von einem hohen Anteil manueller Prozesse geprägt ist. Die beeinträchtigte Reproduzierbarkeit der konventionellen Prüfverfahren spiegelt sich auch in der drastisch reduzierten Anzahl an verwendbaren Messergebnissen wider.

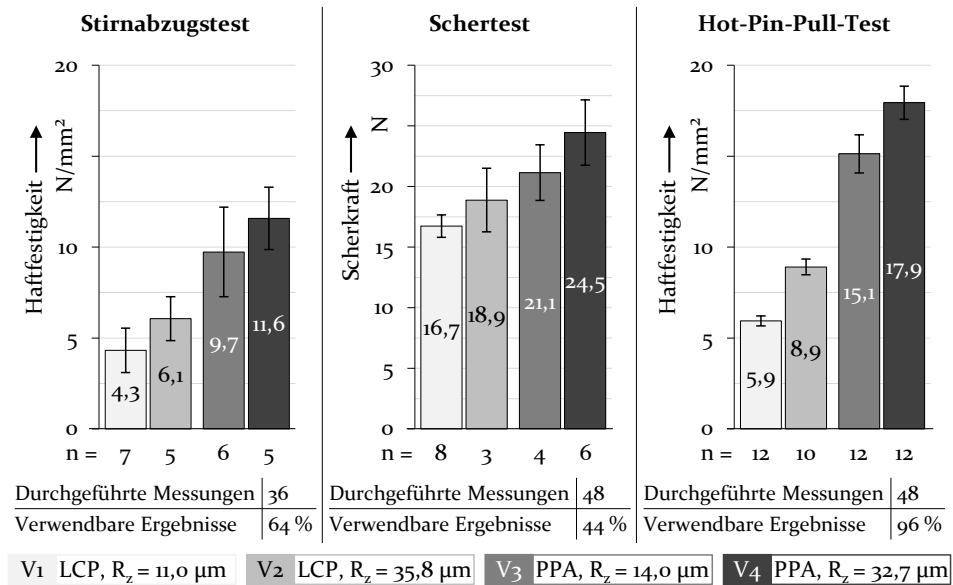


Bild 34: Gegenüberstellung der Haftfestigkeitsergebnisse im Stirnabzugstest, Schertest und Hot-Pin-Pull-Test [98]

Im Rahmen der Versuchsreihe müssen beim Stirnabzugstest rund ein Drittel der Messungen aufgrund offensichtlicher Fehler wie einer mangelhaften Klebstoffdosierung oder einer Schädigung des Prüfverbundes beim Einspannen von Probekörper und Prüfstempel verworfen werden (vgl. Bild 24). Der Anteil an verwendbaren Ergebnissen beträgt damit bei 36 durchgeführten Messungen nur 64 %. Beim Schertest gehen mit einem Anteil von 44 % nicht einmal die Hälfte der 48 durchgeführten Messungen in die Auswertung ein. In Anbetracht der eingetretenen Versagensfälle lässt die Mehrzahl der Messungen keine direkte Bestimmung der Metallisierungshaftfestigkeit zu (vgl. Bild 25) und bleibt daher in der Auswertung unberücksichtigt. Anzumerken ist in diesem Kontext, dass für eine Prüfung, die anstelle einer konkreten Bestimmung der Haftfestigkeit den Nachweis einer Mindesthaftfestigkeit zum Ziel hat, gegebenenfalls auch Messergebnisse herangezogen werden können, bei denen das Versagen nicht zwischen Substrat und Metallisierung vorliegt. Verglichen mit den konventionellen Prüfverfahren bewegt sich der Anteil an Fehlmessungen respektive an nicht verwendbaren Ergebnissen beim Hot-Pin-Pull-Test mit nur 4 % in einem nahezu vernachlässigbaren Bereich. Unter Berücksichtigung der als Standard definierten Prüfspezifikationen lassen sich mit dem Prüfverfahren Fehlmessungen weitgehend ausschließen.

Grundsätzlich ist die Eignung eines Verfahrens für eine spezifische Prüfaufgabe stets unter Beachtung der jeweiligen Anforderungen sowie Gegebenheiten zu beurteilen. Für die Auswahl eines Prüfverfahrens können folglich neben den Eigenschaften der Probekörper auch der vorgesehene Prüfumfang, die Anzahl der zur Verfügung stehenden Probekörper oder die Erfahrungen und Fähigkeiten des Bedienpersonals eine Rolle spielen.

In Tabelle 5 sind alle betrachteten Haftfestigkeitsprüfverfahren anhand potenziell entscheidungsrelevanter Kriterien bewertet. Dabei stützen sich die einzelnen Wertungen sowohl auf eine prinzipielle Betrachtung wesentlicher Verfahrensmerkmale als auch auf die Erkenntnisse aus der vergleichenden Anwendung der Prüfmethoden. Die zusammenfassende Gegenüberstellung zeigt die unterschiedlichen Stärken, Schwächen und Einschränkungen der Verfahren auf und unterstützt damit bei der systematischen Auswahl einer Testmethode.

Tabelle 5: Bewertung alternativer Haftfestigkeitsprüfverfahren

	Hot-Pin-Pull	Schertest	Stirnabzug	Schältest
MID-geeignete Prüfstruktur	++	+	o	-- ²⁾
Hohe Reproduzierbarkeit	++	+	-	+
Geringer Bedienerinfluss	++	+	--	+
Hoher Anteil verwendbarer Ergebnisse	++	-	o	+
Geringer zeitlicher Aufwand	++	++ ¹⁾	-	o
Geringe Temperaturbelastung	-	++ ¹⁾	+	++
Besondere Einschränkungen		1)		2)
1) Montage von Bauelementen erforderlich → Beeinflussung der initialen Haftfestigkeit 2) Typische LDS-Schicht zu dünn bzw. zu spröde → Galvanische Schichtverstärkung erforderlich				

trifft zu (++) trifft überwiegend zu (+) neutral (o) trifft überwiegend nicht zu (-) trifft nicht zu (--)

3.2 Zentrale Einflussgrößen auf die Metallisierungshaftfestigkeit

Die Grundvoraussetzung, um eine für den individuellen Anwendungsfall ausreichende Metallisierungshaftfestigkeit sicherzustellen, sind Kenntnisse zu den zentralen Faktoren, die diese maßgeblich beeinflussen. Material- und fertigungsbedingte Aspekte, die die Ausgangshaftfestigkeit bestimmen, sind dabei ebenso von Bedeutung wie Umweltbelastungen, die

in der späteren Anwendung die ursprüngliche Haftung sukzessive beeinträchtigen können. Die im Folgenden dargestellten Forschungsarbeiten wurden unter Anwendung des Hot-Pin-Pull-Tests gemäß der in Bild 33 definierten Vorgaben durchgeführt und adressieren die beiden genannten Einflussbereiche gleichermaßen.

3.2.1 Material- und fertigungsbedingte Einflussgrößen

Da die mechanische Verankerung für LDS-Metallisierungen als dominierender Haftmechanismus betrachtet wird (vgl. Kapitel 2.2.1), fokussieren sich die Untersuchungen der zentralen Einflussgrößen auf die Haftfestigkeit zunächst auf die Faktoren, die für die Rauheit der Grenzflächenschicht verantwortlich sind. Entsprechend den Ausführungen aus Kapitel 2.1 resultiert die für die Verankerung erforderliche Oberflächenstruktur maßgeblich aus dem Abtrag des Polymermaterials um nicht oder nur schwer ablatierbare Füllstoffe im Laserprozess. Mit den auf diese Weise freigelegten Partikeln formt sich in den strukturierten Bereichen eine mikrorauhe Oberfläche mit Kavernen und Hinterschneidungen, auf der sich die chemische Metallisierung haftfest abscheidet.

In den Untersuchungen wurden drei kommerziell verfügbare LDS-Kunststoffe aus den Materialien LCP, PET/PBT und PPA betrachtet. Die ausgewählten Kunststoffe zeichnen sich mitunter durch eine hohe thermische Beständigkeit aus. Mit Schmelztemperaturen von 255 °C im Falle des PET/PBT-Kunststoffes und über 300 °C für die verwendeten PPA- und LCP-Typen eignen sich die Materialien für einen Einsatz in bleifreien Reflow-Lötprozessen, womit sie für die Herstellung mechatronisch integrierter Baugruppen besonders interessant sind [78][79][108].

Mit dem Ziel, strukturierte Bereiche mit deutlich unterschiedlichen Rauheiten zu erzeugen, wurden auf den Testplatten in Vorversuchen materialspezifische Variationen der Laserparameter auf die resultierende gemittelte Rautiefe R_z analysiert. Auf Grundlage der Ergebnisse erfolgte die Strukturierung der Probekörper für jedes Material unter Verwendung spezifischer Parametersätze mit vergleichsweise geringer und hoher Intensität. In der anschließenden Metallisierung wurden durch eine auf die jeweilige Variante angepasste Prozessführung auf allen Probekörpern vergleichbare Schichtdicken aufgebaut. Die wesentlichen Eigenschaften der verwendeten Probekörper sind Tabelle 6 zu entnehmen.

Tabelle 6: Eigenschaften der Probekörper zur Untersuchung zentraler Einflussgrößen auf die Metallisierungshaftfestigkeit

	LCP glatt	LCP rau	PET/PBT glatt	PET/PBT rau	PPA glatt	PPA rau
Substratmaterial	Vectra® E84oi LDS		Pocan® DPT 7140 LDS		Vestamid® HTplus TGP 3586	
CTE (parallel / senkrecht)	12 / 27 ppm/K [79]		20 / 50 ppm/K [78]		26 / 29 ppm/K [108]	
Laserparameter	sanft	intensiv	sanft	intensiv	sanft	intensiv
Strukturierungsrauheit R_z (Konfokal-Laserscan)	20,9 μm	53,2 μm	29,7 μm	44,6 μm	21,1 μm	49,5 μm
Schichtdicken (Röntgenfluoreszenz)	Cu	10,2 μm	7,7 μm	9,3 μm	10,0 μm	7,3 μm
	Ni	2,0 μm	1,9 μm	1,6 μm	1,6 μm	1,8 μm
	Au	0,2 μm	0,2 μm	0,2 μm	0,2 μm	0,1 μm

Die Bestimmung der Haftfestigkeiten erfolgte an allen Probekörpern in ihren Ausgangszuständen nach der Metallisierung sowie nach Durchlaufen eines klassischen Lötprozesses im Kondensationslötöfen. Im Weiteren wurden Haftfestigkeitsuntersuchungen nach simulierten Umweltbelastungen vorgenommen, die Gegenstand des Kapitels 3.2.2 sind. In jeder Versuchsreihe wurden zwölf Testmetallisierungen je Probekörpervariante im Hot-Pin-Pull-Verfahren abgezogen. Zur Darstellung der Ergebnisse bildet ein Säulendiagramm die Mittelwerte der gemessenen Haftfestigkeiten ab. Die Standardabweichungen sind als Fehlerbalken im Diagramm integriert.

Für eine statistische Auswertung der Versuchsergebnisse wird ferner der Einfluss der jeweils betrachteten Faktoren auf die Metallisierungshaftfestigkeit analysiert. Als statistische Methode kommt hierzu die Varianzanalyse zum Einsatz. Auf Basis einer Varianzanalyse lässt sich die Streuung eines Ergebnisses den in der Versuchsdurchführung berücksichtigten Faktoren zuordnen. Somit kann bestimmt werden, welchen prozentualen Anteil ein Faktor beziehungsweise eine Wechselwirkung an der Ergebnisstreuung hat. Betrachtet werden hierzu die Summen der Abstandsquadrate (Sum of Squares, SS) innerhalb einer faktorbezogenen Gruppe sowie zwischen den Gruppen. Zusätzlich werden zur Analyse die Freiheitsgrade (Degrees of Freedom, DF) herangezogen, welche die unabhängigen Vergleichsmöglichkeiten eines Modellterms angeben. Wird ein Faktor beispielsweise in drei Stufen variiert, stehen für die Analyse dieses Modellterms zwei Freiheitsgrade zur Verfügung. Der Beitrag stellt den prozentualen Anteil dar, den die einzelnen Terme zur Gesamtstreuung des Ergebnisses beitragen. Die mittlere Abstandsquadratsumme (Mean Square, MS) errechnet sich aus der Division der Abstandsquadrate durch die

vorhandenen Freiheitsgrade. Der F-Wert setzt die mittlere Abstandsquadratsumme eines Modellterms ins Verhältnis zur mittleren Abstandsquadratsumme, die durch das Modell nicht erklärt werden kann (Fehler). Als Wahrscheinlichkeitsmaß wird zudem der p-Wert berechnet, der im Bereich von 0 bis 1 Auskunft darüber gibt, ob eine Nullhypothese angenommen beziehungsweise abgelehnt werden kann. Bezogen auf die durchgeführten Untersuchungen besagt die Nullhypothese, dass das Haftfestigkeitsergebnis durch die betrachteten Bedingungen nicht beeinflusst wird. Ist der p-Wert kleiner oder gleich dem Signifikanzniveau von 0,05 (5 % Risiko einer falschen Schlussfolgerung), gilt die Nullhypothese als widerlegt und die Bedingung damit als signifikant. Die signifikanten Einflüsse werden zur Veranschaulichung ergänzend in einem Haupteffekte- sowie gegebenenfalls in einem Wechselwirkungsdiagramm dargestellt.

Die Ergebnisse der ersten Haftfestigkeitsuntersuchung im Ausgangszustand der Probekörper nach ihrer Metallisierung sind in Bild 35 zu sehen. Die Auswertung zeigt, dass sich die Metallisierungshaftfestigkeit in Abhängigkeit des Substratmaterials deutlich unterscheidet. Unter den betrachteten Materialien weist der LCP-Kunststoff mit Werten von 10,5 N/mm² in der glatten und 12,2 N/mm² in der rauhen Variante die geringste Haftfestigkeit auf. Bezogen auf diese Werte liegt die Haftfestigkeit bei den PET/PBT-Probekörpern mit 15,7 N/mm² und 16,9 N/mm² nahezu 50 % respektive 39 % darüber. Die höchsten Messwerte erzielen die Probekörper aus dem Substratmaterial PPA. Die Haftfestigkeiten betragen hier im Mittel 18,2 N/mm² (glatt) und 27,0 N/mm² (rau).

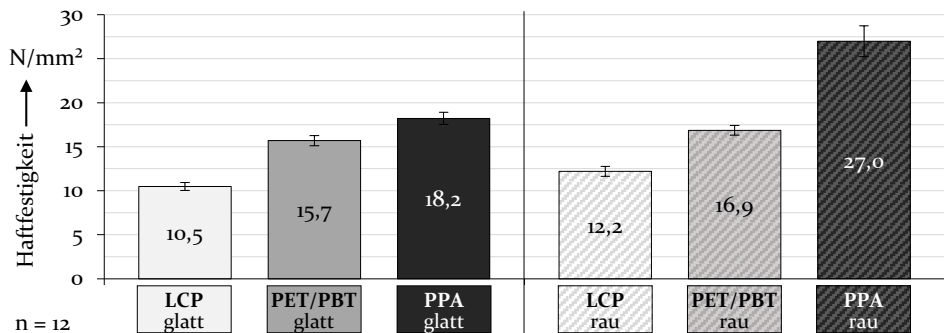


Bild 35: Ergebnisse der Haftfestigkeitsuntersuchung im Ausgangszustand nach der Metallisierung

Auffallend ist dabei der erhebliche Haftfestigkeitsunterschied zwischen der glatten und der rauen Variante. Während bei LCP und PET/PBT die Haftung der Metallisierung durch die Laserstrukturierung mit erhöhter Intensität verhältnismäßig gering zunimmt (LCP +16 %, PET/PBT +8 %), ist im Falle der PPA-Proben die Differenz zwischen den beiden Varianten mit 48 % wesentlich stärker ausgeprägt.

Die statistische Auswertung der Versuchsreihe ist Bild 36 zu entnehmen. Mit der Varianzanalyse kann die aufgetretene Streuung der Haftfestigkeitsergebnisse zu 97,3 % erklärt werden. Dabei bestätigt sich der dominierende Einfluss des Substratmaterials (*Material*). So lassen sich die Haftfestigkeitsunterschiede zu einem Anteil von 73,8 % auf die Variation des Basismaterials zurückführen. Die Strukturierungsrauheit (*Struktur*) trägt mit 13,1 % zur Haftfestigkeitsstreuung bei. Aus der Wechselwirkung der beiden Faktoren resultieren die verbleibenden 10,4 % der Streuung. Anhand der unterschiedlichen Steigungen der aufgetragenen Geraden lässt sich die Wechselwirkung auch deutlich im entsprechenden Diagramm erkennen. Mit einem p-Wert von 0,00 sind alle identifizierten Einflüsse als signifikant einzustufen. Die Residuen, die sich aus der Differenz der gemessenen und der statistisch vorhergesagten Werte ergeben, sind um den Mittelwert 0 normalverteilt und zeigen keinerlei Muster oder Auffälligkeiten, was die Aussagekraft des statistischen Modells stützt.

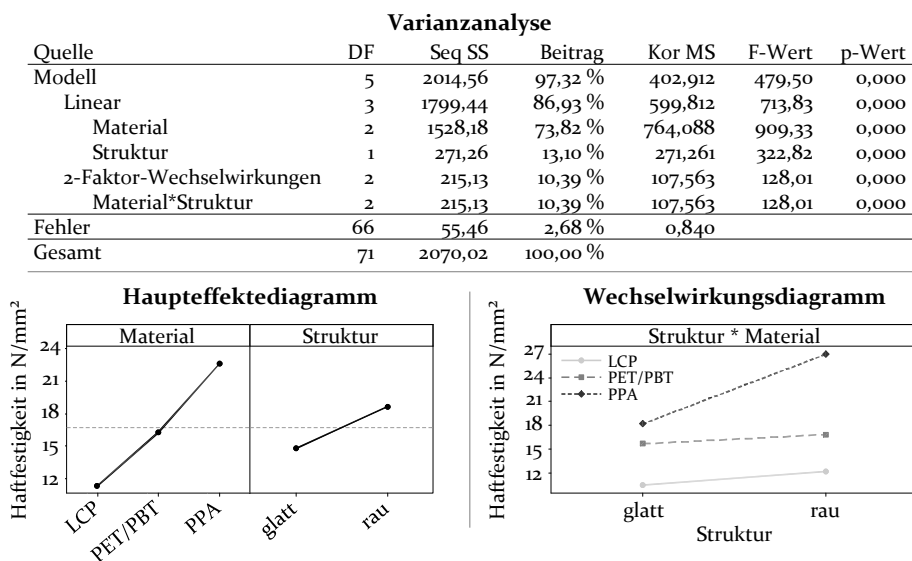


Bild 36: Statistische Analyse der Haftfestigkeitsergebnisse im Ausgangszustand nach der Metallisierung

Wie die Versuchsreihe zeigt, lassen sich materialübergreifend keine direkten Rückschlüsse von der gemittelten Rautiefe der Strukturierung auf die resultierende Haftfestigkeit der Metallisierung ziehen. Der Rauheitskennwert dient allenfalls als Anhaltspunkt, von dem materialspezifisch eine gewisse Tendenz hinsichtlich der Haftfestigkeit abgeleitet werden kann. Die Ausprägung der Oberflächentopologie hängt entscheidend von dem Anteil, der Form und der Lage der Füllstoffe im Kunststoffsubstrat ab. Mit einem zunehmenden Ablationsgrad des Kunststoffes durch die Laserbearbeitung werden die nicht oder nur schwer ablatierbaren Füllstoffe in einem größeren Ausmaß freigelegt, was sich in der Regel auch erkennbar auf das Ergebnis einer Rauheitsmessung auswirkt. In welchem Maße eine Oberfläche die für die mechanische Verankerung der Metallisierung entscheidenden Hinterschneidungen und komplexen Kavernen aufweist, hängt von den individuell vorliegenden Bedingungen ab. Hierüber können jedoch Rauheitskennwerte aus Oberflächenmessungen keine verlässliche Auskunft geben. Unabhängig von der Messmethode (taktil, optisch) oder dem gewählten Kennwert bleiben entsprechende Gestaltausprägungen verborgen. Veranschaulicht wird dieser Sachverhalt an der modellhaften Gegenüberstellung von zwei exemplarischen Oberflächen mit gleichen R_z -Werten in Bild 37.

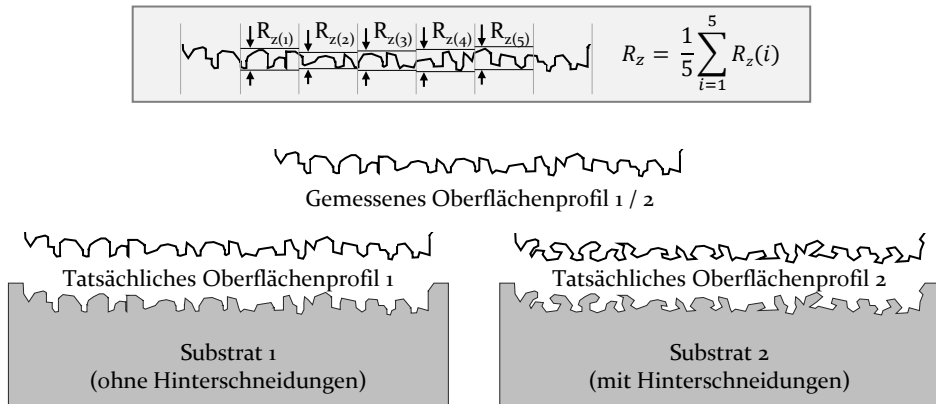


Bild 37: Modellhafte Gegenüberstellung unterschiedlicher Oberflächenprofile mit identischen Ergebnissen in der Oberflächenmessung

Die Herstellung mechatronischer Baugruppen beinhaltet im Rahmen der Montage elektronischer Bauelemente in vielen Fällen einen Lötprozess. Um dessen potenzielle Auswirkung auf die Haftfestigkeit der Metall-Kunststoff-Verbunde in den Untersuchungen zu berücksichtigen, wurden die Probekörper einem klassischen Lötprozess für eine Standard-SnAgCu-Legierung in einem Kondensationslötöfen ausgesetzt. Im Anschluss daran

wurden die Metallisierungshaftfestigkeiten an den Probekörpern erneut bestimmt. Die Durchführung der Hot-Pin-Pull-Tests erfolgte in einem Zeitraum von vier bis acht Stunden nach dem Lötten. Die Veränderung der Haftfestigkeiten nach dem Lötprozess ist in Bild 38 dargestellt. Als Bezugsgröße dienen die in der ersten Versuchsreihe ermittelten Ausgangswerte.

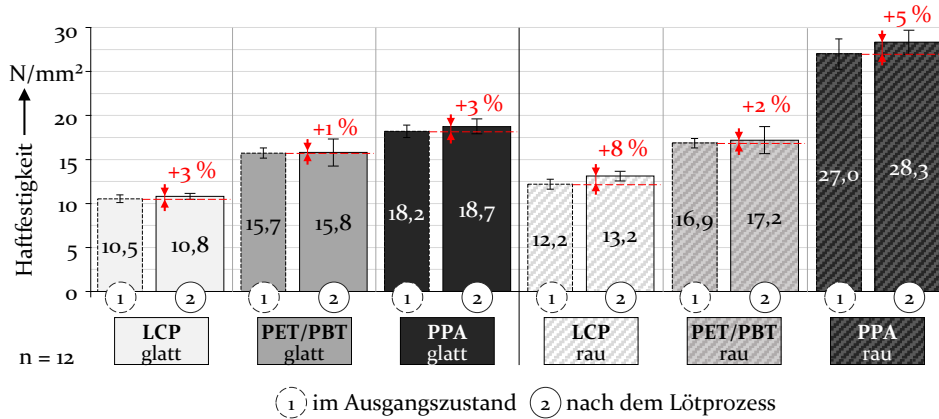


Bild 38: Veränderung der Haftfestigkeit nach dem Lötprozess im Vergleich zum Ausgangszustand

Nach Durchlaufen des Lötprozesses weisen alle betrachteten Probekörper geringfügig höhere Haftfestigkeiten auf. Die Differenz zu den in der ersten Versuchsreihe ermittelten Ausgangswerten liegt zwischen 1 % und 8 % und beträgt im Mittel 3,5 %. Eine unterschiedliche Reaktion auf den Lötprozess ist weder in Abhängigkeit des Substratmaterials noch der Strukturierungsrauheit festzustellen.

Bestätigt wird dies auch durch die statistische Analyse der Versuchsergebnisse (vgl. Bild 39). Der direkte Einfluss des Zustands der Probekörper, welcher an dieser Stelle den Ausgangszustand sowie den Zustand nach dem Lötprozess berücksichtigt, erweist sich zwar als signifikant (p-Wert = 0,001), bewegt sich allerdings mit einem Beitrag zur Ergebnisstreuung von nur 0,3 % in einem weitestgehend vernachlässigbaren Bereich. In Kombination mit den weiteren Faktoren (*Material* und *Struktur*) treten keine signifikanten Effekte ein (p-Wert > 0,05). Alle Wechselwirkungen, die den Probekörperzustand miteinbeziehen, werden aus diesem Grund aus dem statistischen Modell ausgeschlossen. Die bereits diskutierten Haftfestigkeitseinflüsse und die 2-Faktor-Wechselwirkungen zwischen *Material* und *Zustand* zeigen sich analog zur Auswertung der ersten Versuchsreihe auch in der Analyse der erweiterten Untersuchungsergebnisse.

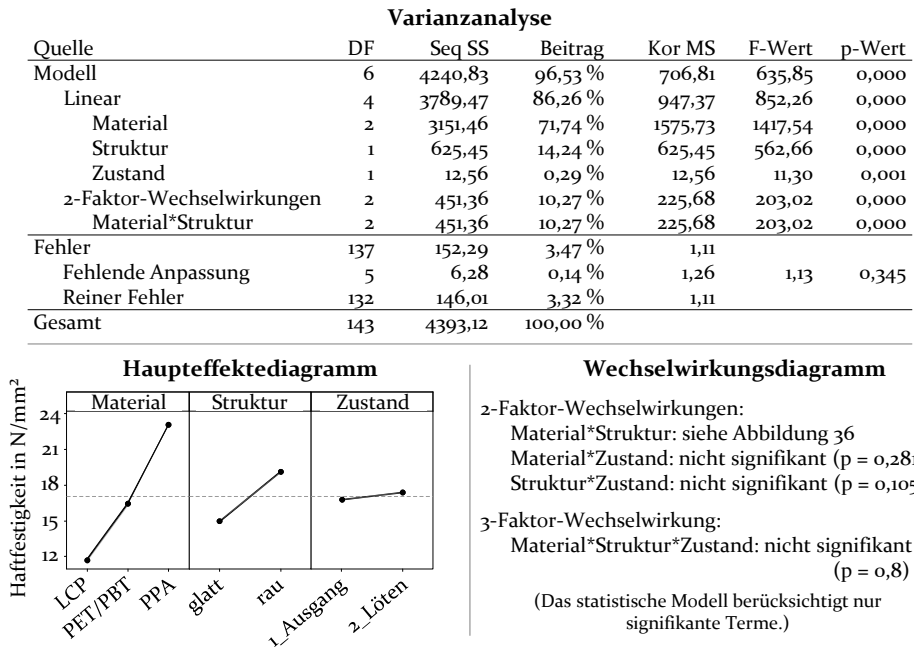


Bild 39: Statistische Analyse der Haftfestigkeitsergebnisse nach dem Lötprozess

3.2.2 Umweltbedingte Einflussgrößen

In Abhängigkeit des jeweiligen Anwendungsfalles sind mechatronische Baugruppen in ihrem Einsatz unterschiedlichen Umweltbelastungen ausgesetzt. Mit fortschreitender Zeit können dabei beanspruchende Einsatzbedingungen die Haftfestigkeit der Metallisierung beeinträchtigen und folglich zu Delaminationserscheinungen führen. Um im Rahmen der Forschungsarbeiten umweltbedingte Einflüsse auf die Haftfestigkeit von LDS-Metallisierungen zu untersuchen, wurden die Probekörper nach dem Lötprozess gängigen Tests zur beschleunigten Alterung ausgesetzt.

Ein Teil der Probekörper wurde einem konstanten Feuchte-Wärme-Test gemäß DIN EN 60068-2-67 [109] unterzogen. Die Probekörper lagerten hierbei für insgesamt 1.000 Stunden unter klimatischen Bedingungen von 85 °C und 85 % relativer Luftfeuchtigkeit. Die Prüfung der Metallisierungshaftfestigkeiten erfolgte sowohl nach der halben als auch nach der gesamten Verweilzeit innerhalb eines Zeitraums von jeweils vier bis acht Stunden nach Entnahme der Probekörper aus dem Klimaprüfschrank.

Parallel dazu wurde der zweite Teil der Probekörper einem Temperaturschocktest gemäß DIN EN 60068-2-14 [110] ausgesetzt (Schnelle Temperaturwechsel mit vorgeschriebener Übergangszeit). Die Prüfspezifikationen wurden entsprechend geltender Herstellervorgaben aus dem Automobilbereich (LV 124) gewählt und richten sich nach Komponenten, die für den Motor- und Getriebeanbau bestimmt sind. Der Test erfolgte demnach bei $-40\text{ }^{\circ}\text{C}/+140\text{ }^{\circ}\text{C}$ mit einer Haltezeit von 15 Minuten und einer Überföhrungsdauer zwischen den Prüfkammern von unter 30 Sekunden [84]. Die Haftfestigkeitsprüfungen wurden an den Probekörpern nach 500 sowie nach 1.000 Temperaturzyklen durchgeführt.

Die Auswirkungen der Umweltbelastungen auf die Metallisierungshaftfestigkeiten variieren in Abhängigkeit des Substratmaterials erheblich. Die Ergebnisse der Versuchsreihen werden aus diesem Grund materialspezifisch analysiert und vorgestellt. Zur Darstellung der durch die Umwelteinflüsse bedingten Veränderung der Haftfestigkeiten sind die Ergebnisse der Versuchsreihen ergänzend zu den bisherigen Werten in Säulendiagrammen abgebildet. Bezogen auf die ermittelten Haftfestigkeiten nach dem Lötprozess enthalten die Diagramme Angaben zur prozentualen Abweichung nach 1.000 Stunden im Feuchte-Wärme- beziehungsweise 1.000 Zyklen im Temperaturschocktest. Zusätzlich werden die materialspezifischen Ergebnisse der durchgeführten Haftfestigkeitsuntersuchung anhand statistischer Auswertungen analysiert.

Für die Probekörper aus dem LCP-Kunststoff sind die Einflüsse der Umweltbelastungen auf die Metallisierungshaftfestigkeit in Bild 40 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen einen mit der Dauer der Umweltbelastungen zunehmenden, jedoch vergleichsweise moderaten Abfall der Haftfestigkeiten.

Die Feuchte-Wärme-Lagerung reduziert die Haftung der Metallisierung im Falle der geringen Strukturierungsrauheit nach 1.000 Stunden um 3 % und im Falle der höheren Rauheit um 11 %. Die raschen Temperaturwechsel zwischen $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ verursachen nach 1.000 Zyklen bei beiden Strukturierungsvarianten einen Haftfestigkeitsverlust von 8 %. Wie aus der Darstellung anschaulich hervorgeht, erweist sich das LCP-Material damit als relativ unempfindlich gegenüber äußeren Einflüssen.

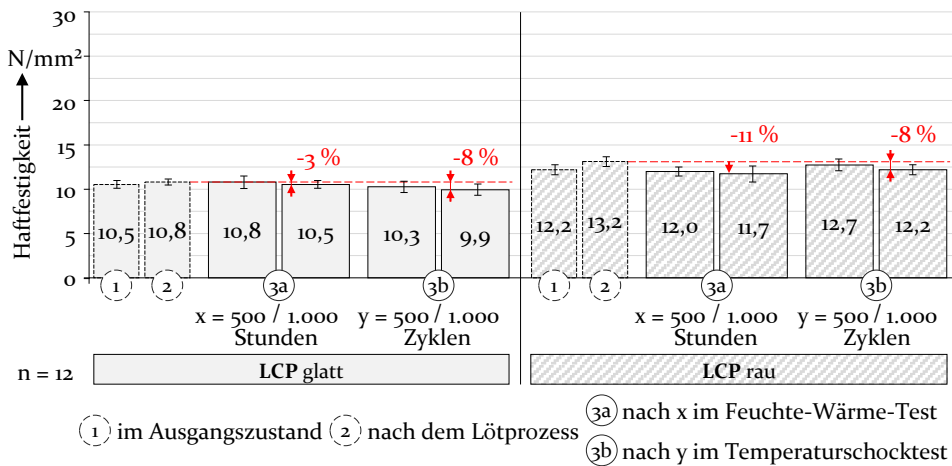


Bild 40: Veränderung der Haftfestigkeit nach den Umweltbelastungen bei den Probekörpern aus dem Substratmaterial LCP

Bestätigt wird dieses Erkenntnis durch die statistische Analyse in Bild 41. Den größten Einfluss auf die Haftfestigkeitsergebnisse der LCP-Probekörper hat gemäß der Varianzanalyse die Strukturierung mit 62,8 %. Dies entspricht etwa 84 % der Streuung, die durch das zugrundeliegende statistische Modell mit den Termen *Struktur*, *Zustand* und deren Wechselwirkung erklärt wird. Der Probekörperzustand, der nun entsprechend der durchgeführten Versuchsreihen den Ausgangszustand, den Zustand nach dem Löten sowie die Zustände nach den Umweltbelastungstests (jeweils nach 500 und 1.000 Stunden bzw. Zyklen) berücksichtigt, generiert hingegen lediglich 6,6 % der Ergebnisstreuung. Das Haupteffektediagramm veranschaulicht den Einfluss der beiden Faktoren, indem für jede Stufe der Mittelwert aus den gemessenen Haftfestigkeiten dargestellt wird. Der Beitrag der Wechselwirkung zu den ermittelten Haftfestigkeitsunterschieden liegt bei 5,6 %. Grafisch ist die Wechselwirkung im zugehörigen Diagramm anhand der unterschiedlich verlaufenden Verbindungslinie der zustandsspezifischen Haftfestigkeitsmittelwerte für die glatte und raue Probekörpervariante erkennbar. Die statistische Signifikanz der identifizierten Effekte bescheinigt in der Varianzanalyse der p-Wert von 0,00.

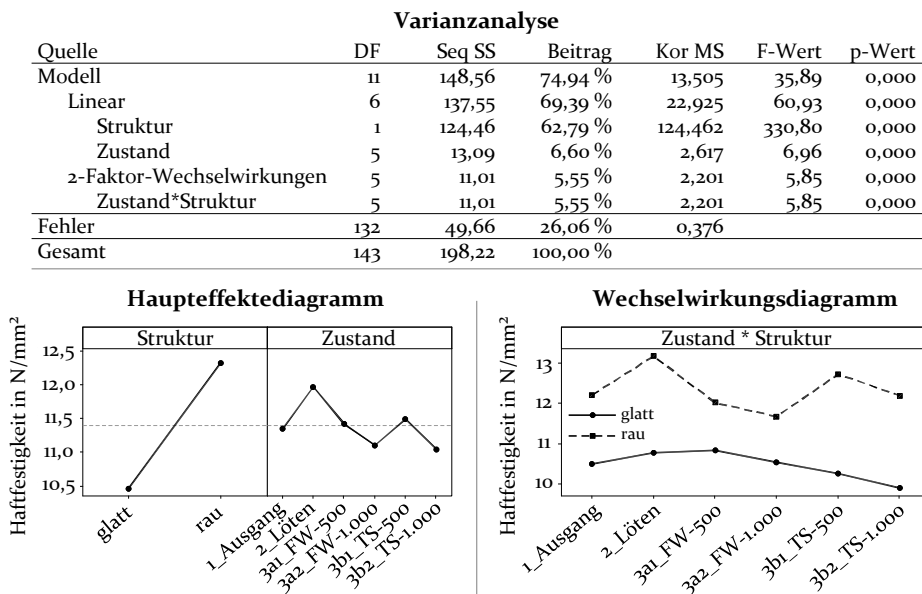


Bild 41: Statistische Analyse der Haftfestigkeitsergebnisse für die Probekörper aus dem Substratmaterial LCP

Der Einfluss der Umweltbelastungen auf die Haftfestigkeit der PET/PBT-Probekörper ist in Bild 42 dargestellt. Verglichen mit den LCP-basierten Probekörpern ist bei dem Mischpolymer ein deutlich stärkerer Effekt festzustellen. Insbesondere verursacht die Feuchte-Wärme-Lagerung eine drastische Abnahme der Metallisierungshaftfestigkeit. Nach 500 Stunden bei 85 °C und 85 % relativer Luftfeuchtigkeit verlieren die Probekörper bereits mehr als 16 % ihrer Haftfestigkeit. Nach 1.000 Stunden beträgt der Haftfestigkeitsverlust sogar 37 % bei der glatten und 34 % bei der rauen Strukturierungsvariante. Auch der Temperaturschocktest führt zu einem erheblichen Haftungsverlust. Nach 1.000 Temperaturzyklen indizieren die Messergebnisse eine Minderung der Haftfestigkeit um 17 % für die glatte respektive 16 % für die raue Variante. Die prozentuale Differenz zu den Haftfestigkeitswerten nach dem Lötprozess fällt damit etwa doppelt so hoch aus, wie es bei den LCP-Probekörpern der Fall ist. Die Rauheit der Strukturierung zeigt im Rahmen der vorgenommenen Variation keinen signifikanten Einfluss auf die umweltbedingten Haftfestigkeitsveränderungen.

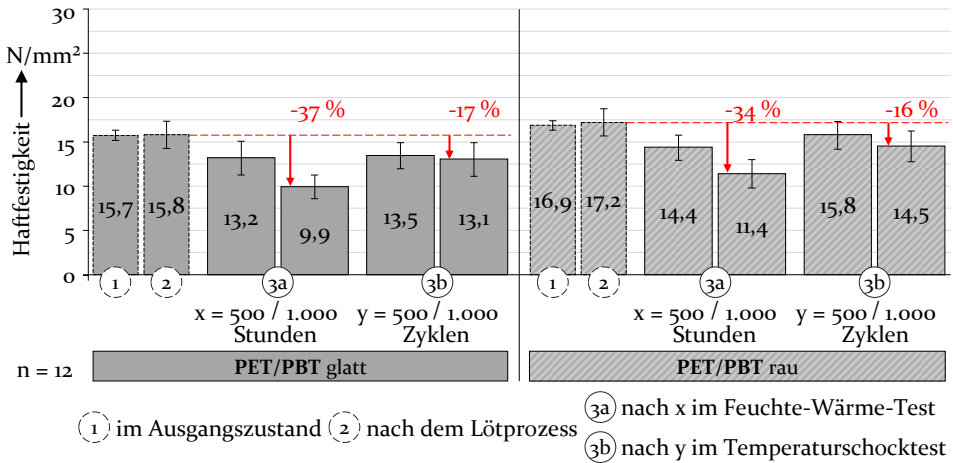


Bild 42: Veränderung der Haftfestigkeit nach den Umweltbelastungen bei den Probekörpern aus dem Substratmaterial PET/PBT

Für die Wechselwirkung der Faktoren *Zustand* und *Struktur* errechnet sich in der Varianzanalyse dementsprechend ein p-Wert von 0,808. Zur Steigerung der Vorhersagegenauigkeit wird die Wechselwirkung folglich in der weiteren statistischen Auswertung nicht betrachtet. Die Analyse auf Grundlage des reduzierten statistischen Modells ist Bild 43 zu entnehmen.

Varianzanalyse						
Quelle	DF	Seq SS	Beitrag	Kor MS	F-Wert	p-Wert
Modell	6	622,382	66,01 %	103,730	44,35	0,000
Linear	6	622,382	66,01 %	103,730	44,35	0,000
Struktur	1	82,983	8,80 %	82,983	35,48	0,000
Zustand	5	539,400	57,21 %	107,880	46,12	0,000
Fehler	137	320,427	33,99 %	2,339		
Fehlende Anpassung	5	5,438	0,58 %	1,088	0,46	0,808
Reiner Fehler	132	314,989	33,41 %	2,386		
Gesamt	143	942,809	100,00 %			

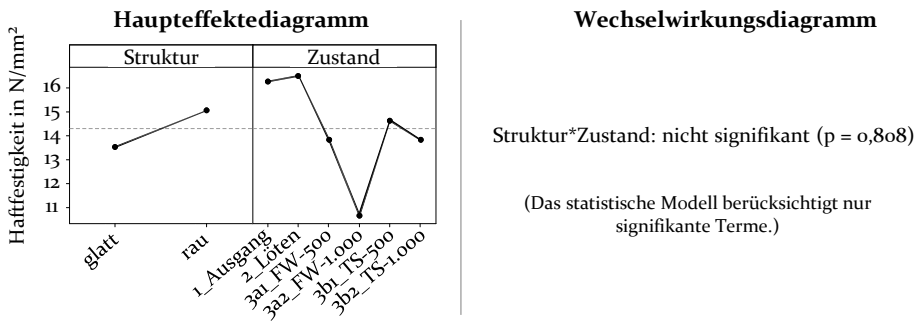


Bild 43: Statistische Analyse der Haftfestigkeitsergebnisse für die Probekörper aus dem Substratmaterial PET/PBT

Die Varianzanalyse, die zwei Drittel der aufgetretenen Ergebnisstreuung den zugrundeliegenden Modelltermen zuordnen kann, bekräftigt den hohen Einfluss der Umweltbelastungen auf die Haftfestigkeit der PET/PBT-Probekörper. Der Faktor *Zustand*, der die Veränderungen durch die Umwelttests beinhaltet, ist demnach für 57,2 % der vorhandenen Varianz verantwortlich. Demgegenüber trägt die Oberflächenstruktur in der vorgenommenen Variation mit 8,8 % in vergleichsweise geringem Ausmaß zu den unterschiedlichen Haftfestigkeitsergebnissen bei. Das Haupteffektdiagramm gibt den massiven Einfluss der klimatischen Bedingungen im Feuchte-Wärme-Test anschaulich zu erkennen.

Auch bei den Probekörpern aus dem Kunststoff PPA, die im Ausgangszustand sowie nach dem Lötprozess die höchsten Haftfestigkeiten erzielen, wirken sich die Umweltbelastungstests negativ auf den Metall-Kunststoff-Verbund aus. Die Feuchte-Wärme-Lagerung schwächt die Verbindung nach der vollen Testdauer relativ geringfügig um 9 % (glatt) beziehungsweise 8 % (rau), obwohl der PPA-Kunststoff unter den betrachteten Substratmaterialien die höchste Feuchtigkeitsaufnahme aufweist. Aus der Gewichtsbestimmung der Probekörper mit einer Präzisionswaage vor und nach dem Umwelttest ergibt sich eine Feuchtigkeitsaufnahme von 1,5 Gew.-%. Zum Vergleich beträgt die Gewichtszunahme bei den Probekörpern aus PET/PBT 0,6 % und nur 0,1 % bei den LCP-Proben. Weitaus deutlicher fällt die Haftfestigkeitsabnahme nach dem Temperaturschocktest aus. Von 18,7 N/mm² bei der glatten und 28,3 N/mm² bei der rauhen Probekörpervariante sinken die Messwerte nach der thermischen Wechselbelastung um 22 % beziehungsweise 26 % auf 14,6 N/mm² und 21,0 N/mm².

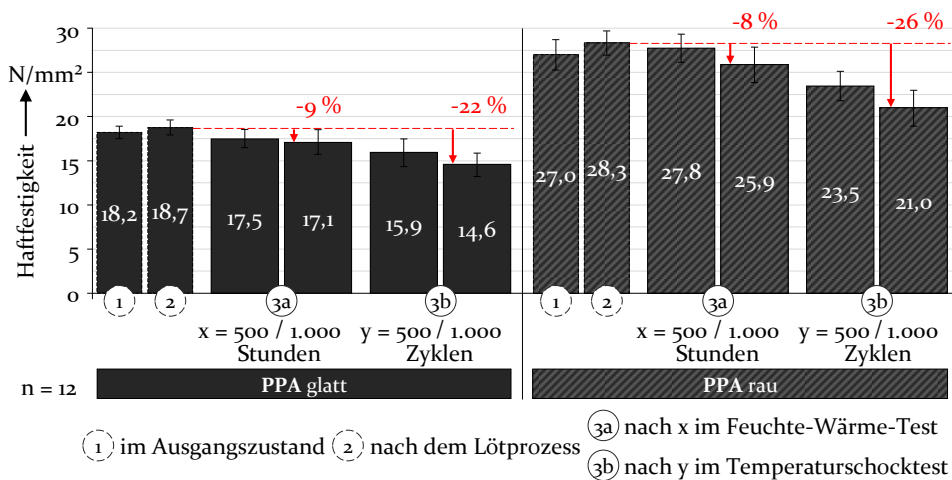


Bild 44: Veränderung der Haftfestigkeit nach den Umweltbelastungen bei den Probekörpern aus dem Substratmaterial PPA

Die statistische Analyse bescheinigt den Einflussgrößen *Struktur*, *Zustand* wie auch der Wechselwirkung beider Faktoren einen signifikanten Effekt (p -Wert = 0,00) auf die Metallisierungshaftfestigkeit. Details sind in Bild 45 dargestellt. In der Varianzanalyse wirkt sich der beträchtliche, initiale Unterschied zwischen der glatten und rauen Strukturierungsvariante deutlich auf die Bemessung der Beiträge der einzelnen Modellterme zur Ergebnisstreuung aus. Von insgesamt 91,0 % erklärbarer Streuung ergeben sich 73,7 % durch die Variation des Faktors *Struktur*. Die Umweltbelastungen verursachen 15,7 % der Haftfestigkeitsunterschiede. Eine Betrachtung des Haupteffektediagramms verdeutlicht grafisch den drastischen Abfall der Metallisierungshaftung durch die Temperaturschockbelastung. Der Effekt der Wechselwirkung zwischen *Zustand* und *Struktur* trägt mit 1,6 % nur unwesentlich zur Streuung der Messwerte bei. Im Wechselwirkungsdiagramm weichen die strukturspezifischen Verbindungslinien der Haftfestigkeitsmittelwerte zu den verschiedenen Zuständen dementsprechend gering von einem parallelen Verlauf ab.

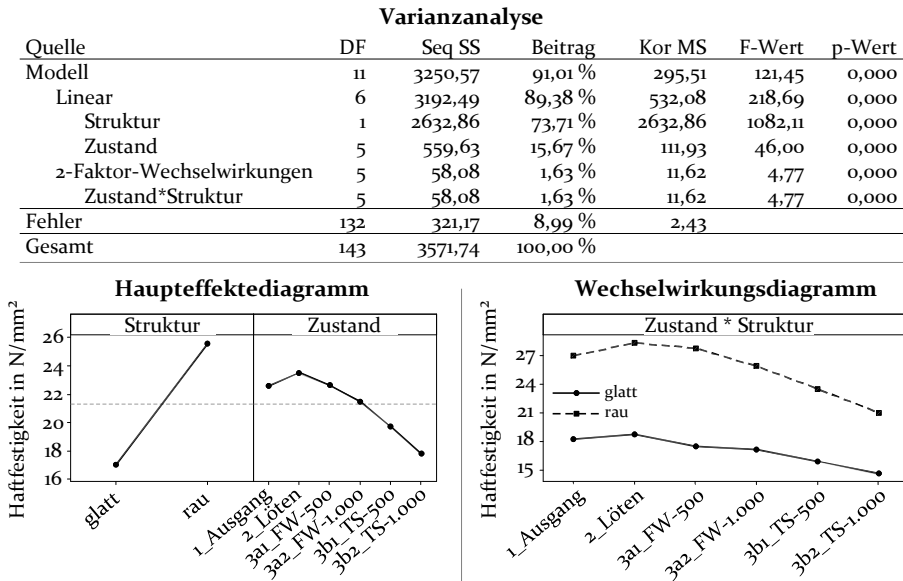


Bild 45: Statistische Analyse der Haftfestigkeitsergebnisse für die Probekörper aus dem Substratmaterial PPA

3.3 Empfehlungen zur Bestimmung und Steigerung der Metallisierungshaftfestigkeit

Der Abbau von Unsicherheiten hinsichtlich ausreichender Metallisierungshaftfestigkeit und die damit verbundene Vermeidung delaminationsbedingter Ausfälle sind wesentliche Voraussetzungen für die weitere Verbreitung mechatronisch integrierter Baugruppen. Die dargestellten Forschungsarbeiten liefern in diesem Zusammenhang einen wichtigen Beitrag, die Haftfestigkeit von LDS-Metallisierungen sicher zu bestimmen, in der Herstellung gezielt zu steigern und Beeinträchtigungen durch Umgebungsbedingungen im Einsatz realistisch einzuschätzen.

Die Evaluierung alternativer Prüfverfahren macht die Einschränkungen konventioneller Methoden bei der Haftfestigkeitsbestimmung von LDS-MID evident. Unter Berücksichtigung der definierten Prüfspezifikationen bietet der neuartige Hot-Pin-Pull-Test diesen Verfahren gegenüber in vielerlei Hinsicht Vorzüge. Da wesentliche Potenziale der MID-Technologie in den Möglichkeiten zur Miniaturisierung sowie der räumlichen Gestaltungsfreiheit liegen, stehen planare Flächen für Prüfstrukturen häufig nur eingeschränkt zur Verfügung. Die Anwendbarkeit des Verfahrens an kleinen Testmetallisierungen mit einem Durchmesser von nur 1 mm ist demzufolge als großer Vorteil zu werten. Darüber hinaus stellen sich sowohl die Versuchsvorbereitung als auch die Versuchsdurchführung vergleichsweise unkompliziert dar. Durch den Einsatz eines maschinellen Dispensers kann die niedrigschmelzende Lotpaste akkurat und gleichmäßig auf den kreisförmigen Testmetallisierungen aufgetragen werden. Mit Hilfe der vertikalen Bilderfassung lassen sich die Pins trotz der verhältnismäßig kleinen Prüfstrukturen mit einer hohen Präzision zentral auf den Abzugsflächen positionieren. Durch die Erwärmung der Pins über die beheizbare Messdose erfolgt der Lötprozess zur Verbindung von Abzugskörper und Testmetallisierung unweigerlich erst zu dem Zeitpunkt, in dem die Pins bereits in der Messdose eingesetzt sind. Somit können zum einen Vorschädigungen am Prüfverbund durch Handhabungsschritte ausgeschlossen und zum anderen, unter Voraussetzung einer waagerechten Bereitstellung der Abzugsflächen, die orthogonale Wirkung der Zugkraft sichergestellt werden. Durch den geringen Bedienerinfluss und die hohe Reproduzierbarkeit der Abläufe lassen sich im Vergleich zu alternativen Methoden bei einem nahezu vernachlässigbaren Anteil an Fehlmessungen geringste Standardabweichungen im einstelligen Prozentbereich erreichen.

Eine pauschale Bewertung der Haftfestigkeitsprüfverfahren hinsichtlich ihrer Eignung für den Einsatz bei LDS-MID kann der hohen Individualität mechatronisch integrierter Baugruppen nicht in vollem Maße gerecht werden. Gerade bei Bauteilen, deren Schichteigenschaften, Substratmaterialien oder Gestaltung von den charakteristischen Ausprägungen typischer LDS-MID abweichen, ist kritisch zu hinterfragen, ob und gegebenenfalls in welchem Ausmaß spezifische Aspekte und Limitierungen der verschiedenen Prüfverfahren von Relevanz sind. Nichtsdestoweniger erweist sich für die Bestimmung der Metallisierungshaftfestigkeit unter LDS-typischen Gegebenheiten der Einsatz des Hot-Pin-Pull-Tests auf Grundlage der durchgeführten Untersuchungen als überaus empfehlenswert.

Die zentralen Einflussgrößen, die maßgeblich die Ausgangshaftfestigkeit des Metall-Kunststoff-Verbundes nach dem Metallisierungsprozess determinieren, sind das Substratmaterial und dessen Oberflächenstruktur. Eine adhäsionsfördernde Oberflächenstruktur generiert sich im Wesentlichen aus dem laserbasierten Abtrag des Kunststoffes durch die Freilegung enthaltener Füllstoffe und hängt damit hauptsächlich vom Substratmaterial, der Füllstoffverteilung im Grundkörper und den Strukturierungsparametern ab. Mit intensiveren Laserparametern werden die Füllstoffe tendenziell tiefer freigelegt, womit sich der Metallisierung mehr Verankerungsmöglichkeiten bieten. Zu beachten ist, dass die für die mechanische Adhäsion ausschlaggebenden Hinterschneidungen und Kavernen einer Oberflächenprofilmessung verborgen bleiben. Gängige Oberflächenkennwerte wie die mittlere Rautiefe R_z oder der arithmetische Mittenrauwert R_a berücksichtigen demnach entsprechende Ausprägungen nicht. Somit können sie allenfalls im Zusammenhang mit dem jeweiligen Substratmaterial als Anhaltspunkt für eine rudimentäre Abschätzung der Haftfestigkeit herangezogen werden.

Von einer Beeinträchtigung der Metallisierungshaftfestigkeit durch einen Lötprozess, denen LDS-basierte mechatronische Baugruppen zum Großteil im Rahmen ihrer Fertigung ausgesetzt sind, ist nicht auszugehen. Stattdessen werden über alle betrachteten Probekörpervarianten hinweg nach Durchlaufen eines klassischen SnAgCu-Lötprofils im Kondensationslöt-ofen geringfügig gesteigerte Haftfestigkeiten ermittelt.

Im Anwendungsumfeld muss hingegen mit zunehmender Einsatzdauer eine Reduzierung der Metallisierungshaftfestigkeit in Kauf genommen werden. Sowohl eine konstante feuchtwarme Umgebung als auch extreme Temperaturschwankungen können die Haftung des Metall-Kunststoff-

Verbundes teilweise erheblich beeinträchtigen und unter Umständen letztendlich zur Delamination der Metallschicht führen. Wie die Untersuchungsergebnisse zeigen, hängt die Reaktion der LDS-Schaltungsträger auf Umweltbelastungen entscheidend vom Substratmaterial ab. Während der LCP-Kunststoff ein weitgehend robustes Verhalten gegenüber den Belastungen der durchgeführten Umwelttests aufweist, lässt bei den Probekörpern aus PPA und PET/PBT die Metallisierungshaftfestigkeit zum Teil erheblich nach. Zwar beschränkt sich beim PPA-Material trotz der höchsten Feuchtigkeitsaufnahme im Testfeld der Rückgang der Haftfestigkeit nach der Feuchte-Wärme-Lagerung auf ein vergleichsweise geringes Maß im einstelligen Prozentbereich, jedoch verursacht hier der Temperaturschocktest einen massiven Haftverlust von bis zu 26 %. Der PET/PBT-Kunststoff reagiert hingegen besonders empfindlich auf die klimatischen Bedingungen im Feuchte-Wärme-Test, durch die er bis zu 37 % seiner Haftfestigkeit verliert. Da eine allgemeine Prognose zum Verhalten von LDS-MID bei Umweltbelastungen nicht möglich ist, empfehlen sich zur Gewährleistung einer ausreichenden Haftfestigkeit dem jeweiligen Anwendungsfall entsprechende materialspezifische Analysen.

4 Vermeidung von Leiterbahnrisen bei thermischer Belastung

Das deutlich differierende Wärmeausdehnungsverhalten von LDS-Kunststoffen und der darauf abgeschiedenen Metallisierung kann unter thermischer Belastung der Baugruppen zu kritischen Spannungszuständen im Materialverbund führen, die das Risiko von Leiterbahnrisen bergen. Die im Folgenden dargestellten Forschungsarbeiten zielen darauf ab, wirksame, anwendungsgerechte Maßnahmen zur Vermeidung von Leiterbahnrisen bei thermischer Belastung zu identifizieren. Dazu werden zentrale Einflussgrößen auf die Rissentstehung unter Berücksichtigung charakteristischer Eigenschaften von MID untersucht. Die zugrundeliegende Methodik der Rissuntersuchungen wird eingangs im Detail beschrieben.

4.1 Methodik zur Untersuchung von Leiterbahnrisen

Analog zur Definition eines Risses ist auch die Detektionsmethode in Abhängigkeit der jeweiligen Betrachtungsebene und der übergeordneten Zielstellung der Untersuchung festzulegen. Für Leiterbahnen sind Risse im Wesentlichen dann als kritisch einzustufen, wenn ihre Kernfunktion, die Herstellung elektrisch leitender Verbindungen, durch entsprechende Schädigungen beeinträchtigt wird, respektive gänzlich nicht mehr erfüllt werden kann. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden aus diesem Grund Risse in Leiterbahnen anhand der schädigungsbedingten Veränderungen ihres elektrischen Widerstands detektiert.

Sofern in den weiteren Ausführungen auf kein abweichendes Vorgehen hingewiesen wird, erfolgte eine Analyse der Widerstandsänderungen auf Grundlage von Online-Messungen, die während der verschiedenen Prüfbelastungen an den Probekörpern durchgeführt wurden. Nach dem Vierleiter-Messprinzip wurden hierbei die Widerstandswerte von Testschaltungen bei einem konstanten Messstrom kontinuierlich über die abfallende Spannung ermittelt und zur späteren Auswertung aufgezeichnet. Mit dem eingestellten Messstrom von 35 mA war es einerseits möglich, die unerwünschte, strominduzierte Eigenerwärmung der Probekörper in einem vernachlässigbaren Bereich zu halten und andererseits gleichzeitig relevante Widerstandsänderungen in ausreichend hoher Auflösung zu erfassen. Eine schematische Übersicht der Online-Messung von Leiterbahnwiderständen während des Temperaturschocktests ist in Bild 46 dargestellt.

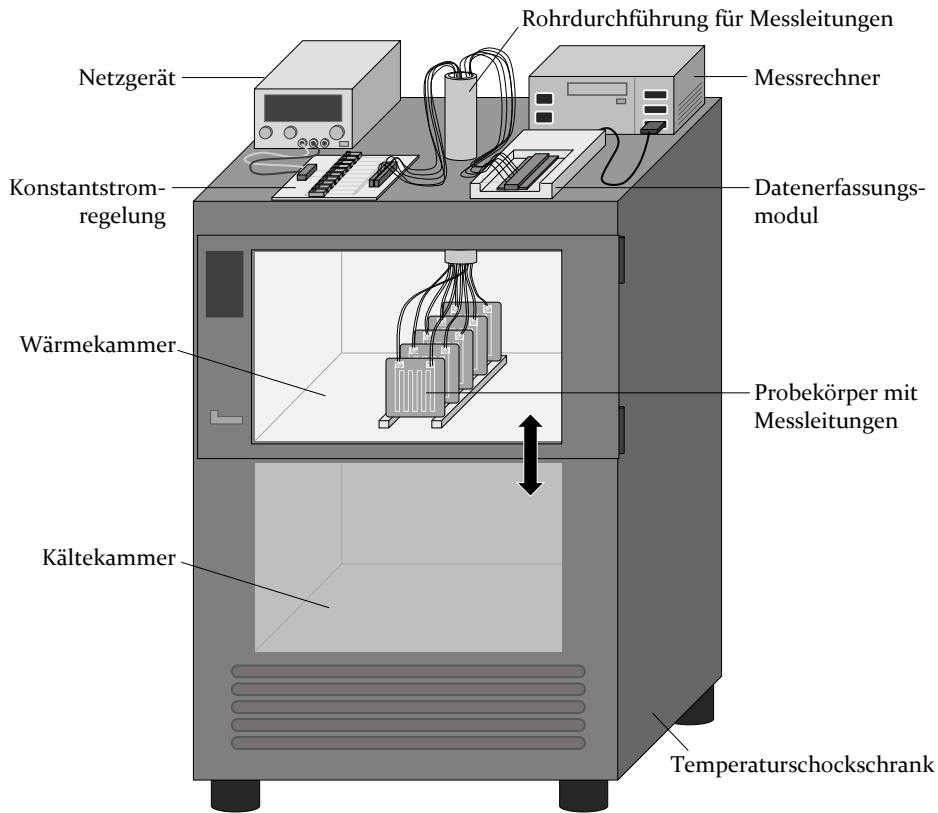


Bild 46: Schematische Darstellung der Online-Messung von Leiterbahnwiderständen während des Temperaturschocktests

Bild 47 zeigt exemplarisch den Widerstandsverlauf einer Testschaltung, bestehend aus fünf gleichartigen, parallel verbundenen Mäandersegmenten, während eines Temperaturschocktests bei $-40\text{ °C}/+125\text{ °C}$. Der zyklische Temperaturwechsel führt physikalisch bedingt zu dem synchron verlaufenden stetigen Anstieg und Abfall des Widerstands der Testschaltung. Eine auffällige Änderung des Widerstandsverlaufs ist zwischen Zyklus 285 und 305 zu beobachten. Der abrupte Widerstandsanstieg um 19 % innerhalb weniger Temperaturzyklen weist deutlich auf die aufgetretene rissbedingte Unterbrechung in einem Mäandersegment hin.

Eine eindeutige Interpretation von Widerstandsverläufen aus Online-Messungen ist bei Testschaltungen, die aus mehreren, parallel verknüpften Leiterbahnsegmenten bestehen, nicht immer ohne Weiteres möglich. Da sich die Widerstände einzelner Schaltungsbereiche nur anteilig auf den ermittelten Gesamtwiderstand auswirken, werden die Effekte lokaler Schädigungen durch die weiteren Segmente kompensiert beziehungsweise

gegenseitig voneinander überlagert. Rissbedingte Änderungen im Widerstandsverlauf sind daher meist nur schwer zu erkennen und dem betroffenen Schaltungsbereich zuzuordnen. Dies ist insbesondere bei Schädigungen der Fall, die nicht direkt zu einer vollständigen Unterbrechung der elektrischen Verbindung führen. Im Gegensatz dazu lassen sich mit Online-Messungen, die an einzelnen, unverzweigten Teststrukturen durchgeführt werden, in aller Regel bereits erste Schädigungsanzeichen eindeutig identifizieren.

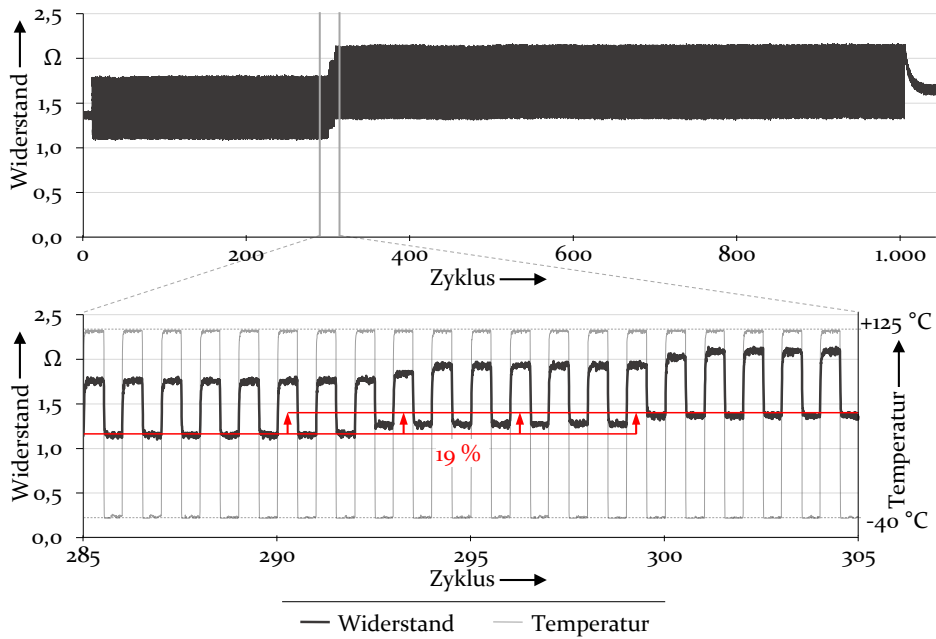


Bild 47: Exemplarischer Widerstandsverlauf einer Testschaltung während eines Temperaturschocktests [111]

In Bild 48 sind charakteristische Widerstandsverläufe, die mittels Online-Messungen an unverzweigten Testschaltungen während eines Temperaturschocktests aufgenommen wurden, in vier Kategorien klassifiziert. Ein Widerstandsverlauf der Kategorie 1 ist über den gesamten Zeitraum der Prüfung frei von Auffälligkeiten und lässt damit keine Anzeichen einer Beschädigung erkennen. Die Widerstandsdiagramme der Kategorien 2 und 3 zeigen während der Belastungsphase ab einem gewissen Zeitpunkt unregelmäßige, temporäre Widerstandsausschläge und weisen damit auf Schädigungen in den Leiterbahnen hin. Während sich maßgeblich bei hohen Temperaturen der Widerstand der Testschaltung in Kategorie 2 vielfach drastisch erhöht, führen die Leiterbahnrisse in Kategorie 3 zeitweise sogar

zu einer vollständigen Unterbrechung der elektrischen Verbindung. Bei abnehmenden Temperaturen schließen sich die Risse häufig weitgehend, wodurch sich der Leiterbahnwiderstand den anfänglichen Werten im unbeschädigten Zustand nähert. Verglichen mit dem Ausgangsniveau ist nach dem Belastungstest bei Raumtemperatur vielfach nur ein unwesentlich erhöhter Widerstand messbar. Unter erneuter Belastung ist jedoch von einer Beeinträchtigung oder einem kompletten Ausfall der Funktion entsprechend geschädigter Baugruppen auszugehen.

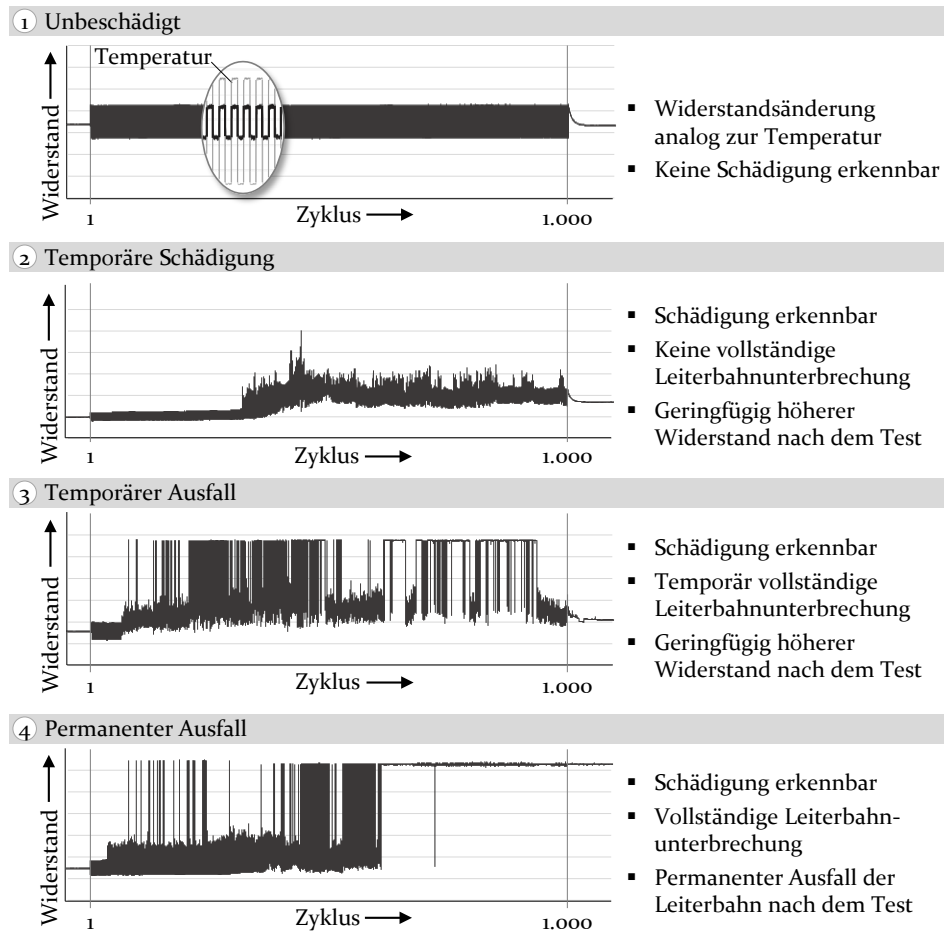


Bild 48: Klassifizierung charakteristischer Widerstandsverläufe aus Online-Messungen während des Temperaturschocktests [111]

Da sich mit üblichen Funktionsprüfungen oder elektrischen Tests Schädigungen, die ein Verhalten gemäß der Kategorien 2 und 3 hervorrufen, nicht sicher detektieren lassen, sind gerade diese Fälle als besonders kritisch einzustufen. Ein Widerstandsverlauf der Kategorie 4 kennzeichnet sich durch einen permanenten Ausfall der Leiterbahn, der auch nach Abschluss der Prüfung unter normalen Bedingungen bestehen bleibt und problemlos festzustellen ist.

Die Analyse der Widerstandsverläufe liefert nicht nur Informationen über den Zeitpunkt der Schädigungen und den vorherrschenden Bedingungen, sondern lässt auch Beeinträchtigungen erkennen, die nur temporär unter erhöhter Belastung auftreten. Damit zeichnet sich die Online-Messung als geeignete Methode aus, um im Weiteren die Rissentstehung in LDS-Leiterbahnen und deren Ursachen zu untersuchen.

4.2 Zentrale Einflussgrößen auf die Rissentstehung

Wesentliche Einflussgrößen auf die Rissentstehung in Leiterbahnen sind im Kapitel 2.2.2 in Form eines Ursache-Wirkungs-Diagramms dargestellt (vgl. Bild 17). Im Rahmen der Forschungsarbeiten liegt der Fokus auf den LDS-spezifischen Besonderheiten, die sich aus den charakteristischen Eigenschaften der Baugruppen ergeben und dementsprechend besondere Aufmerksamkeit beim Einsatz der Technologie erfordern. Im Vordergrund stehen dabei die Auswirkungen der großen thermomechanischen Fehlanpassung zwischen Kunststoff und Metallisierung. In diesem Zusammenhang darf nicht vernachlässigt werden, dass mechatronische Baugruppen nicht erst im Gebrauch, sondern bereits während ihrer Fertigung im Lötprozess kritischen Belastungssituationen ausgesetzt sind. Zudem bedarf es bei allen Vorzügen, die aus der hohen Gestaltungsfreiheit der MID-Technologie hervorgehen, auch einer Auseinandersetzung mit den damit verbundenen Konsequenzen für die Zuverlässigkeit der Bauteile. Aus diesem Grund betrachten gezielte Versuchsreihen zur Rissentstehung speziell die Einflüsse, die aus der räumlichen Geometrie der Grundkörper sowie ihrer Fertigung im Spritzgießprozess resultieren.

4.2.1 Rissanfälligkeit in Abhängigkeit der thermomechanischen Fehlanpassung

Da die thermomechanischen Spannungen im Materialverbund aus Kunststoffsubstrat und Metallisierung die maßgebliche Ursache für die Entstehung von Leiterbahnrisen sind, wird zunächst die Rissanfälligkeit in

Abhängigkeit der CTE-Differenz zwischen den Verbundpartnern betrachtet. Für die Untersuchungen wurden Probekörper in Form von Testplatten mit den Maßen 44 mm x 44 mm x 2 mm aus den Substratmaterialien LCP (Vectra® E840i LDS), PPA (ForTii® LDS51) und PBT (Vestodur® X9423) hergestellt. Die Auswahl der Kunststoffe erfolgte in erster Linie aufgrund ihrer unterschiedlichen linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten, die eine differenzierbare Betrachtung der thermomechanischen Fehlanpassung als Einflussgröße ermöglichen. Eine weitere Anforderung an die Materialauswahl war eine hohe thermische Beständigkeit, die auch einen Einsatz in anspruchsvollen Anwendungsbereichen erlaubt.

In den Datenblättern der verwendeten Materialien sind die CTE-Werte parallel / senkrecht zur Fließrichtung der Kunststoffschmelze mit 12 / 27 ppm/K für LCP, 30 / 40 ppm/K für PPA und 23 / 57 ppm/K für PBT angegeben [79][83][112]. Wie in Kapitel 2.2.2 beschrieben, hängt das Wärmeausdehnungsverhalten von Kunststoffbauteilen mitunter stark von der Ausrichtung der Füllstoffpartikel und damit von den Strömungsbedingungen der Kunststoffschmelze ab. Beeinflusst wird die thermische Ausdehnung dementsprechend auch von anwendungsspezifischen Faktoren wie den gewählten Spritzgießparametern sowie der jeweiligen Werkzeug- und Angussgestaltung. Ferner weisen die Ausdehnungskoeffizienten vielfach eine ausgeprägte Temperaturabhängigkeit auf, worüber aus den Datenblättern für gewöhnlich keine Informationen hervorgehen. Zur detaillierten Charakterisierung des Wärmeausdehnungsverhaltens der verwendeten Probekörper wurden deshalb deren CTE-Werte in einer thermomechanischen Analyse (TMA) nach ISO 11359 [113][114] im Temperaturbereich von -40 °C bis 120 °C bestimmt¹.

Die Ergebnisse der TMA sind Bild 49 zu entnehmen. Ergänzend zu den Liniendiagrammen, in denen die thermischen Ausdehnungskoeffizienten kontinuierlich über die Temperatur dargestellt sind, repräsentieren die Balken die CTE-Mittelwerte innerhalb der gemäß Achsenbeschriftung unterteilten Temperaturintervalle über jeweils 40 K. Als Bezugsgröße zur Fehlanpassung im Materialverbund ist ferner der CTE von Kupfer mit einer vernachlässigbaren Temperaturabhängigkeit [77] als gestrichelte Linie abgebildet.

¹ Die TMA wurde bei der Conti Temic microelectronic GmbH in Nürnberg durchgeführt.

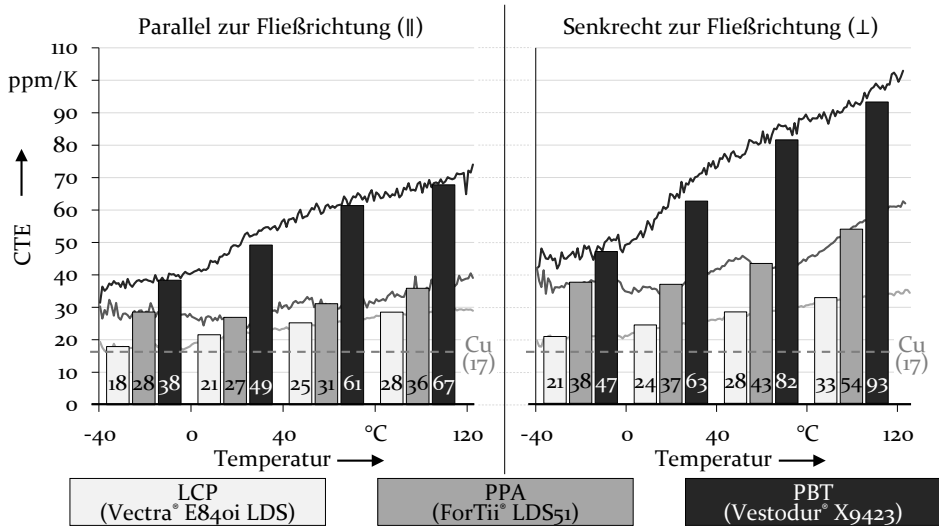


Bild 49: Ergebnisse der TMA – Thermische Längenausdehnungen der verwendeten Probekörper in unterschiedlichen Temperaturbereichen

Gemittelt über den gesamten Temperaturbereich von -40 °C bis 120 °C ergeben sich aus der TMA für die Probekörper aus den Materialien LCP, PPA und PBT CTE-Werte von $23 / 27\text{ ppm/K}$, $30 / 43\text{ ppm/K}$ und $54 / 71\text{ ppm/K}$ (parallel / senkrecht zur Fließrichtung). Die Messergebnisse zeigen dabei deutlich die Temperaturabhängigkeit der Ausdehnungskoeffizienten auf. So liegen im Temperaturintervall von 80 °C bis 120 °C die gemittelten CTE-Werte 33% bis 48% über den jeweiligen Werten im Intervall von 0 °C bis 40 °C .

Das Testlayout, das für die Untersuchungen entworfen wurde, besteht aus acht mäanderförmigen Leiterbahnen mit einer Breite von $100\text{ }\mu\text{m}$ und einer Gesamtlänge von jeweils etwa 300 mm . Zur Vermeidung scharfkantiger Richtungswechsel wurden gemäß den Designregeln für LDS-MID die Mäanderwindungen als Kreisbögen und die Übergänge von den Anschluss pads zu den Leiterbahnen gleitend ausgeführt [26]. Die Orientierung des Testlayouts erfolgte auf allen Probekörpern so, dass die Leiterbahnen längs zum Anguss ausgerichtet sind. Maßgebend für die spätere Auswertung der Versuchsergebnisse sind folglich die ermittelten thermischen Längenausdehnungen parallel zur Fließrichtung der Kunststoffschmelze. Die Aufnahme eines Probekörpers und eine Skizze des Testlayouts sind zur Veranschaulichung in Bild 50 dargestellt.

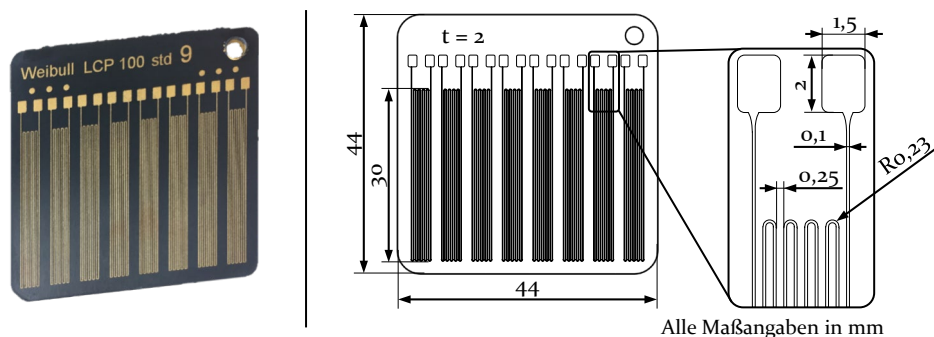


Bild 50: Testlayout für die Untersuchungen zur Rissanfälligkeit in Abhängigkeit thermomechanischer Fehlanpassung

Für die Strukturierung der Probekörper wurden auf Grundlage einer im Vorfeld durchgeführten Parameterstudie materialspezifische Lasereinstellungen festgelegt, mit denen für alle Varianten eine vergleichbare Rauheit von $R_z \approx 20 \mu\text{m}$ erzeugt wurde. Die anschließende Metallisierung erfolgte standardmäßig im Schichtsystem Kupfer-Nickel-Gold. Die zentralen Eigenschaften der Probekörper sind in Tabelle 7 zusammengefasst.

Tabelle 7: Wesentliche Eigenschaften der Probekörper zur Untersuchung der Rissanfälligkeit in Abhängigkeit thermomechanischer Fehlanpassung

	LCP	PPA	PBT
Substratmaterial	Vectra® E84oi LDS	ForTii® LDS51	Vestodur® X9423
Schmelztemperatur	335 °C	325 °C	223 °C
CTE (parallel / senkrecht) gemäß Materialdatenblatt	12 / 27 ppm/K [79]	30 / 40 ppm/K [112]	23 / 57 ppm/K [83]
gemäß TMA (-40 bis 120 °C)	23 / 27 ppm/K	30 / 43 ppm/K	54 / 71 ppm/K
Laserparameter	Standard	Standard	Standard
Strukturierungsrauheit R_z (Konfokal-Laserscan)	22,5 μm	19,0 μm	23,2 μm
Schichtdicken (Röntgenfluoreszenz)	Cu	10,1 μm	9,7 μm
	Ni	4,6 μm	5,6 μm
	Au	4,2 μm	4,5 μm
Schichtrauheit R_z (Konfokal-Laserscan)	0,2 μm	0,2 μm	0,2 μm
	45,3 μm	31,3 μm	27,7 μm

Um die Rissanfälligkeit der LDS-Leiterbahnen unter thermischer Belastung auf den unterschiedlichen Substratmaterialien zu bestimmen, wurden die Probekörper gemäß der in Kapitel 4.1 beschriebenen Methodik während eines Temperaturschocktests online überwacht. Analog zu den hohen

Anforderungen an elektronische Komponenten für den Motor- oder Getriebeanbau im Automobilbereich wurde der Temperaturschocktest nach DIN EN 60068-2-14 bei $-40\text{ °C}/+140\text{ °C}$ durchgeführt [84][110]. Die Prüfdauer wurde auf 1.000 Zyklen mit einer Haltezeit von 15 Minuten nach Durchtemperierung der Proben in der jeweiligen Prüfkammer festgelegt. Durch die Online-Messung wurden die Widerstandswerte aller Leiterzüge über die gesamte Prüfdauer in einem Takt von 20 Sekunden aufgezeichnet. Im Nachgang erfolgte die Analyse der einzelnen Widerstandsverläufe. Entsprechend der Klassifizierung nach Bild 48 werden diejenigen Testschaltungen als geschädigt betrachtet, deren Widerstandsverlauf von Kategorie 1 abweicht. Als Schädigungszeitpunkt wird der Zyklus festgehalten, in dem erstmals bei 140 °C eine Widerstandserhöhung über 20 % bezogen auf den Widerstandswert im ersten Zyklus errechnet wird beziehungsweise eine vollständige Unterbrechung eintritt. Weiter wurden nach dem Temperaturschocktest die Kontaktstellen der Messleitungen an den geschädigten Testschaltungen untersucht. Auf Grundlage einer optischen und elektrischen Prüfung lässt sich in Einzelfällen auf ein Versagen der Lötverbindung als Schädigungsursache schließen. Für die Bestimmung der Leiterbahn-Rissanfälligkeit wurden entsprechende Daten konsequenterweise nicht berücksichtigt.

Zur Bestimmung der Ausfallwahrscheinlichkeiten von LDS-Leiterbahnen aufgrund thermomechanischer Beanspruchung wurden die erhobenen Daten mithilfe einer Weibull-Analyse ausgewertet. Die Weibull-Analyse ist eine etablierte Methode zur Beurteilung der Zuverlässigkeit technischer Erzeugnisse, die das jeweilige Ausfallverhalten statistisch erfasst und beschreibt. In der 2-Parameter-Form, die zum Einsatz kommt, wenn von keiner ausfallfreien Zeit ausgegangen werden kann, ergibt sich die zugrundeliegende Verteilungsfunktion über die Lebensdauer der Erzeugnisse ($F(t)$) aus folgendem Zusammenhang der beiden Parameter Form (b) und Lage (T):

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^b} \quad (8)$$

Der Lageparameter (Skala) entspricht der sogenannten charakteristischen Lebensdauer, die die Zeitspanne angibt, nach der 63,2 % der Einheiten ausgefallen sind. Der Formparameter charakterisiert die Ausfallsteilheit und ist damit ein Maß für die Streuung der Ausfallzeiten und die Form der Ausfalldichte. [115][116]

Die Schätzung der Parameter erfolgte im Rahmen der Untersuchungen nach der Methode der geringsten Abstandsquadrate (Least Squares). Aufgrund der exakteren Anpassung der Funktion an die vorliegenden Daten (Korrelationskoeffizient = 0,93) wurde diese Variante der alternativen Maximum-Likelihood-Methode vorgezogen. Schaltungen, die bis zum Ende des Temperaturschocktests keine Schädigungen aufweisen, wurden in der Weibull-Analyse zeitzensiert als nicht ausgefallen berücksichtigt. Das Ergebnis der Analyse ist in Bild 51 dargestellt.

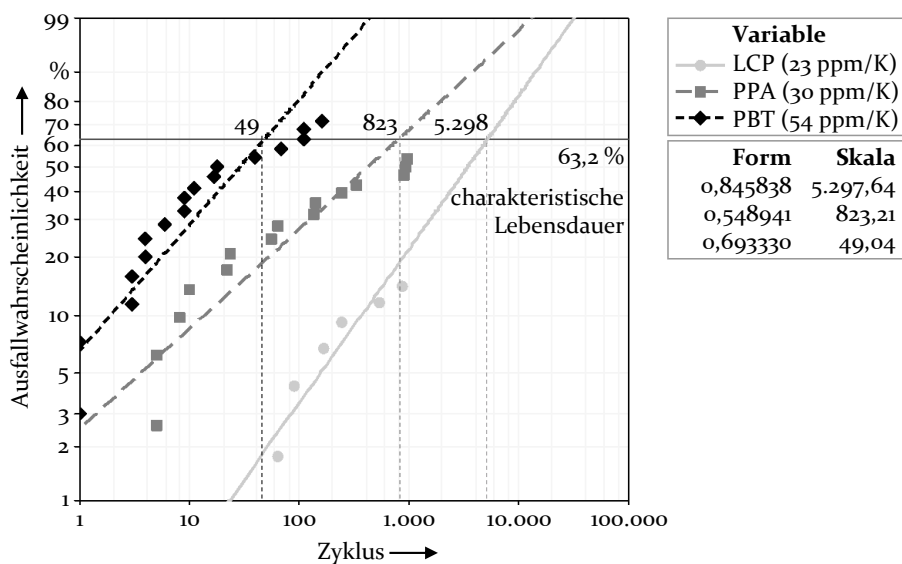


Bild 51: Ausfallwahrscheinlichkeiten von LDS-Leiterbahnen unter thermischer Wechselbelastung bei unterschiedlicher thermomechanischer Fehlanpassung

Das Diagramm zeigt die ermittelten Ausfallwahrscheinlichkeiten der LDS-Leiterbahnen auf den drei betrachteten Probekörpervarianten aus LCP, PPA und PBT. Im direkten Vergleich wird der zentrale Einfluss des Substratmaterials auf die Rissanfälligkeit unter thermischer Belastung deutlich. Mit zunehmender Wärmeausdehnung des Kunststoffes und einer damit größeren thermomechanischen Fehlanpassung in Bezug auf die kupferbasierten Leiterbahnen steigt die Wahrscheinlichkeit rissbedingter Ausfälle drastisch. Bei den LCP-Probekörpern, die mit 23 ppm/K die geringste Wärmeausdehnung und folglich auch die geringste CTE-Fehlanpassung zu Kupfer (17 ppm/K) aufweisen ($\Delta\text{CTE} = 6 \text{ ppm/K}$), beträgt die charakteristische Lebensdauer unter den anspruchsvollen Testbedingungen nahezu 5.300 Temperaturzyklen. Im Metall-Kunststoff-Verbund der PPA-Probekörper fällt die Diskrepanz der CTE-Werte dagegen mit 13 ppm/K etwa doppelt so hoch aus. Die massiven Auswirkungen der

höheren thermomechanischen Beanspruchung auf die Ausfallwahrscheinlichkeiten der 100 μm breiten Leiterbahnen gehen eindrücklich aus der Weibull-Analyse hervor. Aus den Versuchsdaten dieser Probekörpervariante resultiert eine charakteristische Lebensdauer von nur noch 823 Testzyklen. Die höchste Beanspruchung erfahren die Leiterbahnen auf dem PBT-Substrat. Die Wärmeausdehnungsdifferenz zwischen Kunststoff und Leiterbahn beträgt hier mit 37 ppm/K mehr als das sechsfache der LCP-Variante. Im strapaziösen Temperaturwechsel zwischen $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ fallen unter diesen Bedingungen statistisch betrachtet 63,2 % der Testschaltungen nach nicht einmal 50 Zyklen aus.

4.2.2 Geometrische und spritzgießbedingte Einflussgrößen

In bisherigen Forschungsarbeiten zur Zuverlässigkeit mechatronisch integrierter Baugruppen wurden ihre wesenseigenen Merkmale bezüglich ihrer räumlichen Gestaltung und die Grundkörperfertigung im Spritzgießprozess weitestgehend außer Acht gelassen. Eine Reduzierung der Komplexität durch eine ausschließliche Betrachtung planarer Strukturen wird jedoch den realen Gegebenheiten von MID-Anwendungen nicht gerecht. Da sich an konventionellen Testplatten grundlegende anwendungstypische Merkmale nicht abbilden lassen, besteht bei ihrer Verwendung auch nicht die Möglichkeit, diese als potenzielle zuverlässigkeitskritische Einflussgrößen zu untersuchen.

Aus diesem Grund erfolgte eine gezielte Untersuchung geometrischer und spritzgießbedingter Einflüsse auf die Entstehung von Leiterbahnrisen an speziell gestalteten dreidimensionalen Probekörpern. Im Gegensatz zu planaren Testplatten weisen die verwendeten Probekörper wesentliche charakteristische Merkmale realer MID-Applikationen auf und ermöglichen damit, diese systematisch mit in die Zuverlässigkeitsbetrachtungen einzubeziehen.

Das für die Untersuchungen designte Testlayout besteht aus insgesamt acht mäanderförmigen Testschaltungen mit einer Leiterbahnbreite und einem Leiterbahnabstand von jeweils 100 μm . Als Referenzstruktur befindet sich eine der Testschaltungen auf einer planaren Fläche ohne jegliche Besonderheiten. Die weiteren sieben Schaltungen verteilen sich auf unterschiedliche, vermeintlich kritische Stellen des Probekörpers wie konvex und konkav geformte Flächen, bewusst erzeugte Bindenähte oder Auswerfermarkierungen. In Bild 52 ist die Vorder- und Rückseite des Probekörpers mit allen acht Testschaltungen dargestellt.

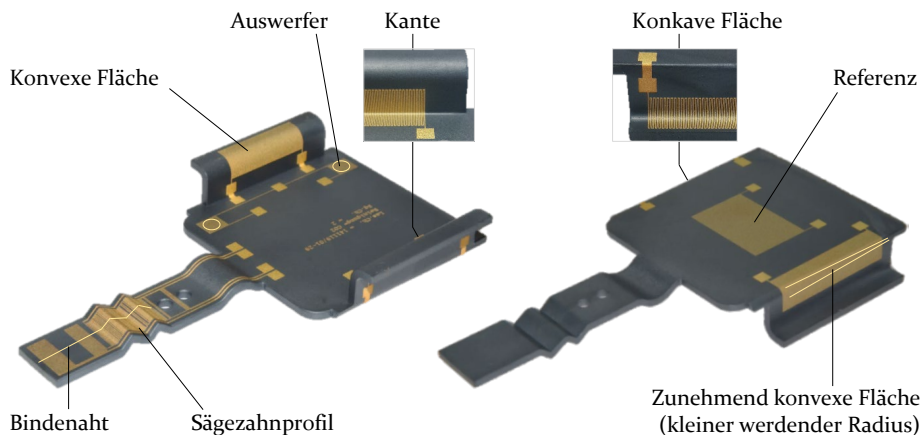


Bild 52: Dreidimensionaler MID-Probekörper mit dem Testlayout zur Untersuchung von Leiterbahnrisen [111]

Für die Untersuchungen wurden Probekörper aus dem Material LCP (Vectra® E84oi LDS) in zwei Varianten gefertigt². Bei der Variante V1 wurde mit geringer Laserleistung und einer anschließenden CO₂-Schneestrahlnreinigung die Rauheit der Leiterbahnen reduziert. Bei der Variante V2 wurde die Metallisierung mit einer erhöhten Nickelschicht abgeschieden. In beiden Varianten wurden die Probekörper zur Hälfte einer Lötbelastung im Kondensationslötöfen ausgesetzt. Der Lötprozess erfolgte bei einem für SnAgCu-Legierungen typischen Lötprofil mit einer Peaktemperatur von 230 °C. In Tabelle 8 sind die relevanten Eigenschaften der verwendeten Probekörper aufgeführt.

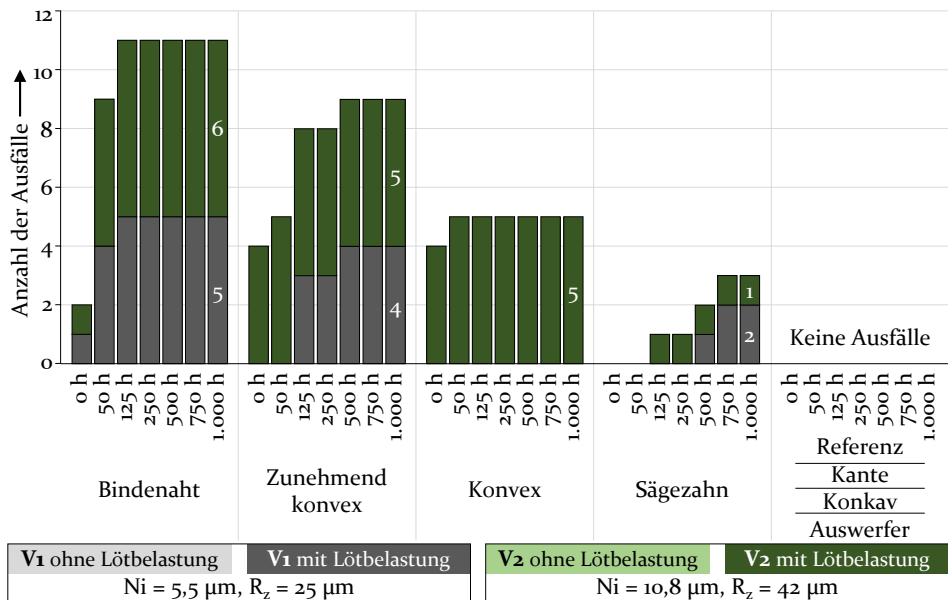
Tabelle 8: Eigenschaften der dreidimensionalen Probekörper [111]

		V1 ohne Lötbelastung	V1 mit Lötbelastung	V2 ohne Lötbelastung	V2 mit Lötbelastung
Substratmaterial		LCP (Vectra® E84oi LDS)			
Schichtdicken (Röntgenfluoreszenz)	Cu	8,0 µm		7,9 µm	
	Ni	5,5 µm		10,8 µm	
	Au	0,2 µm		0,2 µm	
Schichtrauheit R _z (Konfokal-Laserscan)		25 µm		42 µm	
Lötprozess (Kondensation 230 °C)		Nein	Ja	Nein	Ja

² Die Herstellung der Probekörper erfolgte im Rahmen des AiF-IGF-Vorhabens 16737 N (LDS-MID-ChaMP) am Lehrstuhl für Kunststofftechnik (LKT) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU) und bei Hahn-Schickard in Stuttgart.

Die Untersuchungen zur Rissentstehung wurden an den dreidimensionalen Probekörpern anhand von zwei Versuchsreihen unter verschiedenen Belastungsszenarien durchgeführt. Parallel zur Belastung im Temperaturschocktest erfolgte eine Betrachtung der Auswirkungen einer Feuchte-Wärme-Lagerung. Für die Versuchsreihe wurden insgesamt 24 Probekörper – jeweils sechs der Variante V₁ und V₂ mit und ohne Lötbelastung – für 1.000 Stunden den Umgebungsbedingungen von 85 °C bei 85 % relativer Luftfeuchtigkeit ausgesetzt. Um die Folgen der klimatischen Belastung auf den Zustand der Leiterbahnen zu bewerten, wurden die Widerstände sämtlicher Testschaltungen in definierten Zeitabständen geprüft. Die Durchführung der Einzelmessungen erfolgte vor Testbeginn (0 h) sowie nach Belastungszeiten von 50, 125, 250, 500, 750 und 1.000 Stunden.

Die Ergebnisse der Versuchsreihe sind in Bild 53 dargestellt. Separiert nach den unterschiedlichen Positionen der Testschaltungen zeigt das Säulendiagramm zum jeweiligen Messzeitpunkt die Anzahl der ausgefallenen Strukturen jeder Probekörpervariante. Dabei werden lediglich vollständige Leiterbahnunterbrechungen als Ausfälle gewertet. Widerstandsveränderungen im messbaren Bereich sind in der Auswertung hingegen nicht weiter berücksichtigt.



N = 185 Testschaltungen

Bild 53: Ergebnisse der Rissuntersuchung an dreidimensionalen Probekörpern bei Feuchte-Wärme-Lagerung [111]

In der Auswertung der Ergebnisse werden die Unterschiede in der Rissanfälligkeit der Leiterbahnen abhängig von ihrer jeweiligen Positionierung auf dem 3D-Probekörper deutlich. Besonders eklatant sticht zudem der Einfluss einer Lötbelastung auf das Ausfallverhalten der Testschaltungen hervor. So betreffen alle 28 erfassten Ausfälle Probekörper, die im Rahmen der Versuchsreihe einem Lötprozess unterzogen wurden. Davon weisen zehn Testschaltungen bereits unmittelbar nach Durchlaufen des Lötovens Leiterbahnunterbrechungen auf.

Im Hinblick auf die Positionierung zeigen die Leiterbahnen im Bindenahtbereich die höchste Neigung zu rissbedingten Ausfällen. Nach der Feuchte-Wärme-Lagerung verfügt nur noch einer der zwölf Probekörper mit Lötbelastung an dieser Stelle über eine intakte Schaltung. Ein erhöhtes Risiko für Leiterbahnrisse besteht darüber hinaus auf den konvex ausgeprägten Flächen. An der Referenzposition, der Kante, der konkaven Fläche sowie an den Auswerfermarkierungen verursachen die Testbedingungen hingegen keine Leiterbahnunterbrechung. In Bezug auf die beiden betrachteten Probekörpervarianten V₁ und V₂ deuten die Resultate ferner auf eine erhöhte Rissbeständigkeit von Leiterbahnen mit geringer Nickelschichtdicke und Oberflächenrauheit hin. Bei der entsprechenden Variante V₁ fallen mit elf Defekten gegenüber der alternativen Variante V₂ mit 17 Defekten insgesamt 35 % weniger Testschaltungen aus. Die Übersicht in Bild 54 über die Anzahl der aufgetretenen Defekte in den jeweiligen Positionen und Probekörpervarianten mit und ohne Lötbelastung dokumentiert deutlich die genannten kritischen Einflussgrößen.

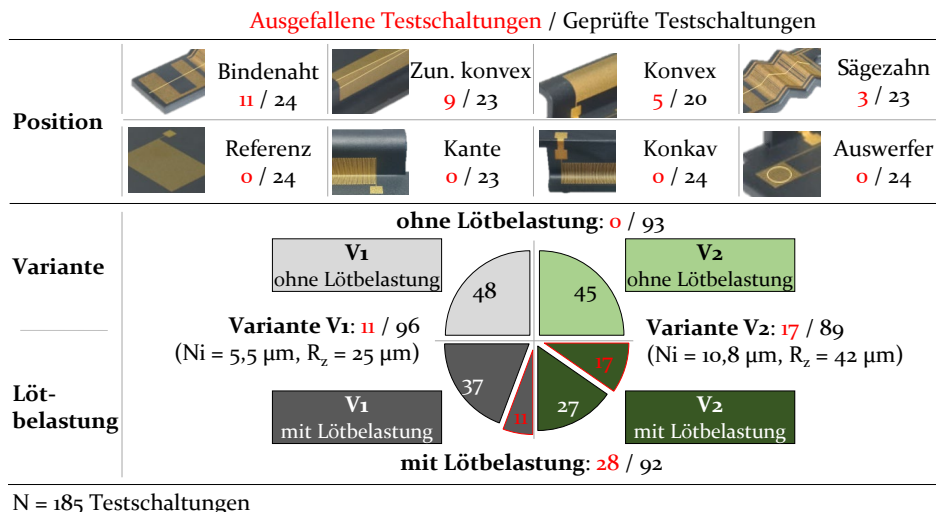
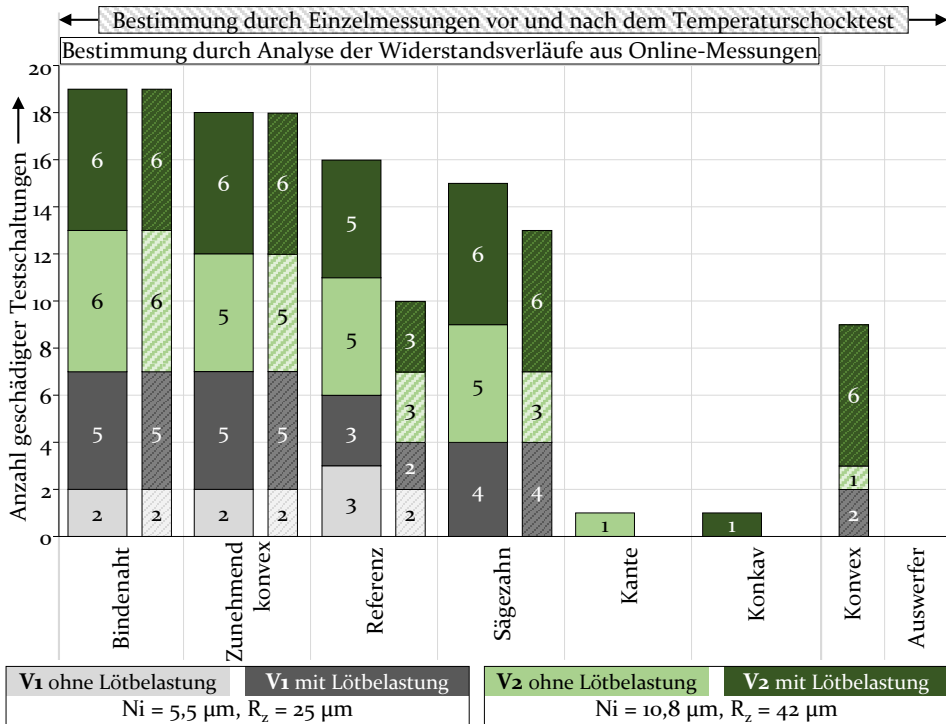


Bild 54: Festgestellte Ausfälle in der Versuchsreihe an dreidimensionalen Probekörpern bei Feuchte-Wärme-Lagerung nach Position, Variante und Lötbelastung

In der Versuchsreihe zur Rissentstehung unter thermischer Wechselbelastung wurden wiederum jeweils sechs dreidimensionale Probekörper der Varianten V1 und V2 mit und ohne Lötbelastung einem Temperaturschocktest über 1.000 Zyklen bei $-40\text{ }^{\circ}\text{C}/+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ ausgesetzt. Zusätzlich zur Messung der Widerstände aller Testschaltungen vor und nach der Prüfbelastung wurde der Zustand der Leiterbahnen kontinuierlich während des Temperaturschocktests anhand von Online-Messungen aufgezeichnet. Aufgrund der limitierten Anzahl von Messkanälen beschränkten sich die Online-Messungen an den insgesamt 24 untersuchten Probekörpern auf sechs der acht applizierten Teststrukturen. Die Testschaltungen auf den konvexen Flächen wurden von den Online-Messungen ausgenommen, da die vermeintlich kritischere Leiterbahnführung über die Bauteilkante mit kleiner werdendem Radius (*Zunehmend konvex*) bereits eine entsprechende Geometrie betrachtet. Eine Vermeidung von Leiterbahnen auf Auswerfermarkierungen wird bereits in den LDS-Designregeln empfohlen [26]. Demnach wurden auch hier die Widerstände ausschließlich vor und nach dem Temperaturschocktest sowie gegebenenfalls vor der Lötbelastung gemessen.

Die Ergebnisse der Versuchsreihe sind in Bild 55 zu sehen. Die Auswertung zeigt für jede Position die Anzahl der geschädigten Testschaltungen und ihre Verteilung auf die verschiedenen Probekörpervarianten. Dabei sind die permanenten Ausfälle, die anhand von Einzelmessungen detektiert werden können, und die Schädigungen, die aus der Analyse der Online-Messungen hervorgehen, in separaten Säulen dargestellt. Die Auswertung der Widerstandsverläufe beruht auf der in Abschnitt 4.1 dargelegten Klassifizierung. Demzufolge entsprechen die Schädigungen, die über die Anzahl der aus Einzelmessungen ermittelten Ausfälle hinausgehen, temporären Beeinträchtigungen oder Ausfällen gemäß den Kategorien 2 und 3 (vgl. Bild 48).

Die hohe Anzahl an Defekten macht die erhebliche Beanspruchung der Leiterbahnen bei thermischer Wechselbelastung deutlich. Wie bereits im Feuchte-Wärme-Test erweisen sich Bindenahtbereiche und konvexe Flächen als besonders kritische Stellen für das Schaltungslayout. Über alle 24 Probekörper hinweg überstehen an den entsprechenden Positionen (*Bindenaht* und *Zunehmend konvex*) lediglich fünf respektive sechs Testschaltungen die Prüfbedingungen ohne erkennbaren Schaden. Selbst an der vermeintlich unkritischen Referenzposition treten an zwei Drittel aller getesteten Probekörper Defekte auf.



N = 192 Testschaltungen

Bild 55: Ergebnisse der Rissuntersuchung an dreidimensionalen Probekörpern bei Temperaturschockbelastung [111]

Im Vergleich dazu wirken sich die konkav gestalteten Flächen einschließlich des Kantenübergangs günstig auf die Rissbeständigkeit der Leiterbahnen aus. An diesen Positionen zeigt jeweils nur eine Testschaltung während der Belastungsphase temporäre Auffälligkeiten, die auf eine Schädigung hinweisen. Weiter indizieren auch die Ergebnisse dieser Versuchsreihe die erhöhte Rissneigung bei einer Lötbelastung. Mit 49 der insgesamt 79 detektierten Schädigungen sind mehrheitlich durch einen Lötprozess vorbelastete Probekörper von Leiterbahnrisen betroffen. Ebenso tendieren wie bereits bei der Feuchte-Wärme-Lagerung vermehrt die Probekörper der Variante V2 mit höherer Nickelschichtdicke und Leiterbahnrauheit zu rissbedingten Schädigungen. Im Vergleich zur Variante V1 mit 26 Defekten ist die Fehlerrate hier mit 53 Schädigungen mehr als doppelt so hoch. Die Übersicht in Bild 56 hebt die kritischen geometrischen und spritzgießbedingten Gegebenheiten in Bezug auf die Entstehung von Leiterbahnrisen hervor. Zudem werden anhand der differenzierten Gegenüberstellung fertigungsbezogene Einflüsse sowie die enorme Belastung für die Leiterbahnen im Lötprozess aufgezeigt.

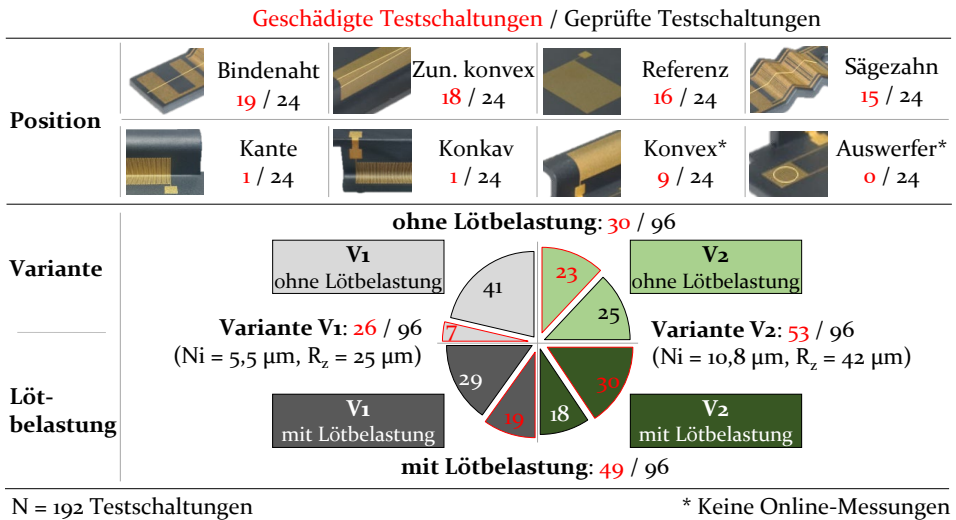


Bild 56: Festgestellte Schädigungen in der Versuchsreihe an dreidimensionalen Probekörpern bei Temperaturschockbelastung nach Position, Variante und Lötbelastung

4.2.3 Rissentstehung im Lötprozess

Die Ergebnisse der Untersuchungen aus Kapitel 4.2.2 weisen auf ein drastisch erhöhtes Risiko von Leiterbahnrisen nach einer Lötbelastung hin und geben damit Anlass, den Fokus weiterer Forschungsarbeiten zur Rissentstehung auf den Lötprozess selbst zu richten. Die extremen Löttemperaturen, die im Reflowprozess zum Aufschmelzen der Lotpaste noch während der Fertigung auf die Baugruppen wirken, überschreiten zwangsläufig die Temperaturen im späteren Einsatz der Baugruppen. Im Hinblick auf die resultierenden thermomechanischen Spannungen im Materialverbund sei an dieser Stelle nochmals auf den charakteristischen sprungartigen Anstieg des Wärmeausdehnungsverhaltens thermoplastischer Kunststoffe oberhalb ihrer Glasübergangstemperatur erinnert. Trotz der verhältnismäßig kurzzeitigen Belastung von nur wenigen Minuten droht den Leiterbahnen durch die enorme Beanspruchung eine nachhaltige Schädigung, die unter Umständen bei einer anschließenden elektrischen Prüfung unerkannt bleibt.

Eine Untersuchung der Rissentstehung während des Lötprozesses nach dem Prinzip der in Abschnitt 4.1 dargestellten Methodik erfordert verschiedene Anpassungen am Messaufbau. Für eine sichere elektrische Kontaktierung der Messleitungen wurde als Alternative zu einer Lötverbindung ein geeigneter Leitklebstoff eingesetzt. Die Aushärtung des Klebstoffes erfolgte im Sinne einer möglichst schonenden Probenpräparation für drei

Stunden bei einer Temperatur von 80 °C. Eine Beeinflussung der Messergebnisse durch vermeintliche Leitfähigkeitsänderungen bei einer späteren Nachvernetzung des Klebstoffes im Lötprozess konnte in Vorversuchen ausgeschlossen werden. Um bei der Aufzeichnung der Messwerte fehlerhafte Messsignale möglichst auszuschließen, ist darüber hinaus unter den erschwerten Bedingungen auf eine sichere mechanische Fixierung der Messleitungen zu achten. Zudem ist dafür Sorge zu tragen, dass durch die langen Messleitungen weder der kontinuierliche Durchlauf der Probekörper durch den Lötoven gestört wird, noch, dass diese unnötig lange den thermischen Belastungen in der Peakzone des Lötovens ausgesetzt sind. Hierfür wurde eine Probenaufnahme mit entsprechenden Zugentlastungen und Anschlussklemmen konzipiert, welche eine Beeinflussung der Datenaufzeichnung durch eine mechanische Belastung der Kontaktierung verhindert sowie eine rasche Entnahme des Aufbaus nach erfolgter Messung ermöglicht. Die Nachführung der Messleitung wurde durch das manuelle Einlegen vorbereiteter Aufnahmeelemente bewerkstelligt, an denen die Messleitungen im Vorfeld fixiert wurden.

Rückschlüsse auf etwaige rissbedingte Schädigungen der Leiterbahnen durch die thermische Belastung im Lötprozess lassen sich wie auch beim Temperaturschocktest im Nachgang der Versuchsdurchführung anhand einer Analyse der kontinuierlich aufgezeichneten Messdaten ziehen. In Anlehnung an die Klassifizierung charakteristischer Widerstandsverläufe beim Temperaturschocktest (vgl. Bild 48) werden auch die Ergebnisse der Online-Messung während des Lötprozesses in vier verschiedene Klassen eingeteilt. An Beispielen charakteristischer Widerstandsverläufe sind in Bild 57 die vier Klassen mit ihren jeweiligen Merkmalen und der daraus abgeleiteten Interpretation hinsichtlich des Schädigungszustands der Leiterbahnen aufgeführt.

In einer ersten Versuchsreihe wurde die Rissentstehung in einem für SnAgCu-Lot klassischen Lötprozess bei unterschiedlichem Wärmeausdehnungsverhalten der Substratmaterialien untersucht. Hierzu kamen Probeplatten mit den Maßen 50 mm x 50 mm x 2 mm aus den Materialien LCP (Vectra® E84oi LDS) und PET/PBT (Pocan® DPT 7140 LDS) zum Einsatz. Als Teststrukturen wurden mäanderförmige Leiterzüge mit einer Leiterbahnbreite von 100 µm unter Verwendung von Standardfertigungsparametern auf die Kunststoffplatten strukturiert und metallisiert.

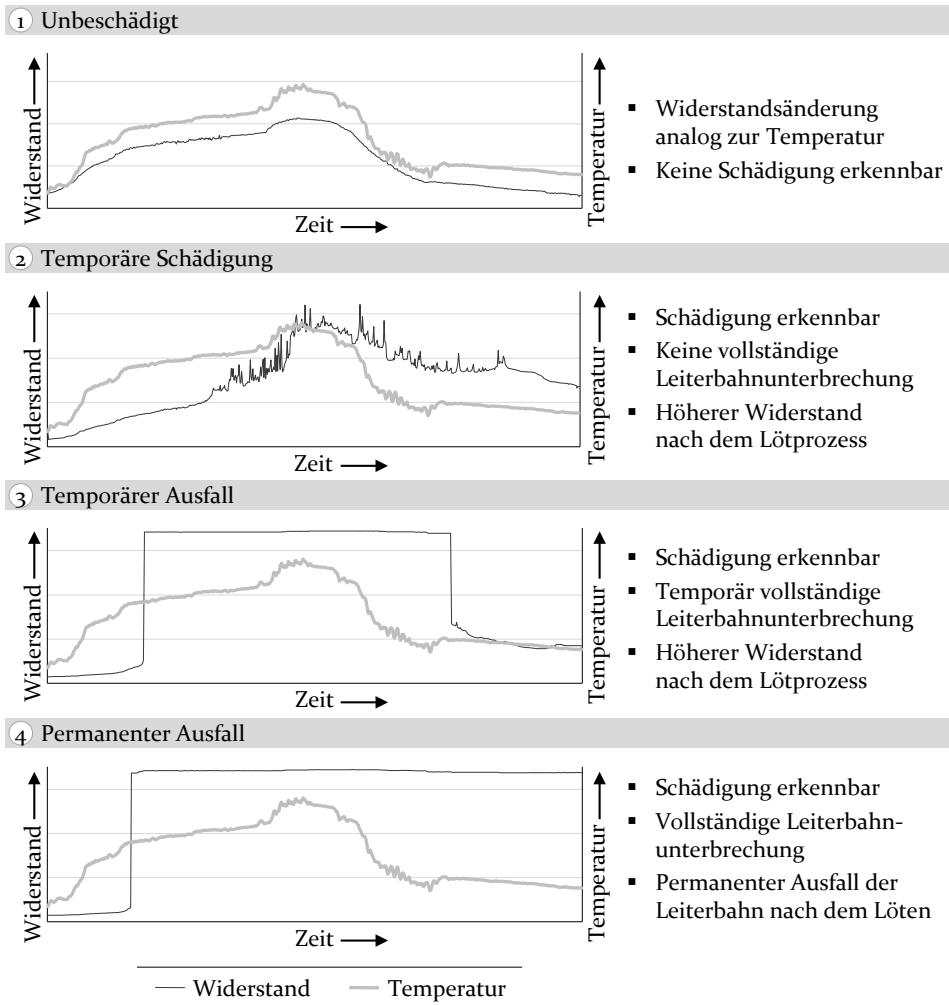


Bild 57: Klassifizierung charakteristischer Widerstandsverläufe aus Online-Messungen während des Lötprozesses

Durch eine gezielte Ausrichtung des Layouts auf den Probeplatten wurden im Rahmen der Versuchsreihe gemäß den in den Materialdatenblättern angegebenen Werten Ausdehnungskoeffizienten von 12 ppm/K (LCP parallel zur Fließrichtung), 27 ppm/K (LCP senkrecht zur Fließrichtung) und 50 ppm/K (PET/PBT senkrecht zur Fließrichtung) an jeweils 21 Testschaltungen betrachtet. Die wesentlichen Kenndaten der eingesetzten Probekörper sind in Tabelle 9 angegeben.

Tabelle 9: Probekörper zur Untersuchung der Rissentstehung im Lötprozess bei unterschiedlichem Wärmeausdehnungsverhalten der Substrate

	LCP parallel	LCP senkrecht	PET/PBT senkrecht
Substratmaterial	Vectra® E840i LDS		Pocan® DPT 7140 LDS
CTE (in Leiterbahn- längsrichtung)	12 ppm/K [79]	27 ppm/K [79]	50 ppm/K [78]
Leiterbahnbreite	100 µm		
Laserparameter	Standard		
Schichtdicken (Röntgenfluoreszenz)	Cu	7,3 µm	6,0 µm
	Ni	5,3 µm	5,3 µm
	Au	0,1 µm	0,1 µm
Schichtrauheit R_z (Konfokal-Laserscan)	18,1 µm		31,9 µm

Eine Analyse der während des Lötprozesses an den Testschaltungen aufgetragenen Widerstandsverläufe offenbart drastische Unterschiede hinsichtlich der Schädigung von Leiterbahnen in Abhängigkeit der Wärmeausdehnung des Substratmaterials. In Bild 58 sind die Widerstandsverläufe aller Testschaltungen für die drei betrachteten Varianten in separaten Diagrammen untereinander dargestellt. Für eine detaillierte Ergebnisanalyse ist eine genaue Betrachtung der Datenreihen im Einzelnen erforderlich. Die Übersichtsdarstellungen eignen sich hierzu nicht. Stattdessen dienen sie an dieser Stelle dazu, in Abhängigkeit der Wärmeausdehnung des Substrats ein Gesamtbild der Auswirkungen des Lötprozesses auf die Zustände der Leiterbahnen zu vermitteln. Zu beachten ist dabei die unterschiedliche Skalierung der Widerstandsachsen. Aufgrund der variierenden Schädigungsfälle sind diese materialspezifisch an die gesamttheitlichen Gegebenheiten angepasst.

Die Leiterbahnen, die auf den LCP-Probekörpern parallel zur Fließrichtung der Kunststoffschmelze im Spritzgießprozess orientiert sind und damit den geringsten thermomechanischen Spannungen unterliegen, zeigen in der Online-Messung keinerlei Auffälligkeiten. Gemäß der in Bild 57 vorgenommenen Klassifizierung verändern sich die Widerstände aller Testschaltungen entsprechend der Kategorie 1 ohne jegliche Schädigungsanzeichen analog zum Temperaturprofil.

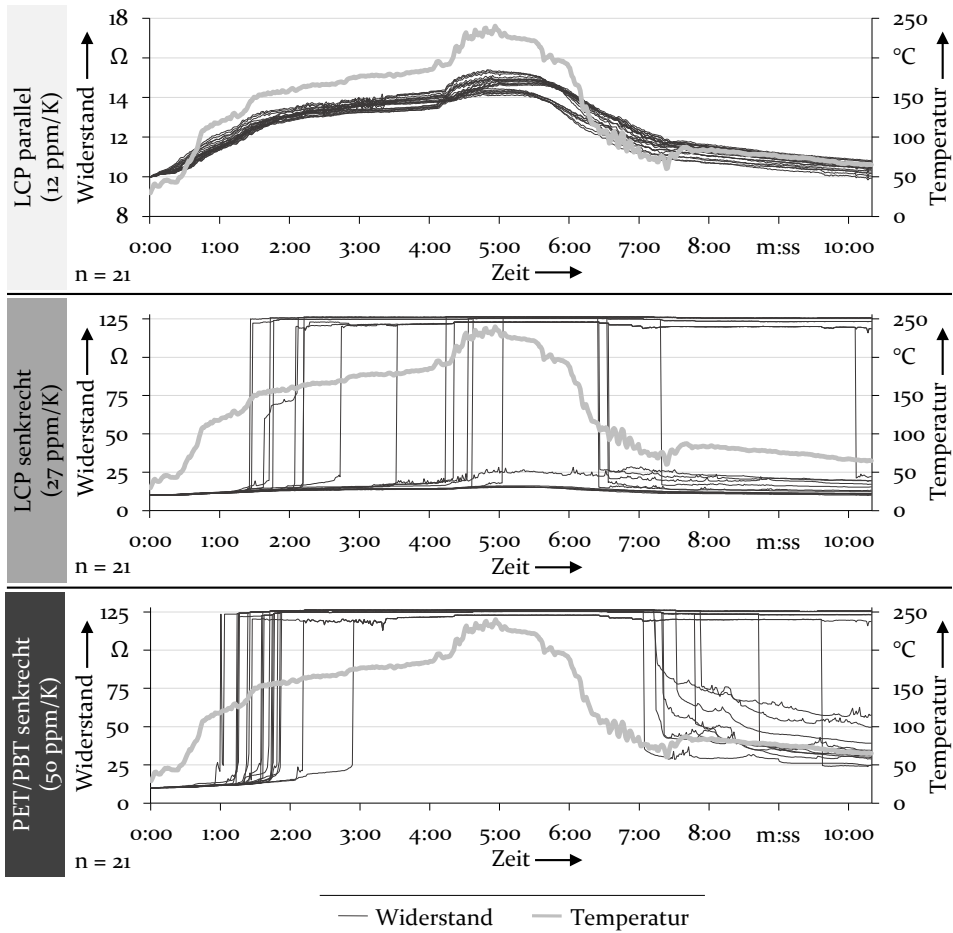


Bild 58: Widerstandsverläufe aus der Versuchsreihe zur Rissentstehung im Lötprozess bei unterschiedlichem Wärmeausdehnungsverhalten der Substrate

Bei einer um 90° gedrehten Orientierung des Testlayouts auf den Probekörpern sind auf selbigem Substratmaterial hingegen an zahlreichen Testschaltungen rissbedingte Schädigungen festzustellen. In den überwiegenden Fällen kommt es während der Halte- oder Peakphase sogar zu vollständigen Leiterbahnunterbrechungen. Bei Entspannung der Probekörper in der Abkühlphase schließen sich die Rissflanken mehrheitlich, wodurch die Testschaltungen wieder eine geschlossene elektrische Verbindung aufweisen (vgl. Kategorie 3). Da sich die Widerstände der Testschaltungen mit fortschreitender Abkühlung ihren Ausgangswerten nähern, ist eine eindeutige Identifizierung entsprechender Schädigungen durch eine einfache Widerstandsprüfung vor und nach der Lötbelastung nicht möglich.

Die massivste Beanspruchung im Rahmen der Versuchsreihe erfahren die Leiterbahnen auf den PET/PBT-Probekörpern. Durch die Orientierung der Leiterbahnlängsrichtung senkrecht zur Spritzgießrichtung wirken bei Erwärmung der Probekörper die Dehnungen von Substrat und Kupferschicht in einem ungleichen Verhältnis von etwa 3 zu 1 (50 ppm/K zu 17 ppm/K) auf die 100 µm breiten Leiterzüge. Unter der extremen Belastung im Lötprozess führen die resultierenden thermomechanischen Spannungen im Metall-Kunststoff-Verbund bei dieser Probekörpervariante zu den dramatischsten Ergebnissen. Wie aus den Widerstandsverläufen der Testschaltungen eindeutig hervorgeht, verursacht der Fertigungsprozess ausnahmslos bei allen 21 Testschaltungen eine vollständige Unterbrechung der elektrischen Verbindung. Sämtliche Ausfälle ereignen sich bereits in der Aufheiz- und in der Haltephase bei Probekörpertemperaturen zwischen 120 °C und 175 °C. Nach dem Lötprozess weisen annähernd 60 % der Testschaltungen wieder eine geschlossene elektrische Verbindung auf und lassen sich damit gemäß Kategorie 3 klassifizieren. Bei den übrigen Testschaltungen bleibt entsprechend Kategorie 4 die rissbedingte Unterbrechung der Leiterbahnen auch nach Abkühlung auf Raumtemperatur bestehen.

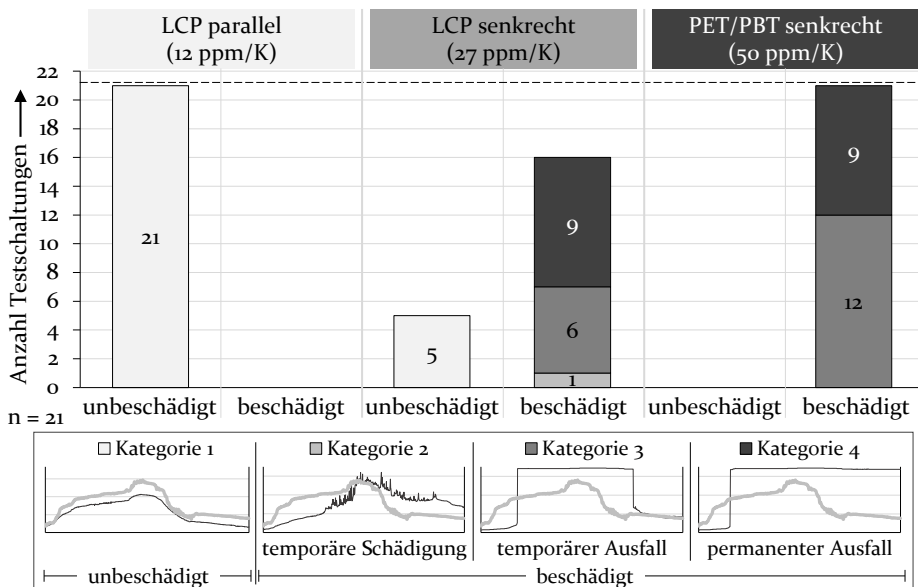


Bild 59: Ergebnisse der Versuchsreihe zur Rissentstehung im Lötprozess bei unterschiedlichem Wärmeausdehnungsverhalten der Substrate

Das Säulendiagramm in Bild 59 fasst die Ergebnisse aus der dedizierten Analyse der Widerstandsverläufe zusammen. Für die drei betrachteten Probekörpervarianten werden die Anzahl unbeschädigter sowie beschädigter Testschaltungen dargestellt. Im Falle beschädigter Testschaltungen differenziert die Darstellung analog zur Klassifizierung nach Bild 57 die Kategorien 2, 3 und 4.

Ausgehend von den Ergebnissen der Variante *LCP senkrecht* wurde in einer weiteren Versuchsreihe die Rissentstehung im Lötprozess bei einer Variation der Leiterbahnbreite und der Schichtrauheit untersucht. Hierzu wurden zusätzliche Probekörper auf Basis des Materials LCP mit einer senkrechten Orientierung der Leiterbahnlängsrichtung zur Kunststoff-fließrichtung hergestellt. Neben einer rauen Variante mit 100 µm breiten Leiterbahnen, bei der die Laserleistung im Strukturierungsprozess erhöht wurde, wurden auch Probekörper jeweils in einer Standard- und einer rauen Variante mit Leiterbahnbreiten von 300 µm gefertigt. Die wesentlichen Eigenschaften der Probekörper für die zweite Versuchsreihe sind in Tabelle 10 aufgeführt.

Tabelle 10: Probekörper zur Untersuchung der Rissentstehung im Lötprozess bei Variation von Leiterbahnbreite und Schichtrauheit

	LCP senkrecht				
	100 / Standard	100 / rau	300 / Standard	300 / rau	
Substratmaterial	Vectra® E84oi LDS				
CTE (in Leiterbahn-längsrichtung)	27 ppm/K [79]				
Leiterbahnbreite	100 µm		300 µm		
Laserparameter	Standard	erhöhte Leistung	Standard	erhöhte Leistung	
Schichtdicken (Röntgenfluoreszenz)	Cu	<u>7,3 µm</u>	<u>6,3 µm</u>	<u>7,3 µm</u>	<u>6,3 µm</u>
	Ni	<u>5,3 µm</u>	<u>3,7 µm</u>	<u>4,7 µm</u>	<u>2,7 µm</u>
	Au	0,1 µm	0,1 µm	0,1 µm	0,2 µm
Schichtrauheit R _z (Konfokal-Laserscan)	18,1 µm	40,1 µm	21,6 µm	68,6 µm	

Die Versuchsdurchführung erfolgte ohne Änderungen entsprechend dem beschriebenen Vorgehen im Rahmen der ersten Versuchsreihe. Die aus den Online-Messungen aufgezeichneten Widerstandsverläufe indizieren für die verschiedenen Varianten erneut erhebliche Unterschiede in der Rissresistenz der Leiterbahnen unter den wirkenden Belastungen in einem Standardlötprozess. Bild 60 stellt unter Einbeziehung der Ausgangsvariante mit der Bezeichnung *LCP senkrecht – 100 / Standard* für die verschiedenen

ausgeprägten Testschaltungen alle Widerstandsverläufe in Übersichtsdiagrammen gegenüber.

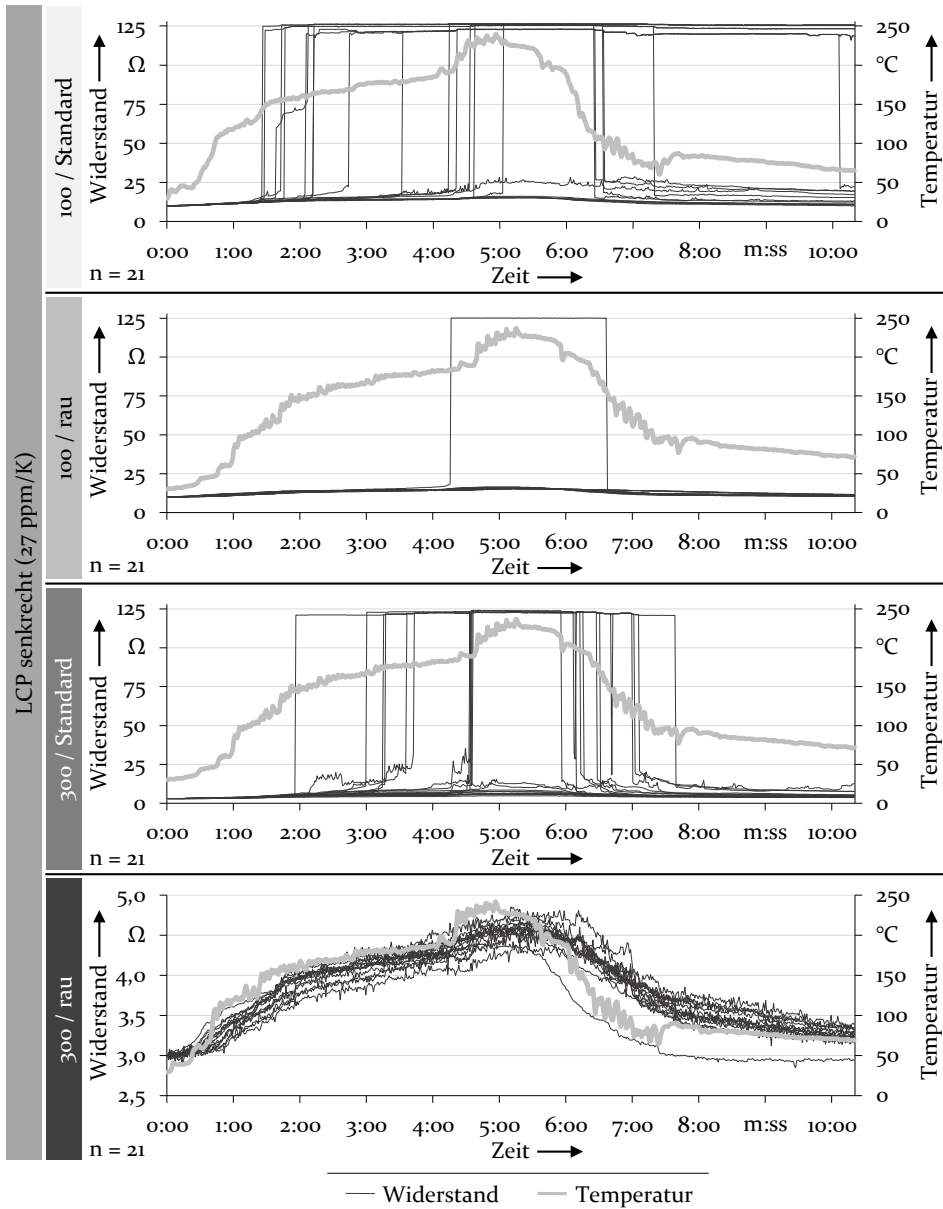


Bild 6o: Widerstandsverläufe aus der Versuchsreihe zur Rissentstehung im Lötprozess bei Variation von Leiterbahnbreite und Schichtrauheit

Ein positiver Effekt auf die Robustheit der Leiterbahnen gegenüber thermomechanisch induzierten Rissen kann durch die Steigerung der Rauheit erzielt werden. Mit nur einer Ausnahme bei einer Testschaltung mit 100 µm breiten Leiterbahnen lassen die Widerstandsaufzeichnungen im Falle der Varianten, die mit erhöhter Laserleistung strukturiert wurden, keine Anzeichen einer Schädigung erkennen. Gemäß der schematischen Darstellung in Bild 61 bietet eine modellhafte Gegenüberstellung einer glatten und rauen Metallisierung einen Ansatz zur Erklärung des unterschiedlichen Ausfallverhaltens: Zum einen reduziert die vergrößerte Fläche einer rauen Struktur die inneren Spannungen, die durch die dominierende thermische Längenausdehnung des Kunststoffsubstrats in der Metallschicht verursacht werden. Zum anderen resultiert aus einer hohen Schichtrauheit ein komplexerer Spannungszustand, wodurch die besonders kritischen lateralen Spannungen in der Metallisierung zusätzlich kompensiert werden.

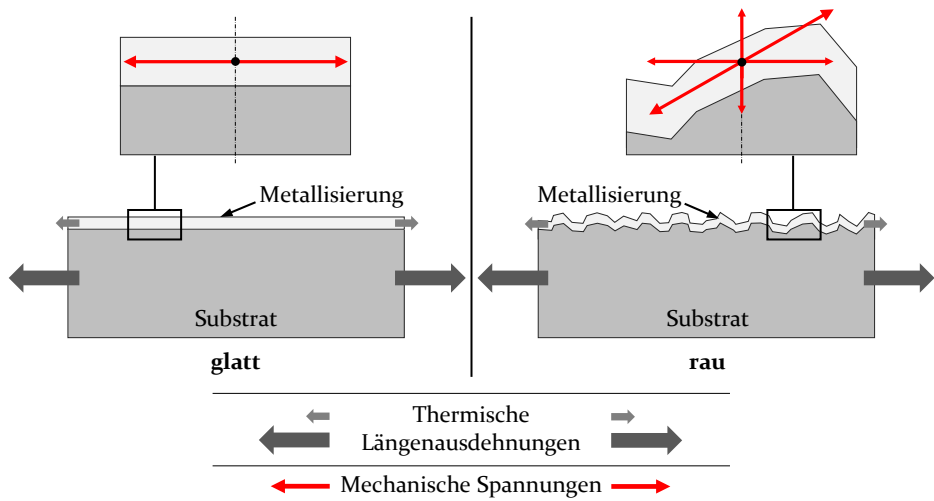


Bild 61: Modellhafte Gegenüberstellung einer glatten und rauen Metallisierung in Bezug auf thermisch induzierte mechanische Spannungen

Durch die breitere Auslegung der Leiterbahnen verringert sich die Anzahl der detektierten Schädigungen nur geringfügig. Bei den Testschaltungen, die mit Standardlaserparametern gefertigt wurden und die demzufolge eine vergleichsweise geringe Oberflächenrauheit aufweisen, treten in der 300 µm Variante zwar keine bleibenden Ausfälle gemäß Kategorie 4 auf, dennoch überstehen nur 38 % der Schaltungen den Lötprozess ohne erkennbare Schädigung. In der Variante mit 100 µm breiten Leiterbahnen bleiben im Vergleich 24 % der Testschaltungen unbeschädigt. Die temporären Leiterbahnunterbrechungen ereignen sich bei breiteren Strukturen

im Lötprozess tendenziell später und werden vielfach im Vorfeld durch deutliche Schwankungen des Widerstands auf erhöhtem Niveau begleitet. Einen Ansatz zur Erklärung der Beobachtung bietet das in Kapitel 2.2.2 beschriebene Ausbreitungsverhalten von Rissen, welches sich bei breiteren Strukturen deutlicher in den Messverläufen abzeichnet und zu einer späteren vollständigen Unterbrechung führt.

Die zusammenfassende Auswertung der Versuchsreihe in Bild 62 beruht auf der Analyse der einzelnen Widerstandsverläufe. Im Diagramm wird das unterschiedliche Ausmaß an rissbedingten Schädigungen im Lötprozess bei der betrachteten Variation der Leiterbahnbreite und der Schichtrauheit deutlich.

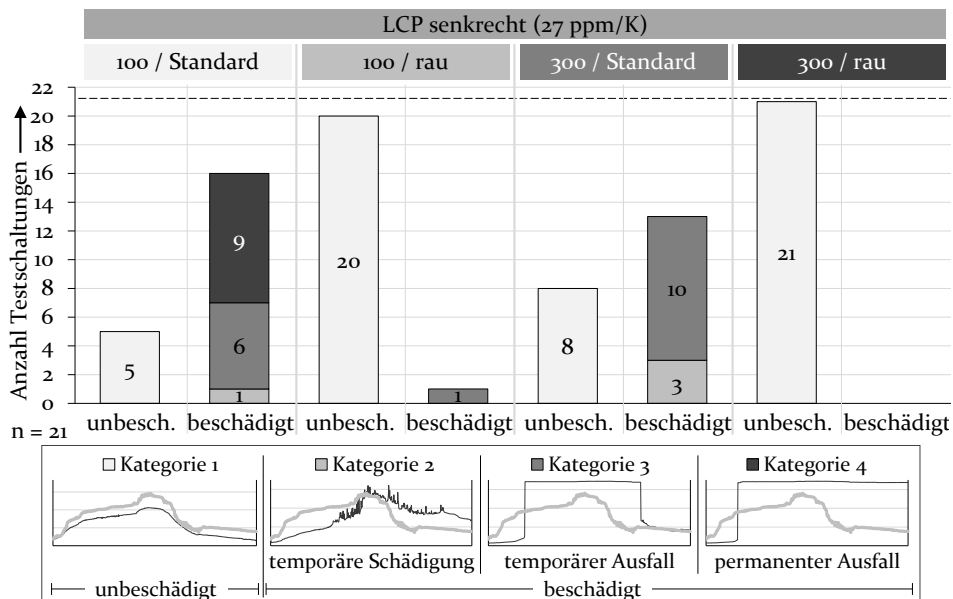


Bild 62: Ergebnisse der Versuchsreihe zur Rissentstehung im Lötprozess bei Variation von Leiterbahnbreite und Schichtrauheit

4.3 Maßnahmen zur Vermeidung von Leiterbahnrisen bei thermischer Belastung

Mechatronische Produkte können bereits bei ihrer Herstellung, Lagerung und ihrem Transport, jedoch insbesondere während ihres Gebrauchs hohen thermischen Belastungen ausgesetzt sein. Eine sichere und durchgängige Funktionserfüllung darf ungeachtet dessen durch die technologische Umsetzung der Produkte in keiner Weise eingeschränkt oder

gefährdet werden. Bei einem Einsatz von LDS-Baugruppen ist in diesem Zusammenhang ein erhöhtes Risiko für einen Ausfall der rissanfälligen Leiterbahnen zu berücksichtigen, welches vor allem aus den thermomechanischen Spannungen im Metall-Kunststoff-Verbund resultiert. Die aus den Forschungsarbeiten gewonnenen Erkenntnisse verhelfen, die Zuverlässigkeit von LDS-MID sicherer einzuschätzen und durch die Ableitung präventiver Maßnahmen rissbedingte Ausfälle zu vermeiden.

Zur Untersuchung des Rissverhaltens von Leiterbahnen hat sich die Online-Widerstandsmessung als geeignete Methode erwiesen. Zum einen werden durch die fortwährende Aufzeichnung der Widerstände auch Schädigungen an Leiterstrukturen detektiert, die nur temporär auftreten und durch Prüfungen im unbelasteten Zustand nicht feststellbar sind. Zum anderen liefert die Methode wertvolle Informationen über Schädigungszeitpunkte und -verläufe sowie den dabei vorherrschenden Bedingungen. Diese Informationen bilden die Grundlage zur weiteren Analyse und Interpretation der Untersuchungsergebnisse.

Als zentrale Einflussgröße auf die Rissentstehung in LDS-Leiterbahnen bestimmt die Wärmeausdehnung des Substrats das Ausmaß der thermomechanischen Beanspruchung im Metall-Kunststoff-Verbund. Mit zunehmender Fehlanpassung der Wärmeausdehnung zum CTE von Kupfer (17 ppm/K), dem Grundmaterial der Metallisierung, steigt die Ausfallwahrscheinlichkeit durch Leiterbahnrisse dramatisch. Während LDS-typische Leiterbahnen bei einer Temperaturwechselbelastung zwischen -40 °C und 140 °C auf Probekörpern mit einem CTE von 23 ppm/K eine charakteristische Lebensdauer von etwa 5.300 Zyklen aufweisen, sinkt diese bei einem CTE von 54 ppm/K auf unter 50 Zyklen. Im Hinblick auf die Vermeidung von Leiterbahnrisen bei thermischer Belastung untermauern diese Forschungsergebnisse die entscheidende Bedeutung der Wahl des Substratmaterials. Da das thermische Ausdehnungsverhalten von Kunststoffbauteilen jedoch nicht alleine vom gewählten Material abhängt, sondern auch erheblich von der Füllstoffverteilung und -orientierung im Bauteil beeinflusst wird, sind ebenso Gestaltungsaspekte und Verarbeitungsparameter für die Zuverlässigkeit der Baugruppen von hoher Relevanz. Anhand von Spritzgießsimulationen können hierzu gegebenenfalls bereits im Entwicklungsprozess hilfreiche Informationen gewonnen werden. Ferner sind im Kontext der Wärmeausdehnung die Angaben in Materialdatenblättern kritisch zu hinterfragen. Vielfach geben die enthaltenen Daten keine verlässliche Auskunft über das Ausdehnungsverhalten im relevanten Temperaturbereich. Zudem lassen sich üblicherweise die richtungsabhängigen CTE-Werte in Fließrichtung der Kunststoffschmelze

sowie parallel zu dieser nicht auf die individuellen, applikationsabhängigen Gegebenheiten übertragen. Im Zweifelsfall ist es folglich ratsam, anwendungsspezifische Analysen vorzunehmen.

Mit einem Fokus auf das Bauteildesign und die Positionierung des Schaltungslayouts konnten weitere Einflussgrößen auf die Entstehung von Leiterbahnrisen identifiziert werden. Unter Umweltbelastungen im Feuchte-Wärme-Test bei 85 °C und 85 % relativer Luftfeuchtigkeit sowie im Temperaturschocktest bei -40 °C/+125 °C neigen bevorzugt Leiterbahnen im Bereich von Bindenähten und auf konvex gestalteten Flächen zu Ausfällen. Die Positionierung von Leiterbahnen auf konkaven Flächen begünstigt hingegen deren Rissresistenz. Zur Vermeidung von rissbedingten Ausfällen sollten demzufolge bereits in der Produktgestaltung die genannten kritischen Geometrien beziehungsweise Positionen nicht für Leiterstrukturen vorgesehen werden. Nach Möglichkeit empfiehlt es sich stattdessen, gezielt eine Leiterbahnführung auf konkaven Flächen zu forcieren. Ebenso sollte das Schaltungslayout unter Berücksichtigung der Füllstoffverteilung gestaltet und orientiert werden. Dies gilt im Besonderen im Falle einer ausgeprägten Anisotropie der thermischen Bauteilausdehnung.

Die Ergebnisse der spezifischen Untersuchungen zur Rissentstehung während des Lötprozesses verdeutlichen die extreme Belastung, der die Baugruppen schon in ihrer Fertigung ausgesetzt sind. Eine Analyse der Widerstandsverläufe, die mithilfe eines adaptierten Messaufbaus während des Lötprozesses aufgezeichnet wurden, lässt auch solche Schädigungen deutlich erkennen, die nicht zu einer bleibenden Leiterbahnunterbrechung führen. Entscheidenden Einfluss auf das Rissverhalten der Leiterbahnen hat auch hier die Wärmeausdehnung des Substratmaterials. Bei einer annähernden Übereinstimmung der CTE-Werte von Substrat und Metallisierung ($\Delta\text{CTE} \leq 5 \text{ ppm/K}$) sind keinerlei Schädigungsanzeichen durch den Lötprozess festzustellen (vgl. Bild 59 Variante *LCP parallel*). Mit zunehmender thermomechanischer Fehlanpassung steigt das Risiko der rissbedingten Leiterbahnschädigung jedoch drastisch an. Da in vielen Fällen die entstandenen Rissflanken in der Abkühlphase wieder mechanisch miteinander in Kontakt treten, besteht eine besondere Gefahr darin, entsprechend vorgeschädigte Baugruppen bei einer elektrischen Prüfung oder einem Funktionstest zum Abschluss ihres Herstellungsprozesses nicht zu erkennen. Dies erklärt die auffallende Häufung von Leiterbahnrisen bei Umweltbelastungen an Bauteilen, die zuvor einem Lötprozess ausgesetzt waren. Um rissbedingten Ausfällen vorzubeugen, ist somit von einem konventionellen Lötprozess (SnAgCu) abzusehen, sofern das Wärmeaus-

dehnungsverhalten im Metall-Kunststoff-Verbund nicht optimal aufeinander abgestimmt ist. Als Alternative bieten sich niedrigschmelzende Lote (z. B. SnBi) oder Leitlebstoffe an, durch deren Einsatz die thermische Belastung der Baugruppen erheblich reduziert werden kann.

Großen Einfluss auf die Rissentstehung in LDS-Leiterbahnen haben zweifelsohne auch deren Schichteigenschaften. Im Rahmen der dargestellten Forschungsarbeiten konnten diese allerdings nicht im Detail betrachtet werden. Die Ergebnisse weisen jedoch darauf hin, dass die Rauheit der Metallisierung wie auch die Dicke der Nickelschicht die Robustheit der Leiterbahnen signifikant beeinflussen. Bei höherer Rauheit ist davon auszugehen, dass die Spannungen in der Metallschicht durch die vergrößerte Fläche reduziert werden. Zusätzlich verringert sich der kritische laterale Anteil aufgrund der komplexeren Spannungszustände. Eine hohe Schichtrauheit begünstigt demnach tendenziell die Rissresistenz der Leiterbahnen. Auf einen negativen Effekt lassen dagegen die Ergebnisse bei hohen Nickelschichtdicken schließen. Eine naheliegende Begründung hierfür liegt in der typischerweise geringen Duktilität der Nickelschichten. Gezielte Untersuchungen zur Steigerung der Robustheit von LDS-Metallschichtsystemen sind Gegenstand gegenwärtiger Forschungsarbeiten³.

³ AiF-IGF-Vorhaben 19754 N: Metallisierungssysteme für Leiterbahnen auf polymerbasierten 3D-Schaltungsträgern mit erhöhter Zuverlässigkeit (MetaZu)

5 Steigerung der Stromtragfähigkeit durch den Einsatz von Metallkern-MID

Der Einsatz von LDS-MID in mechatronischen Anwendungen höherer Leistungsbereiche erfordert eine deutliche Steigerung ihrer typischen Stromtragfähigkeiten. Ein grundlegend neuer Lösungsansatz zur Überwindung der Einschränkungen kunststoffbasierter MID hinsichtlich ihrer limitierenden thermischen Eigenschaften basiert auf einem LDS-fähigen Pulverlack, der eine Herstellung von Metallkern-MID ermöglicht. Die im Folgenden dargestellten Forschungsarbeiten betrachten zu Beginn den Herstellungsprozess entsprechender Metallkern-MID. In vergleichenden Untersuchungen werden daraufhin ihre Eigenschaften bestimmt und denen konventioneller LDS-MID gegenübergestellt. Anhand eines praxis-relevanten Versuchsaufbaus erfolgt abschließend eine Analyse und Bewertung neuer Anwendungspotenziale.

5.1 Herstellung von Metallkern-MID auf Basis von LDS-fähigem Pulverlack

Bei Pulverlacken handelt es sich um lösemittelfreie Beschichtungswerkstoffe, die mittels elektrostatischer Verfahren auf Substrate aufgebracht werden können. Die endgültige Haftwirkung von Pulverlack-Beschichtungen entsteht durch ein Aufschmelzen oder chemisches Vernetzen in einem nachgelagerten Einbrennprozess. Zu den wesentlichen Charakterisierungsmerkmalen von Pulverlacken zählen die Korngröße respektive die Korngrößenverteilung sowie die Materialdichte und die Einbrennbedingungen. Für die Verarbeitung sind zudem die Rieselfähigkeit, die Wirbelfähigkeit und das Aufladeverhalten der Pulver von besonderer Bedeutung. [117]

Generell lassen sich zwei unterschiedliche Beweggründe für die Verwendung von Pulverlacken anführen. Zum einen ist dies die Herstellung dekorativer Oberflächen, die sich beispielsweise durch ihre Farbe oder Struktur auszeichnen. Zum anderen kann die Beschichtung als Funktionsträger dienen. Das Motiv für den Einsatz von Pulverlacken liegt hierbei vielfach im Schutz vor Korrosion, aggressiven Chemikalien oder mechanischen Beschädigungen. [117]

Eine Erweiterung im Bereich der funktionalen Beschichtung stellen die von der LPKF Laser & Electronics AG entwickelten LDS-fähigen Pulverlacke auf Basis von Polyurethan (PU) beziehungsweise Polyesterharz (PES) dar.

Durch den Zusatz eines LDS-Additivs ermöglichen die Pulverlacke eine selektive Metallisierung der beschichteten Oberfläche metallischer Grundkörper nach dem Verfahren der Laserdirektstrukturierung. Aufgrund seiner höheren thermischen Stabilität, die auch einen Lötensatz bei Temperaturen bis zu 270 °C erlaubt, wurde im Rahmen der im Weiteren dargestellten Forschungsarbeiten die Polyurethan-basierte Pulverlackvariante mit der Bezeichnung *PU 100* eingesetzt. Die Eigenschaften des Pulverlacks sind in Tabelle 11 zusammengefasst. [118]

Tabelle 11: Eigenschaften des Pulverlacks PU 100 [118][119]

	Pulverlack PU 100	
Basismaterial	Polyurethan (PU)	
Farbe	weiß, glänzend	
Dichte (DIN ISO 8130-2)	1,45 bis 1,70 g/cm ³	
Kornverteilung	< 20 %	< 10 µm
	40 bis 55 %	< 32 µm
	> 92 %	< 90 µm
Einbrennbedingungen	45 bis 55 Minuten	bei 180 °C
	30 bis 35 Minuten	bei 190 °C
	20 bis 25 Minuten	bei 200 °C
Mindestschichtdicke	60 µm	
Gitterschnitt (DIN EN ISO 24049)	GT 0	
Durchschlagsfestigkeit	Wechselspannung	71,4 kV/mm
	Gleichspannung	132,7 kV/mm
Maximale Löttemperatur	270 °C für 5 Sekunden	

Vor der Pulverbeschichtung ist eine Vorbehandlung der metallischen Substrate erforderlich. Die Oberflächen müssen frei von Verunreinigungen, Ölen und Fetten sein. Um die Haftung der Beschichtung auf Aluminiumoberflächen zu verbessern, empfiehlt sich eine sogenannte Grünchromatierung. Das metallische Bauteil wird dabei in eine Chrom(III)-haltige Lösung getaucht oder mit dieser besprüht. Durch Reaktion der Chemikalien entstehen schwer lösliche, feine Kristalle, die fest mit der Aluminiumoberfläche verwachsen und eine mikrorauhe Schicht ausbilden. Neben einem guten Haftgrund stellt die namensgebende, grün irisierende Konversionsschicht eine Diffusionssperre zwischen Grundsubstrat und wasserdampfdurchlässigen Beschichtungen dar und steigert die Korrosionsbeständigkeit. [117]

Im elektrostatischen Beschichtungsprozess werden elektrische Feldkräfte zur Aufbringung einer Pulverschicht auf eine Substratoberfläche genutzt. Die hierfür benötigte Pulverwolke kann verfahrensabhängig über eine Sprühpistole oder ein Wirbelbett in einer Beschichtungskammer erzeugt werden. Für einen gezielten Transport der Partikel auf die Substratoberfläche werden der zu beschichtende Grundkörper und die Pulverlackteilchen in gegensätzliche Ladungszustände versetzt. Basierend auf den physikalischen Gesetzmäßigkeiten der Abstoßung gleicher und Anziehung unterschiedlicher Ladungen führen die auf die Teilchen wirkenden Coulomb'schen Kräfte den gewünschten Pulverauftrag auf der Werkstückoberfläche herbei. Die elektrische Aufladung der Teilchen kann auf Grundlage verschiedener Wirkmechanismen geschehen. In der Praxis sind die triboelektrische Aufladung sowie die Ionisation, die auch als Korona-Aufladung bezeichnet wird, von Bedeutung. Die triboelektrische Aufladung erfolgt unabhängig von einem äußeren elektrischen Feld und basiert auf einer Übertragung von Ladungsträgern in den Berührungsflächen zweier Körper. Die folgende mechanische Trennung der unterschiedlich geladenen Oberflächen, zum Beispiel die des Pulvers und der Wandung einer Sprühpistole, verhindert eine Wiederherstellung der ursprünglichen Ladungsverteilung. Die alternative Methode der Ionisation beruht auf einem elektrischen Feld, das von einer Hochspannungselektrode durch eine Korona-Entladung zwischen dieser und dem geerdeten Grundkörper erzeugt wird. Im Bereich des elektrischen Feldes nehmen die Pulverteilchen freie Elektronen auf und werden somit als negativ geladene Partikel entlang der Feldlinien zum geerdeten Grundkörper transportiert. [30][117]

Im Rahmen der Forschungsarbeiten erfolgte die Pulverbeschichtung im druckluftfreien elektrostatischen Wirbelbettverfahren. Die Methode wird anhand der schematischen Darstellung des Aufbaus in Bild 63 erläutert.

Der Aufbau der Beschichtungsanlage besteht aus einer elektrisch isolierenden Pulverwanne mit einem leitfähigen Bodengitter (Korona-Elektrode), welche mit geringem Abstand zu einer plattenförmigen Gegenelektrode in eine Beschichtungskammer eingesetzt wird. Durch das Anlegen einer Wechselspannung von 12 kV zwischen Gitter- und Plattenelektrode werden die Pulverpartikel elektrisch geladen und vom Boden der Kunststoffwanne abgestoßen. Die zusätzliche Überlagerung der Wechselspannung mit einer im Bereich von 9 kV bis 45 kV einstellbaren Gleichspannung fördert die Abstoßung der Partikel, hindert sie am Zurückfallen und führt damit zur Bildung einer Pulverwolke. Zeitgleich bewirkt das Anlegen der Gleichspannung an der Gitterelektrode nach dem Korona-Prinzip eine Ionisation der Umgebungsluft, wodurch ein statisches elektrisches Feld erzeugt wird. Mit

dem Eintritt der geladenen Pulverpartikel in das elektrische Feld werden diese entlang der Feldlinien zum geerdeten Grundkörper transportiert, wo sie sich aufgrund der Coulomb'schen Kräfte anlagern. [120]

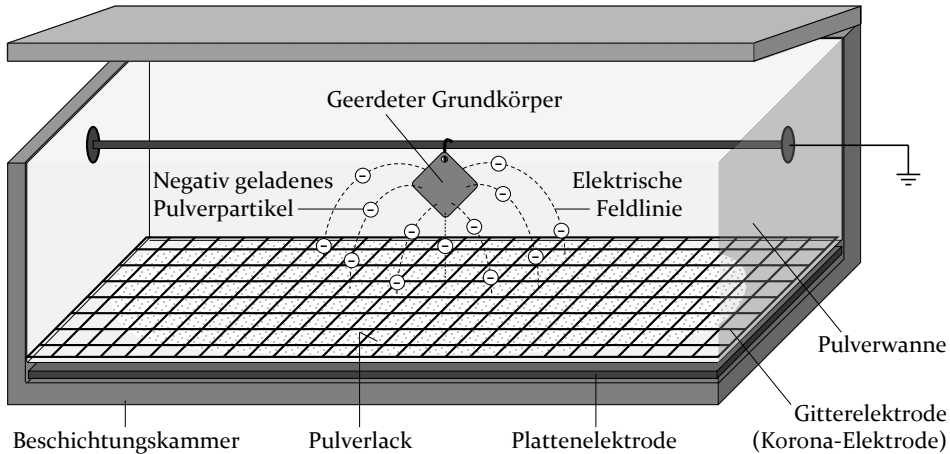


Bild 63: Schematische Darstellung der Pulverbeschichtung im druckluftfreien elektrostatischen Wirbelbettverfahren

Im anschließenden Einbrennprozess wird das aufgetragene Pulver in der Regel mittels heißer konvergierender Luft oder Infrarotstrahlung aufgeschmolzen und vernetzt auf dem Grundkörper zu einer geschlossenen und haftfesten Beschichtung. Für die Qualität der Beschichtung ist entscheidend, dass der Grundkörper schnell und gleichmäßig auf die vom Pulverlackhersteller angegebene Einbrenntemperatur erwärmt und über die entsprechende Einbrenndauer konstant auf dieser gehalten wird. [117]

Die mit dem LDS-fähigen Pulverlack beschichteten metallischen Grundkörper lassen sich analog zu Substraten aus LDS-Kunststoffen gemäß der in Kapitel 2.1 beschriebenen Prozesskette weiter zu MID-Bauteilen funktionalisieren. Mit ihrer hohen Wärmeleitfähigkeit und mechanischen Stabilität bieten die Metallkerne dabei einen vielversprechenden Ansatz, die Einschränkungen rein polymerbasierter Schaltungsträger für ihren Einsatz in leistungselektronischen Anwendungen zu überwinden.

Für die in den folgenden Abschnitten dargestellten Untersuchungen der Eigenschaften von Metallkern-MID wurden Probekörper auf Basis von Aluminium-Platten der Größe 60 mm x 60 mm x 2 mm hergestellt. Die Beschichtung der Grundkörper mit dem LDS-fähigen Pulverlack *PU 100* erfolgte in einer Beschichtungskammer nach dem beschriebenen druckluftfreien elektrostatischen Wirbelbettverfahren. Mit dem Ziel, haftfeste, homogene Beschichtungen mit einer hinreichenden Schichtdicke ($> 60 \mu\text{m}$)

zu erzeugen, wurden in Voruntersuchungen zentrale Einflussgrößen auf den Beschichtungsprozess systematisch variiert. Auf Grundlage optischer Analysen, Schichtdickenmessungen und Gitterschnitttests wurden folgende Prämissen und Parameter für die Herstellung der Probekörper festgelegt:

- ❑ Gründliche Reinigung sowie Grünchromatierung der Aluminium-Platten
- ❑ Vorwärmen der Aluminium-Platten auf 120 °C
- ❑ Zentrale Positionierung in der Beschichtungskammer bei einer möglichst gleichmäßigen Pulververteilung
- ❑ Beschichtungsdauer von 40 Sekunden bei einer Beschichtungsspannung von 25 kV
- ❑ Einbrennen im Konvektions-Trockenofen für 32,5 Minuten bei 190 °C

Der entscheidende Einfluss der Grünchromatierung auf die Beschichtungsqualität wird besonders nach einem Lötprozess wie auch nach der Metallisierung der LDS-Strukturen deutlich. Auf der linken Seite in Bild 64 offenbart der Querschliff einer Metallkern-MID-Probe, die ohne Grünchromatierung beschichtet wurde, eine großflächige Delamination der Pulverschicht von der Aluminiumoberfläche nach dem Metallisierungsprozess.

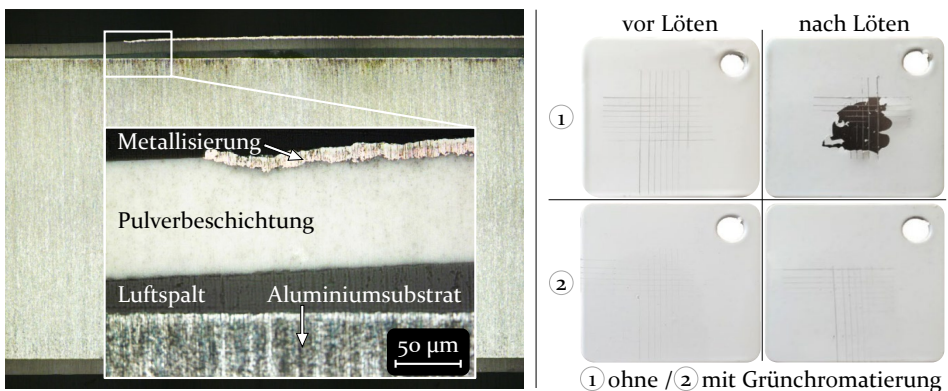


Bild 64: Delamination der Pulverbeschichtung ohne Grünchromatierung nach dem Metallisierungsprozess im Querschliff (links) und Aufnahmen exemplarischer Ergebnisse aus dem Gitterschnitttest vor und nach dem Löten (rechts)

Auf der rechten Seite der Abbildung sind exemplarische Aufnahmen von Probekörpern nach einem Gitterschnitttest dargestellt. Infolge einer Belastung im Kondensationslötöfen bei 230 °C weisen die Testergebnisse

unvorbehandelter Probekörper auch hier auf einen erheblichen Haftfestigkeitsverlust hin. In den Aufnahmen ist die massive Abplatzung der Pulverbeschichtung auf dem entsprechenden Probekörper deutlich zu erkennen. An grüschromatierten Probekörpern konnten hingegen über alle Untersuchungen hinweg keine vergleichbaren Probleme beobachtet werden.

5.2 Bestimmung anwendungsrelevanter Eigenschaften von Metallkern-MID im Vergleich zu spritzgegossenen LDS-MID

Die Untersuchungen der Eigenschaften von Metallkern-MID konzentrierten sich im Wesentlichen auf eine Charakterisierung der Haftfestigkeit des Materialverbundes sowie auf eine Bestimmung der Stromtragfähigkeiten von Leiterbahnen. Vergleichend zu den Metallkern-MID wurden die Untersuchungen an gleich dimensionierten, konventionellen LDS-Probekörpern aus zwei unterschiedlichen Substratmaterialien durchgeführt. Neben dem Standardmaterial LCP (Vectra® E840i LDS) wurde dabei das spezielle Hochtemperatur-Polyamid PA MXD6 (Reny® XHP 2082 ET) mit optimierter thermischer Leitfähigkeit betrachtet. Die zentralen Eigenschaften der Probekörper sind in Tabelle 12 aufgeführt. Die Gegenüberstellung der Untersuchungsergebnisse dient dazu, die ermittelten Eigenschaften der Metallkern-MID im Kontext bisheriger Möglichkeiten einzuordnen und davon ausgehend etwaige neue Potenziale zu bewerten.

Tabelle 12: Eigenschaften der Probekörper für Vergleichsuntersuchungen von Metallkern-MID und konventionellen LDS-MID [76][79][121]

	LCP	PA MXD6	Metallkern-MID
Maße (l x b x h)	60 mm x 60 mm x 2 mm ¹⁾		
Basismaterial	Vectra® E840i LDS	Reny® XHP 2082 ET	Aluminium ²⁾ (Al) mit PU 100-Beschichtung
Farbe	grau	weiß	weiß, glänzend
E-Modul	9.300 MPa	16.300 MPa	Al: 70.000 MPa ¹⁾
Zugfestigkeit	102 MPa	66 MPa	Al: 220 bis 270 MPa ¹⁾
CTE (parallel / senkrecht)	12 / 27 ppm/K	20 / 40 ppm/K	Al: 23,9 ppm/K ¹⁾
Wärmeleitfähigkeit	0,30 bis 0,35 W/mK	2,7 W/mK	34,3 W/mK ³⁾ Al: 140 bis 160 W/mK ¹⁾

¹⁾ Unbeschichtete Aluminium-Platte

²⁾ EN AW – 5754A H22 (Legierungszusätze: Mg 2,6 bis 3,6 %, Mn 0,5 %, weitere 1,7 %)

³⁾ In Plattendurchgangsrichtung; die Messung erfolgte am Lehrstuhl für Kunststofftechnik (LKT) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU)

5.2.1 Haftfestigkeit der Metallisierung

Zur Untersuchung der Haftfestigkeit wurden der Schertest und der Hot-Pin-Pull-Test eingesetzt. Für den Schertest wurden Probekörper unter Verwendung von SnAgCu-Lot mit SMD-Widerständen der Bauform 0805 aufgebaut. Das Löten der Bauelemente erfolgte im Kondensationsverfahren. Angepasst an die Bauform wurde für das Abscheren der Widerstände ein Schermeißel mit einer Breite von 800 µm gewählt. Die Scherhöhe wurde auf 100 µm eingestellt. Die Ergebnisse der Haftfestigkeitsuntersuchung im Schertest sind in Bild 65 dargestellt.

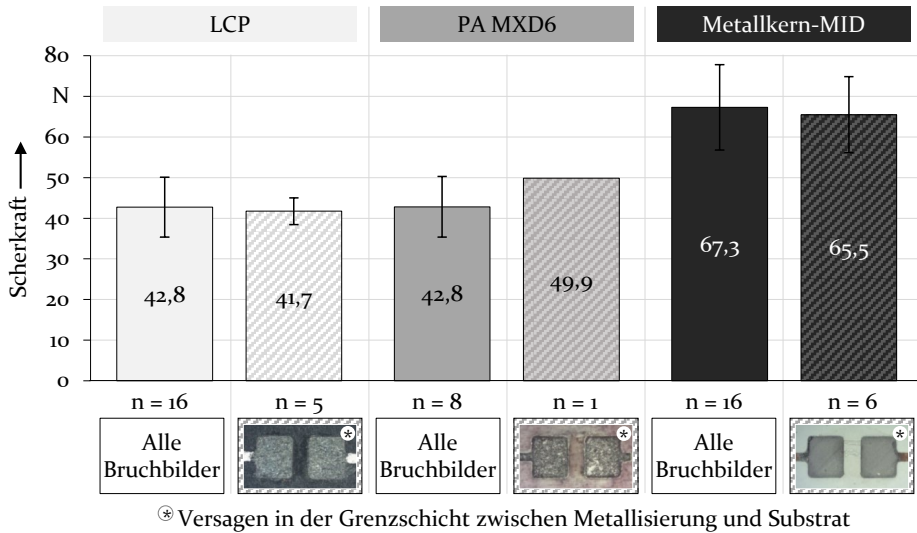


Bild 65: Ergebnisse der vergleichenden Haftfestigkeitsuntersuchung im Schertest [122]

Die Scherkraftmessungen an den thermoplastischen Probekörpern auf Basis der Materialien LCP und PA MXD6 ergeben Resultate im Bereich von 40 N bis 50 N. Die ermittelten Scherfestigkeiten der 0805-Widerstände auf den Metallkern-MID-Probekörpern liegen dagegen auf einem deutlich höheren Niveau. Unter Berücksichtigung aller durchgeführten Messungen liegt die durchschnittliche Scherkraft für die Metallkern-MID bei 67,3 N mit einer relativen Standardabweichung von 15,6 %. Bezogen auf die Vergleichswerte von LCP und PA MXD6, die in beiden Fällen 42,8 N bei einer Standardabweichung von 17,3 % respektive 17,4 % betragen, übertrifft die Metallkern-Variante die konventionellen Probekörper hinsichtlich der Scherfestigkeit damit um 57 %.

Zusätzlich zur gemessenen Scherkraft erfordert die Prüfmethode für eine Bewertung der Ergebnisse eine Betrachtung des jeweiligen Bruchbildes. Für die Bestimmung der Metallisierungshaftfestigkeit sind Versagensfälle, bei

denen die Metallisierung vom Substrat gelöst wurde, von vorrangiger Bedeutung. Die Auswertung beinhaltet daher auch eine gesonderte Betrachtung entsprechender Ergebnisse. Hier betragen die gemittelten Scherkräfte bei den Metallkern-MID 65,5 N, beim Substratmaterial PA MXD6 49,9 N und bei LCP 41,7 N. Zu berücksichtigen ist dabei jedoch die deutlich reduzierte Anzahl an Einzelwerten, aus denen die Ergebnisse hervorgehen. Im Falle von PA MXD6 liegt nur ein einziger Wert vor, bei dem das Versagen zwischen Metallisierung und Substrat eingetreten ist.

Der Hot-Pin-Pull-Test wurde als zweites Verfahren zur Haftfestigkeitsuntersuchung gemäß festgelegtem Standard (siehe Bild 33) unter Verwendung einer SnBi-Lotpaste an kreisförmigen Testmetallisierungen mit 1 mm Durchmesser durchgeführt. Abweichend vom Standard musste das Temperaturprofil an die speziellen Gegebenheiten der Metallkern-MID-Probekörper angepasst werden. Die rasche Wärmeabfuhr über den beschichteten Aluminiumkern verhindert bei Anwendung des Standardprofils eine ausreichende Erwärmung der Lötstelle und führt dadurch zu einem unvollständigen Aufschmelzen der applizierten Lotpaste. Um bei der hohen thermischen Leitfähigkeit der Probekörper die erforderliche Lötverbindung zwischen Pin und Testmetallisierung herzustellen, wurde die Haltezeit für die Peaktemperatur von 20 auf 90 Sekunden verlängert. Der übrige Verlauf des Temperaturprofils gestaltet sich analog zum Standard. Die Anpassung des Temperaturprofils und die resultierende Auswirkung auf den Abzugserfolg sind in Bild 66 dargestellt. Zur Gewährleistung einheitlicher Prüfbedingungen wurde das angepasste Temperaturprofil auch bei den vergleichenden Haftfestigkeitstests an den Kunststoffprobekörpern angewendet.

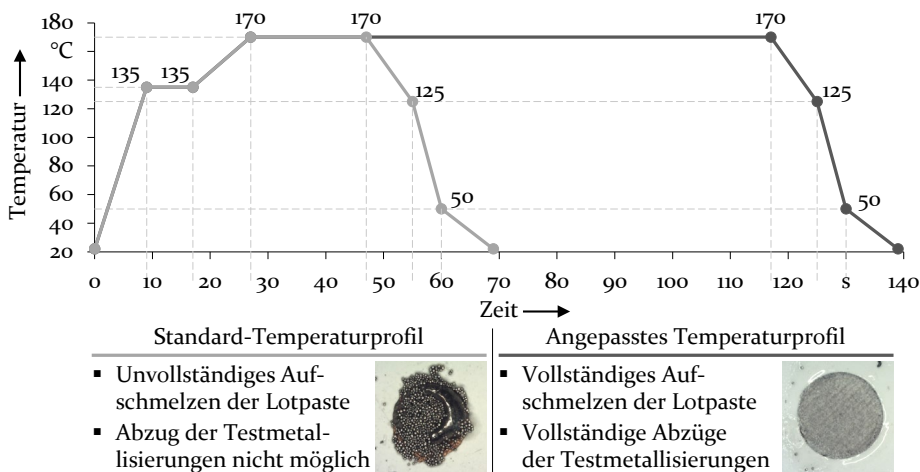


Bild 66: Anpassung des Temperaturprofils für den Hot-Pin-Pull-Test zur Prüfung von Metallkern-MID

Die in Bild 67 dargestellten Ergebnisse des Hot-Pin-Pull-Tests bestätigen noch deutlicher die signifikanten Unterschiede in der Metallisierungshaftfestigkeit zwischen den Metallkern-MID und den betrachteten thermoplastischen Probekörpern. Die geringen Standardabweichungen zwischen 5,1 % und 6,7 % weisen auch in dieser Testreihe auf eine hohe Reproduzierbarkeit der Prüfmethode hin. Mit einem Mittelwert von 35,2 N/mm² attestieren die Ergebnisse den Metallkern-MID eine 2,75-fache Haftfestigkeit gegenüber der PA MXD6-Variante, die einen Wert von 12,8 N/mm² erzielt. Auf der Vergleichsprobe aus LCP beträgt die Haftfestigkeit 10,1 N/mm². Mit einem Faktor von 3,5 ist demnach der Haftfestigkeitsunterschied zwischen dem Standard-LDS-Kunststoff und der PU-basierten Pulverbeschichtung sogar noch größer.

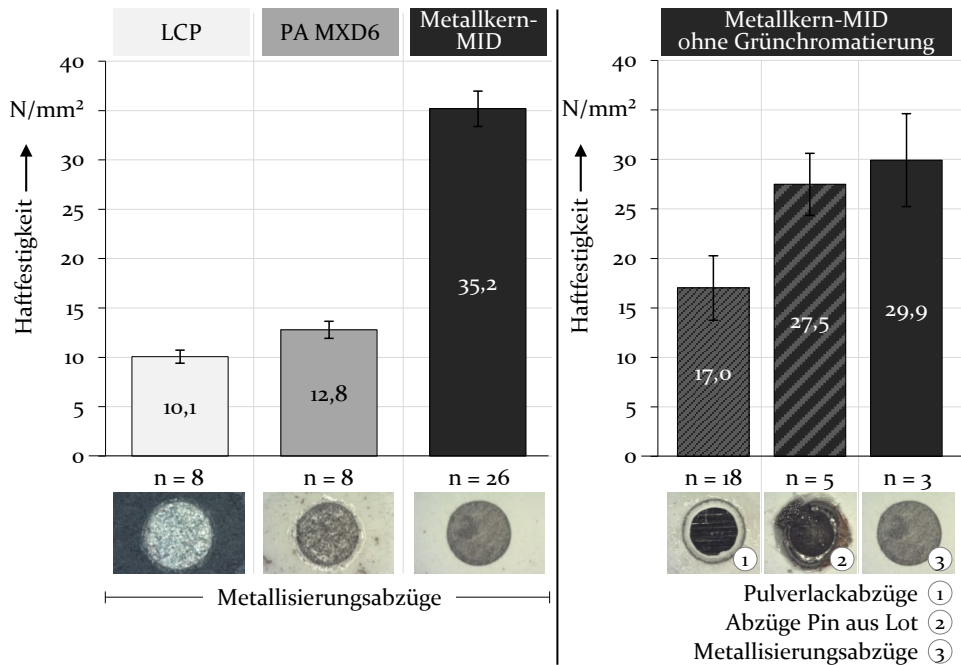


Bild 67: Ergebnisse der vergleichenden Haftfestigkeitsuntersuchung im Hot-Pin-Pull-Test (links) [122] und Testreihe an Metallkern-MID ohne Grünchromatierung mit unterschiedlichen Versagensfällen (rechts)

Mit Verweis auf die exemplarischen Aufnahmen in der Auswertung belegt eine Betrachtung der Abzugsflächen, dass im Verbund der Metallkern-MID aus Aluminiumplatte, Pulverbeschichtung und chemisch abgeschiedener Metallisierung das Versagen an der Grenzfläche zwischen Metallisierung und Pulverlackschicht eintritt. Eine parallele Testreihe an Metallkern-MID-Probekörpern, die ohne Grünchromatierung hergestellt wurden,

unterstreicht in Ergänzung zu den geschilderten Problematiken nach der Metallisierung und dem Löten (vgl. Bild 64) den positiven Effekt der Vorbehandlung auf die Beschichtungsqualität. Wie die gesonderte Analyse zeigt, löst sich hier beim Hot-Pin-Pull-Test aufgrund der mangelnden Haftung in den überwiegenden Fällen die Pulverschicht vom Aluminiumsubstrat und das Versagen tritt bereits bei niedrigeren Zugkräften ein.

5.2.2 Stromtragfähigkeit der Leiterbahnen

Um die Stromtragfähigkeit von Leiterbahnen in Abhängigkeit der betrachteten Substrate zu bestimmen, wurden sogenannte End-of-Life-Messungen an 35 mm langen Leiterbahnen mit Breiten von 500 μm und 1 mm durchgeführt. Durch eine Anpassung der Prozesszeiten an das individuelle Metallisierungsverhalten der verschiedenen Probekörper wurden alle Leiterbahnen in vergleichbaren Schichtdicken abgeschieden. So liegt gemäß Röntgenfluoreszenzmessung die Gesamtschichtdicke der Leiterbahnen im Bereich von 10,0 μm bis 10,5 μm bei einem Kupferanteil von 8,2 μm bis 8,5 μm .

Die End-of-Life-Messungen kennzeichnen sich dadurch, dass durch eine inkrementelle Steigerung der Stromstärke jeweils nach Erreichen eines thermischen Gleichgewichts die Belastung auf eine Leiterbahn solange erhöht wird, bis diese irreversibel versagt. Im Rahmen der Untersuchungen wurde jede Leiterbahn initial mit einer Stromstärke von 0,75 A belastet. Sobald sich die Temperatur der stromdurchflossenen Leiterbahn gemäß der permanenten thermografischen Messung innerhalb von 20 Sekunden um weniger als 0,5 K änderte, wurde die Stromstärke um 375 mA erhöht. Diese Prozedur wurde solange wiederholt, bis die strominduzierte Erwärmung zu einem thermischen Versagen der Leiterbahn und damit zur Unterbrechung des Stromkreises führte. Zur korrekten Einstellung des Emissionsgrads für die thermografische Messung sowie zur Absicherung der Ergebnisse erfolgte eine parallele Bestimmung der Leiterbahntemperaturen mittels Typ-K-Thermoelementen.

Aus den Graphen in Bild 68 gehen die ermittelten Stromtragfähigkeiten in Abhängigkeit der Substrate und der Leiterbahnbreite hervor. Die geringste Belastbarkeit weisen die Leiterbahnen auf dem LCP-Kunststoff auf. Die Ausfälle ereignen sich bei den 500 μm breiten Leiterbahnen bei einer Stromstärke von 2,88 A und bei der doppelten Leiterbahnbreite bei 4,5 A. Auf dem Polyamidsubstrat PA MXD6 mit der erhöhten thermischen Leitfähigkeit ist bereits eine signifikante Steigerung der Strombelastbarkeit festzustellen. Mit Stromstärken von 4,25 A beziehungsweise 6,25 A tritt das

thermisch bedingte Versagen der Leiterbahnen im Vergleich zum Standardkunststoff für LDS-Baugruppen erst bei einer etwa 40 % höheren Strombelastung ein. Die mit Abstand höchsten Stromtragfähigkeiten erzielen die Leiterbahnen der Metallkern-MID. Auf den pulverbeschichteten Aluminiumkörpern versagen die Leiterbahnen mit einer Breite von 500 μm bei einer Stromstärke von 6,75 A. Bei 1 mm Breite fallen die Leiterbahnen erst bei einer Strombelastung von 10,31 A aus.

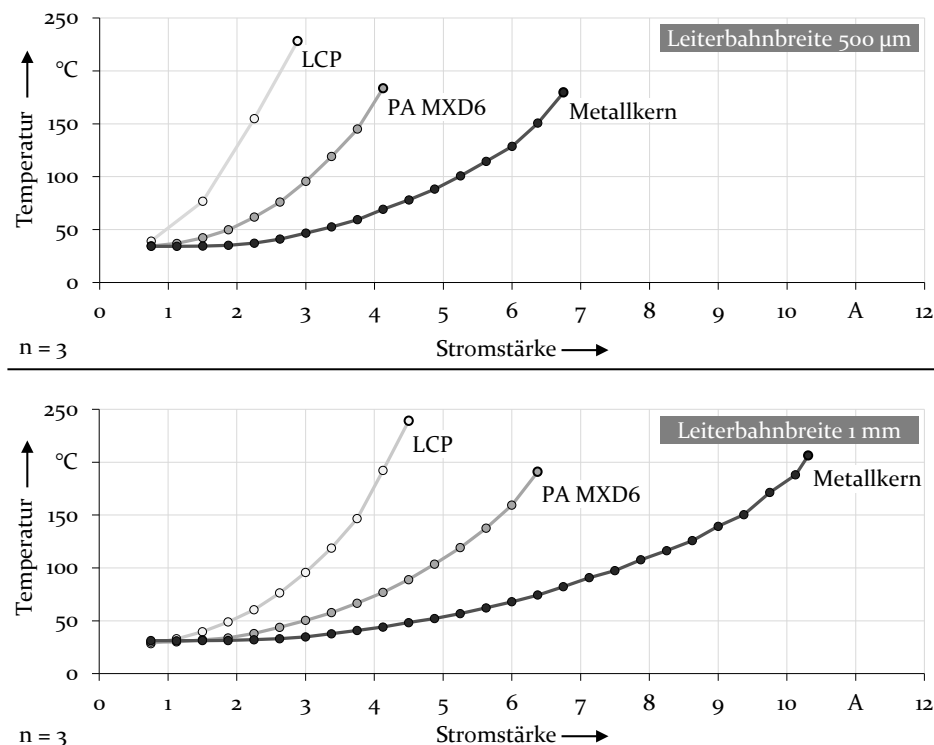


Bild 68: Ergebnisse der vergleichenden Stromtragfähigkeitsuntersuchung für Leiterbahnbreiten von 500 μm (oben) und 1 mm (unten) [122]

Über alle betrachteten Substrate und Leiterbahnbreiten hinweg lassen die Graphen darauf schließen, dass ein Versagen der Leiterbahnen droht, sobald die Temperaturen sich dem Wert von 200 $^{\circ}\text{C}$ nähern oder diesen gar überschreiten. Eine unverkennbare Abhängigkeit von den unterschiedlichen Substraten weist jedoch die strominduzierte Temperaturentwicklung auf den Probekörpern auf. Entscheidend ist hierbei die thermische Leitfähigkeit des jeweiligen Grundkörpers. Bei dem verwendeten LCP liegt diese in einem Bereich von 0,30 W/mK bis 0,35 W/mK [80]. Demgegenüber zeichnet sich das PA MXD6-Material mit 2,7 W/mK durch eine acht- bis

neunfache Wärmeleitfähigkeit aus [76]. Für die Metallkern-MID-Probekörper wurde eine thermische Leitfähigkeit in Probendurchgangsrichtung von 34,3 W/mK ermittelt⁴, welche die Grenzen dielektrischer polymerbasierter Substrate deutlich übersteigt [123][124]. Durch die stärkere Wärmespreizung und die damit begünstigte Abfuhr der erzeugten Wärme an die Umgebung stellen sich mit zunehmender thermischer Leitfähigkeit der Substrate erst bei erhöhten Strombelastungen kritische Temperaturzustände an den Probekörpern ein. Eine Temperatur von 150 °C erreichen so zum Beispiel die Leiterbahnen mit 1 mm Breite im beschriebenen Versuchsaufbau auf dem LCP-Substrat noch unter 4 A, auf dem PA MXD6-Substrat bei fast 6 A und auf den pulverbeschichteten Aluminiumkern-Proben erst bei über 9 A.

5.3 Erschließung neuer Anwendungspotenziale durch Metallkern-MID

Die Möglichkeit, selektive Metallisierungen im Verfahren der Laserdirektstrukturierung auf pulverbeschichtete metallische Grundkörper aufzubringen, bietet einen vielversprechenden Ansatz, die Potenziale der MID-Technologie in neuen Anwendungsbereichen zu nutzen. Mit etablierten Fertigungstechnologien lassen sich unter Berücksichtigung spezifischer Randbedingungen wie einer isolationsfähigen Mindestschichtdicke räumliche Metallkern-Schaltungsträger herstellen.

Die im Rahmen der präsentierten Forschungsarbeiten hergestellten Metallkern-Probekörper übertreffen konventionelle LDS-MID hinsichtlich anwendungsrelevanter Qualitätsaspekte wie der Metallisierungshaftfestigkeit und der Stromtragfähigkeit bei Weitem. So lösen sich im Hot-Pin-Pull-Test die Metallisierungen bezogen auf die Vergleichswerte der LCP-Proben erst bei der 3,5-fachen Zugkraft von der Pulverbeschichtung. Im Stromtragfähigkeitstest versagen sowohl die 500 µm als auch die 1 mm breiten Leiterbahnen auf den Metallkern-Proben verglichen mit dem Standard-LDS-Kunststoff erst bei der 2,3-fachen Strombelastung.

Am praxisrelevanten Beispiel einer LED-Anwendung demonstriert eine vergleichende thermografische Betrachtung an einem einfachen Testaufbau die Potenziale von Metallkern-MID für den Einsatz in Anwendungsbereichen mit erhöhten Leistungen. Gerade für die zunehmend bedeutende LED-Beleuchtung ist die sichere und effektive Abfuhr der beim Betrieb

⁴ Die Bestimmung der thermischen Leitfähigkeit erfolgte am Lehrstuhl für Kunststofftechnik (LKT) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU).

entstehenden Verlustwärme eine entscheidende Anforderung für eine hohe Lichtausbeute und Lebensdauer [125]. Um im Vergleichstest die Wärmeentwicklung auf den drei 60 mm x 60 mm x 2 mm Substraten aus LCP, PA MXD6 und dem pulverbeschichteten Aluminium zu untersuchen, wurde in zentraler Position auf die Probekörper jeweils eine Mid-Power-LED mit einer Leistung von 0,5 W sowie ein SMD-Widerstand montiert. In einem einheitlichen Messaufbau wurden die LEDs in einer Prüfkammer bei konstanter Umgebungstemperatur von 22 °C über ein Netzgerät mit 135 mA bei 3,15 V betrieben und die dabei auf den Probekörpern resultierende Wärmeentwicklung mittels einer Thermokamera aufgenommen.

Die thermografischen Aufnahmen in Bild 69 zeigen die unterschiedlichen Proben nach einer Betriebszeit der LED von zehn Minuten. Zu jeder Aufnahme ist die ermittelte Maximaltemperatur ($T_{\max}$) sowie die davon abgeleitete Erwärmung (ΔT) bezogen auf die Umgebungstemperatur angegeben.

- Probekörper mit 0,5 W Mid-Power-LED
- Stromstärke 135 mA
- Spannung 3,15 V
- Betriebszeit 10 Minuten
- Umgebungstemperatur 22 °C

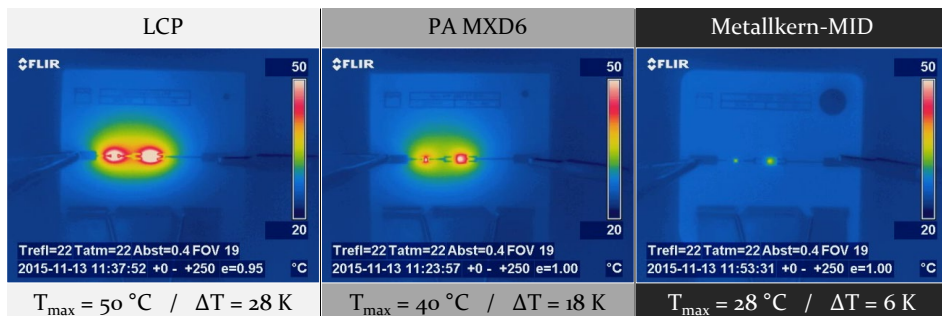
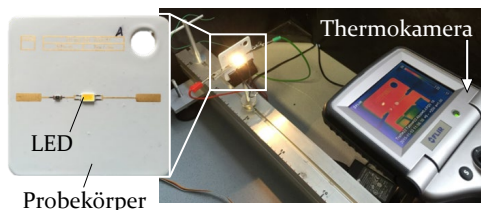


Bild 69: Testbedingungen und thermografische Aufnahmen von LED-Probekörpern auf Basis unterschiedlicher Substratvarianten [122]

In der Gegenüberstellung der Aufnahmen ist die unterschiedliche Wärmeentwicklung auf den verschiedenen Probekörpern nicht zu übersehen. Der Probekörper aus dem LCP-Material mit der geringsten thermischen Leitfähigkeit im Test erwärmt sich in einem verhältnismäßig großen Bereich um die LED sowie um den vorgeschalteten Widerstand. Die ermittelte Maximaltemperatur von 50 °C übersteigt die Umgebungstemperatur um 28 K. Bei dem Probekörper auf Basis des Materials PA MXD6 mit der erhöhten

thermischen Leitfähigkeit beschränkt sich unter gleichen Testbedingungen die Erwärmung auf einen sichtbar kleineren Bereich um die montierten Bauelemente. Mit einer lokalen Erwärmung um bis zu 18 K beträgt die gemessene, absolute Höchsttemperatur auf dem Probekörper 40 °C. Die effektivste Entwärmung ermöglicht das Metallkern-Substrat. Der entsprechende Probekörper weist nur einen minimalen Bereich mit leicht erhöhten Temperaturen um die LED und den Widerstand auf. Die maximale Temperatur beträgt hier 28 °C und übersteigt damit die Umgebungstemperatur um lediglich 6 K.

Der Vergleich verdeutlicht die überlegenen thermischen Eigenschaften von Metallkern-MID gegenüber konventionellen LDS-MID aus thermoplastischen Kunststoffen. Die Möglichkeit, basierend auf räumlich geformten Metallkörpern mechatronisch integrierte Baugruppen zu fertigen, eröffnet Produktentwicklern völlig neue Gestaltungsspielräume. Für die Herstellung der metallischen Grundkörper kann auf verschiedenste Formgebungsverfahren zurückgegriffen werden. Neben seit Jahrzehnten etablierten Verfahren wie dem Druckguss, dem Tiefziehen oder anderen Prozessen zur Blechumformung sowie der spanenden Bearbeitung von Halbzeugen zählen hierzu auch fortschrittliche Methoden der additiven Fertigung. Aus diesem Bereich ist insbesondere das selektive Laserschmelzen (Selective Laser Melting, SLM) hervorzuheben. Durch das laserbasierte, schichtweise Aufschmelzen von Metallpulver können im SLM-Prozess hochkomplexe Bauteile hergestellt werden. Das werkzeuglose Verfahren eignet sich zur schnellen Herstellung von Musterteilen, Prototypen und individuellen Produkten ebenso wie zur Serienfertigung im kleineren bis mittleren Stückzahlbereich.

Die weitere Verarbeitung der räumlichen Grundkörper zu Metallkern-MID erhält deren geometrische Gestaltungsfreiheit und transferiert ihre Vorzüge konsequent auf die Ebene der mechatronischen Funktionalisierung. Im Hinblick auf ein funktionsoptimiertes Design lässt sich zusätzlich zur Zentralfunktion der Baugruppe auch gezielt das thermische Management zu Gunsten einer gesteigerten Zuverlässigkeit optimieren. Bei Beleuchtungsanwendungen kann das Produktdesign beispielsweise spezifische Positionen für LEDs vorgeben, um die gewünschte Strahlcharakteristik zu erzielen, und gleichzeitig Kühlrippen sowie metallisierte dreidimensionale Kühlflächen bereitstellen, die eine effektive Abfuhr der Verlustwärme gewährleisten.

Bei den großen Potenzialen besteht ungeachtet der bislang durchweg überzeugenden Forschungsergebnisse weiterer Bedarf, die Eigenschaften von Metallkern-MID detailliert für den individuellen Anwendungsfall zu untersuchen. Für einen Serieneinsatz ist im Speziellen die Langzeitzuverlässigkeit der pulverbeschichteten Schaltungsträger von entscheidender Bedeutung. In diesem Kontext ist ein Schwerpunkt künftiger Forschungsarbeiten auf die Auswirkungen einsatzspezifischer Umweltbelastungen auf die Multi-Material-Verbundsysteme aus Metallkern, duroplastischer Beschichtung und selektiver Metallisierung zu legen.

6 Zusammenfassung

Der rasant zunehmende Bedarf an multifunktionalen mechatronischen Systemen wird von hohen Anforderungen an deren Qualität und Zuverlässigkeit begleitet. Die vielfältigen Anwendungspotenziale der MID-Technologie, die es ermöglichen, hochintegrierte mechatronische Baugruppen in funktionsoptimalem Design herzustellen, werden seit Jahren durch eine Vielzahl unterschiedlichster Applikationsbeispiele eindrucksvoll belegt. Unsicherheiten hinsichtlich der Zuverlässigkeit der individuellen technischen Lösungen hemmen jedoch ihre weitere Verbreitung. Die Qualitätssicherung in der Produktion von MID sowie die verlässliche Einschätzung und Steigerung ihrer Zuverlässigkeit sind folglich gerade für einen Einsatz in sicherheitsrelevanten Bereichen wie auch unter hohen Umweltbelastungen von großem Belang. Die Ergebnisse dieser Arbeit leisten in diesem Zusammenhang einen Beitrag zum Abbau der bestehenden Hemmnisse.

Die strukturierten Hinweise zu den qualitätsbeeinflussenden Faktoren in der Produktion von LDS-MID verhelfen den Herstellern zur Optimierung und Sicherung ihrer Fertigungsqualität. Darüber hinaus dienen die Ausführungen Entwicklern bei der Konzeption anforderungsgerechter Bauteile. Bedingt durch die hohe Komplexität mechatronisch integrierter Baugruppen sind ein prozessübergreifendes Verständnis und eine adäquate Sensibilisierung für Abhängigkeiten sowohl in der Entwicklung als auch in der Fertigung von entscheidender Bedeutung. Im Hinblick auf eine ganzheitliche Qualitätsbewertung bilden sie die Grundlage für eine kritische Prüfung der Erzeugnisse nach dem jeweiligen Prozessschritt. Konkrete Anhaltspunkte bieten hierzu die in der Arbeit zu jeder Prozessstufe enthaltenen Fehlerbilder. Die Schwerpunkte der Forschungsarbeiten ergeben sich aus den charakteristischen Ausfallursachen und Einschränkungen, die einen breiteren Einsatz von LDS-MID unterbinden.

Um eine Delamination der Metallisierung zu vermeiden, muss unter Berücksichtigung der anwendungsspezifischen Anforderungen eine ausreichende Haftfestigkeit des Metall-Kunststoff-Verbundes sichergestellt werden. Zur Bewertung der Metallisierungshaftfestigkeit wurde basierend auf dem Hot-Pin-Pull-Test ein geeignetes Verfahren qualifiziert, das sich bei den LDS-spezifischen Gegebenheiten gegenüber alternativen Ansätzen als äußerst vorteilhaft erweist. Dominierenden Einfluss auf die Metallisierungshaftfestigkeit hat das Substratmaterial. Durch den laserbasierten Polymerabtrag an der Bauteiloberfläche werden im Strukturierungsprozess

in Abhängigkeit der gegebenen Füllstoffausprägung und -orientierung Verankerungsmöglichkeiten für die folgende Metallisierung kreiert. Dementsprechend kommt auch der Wahl der Laserparameter eine entscheidende Bedeutung für die spätere Haftfestigkeit der LDS-Metallisierung zu. Ausschlaggebend für die mechanische Adhäsion sind Hinterschneidungen und Kavernen, die eine haftfeste Verzahnung der Metallschicht im Kunststoff ermöglichen. Da entsprechend abgeschattete Gestaltausprägungen in Oberflächenmessungen nicht erfasst werden, lassen Rauheitskennwerte allerdings nur bedingt in einer materialspezifischen Betrachtung Rückschlüsse auf die zu erwartende Metallisierungshaftfestigkeit zu. Während die Untersuchungsergebnisse keine Beeinträchtigung der Haftfestigkeit durch einen Lötprozess erkennen lassen, können Umwelteinflüsse, denen die Baugruppen im Einsatz ausgesetzt sind, den Metall-Kunststoff-Verbund mit der Zeit drastisch schwächen. In Bezug auf das Ausmaß, in dem ein Materialverbund auf verschiedene Umwelteinflüsse reagiert, zeigt sich wiederum eine starke Abhängigkeit vom Substratmaterial. Belastbare Aussagen zur Veränderung der Metallisierungshaftfestigkeit von LDS-MID über deren Einsatzdauer erfordern folglich applikationsspezifische Betrachtungen, die sowohl das Basismaterial als auch die Anwendungsumgebung berücksichtigen.

Eine weitere spezifische Gefährdung besteht für die Zuverlässigkeit LDS-basierter Baugruppen in der Entstehung von Leiterbahnrisen unter thermischer Belastung. Die Ursache für die erhöhte Rissgefahr liegt im Wesentlichen in der thermomechanischen Fehlanpassung der Verbundmaterialien. Durch ein stark differierendes Wärmeausdehnungsverhalten von Substrat und der darauf abgeschiedenen Kupfermetallisierung induzieren Temperaturbelastungen erhebliche mechanische Spannungen in den dünnen, rissempfindlichen Leiterbahnen. Den maßgeblichen Einfluss der thermischen Ausdehnung des Grundkörpers auf die Rissentstehung in LDS-Leiterbahnen belegt die durchgeführte Analyse der Ausfallwahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit der thermomechanischen Fehlanpassung. Die auf Basis eines thermischen Umweltbelastungstests ermittelten charakteristischen Lebensdauern verdeutlichen die enorme Bedeutung aufeinander abgestimmter Materialien für die Zuverlässigkeit mechatronisch integrierter Baugruppen.

Hohe thermische Belastungen drohen den Baugruppen jedoch nicht erst in ihrem Einsatz. Vielfach sind LDS-MID bereits im Rahmen ihrer Fertigung einem Lötprozess ausgesetzt, der üblicherweise mit Temperaturen im Bereich von 230 °C eine noch erheblichere Beanspruchung der Leiterbahnen hervorruft als die späteren Einsatzbedingungen. Anhand von Online-

Messungen konnten weitere wertvolle Erkenntnisse hinsichtlich der Rissentstehung durch eine zielgerichtete Betrachtung des Lötprozesses gewonnen werden. Der Nachweis von Schädigungen, die im unbelasteten Zustand nach dem Abkühlen der Baugruppe anhand einer elektrischen Prüfung nicht eindeutig zu identifizieren sind, offenbart, wie kritisch der Fertigungsprozess schon bei geringen CTE-Differenzen im Materialverbund zu werten ist. Im Zweifel bieten sich mit niedrigschmelzenden Lotlegierungen und Leitlebstoffen bewährte Alternativen zu einer konventionellen SnAgCu-Lötverbindung an. Durch die Untersuchung MID-spezifischer Ausprägungen an dreidimensionalen Probekörpern konnten ferner Bindenähte und konvexe Flächen als erhebliche Risikofaktoren für Leiterbahnrisse identifiziert werden. Eine erhöhte Rissresistenz zeigen dagegen Leiterbahnen auf konkav gestalteten Oberflächen. Neben diesen Erkenntnissen ist für eine zuverlässige Produktgestaltung auch die Füllstoffverteilung und -orientierung im Bauteil zu beachten. Insbesondere bei einer ausgeprägten Anisotropie der thermischen Ausdehnung können durch eine gezielte Layoutgestaltung und -positionierung mechanische Spannungen in den Leiterbahnen reduziert werden. Darüber hinaus lassen sich aus den Versuchsergebnissen erste Ansätze zur Steigerung der Robustheit von LDS-Leiterbahnen ableiten, nach denen eine erhöhte Schichttraueit sowie eine geringe Nickelschichtdicke deren Belastbarkeit begünstigen. Eine systematische Optimierung der Rissbeständigkeit von LDS-Metallschichtsystemen ist Gegenstand weiterführender Forschungsarbeiten.

Im wachsenden Bereich der Leistungselektronik werden die Einsatzmöglichkeiten von LDS-MID massiv durch ihre eingeschränkte Stromtragfähigkeit limitiert. Die thermischen Eigenschaften der kunststoffbasierten Schaltungsträger erfüllen nicht die Voraussetzungen, um die hohe Verlustwärme in ausreichendem Maße abzuführen und damit eine thermische Schädigung der dünnen Leiterbahnen zu verhindern. Ein fundamental neuer Lösungsansatz zur Überwindung der bestehenden Grenzen wurde im Rahmen der Forschungsarbeiten mit dem Einsatz von Metallkern-MID untersucht. Unter Verwendung eines LDS-fähigen Pulverlacksystems lassen sich mit etablierten Fertigungstechnologien mechatronisch integrierte Baugruppen auf Basis metallischer Grundkörper herstellen. In Gegenüberstellung zu konventionellen LDS-MID aus thermoplastischen Kunststoffen bekunden die ermittelten Eigenschaften dieser Metallkern-MID neue Potenziale zur Erweiterung des Einsatzspektrums mechatronisch integrierter Baugruppen in Anwendungsfeldern, die eine höhere Strombelastbarkeit voraussetzen.

Zusätzlich zu dem Nutzen, den die neu gewonnenen Erkenntnisse bei entsprechender Berücksichtigung unmittelbar zur Steigerung der Qualität und Zuverlässigkeit von LDS-MID stiften, bieten die Untersuchungsergebnisse auch eine fundierte Ausgangsbasis für weiterführende wissenschaftliche Arbeiten. Diese können sowohl darauf ausgerichtet sein, in material- und prozessbezogenen Entwicklungsarbeiten die identifizierten Einflussgrößen auf die Qualität und Zuverlässigkeit von LDS-MID konsequent zu optimieren, als auch angepasste technologische Ansätze zur Überwindung bestehender Limitierungen zu forcieren oder aber die ermittelten Zusammenhänge auf artverwandte Bereiche wie die gedruckte Elektronik zu transferieren. Sinnvoll erscheint in diesem Kontext insbesondere eine physikalische Modellierung der aufgezeigten Wirkzusammenhänge. Valide Simulationsmodelle, beispielsweise zur Rissentstehung in Leiterbahnen, würden es ermöglichen, vergleichsweise schnell und ressourcenschonend Effekte unterschiedlichster Modifikationen auf die Robustheit mechatronisch integrierter Baugruppen zu analysieren und ihre Zuverlässigkeit unter verschiedensten Einsatzbedingungen zu bewerten.

7 Summary

The rapidly increasing demand for multifunctional mechatronic systems is accompanied by high requirements in terms of their quality and reliability. The manifold application potentials of MID technology, which enable the production of highly integrated mechatronic assemblies with function-optimized designs, have proven themselves impressively over many years through a multitude of different serial applications. However, uncertainties regarding the reliability of the individual technical solutions inhibit their further dissemination. Quality assurance in MID production as well as the reliable assessment and increase of its reliability are therefore of great importance – especially for use in safety-relevant areas as well as under stressful environmental conditions. In this context, the results of this work contribute to eliminate existing constraints.

The structured references to the quality-influencing factors in the production of LDS-MID help manufacturers to optimize and assure their production quality. In addition, the indications serve developers in the design of products that meet requirements. Due to the high complexity of Mechatronic Integrated Devices, a cross-process understanding and adequate sensitization for dependencies in both development and production are of decisive importance. With regard to a holistic quality assessment, they constitute the basis for a critical examination of the products after each process step. The exemplary defect images contained in the work for each process stage provide concrete indications in this respect. The main research areas arise from the characteristic failure mechanisms and limitations that prevent a wider use of LDS-MID.

In order to avoid delamination of the metallization, sufficient adhesion of the metal-plastic composite must be ensured, taking into account the application-specific requirements. Based on the hot pin pull test, a suitable method for evaluating the adhesion strength was qualified, which proves to be extremely advantageous compared to alternative approaches with regard LDS-specific conditions. Dominant influence on the adhesion of metallization has the substrate material. In the structuring process, the laser-based polymer removal on the component surface creates anchoring possibilities for the subsequent metallization as a function of the given filler properties and orientation. Accordingly, the laser parameters also influence the adhesion strength of LDS metallization. Decisive for the mechanical adhesion are undercuts and caverns, which allow the metal layer to inter-

lock firmly in the plastic. Since correspondingly shaded shape characteristics are not recorded in surface measurements, however, roughness parameters only allow severely restricted conclusions on the expected metallization adhesion in a material-specific consideration. While the findings do not show any degradation of the adhesion strength by a soldering process, environmental influences to which the assemblies are exposed in use can drastically weaken the metal-plastic composite over time. The extent to which a composite material reacts to various environmental influences again shows a strong dependence on the substrate material. Reliable predictions about changes in the adhesion strength of LDS-MID over its service period therefore require application-specific considerations that take into account both the base material and the application environment.

Another particular hazard is the formation of cracks in conductors under thermal stress. The reason for the increased risk of cracking is essentially the thermomechanical mismatch of the composite materials. Due to a strongly differing thermal expansion behavior of the substrate and the copper metallization deposited on it, thermal loads induce considerable mechanical stresses in the thin, crack-sensitive conductor tracks. The decisive influence of the thermal expansion of the substrate on crack formation in LDS conductor tracks is demonstrated by the analysis of the failure probabilities as a function of the thermomechanical mismatch. The characteristic lifetimes determined on the basis of a thermal environmental stress test illustrate the enormous importance of matched materials for the reliability of Mechatronic Integrated Devices.

However, high thermal loads do not only threaten the components in their use. In many cases, LDS-MID are already exposed to a soldering process during their production. With temperatures in the range of 230 °C, this usually causes even greater stress on the conductors than the later operating conditions. On the basis of online measurements, further valuable findings regarding crack formation could be gained by a targeted investigation of the soldering process. The proof of damage that cannot be clearly identified in the unloaded state after the assembly has cooled reveals how critical the manufacturing process is even in the case of minor CTE differences in the material composite. In case of doubt, low-melting solder alloys and conductive adhesives offer proven alternatives to conventional SnAgCu solder joints. By investigating MID-specific characteristics of three-dimensional test specimens, weld lines and convex surfaces could also be identified as significant risk factors for conductor cracks. Conductive tracks on concave surfaces, on the other hand, show increased resistance to cracking. In addition to these findings, the filler distribution and orientation in the

component must also be taken into account for reliable product design. Especially with a pronounced anisotropy of the thermal expansion, mechanical stresses in the conductor tracks can be reduced by a targeted layout design and positioning. Furthermore, the test results can be used to derive initial approaches for increasing the robustness of LDS circuits, according to which increased layer roughness and a low nickel layer thickness promote their load-bearing capacity. A systematic optimization of the crack resistance of LDS metal layer systems is the subject of further research.

In the growing field of power electronics, the application possibilities of LDS-MID are massively restricted by their limited current carrying capacity. The thermal properties of the plastic-based circuit carriers do not meet the requirements to sufficiently dissipate the high heat loss and thus prevent thermal damage to the thin conductor tracks. A fundamentally new approach to overcoming existing limits was investigated in the research with the use of metal-core MID. With an LDS-capable powder coating system, Mechatronic Integrated Devices based on metallic bodies can be manufactured by means of established production technologies. In comparison to conventional LDS-MID made of thermoplastics, the properties of these metal-core MID reveal new potential for expanding the range of applications of mechatronically integrated assemblies into fields of application that require higher current-carrying capacity.

In addition to the benefits that the new findings directly offer in terms of improving the quality and reliability of LDS-MID when considered accordingly, the experimental results also provide a profound basis for further research. These can be aimed at consequently optimizing the identified influencing factors on the quality and reliability of LDS-MID in material- and process-related developments, as well as at forcing adapted technological approaches to overcome existing limitations, or at transferring the determined correlations to related areas such as printed electronics. In this context, a physical modelling of the indicated cause-effect relationships appears to be particularly useful. Valid simulation models, for instance on crack formation in conductor tracks, would enable a comparatively quick and resource-saving analysis of the effects of various modifications on the robustness of Mechatronic Integrated Devices and the evaluation of their reliability under a wide range of operating conditions.

Literaturverzeichnis

- [1] FRANKE, J.: Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3-D MID). Bamberg: Carl Hanser Verlag, 1995 (Fertigungstechnik Erlangen 50)
- [2] GAUSEMEIER, J.: Einführung. In: GAUSEMEIER, J.; FELDMANN, K. (Hrsg.): Integrative Entwicklung räumlicher elektronischer Baugruppen. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2006, S. 1–22
- [3] GOTH, C.; KUHN, T.: Mechatronische Integrationspotenziale durch MID. In: FRANKE, J. (Hrsg.): Räumliche elektronische Baugruppen (3D-MID): Werkstoffe, Herstellung, Montage und Anwendung für spritzgegossene Schaltungsträger. München: Carl Hanser Verlag, 2013, S. 1–22
- [4] NAUNDORF, G.; WISBROCK, H.: Leiterbahnstrukturen auf einem nichtleitenden Trägermaterial und Verfahren zu ihrer Herstellung. Patentschrift DE 19723734 C2. 1997-06-06
- [5] NAUNDORF, G.; WISBROCK, H.: Leiterbahnstrukturen auf einem nichtleitenden Trägermaterial, insbesondere feine Leiterbahnstrukturen, und Verfahren zu ihrer Herstellung. Patentschrift DE 19731346 A1. 1999-03-04
- [6] NAUNDORF, G.; WISBROCK, H.: Leiterbahnstrukturen und Verfahren zu ihrer Herstellung. LPKF Laser & Electronics AG. Patentschrift WO 2003005784 A2. 2003-01-16
- [7] FRANKE, J.; GAUSEMEIER, J.; GOTH, C.; DUMITRESCU, R.: MID-Studie 2011: Markt- und Technologieanalyse. Erlangen: Eine Studie im Auftrag der Forschungsvereinigung Räumliche Elektronische Baugruppen 3-D MID e.V. (Hrsg.), 2011
- [8] GOTH, C.: Fallstudien. In: FRANKE, J. (Hrsg.): Räumliche elektronische Baugruppen (3D-MID): Werkstoffe, Herstellung, Montage und Anwendung für spritzgegossene Schaltungsträger. München: Carl Hanser Verlag, 2013, S. 293–317
- [9] GOTH, C.; KUHN, T.: Three-Dimensional and with a Fine Structure: 3-D Technology on the Rise. In: Kunststoffe international (2015), Nr. 6, S. 76–80

- [10] FECHTELPETER, C.; JÜRGENHAKE, C.; FRITZ, K.-P.; GRÖZINGER, T.; MÜLLER, H.; WILD, P.: Zuverlässigkeit bei MID: Hemmnisse, Potentiale, Handlungsfelder. Paderborn, Stuttgart, 2015
- [11] LPKF LASER & ELECTRONICS AG: Approved LDS Materials [Unternehmensschrift]. Garbsen, 2018
- [12] HOPMANN, C.; MICHAELI, W.; GREIF, H.; EHRIG, F.: Technologie des Spritzgießens: Lern- und Arbeitsbuch. 4., aktualisierte Auflage. München: Carl Hanser Verlag, 2017
- [13] JAROSCHEK, C.: Spritzgießen für Praktiker. 3. Auflage. München: Carl Hanser Verlag, 2013
- [14] JOHANNABER, F.; MICHAELI, W.: Handbuch Spritzgießen. 2. Auflage. München: Carl Hanser Verlag, 2004
- [15] BICHLER, M.: Prozessgrößen beim Spritzgießen: Analyse und Optimierung. 2., aktualisierte und erweiterte Auflage. Berlin, Wien, Zürich: Beuth Verlag, 2012
- [16] BICHLER, M.: Kunststoffteile fehlerfrei spritzgießen: Erfolgreiche Strategien zur Erkennung und Beseitigung von Fehlern an Spritzgussteilen. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage. Heidelberg: Hüthig Verlag, 2007
- [17] KURR, F.: Praxishandbuch der Qualitäts- und Schadensanalyse für Kunststoffe. 2., überarbeitete Auflage. München: Carl Hanser Verlag, 2014
- [18] HEININGER, N.: Effiziente Fertigung von dreidimensionalen Schaltungen. In: PLUS - Produktion von Leiterplatten und Systemen (2004), Nr. 7, S. 1150–1154
- [19] NAUNDORF, G.; WILBROCK, H.: A fundamentally new mechanism for additive metallization of polymeric substrates in ultra fine line technology illustrated for 3D-MIDs. In: FELDMANN, K.; MEIER, R.; RÖMER, M.; ZIPPMANN, V. (Hrsg.): Proceedings: 4th International Congress Molded Interconnect Devices. Erlangen, 2000, S. 243–249
- [20] SCHLÜTER, R.; RÖSENER, B.; KICKELHAIN, J.; NAUNDORF, G.: Completely Additive Laser-Based Process for the Production of 3D MIDs – the LPKF LDS Process. In: FELDMANN, K.; MEIER, R.; RÖMER, M.; ZIPPMANN, V. (Hrsg.): Proceedings: 5th International Congress Molded Interconnect Devices. Erlangen, 2002, S. 123–130

- [21] WISSBROCK, H.: Laser-Direkt-Strukturieren von Kunststoffen: Ein neues Verfahren im Spiegel eingeführter MID-Technologien. In: *Kunststoffe* 92 (2002), S. 101–105
- [22] WHITE, J.: LDS Additives: Properties, Functions and Technical Notes. In: FRANKE, J.; KUHN, T.; GOTH, C.; POJTINGER, A. (Hrsg.): *Proceedings: 12th International Congress Molded Interconnect Devices*, 2016, S. 119–130
- [23] N. N.: Laserstrukturierte Schaltungsträger. In: *LASER – Entwicklung und industrielle Anwendung* 22. Jahrgang (2008), Nr. 1, S. 30–33
- [24] GRÄTZ, M.: Neue Basismaterialien – Materialerprobung für 3D-MID-Komponenten. Verfügbar unter: https://3d-mid.de/cms/upload/aktuelles/rueckblicke/Graetz_M_-_Neue_Basismaterialien_-_Materialerprobung_fr_3D-MID-Komponenten.pdf, 2013 – Überprüfungsdatum 2018-07-24
- [25] LPKF LASER & ELECTRONICS AG: LDS laser parameter recommendation [Unternehmensschrift]. Garbsen, 2011
- [26] LPKF LASER & ELECTRONICS AG: LDS MID Designregeln: Designregeln für laserdirektstrukturierte MID-Komponenten [Unternehmensschrift]. Version 2.1. Garbsen, 2011
- [27] SCHUSTER, N.; KOLOBRODOV, V. G.: *Infrarotthermographie*. Zweite, überarbeitete und erweiterte Ausgabe. Weinheim: WILEY-VCH Verlag, 2004
- [28] EBERHARDT, W.; WESER, S.; KÜCK, H.: Von der Deko in die Industrie: Metallisierung von MID mit nasschemischen Verfahren. In: *Elektronik – Sonderausgabe Räumliche elektronische Baugruppen* (2011), S. 24–27
- [29] GOTH, C.: Metallisierung für 3D-MID: Whitepaper HARTING Mitronics. Verfügbar unter: http://www.harting-mitronics.ch/fileadmin/hartingmitronics/white_papers/Metallisierung_für_3D-MID_HARTING_Mitronics.pdf – Überprüfungsdatum 2017-06-12
- [30] HOFMANN, H.; SPINDLER, J.: *Verfahren in der Beschichtungs- und Oberflächentechnik*. 3., überarbeitete Auflage. München: Carl Hanser Verlag, 2014

- [31] PRINZ, U.: Electroless Copper in MID. In: FELDMANN, K.; HEYER, J.; KUNZE, A.; RÖMER, M. (Hrsg.): Proceedings: 6th International Congress Molded Interconnect Devices. Erlangen, 2004, S. 195–201
- [32] BIRKICHT, A.: 3D-MID aus einer Hand: Harting Mitronics verfügt über die vollständige MID-Prozesskette im eigenen Haus. In: Elektronik – Sonderausgabe Räumliche elektronische Baugruppen (2011), S. 28–30
- [33] RISSE, A.: Fertigungsverfahren der Mechatronik, Feinwerk- und Präzisionsgerätetechnik. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2012
- [34] N. N.: Reinigung Laser-MID – Untersuchungen zu umweltfreundlichen und wirtschaftlichen Reinigungsverfahren für laserstrukturierte 3D-MID-Baugruppen: Schlussbericht zum AiF-IGF-Vorhaben 16683 N. 2012
- [35] SCHRAMM, R.: Strukturierung und Metallisierung. In: FRANKE, J. (Hrsg.): Räumliche elektronische Baugruppen (3D-MID): Werkstoffe, Herstellung, Montage und Anwendung für spritzgegossene Schaltungsträger. München: Carl Hanser Verlag, 2013, S. 65–116
- [36] BELL, H.: Reflowlöten: Grundlagen, Verfahren, Temperaturprofile und Lötfehler. Bad Saulgau: Eugen G. Leuze Verlag, 2005
- [37] FELDMANN, K.; BIGL, T.: Technologien für integrierte mechanisch-elektronische Baugruppen. In: GAUSEMEIER, J.; FELDMANN, K. (Hrsg.): Integrative Entwicklung räumlicher elektronischer Baugruppen. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2006, S. 81–92
- [38] BRAND, A.: Prozesse und Systeme zur Bestückung räumlicher elektronischer Baugruppen (3D-MID). Bamberg: Meisenbach, 1997 (Fertigungstechnik Erlangen 61)
- [39] GOTH, C.; SCHATZ, G.: Montagetechnologien und Verbindungstechniken für 3D-MID: Whitepaper HARTING Mitronics. Verfügbar unter: http://www.harting-mitronics.ch/fileadmin/hartingmitronics/white_papers/M Montagetechnologien_und_Verbindungstechniken_für_3D-MID.pdf – Überprüfungsdatum 2017-11-26
- [40] ZIMMERMANN, M.: Aufbau- und Verbindungstechnik auf LDS-MID. In: PLUS - Produktion von Leiterplatten und Systemen (2009), Nr. 3, S. 621–632

- [41] LUCHS, R.: Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT. Bamberg: Meisenbach, 1998 (Fertigungstechnik Erlangen 85)
- [42] PFEFFER, M.: Montagetechnik für 3D-MID. In: FRANKE, J. (Hrsg.): Räumliche elektronische Baugruppen (3D-MID): Werkstoffe, Herstellung, Montage und Anwendung für spritzgegossene Schaltungsträger. München: Carl Hanser Verlag, 2013, S. 121–144
- [43] ZOLLEIß, B.: Optimierte Prozesse und Systeme für die Bestückung mechatronischer Baugruppen. Bamberg: Meisenbach, 2007 (Fertigungstechnik Erlangen 186)
- [44] GOTH, C.: Verbindungstechnik. In: FRANKE, J. (Hrsg.): Räumliche elektronische Baugruppen (3D-MID): Werkstoffe, Herstellung, Montage und Anwendung für spritzgegossene Schaltungsträger. München: Carl Hanser Verlag, 2013, S. 147–182
- [45] N. N.: Automatisierte Fertigungslinie für Heißpräge-MID-Baugruppen: Abschlussbericht des BMBF-Verbundprojektes AHMID. 2002
- [46] HUNZIKER, W.: Chipmontage auf MID (Molded Interconnect Devices) – Ein Weg zu Chipmodulen höherer Funktionalität. In: tec.News. Das Technologie-Magazin von HARTING (2005), Nr. 13, S. 20–25
- [47] HARMAN, G. G.: Wire Bonding in Microelectronics. Third Edition. New York: McGraw-Hill, 2010
- [48] OSTERWALD, F.: Verbindungsbildung beim Ultraschall-Drahtbonden: Einfluß der Schwingungsparameter und Modellvorstellungen. TU Berlin: Dissertation, 1999
- [49] N. N.: Drahtbonden auf MID – Untersuchungen zur Einsetzbarkeit der Ultraschall-Drahtbondtechnik zur Kontaktierung in miniaturisierten MID-Gehäusen für die Mikrosystemtechnik: Schlussbericht zum AiF-IGF-Vorhaben 12417 N. 2002
- [50] N. N.: Kontaktierung LDS-MID – Untersuchungen zur Verbesserung der Kontaktierung von LDS-MID durch Planarisierung: Schlussbericht zum AiF-IGF-Vorhaben 15664 N. 2009
- [51] GRÖZINGER, T.: Untersuchungen zu Zuverlässigkeit und Lebensdauermodellen für gelötete SMD auf spritzgegossenen Schaltungsträgern. München: Dr. Hut, 2015

- [52] KANANI, N.; et al.: Moderne Mess- und Prüfverfahren für metallische und andere anorganische Überzüge. Renningen: expert Verlag, 2007
- [53] BISCHOF, C.; POSSART, W.: Adhäsion: Theoretische und experimentelle Grundlagen. Berlin: Akademie-Verlag, 1983
- [54] MATTOX, D. M.: Interface Formation and the Adhesion of Deposited Thin Films: Sandia Corporation Monograph SC-R-65-852. Albuquerque, New Mexico: Technical Information Division, Sandia Corporation, 1965
- [55] HEYMANN, K.; RIEDEL, W.; WOLDT, G.: Kunststoffgalvanisieren in Theorie und Praxis. In: Angewandte Chemie 82 (1970), S. 412–421
- [56] BOBZIN, K.: Oberflächentechnik für den Maschinenbau. Weinheim: WILEY-VCH Verlag, 2013
- [57] HAEFER, R. A.: Oberflächen- und Dünnschicht-Technologie: Teil 1: Beschichtungen von Oberflächen. Berlin, Heidelberg: Springer, 1987
- [58] FÖRSTER, F.: Untersuchungen zum Mechanismus der Haftung zwischen Polymeren und außenstromlos abgeschiedenen Metallschichten. TU Berlin, Institut für Technische Chemie: Dissertation, 1985
- [59] MEYER, H.: Technische und wissenschaftliche Aspekte der Metallisierung von Polymeren. In: Kunststoffmetallisierung und leitende Polymere: 15. Ulmer Gespräch. Bad Saulgau: Eugen G. Leuze Verlag, 1993, S. 74–88
- [60] SUCHENTRUNK, R.: Kunststoff-Metallisierung. 3. Auflage. Bad Saulgau: Eugen G. Leuze Verlag, 2006
- [61] BISCHOF, C.: ND-Plasmatechnik im Umfeld der Haftungsproblematik bei Metall-Polymer-Verbunden. In: Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 24 (1993), Nr. 2, S. 33–41
- [62] HABENICHT, G.: Kleben: Grundlagen, Technologien, Anwendung. 6., aktualisierte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008
- [63] GLEICH, H.: Zusammenhang zwischen Oberflächenenergie und Adhäsionsvermögen von Polymerwerkstoffen am Beispiel von PP und PBT und deren Beeinflussung durch die Niederdruck-Plasmatechnologie. Universität Duisburg-Essen: Dissertation, 2004

- [64] MITTAL, K. L.: Adhesion measurement of thin films. In: *Electrocomponent Science and Technology* 3 (1976), Nr. 1, 21–42
- [65] BRINKHUES, S.; KANTHAMNENI, A.; BROSE, A.; MAJCHEREK, S.; SCHMIDT, B.: Investigation of Adhesion Strength of Metallization on Thermoplastic and Ceramic Substrates. In: IEEE (Hrsg.): *12th International Congress Molded Interconnect Devices (MID): Scientific Proceedings*, 2016, S. 94–99
- [66] ZEH, K.; ROHDE, H.: Selection and Qualification of a Test Method for Determining Adhesion of MID Metallization in the LDS Technology. In: BIRKICHT, A.; FRANKE, J.; JOHN, W.; KUHN, T. (Hrsg.): *Proceedings: 10th International Congress Molded Interconnect Devices*, 2012
- [67] GOTH, C.; GEHRMANN, R.; GRÄTZ, M.: Qualifizierung von 3D-MID: Whitepaper HARTING Mitronics. Verfügbar unter: http://www.harting-mitronics.ch/fileadmin/hartingmitronics/white_papers/Qualifizierung_von_3D-MID_HARTING_Mitronics.pdf – Überprüfungsdatum 2017-11-26
- [68] N. N.: Elektrische Störung bei BMW. Verfügbar unter: <http://www.autoservicepraxis.de/elektrische-stoerung-bei-bmw-955258.html> – Aktualisierungsdatum: 2010-07-17 – Überprüfungsdatum 2017-11-26
- [69] KUNA, M.: *Numerische Beanspruchungsanalyse von Rissen: Finite Elemente in der Bruchmechanik*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2008
- [70] KRUPP, U.: *Mikrostrukturelle Aspekte der Rissinitiierung und -ausbreitung in metallischen Werkstoffen*. Universität Siegen, Fachbereich Maschinentechnik: Habilitation, 2004
- [71] SURESH, S.: *Fatigue of Materials*. Second Edition. Cambridge: Cambridge University Press, 1998
- [72] SURESH, S.; RITCHIE, R. O.: Propagation of short fatigue cracks. In: *International Metal Reviews* 29 (1984), S. 445–475
- [73] TOKAJI, K.; OGAWA, T.: The Growth Behaviour of Microstructurally Small Fatigue Cracks in Metals. In: MILLER, K. J.; De los Rios, E. R. (Hrsg.): *Short Fatigue Cracks: ESIS 13*. London: Mechanical Engineering Publications, 1992, S. 85–99

- [74] APELDORN, T.: Untersuchung Leiterplattensubstrat-spezifischer Eigenschaften von ausdehnungsarmen Compounds auf Basis von Thermoplasten. Universität Bayreuth, Lehrstuhl für Polymere Werkstoffe: Dissertation, 2013
- [75] BAUR, E.; BRINKMANN, S.; OSSWALD, T. A.; RUDOLPH, N.; SCHMACHTENBERG, E.: Saechtling Kunststoff Taschenbuch. 31. Ausgabe. München: Carl Hanser Verlag, 2013
- [76] MITSUBISHI ENGINEERING-PLASTICS CORPORATION: Reny: High performance polyamide [Werkstoffdatenblatt]
- [77] DEUTSCHES KUPFERINSTITUT: Cu-OFE [Werkstoffdatenblatt]. Verfügbar unter: https://www.kupferinstitut.de/fileadmin/user_upload/kupferinstitut.de/de/Documents/Shop/Verlag/Downloads/Werkstoffe/Datenblaetter/Kupfer/Cu-OFE.pdf, 2005 – Überprüfungsdatum 2018-11-18
- [78] LANXESS DEUTSCHLAND GMBH: Pocan DPT 7140 LDS [Werkstoffdatenblatt]. 2011
- [79] TICONA GMBH: Vectra® E840i LDS | LCP | Mineral Reinforced [Werkstoffdatenblatt]. 2011
- [80] N. N.: Charakterisierung und praxisnahe Methoden zur Prüfung von Leiterbahnen auf LDS-MID als Metall/Kunststoff-Verbundsysteme: Schlussbericht zum AiF-IGF-Vorhaben 16737 N. 2015
- [81] MITSUBISHI ENGINEERING-PLASTICS CORPORATION: Xantar® LDS 3730: Property Data [Werkstoffdatenblatt]. 2017
- [82] ISOLA GROUP: FR408HR: High Performance Laminate and Prepreg [Werkstoffdatenblatt]. Verfügbar unter: <http://www.isola-group.com/wp-content/uploads/data-sheets/fr408hr.pdf>, 2018 – Überprüfungsdatum 2018-05-07
- [83] EVONIK RESOURCE EFFICIENCY GMBH: Vestodur® X9423 schwarz E70372: Technische Information [Werkstoffdatenblatt]. 2016
- [84] MBN LV 124-2 (2013-08): Elektrische und elektronische Komponenten in Personenkraftwagen bis 3,5t – Allgemeine Anforderungen, Prüfbedingungen und Prüfungen Teil 2: Umweltaanforderungen. Mercedes-Benz

- [85] GERHARD, M.: Qualitätssteigerung in der Elektronikproduktion durch Optimierung der Prozeßführung beim Löten komplexer Baugruppen. Bamberg: Meisenbach, 1998 (Fertigungstechnik Erlangen 78)
- [86] IPC-2152 (2009-08): Standard for Determining Current Carrying Capacity in Printed Board Design. Association Connecting Electronics Industries (IPC)
- [87] ADAM, J.: Strombelastbarkeit von Leiterbahnen: Teil 1 Grundlagen. In: PLUS - Produktion von Leiterplatten und Systemen (2002), Nr. 10, S. 1669–1673
- [88] ADAM, J.: New correlations between electrical current and temperature rise in PCB traces. In: IEEE (Hrsg.): 20th Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, 2004, S. 292–299
- [89] ADAM, J.: Strombelastbarkeit von Leiterbahnen. In: PLUS - Produktion von Leiterplatten und Systemen (2010), Nr. 3, S. 529–535
- [90] ADAM, J.: Virtuelle Thermographie von Leiterbahnen und Leiterplatten: Teil 1: Hotspots durch Bauteile. In: PLUS - Produktion von Leiterplatten und Systemen (2013), Nr. 3, S. 471–479
- [91] ADAM, J.: Neues von der Strombelastbarkeit von Leiterbahnen. In: Elektronische Baugruppen: Aufbau- und Verbindungstechnik. Die Trends von heute – die Chancen von morgen. Vorträge der DVS/GMM-Fachtagung vom 4. bis 5. Februar 2004 in Fellbach. Berlin, Offenbach: VDE Verlag, 2004, S. 117–123
- [92] LENEKE, T.: Entwärmungskonzepte durch funktionale Strukturen in spritzgegossenen dreidimensionalen Schaltungsträgern. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Lehrstuhl für Mikrosystemtechnik: Dissertation, 2012
- [93] IPC-4101C DE (2009-08): Spezifikation für Basismaterialien für starre Leiterplatten und Multilayerleiterplatten. Association Connecting Electronics Industries (IPC)
- [94] GOTH, C.: Analyse und Optimierung der Entwicklung und Zuverlässigkeit räumlicher Schaltungsträger (3D-MID). Bamberg: Meisenbach, 2013 (Fertigungstechnik Erlangen 232)

- [95] N. N.: Zuverlässigkeit mikromechatronischer Systeme mit Chip auf MID und flexiblen Substraten: Schlussbericht zum AiF-IGF-Vorhaben 303 ZBG. 2011
- [96] BEITINGER, G.: Herstellungs- und Prüfverfahren für thermoplastische Schaltungsträger. Bamberg: Meisenbach, 1999 (Fertigungstechnik Erlangen 97)
- [97] GOTH, C.; KUHN, T.; GION, G.; FRANKE, J.: Hot Pin Pull Method – New Test Procedure for the Adhesion Measurement for 3D-MID. In: FRANKE, J.; KUHN, T.; BIRKICHT, A.; POJTINGER, A. (Hrsg.): 11th International Congress Molded Interconnect Devices: Scientific Proceedings. Pfaffikon: Trans Tech Publications Ltd, 2014, S. 115–120
- [98] KUHN, T.; FRANKE, J.: Test Methods and Influencing Factors for the Adhesion Strength Measurement of Metallized Structures on Thermoplastic Substrates. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings of the 16th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC), 2014, S. 655–660
- [99] DIN EN 60249-1:1994-05: Basismaterialien für gedruckte Schaltungen – Teil 1: Prüfverfahren (IEC 60249-1:1982 + A4:1993). Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN). [ersatzlos zurückgezogen]
- [100] SEIDEL, C.: Verbunde aus Hochtemperaturthermoplasten und Kupfer für flexible Schaltungsträger. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Polymerwerkstoffe: Dissertation, 2006
- [101] DIN EN ISO 4624:2016-08: Beschichtungsstoffe – Abreißversuch zur Bestimmung der Haftfestigkeit (ISO 4624:2016). Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN)
- [102] DIN EN 62137-1-2:2008-02: Oberflächenmontage-Technik – Verfahren zur Prüfung auf Umgebungseinflüsse und zur Prüfung der Haltbarkeit von Oberflächen-Lötverbindungen – Teil 1-2: Scherfestigkeitsprüfung (IEC 62137-1-2:2007). Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN)
- [103] GHASSEMIEH, E.: Evaluation of sources of uncertainties in microtensile bond strength of dental adhesive system for different specimen geometries. In: Dental Materials 24 (2008), S. 536–547
- [104] VAN NOORT, R.; NOROOZI, S.; HOWARD, I. C.; CARDEW, G.: A critique of bond strength measurements. In: Journal of Dentistry 17 (1989), S. 61–67

- [105] ESCRIBANO, N. I.; DEL-NERO, M. O.; de la Macorra, Jose C.: Inverse Relationship between Tensile Bond Strength and Dimensions of Bonded Area. In: Journal of Biomedical Materials Research - Part B: Applied Biomaterials 66B (2003), S. 419–424
- [106] SANO, H.; SHONO, T.; SONODA, H.; TAKATSU, T.; CIUCCHI, B.; CARVALHO, R.; PASHLEY, D. H.: Relationship between surface area for adhesion and tensile bond strength - Evaluation of a micro-tensile bond test. In: Dental Materials 10 (1994), S. 236–240
- [107] SCHERRER, S. S.; CESAR, P. F.; SWAIN, M. V.: Direct comparison of the bond strength results of the different test methods: A critical literature review. In: Dental Materials 26(2) (2010), e78–e93
- [108] EVONIK DEGUSSA GMBH: Vestamid® HTplus TGP3586: Product Information [Werkstoffdatenblatt]. 2011
- [109] DIN EN 60068-2-67:1996-07: Umweltprüfungen - Teil 2: Prüfungen - Prüfung Cy: Feuchte Wärme, konstant, beschleunigte Prüfung, vorzugsweise für Bauelemente (IEC 60068-2-67:1995). Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN)
- [110] DIN EN 60068-2-14:2010-04: Umgebungseinflüsse - Teil 2-14: Prüfverfahren - Prüfung N: Temperaturwechsel (IEC 60068-2-14:2009). Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN)
- [111] KUHN, T.; FRANKE, J.: Influences on Crack Initiation in Conductor Tracks on Three-Dimensional Thermoplastic Substrates. In: Surface Mount Technology Association (SMTA) (Hrsg.): IEEE Proceedings of the Pan Pacific Microelectronics Symposium (Pan Pacific), 2017, S. 169–175
- [112] DSM: ForTii® LDS51 PA4T-GF30 FR(40): Property Data [Werkstoffdatenblatt]. 2017
- [113] ISO11359-1:2014(E): Plastics - Thermomechanical analysis (TMA) - Part 1: General principles. International Organization for Standardization (ISO)
- [114] ISO 11359-2:1999(E): Plastics - Thermomechanical analysis (TMA) - Part 2: Determination of coefficient of linear thermal expansion and glass transition temperature. International Organization for Standardization (ISO)

- [115] BERTSCHE, B.; LECHNER, G.: Zuverlässigkeit im Maschinenbau: Ermittlung von Bauteil- und System-Zuverlässigkeiten. Berlin, Heidelberg: Springer, 1990
- [116] SCHMITT, R.; PFEIFER, T.: Qualitätsmanagement: Strategien - Methoden - Techniken. 4., vollständig überarbeitete Auflage. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2010
- [117] PIETSCHMANN, J.: Industrielle Pulverbeschichtung: Grundlagen, Verfahren, Praxiseinsatz. 4., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013
- [118] KRÜGER, R.; RÖSENER, B.; FENGLER, M.: The LDS Process: Exploring New Avenues with Coatings. In: FRANKE, J.; KUHN, T.; BIRKICHT, A.; POJTINGER, A. (Hrsg.): Proceedings: 11th International Congress Molded Interconnect Devices, 2014
- [119] LPKF LASER & ELECTRONICS AG: TechNote LPKF LDS PowderCoating PU 100. Version 1.1. 2014
- [120] STÜTZ, E.: Verfahren zum Abstoßen von Teilchen von einer Unterlage sowie Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens. Patentschrift DE 2036279 B2. 1972-01-27
- [121] BATZ+BURGEL GMBH & CO. KG: Werkstoffdatenblatt: EN AW – 5754 (Al Mg 3 – 3.3535). Verfügbar unter: https://batz-burgel.com/wp-content/uploads/BB_5754.pdf, 2015 – Überprüfungsdatum 2018-08-04
- [122] KUHN, T.; KRÜGELSTEIN, A.; FRANKE, J.: Mechatronic Integrated Devices Produced by Laser Direct Structuring on Powder-Coated Aluminum Substrates. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings of the 39th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), 2016, S. 27–32
- [123] AMESÖDER, S.: Wärmeleitende Kunststoffe für das Spritzgießen. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Kunststofftechnik: Dissertation, 2010
- [124] HEINLE, C.: Simulationsgestützte Entwicklung von Bauteilen aus wärmeleitenden Kunststoffen. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Kunststofftechnik: Dissertation, 2012

- [125] SCHEUBECK, M.: Manche mögen's kühl: Thermische Anforderungen von LED-Leuchten. In: elektronik journal 47 (2012), 03/2012, S. 14-17

Verzeichnis promotionsbezogener eigener Publikationen

- [P1] GOTH, C.; KUHN, T.: Mechatronische Integrationspotenziale durch MID. In: FRANKE, J. (Hrsg.): Räumliche elektronische Baugruppen (3D-MID): Werkstoffe, Herstellung, Montage und Anwendung für spritzgegossene Schaltungsträger. München: Carl Hanser Verlag, 2013, S. 1–22
- [P2] GOTH, C.; KUHN, T.; GION, G.; FRANKE, J.: Hot Pin Pull Method – New Test Procedure for the Adhesion Measurement for 3D-MID. In: FRANKE, J.; KUHN, T.; BIRKICHT, A.; POJTINGER, A. (Hrsg.): 11th International Congress Molded Interconnect Devices: Scientific Proceedings. Pfaffikon: Trans Tech Publications Ltd, 2014, S. 115–120
- [P3] KUHN, T.; FRANKE, J.: Test Methods and Influencing Factors for the Adhesion Strength Measurement of Metallized Structures on Thermoplastic Substrates. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings of the 16th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC), 2014, S. 655–660
- [P4] FRANKE, J.; KUHN, T.: Mechatronic Integrated Devices: Innovative Lösungen für mechatronische Systeme. In: electronic fab (2015), Nr. 1, S. 29–63
- [P5] GOTH, C.; KUHN, T.: Three-Dimensional and with a Fine Structure: 3-D Technology on the Rise. In: Kunststoffe international (2015), Nr. 6, S. 76–80
- [P6] KUHN, T.; KRÜGELSTEIN, A.; FRANKE, J.: Mechatronic Integrated Devices Produced by Laser Direct Structuring on Powder-Coated Aluminum Substrates. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings of the 39th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), 2016, S. 27–32
- [P7] KUHN, T.; FRANKE, J.: Influences on Crack Initiation in Conductor Tracks on Three-Dimensional Thermoplastic Substrates. In: Surface Mount Technology Association (SMTA) (Hrsg.): IEEE Proceedings of the Pan Pacific Microelectronics Symposium (Pan Pacific), 2017, S. 169–175
- [P8] FISCHER, A. J.; DRUMMER, D.; KUHN, T.; FRANKE, J.; MÜLLER, H.; ZIMMERMANN, A.: Effect of flow lines on the metallization of laser-structured polymer parts. In: Society of Plastics Engineering (SPE) (Hrsg.): Proceedings of the Annual Technical Conference (SPE AN-TEC), 2017

- [P9] KUHN, T.; FRANKE, J.: Durability Test. In: CHATTI, S.; TOLIO, T. (Hrsg.): CIRP Encyclopedia of Production Engineering. Berlin, Heidelberg: Springer, 2018
- [P10] FISCHER, A. J.; KUHN, T.; DRUMMER, D.; FRANKE, J.: Effect of talc on the metal adhesion of laser-structured polymer parts. In: IEEE (Hrsg.): 13th International Congress Molded Interconnect Devices (MID): Scientific Proceedings, 2018, S. 57–61
- [P11] KUHN, T.; FRANKE, J.: Räumliche mechatronisch integrierte Baugruppen 3D-MID. In: RITZ, K. (Hrsg.): Handbuch der Leiterplattentechnik: Band 5, Teil 2. Bad Saulgau: Eugen G. Leuze Verlag, 2019, S. 813–834

Verzeichnis promotionsbezogener studentischer Arbeiten*

Die Erstellung von Aufbauten, Auswertungen, Recherchen und Versuchen erfolgten durch Aufgabenstellung und unter fachlicher Anleitung des Verfassers mit Unterstützung der folgenden studentischen Arbeiten:

- [S1] ALGAYER, A.; KUHN, T.; FRANKE, J.: Untersuchungen zur Rissentstehung in Leiterbahnen auf thermoplastischen Substraten durch Lötprozesse. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik: Masterarbeit, 2018
- [S2] ASSMANN, M.; KUHN, T.; FRANKE, J.: Auswirkungen des Temperatureintrags bei der Bestimmung der Metallisierungshaftfestigkeit für MID im Hot-Pin-Pull-Verfahren. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik: Projektarbeit, 2015
- [S3] BRÄUER, P.; KUHN, T.; FRANKE, J.: Bestimmung von Ausfallwahrscheinlichkeiten LDS-basierter Schaltungsträger bei thermomechanischer Beanspruchung unter Automotive-Anforderungen. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik: Masterarbeit, 2018
- [S4] BURMANN, S.; KUHN, T.; FRANKE, J.: Bestimmung thermomechanisch bedingter Spannungen in spritzgegossenen thermoplastischen Schaltungsträgern. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik: Projektarbeit, 2016
- [S5] DMITRIEV, A.; KUHN, T.; FRANKE, J.: Untersuchungen zur Haftfestigkeit und Mikrorissbildung von Leiterbahnen auf LDS-MID. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik: Projektarbeit, 2014

* Der Autor an zweiter (und ggf. dritter) Stelle bezeichnet den bzw. die Betreuer der studentischen Arbeit und an letztgenannter Stelle den Lehrstuhlinhaber.

- [S6] GRABHERR, M.; KUHN, T.; FRANKE, J.: Untersuchungen zur Prüfung der Haftfestigkeit an seriennahen metallisierten Strukturformen. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik: Projektarbeit, 2015
- [S7] HAGELAUER, M.; KUHN, T.; FRANKE, J.: Statistische Versuchsplanung und -durchführung zur Ermittlung der Haupteinflussfaktoren bei der Prüfung der Metallisierungshaftfestigkeit im Hot-Pin-Pull-Verfahren. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik: Bachelorarbeit, 2015
- [S8] HERZOG, C.; KUHN, T.; FRANKE, J.: Untersuchungen zur optimierten Prüfung der Leiterbahnhaftfestigkeit auf spritzgegossenen Schaltungsträgern. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik: Bachelorarbeit, 2017
- [S9] IMHOF, S.; KUHN, T.; FRANKE, J.: Evaluierung von Prüfverfahren zur Bestimmung der Metallisierungshaftung von laserdirektstrukturierten spritzgegossenen Schaltungsträgern. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik: Masterarbeit, 2018
- [S10] KRÜGELSTEIN, A.; KUHN, T.; FRANKE, J.: Evaluierung eines Pulverlacksystems zur Herstellung von Schaltungsträgern mittels Laserdirektstrukturierung. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik: Masterarbeit, 2015
- [S11] LENG, T.; KUHN, T.; REITBERGER, T.; FRANKE, J.: Evaluierung und Qualifizierung alternativer Verbindungsmedien für den Einsatz im Hot-Pin-Pull-Test. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik: Projektarbeit, 2016
- [S12] PICKEL, M.; KUHN, T.; FRANKE, J.: Schichtcharakterisierung und Evaluierung praxisnaher Prüfmethode für laserstrukturierte spritzgegossene Schaltungsträger. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik: Masterarbeit, 2014

- [S13] RAAB, J.; KUHN, T.; FRANKE, J.: Untersuchungen zur Haftfestigkeitsprüfung an Leiterstrukturen spritzgegossener Schaltungsträger. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik: Projektarbeit, 2016
- [S14] SARIGÜL, S.; KUHN, T.; FRANKE, J.: Auswahl und Evaluierung alternativer FügemitteI zur Haftfestigkeitsprüfung metallisierter Strukturen auf thermoplastischen Substraten. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik: Bachelorarbeit, 2015
- [S15] SCHARRER, M.; KUHN, T.; FRANKE, J.: Hot Pin Pull Test – Untersuchungen zum Einfluss zentraler Prozessparameter auf das Messergebnis. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik: Projektarbeit, 2014
- [S16] SCHMIDT, M.; KUHN, T.; FRANKE, J.: Untersuchungen zur Rissentstehung von laserdirektstrukturierten Leiterbahnen beim Reflowlöten. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik: Projektarbeit, 2016
- [S17] YU, T.; KUHN, T.; FRANKE, J.: Untersuchungen zum Einfluss der Schichtraueheit auf die Haftfestigkeit der Metallisierung bei LDS-MID. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik: Projektarbeit, 2015

Reihenübersicht

Koordination der Reihe (Stand 2019):

Geschäftsstelle Maschinenbau, Dr.-Ing. Oliver Kreis, www.mb.fau.de/diss/

Im Rahmen der Reihe sind bisher die nachfolgenden Bände erschienen.

Band 1 – 52

Fertigungstechnik – Erlangen

ISSN 1431-6226

Carl Hanser Verlag, München

Band 53 – 307

Fertigungstechnik – Erlangen

ISSN 1431-6226

Meisenbach Verlag, Bamberg

ab Band 308

FAU Studien aus dem Maschinenbau

ISSN 2625-9974

FAU University Press, Erlangen

Die Zugehörigkeit zu den jeweiligen Lehrstühlen ist wie folgt gekennzeichnet:

Lehrstühle:

FAPS	Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
KTmflk	Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
LFT	Lehrstuhl für Fertigungstechnologie
LPT	Lehrstuhl für Photonische Technologien

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

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

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

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

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

Band 6: Rudolf Nuss
Untersuchungen zur Bearbeitungsquali-
tät im Fertigungssystem Laserstrahl-
schneiden
LFT, 206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15783-2.

Band 7: Wolfgang Scholz
Modell zur datenbankgestützten Planung
automatisierter Montageanlagen
FAPS, 194 Seiten, 89 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15825-1.

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

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

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

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

Band 12: Gerhard Kleineidam
CAD/CAP: Rechnergestützte Montage-
feinplanung
FAPS, 203 Seiten, 107 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16112-0.

Band 13: Frank Vollertsen
Pulvermetallurgische Verarbeitung eines
übereutektoiden verschleißfesten Stahls
LFT, XIII u. 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tab.
1990. ISBN 3-446-16133-3.

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

Band 15: Uwe Geißler
Material- und Datenfluß in einer flexiblen
Blechbearbeitungszelle
LFT, 124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16358-1.

Band 16: Frank Oswald Hake
Entwicklung eines rechnergestützten
Diagnosesystems für automatisierte
Montagezellen
FAPS, XIV u. 166 Seiten, 77 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16428-6.

Band 17: Herbert Reichel
Optimierung der Werkzeugbereitstellung
durch rechnergestützte
Arbeitsfolgenbestimmung
FAPS, 198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16453-7.

Band 18: Josef Scheller
Modellierung und Einsatz von
Softwaresystemen für rechnergeführte
Montagezellen
FAPS, 198 Seiten, 65 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16454-5.

Band 19: Arnold vom Ende
Untersuchungen zum Biegeumforme mit
elastischer Matrizze
LFT, 166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16493-6.

Band 20: Joachim Schmid
Beitrag zum automatisierten Bearbeiten
von Keramikguß mit Industrierobotern
FAPS, XIV u. 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tab.
1991. ISBN 3-446-16560-6.

Band 21: Egon Sommer
Multiprozessorsteuerung für
kooperierende Industrieroboter in
Montagezellen
FAPS, 188 Seiten, 102 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-17062-6.

Band 22: Georg Geyer
Entwicklung problemspezifischer
Verfahrensketten in der Montage
FAPS, 192 Seiten, 112 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16552-5.

Band 23: Rainer Flohr
Beitrag zur optimalen
Verbindungstechnik in der
Oberflächenmontage (SMT)
FAPS, 186 Seiten, 79 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16568-1.

Band 24: Alfons Rief
Untersuchungen zur Verfahrensfolge
Laserstrahlschneiden und -schweißen
in der Rohkarosseriefertigung
LFT, VI u. 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab.
1991. ISBN 3-446-16593-2.

Band 25: Christoph Thim
Rechnerunterstützte Optimierung
von Materialflußstrukturen in der
Elektronikmontage durch Simulation
FAPS, 188 Seiten, 74 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17118-5.

Band 26: Roland Müller
CO₂-Laserstrahlschneiden von
kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen
LFT, 141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tab. 1992.
ISBN 3-446-17104-5.

Band 27: Günther Schäfer
Integrierte Informationsverarbeitung
bei der Montageplanung
FAPS, 195 Seiten, 76 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17117-7.

Band 28: Martin Hoffmann
Entwicklung einer
CAD/CAM-Prozesskette für die
Herstellung von Blechbiegeteilen
LFT, 149 Seiten, 89 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17154-1.

Band 29: Peter Hoffmann
Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden
und -schweißen: Prozeßführung und
Systemtechnik in der 3D-Laserstrahlbear-
beitung von Blechformteilen
LFT, 186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tab. 1992.
ISBN 3-446-17153-3.

Band 30: Olaf Schrödel
Flexible Werkstattsteuerung mit
objektorientierten Softwarestrukturen
FAPS, 180 Seiten, 84 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17242-4.

Band 31: Hubert Reinisch
Planungs- und Steuerungswerkzeuge
zur impliziten Geräteprogrammierung
in Roboterzellen
FAPS, XI u. 212 Seiten, 112 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17380-3.

Band 32: Brigitte Bärnreuther
Ein Beitrag zur Bewertung des Kommuni-
kationsverhaltens von Automatisierungs-
geräten in flexiblen Produktionszellen
FAPS, XI u. 179 Seiten, 71 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17451-6.

Band 33: Joachim Hutfless
Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik
in der Strahlführung einer
CO₂-Hochleistungslaseranlage
LFT, 175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tab. 1993.
ISBN 3-446-17532-6.

Band 34: Uwe Günzel
Entwicklung und Einsatz eines Simula-
tionsverfahrens für operative und
strategische Probleme der
Produktionsplanung und -steuerung
FAPS, XIV u. 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab.
1993. ISBN 3-446-17604-7.

Band 35: Bertram Ehmann
Operatives Fertigungscontrolling durch
Optimierung auftragsbezogener Bearbei-
tungsabläufe in der Elektronikfertigung
FAPS, XV u. 167 Seiten, 114 Bilder. 1993.
ISBN 3-446-17658-6.

Band 36: Harald Kolléra
Entwicklung eines benutzerorientierten
Werkstattprogrammiersystems für das
Laserstrahlschneiden
LFT, 129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tab. 1993.
ISBN 3-446-17719-1.

Band 37: Stephanie Abels
Modellierung und Optimierung von
Montageanlagen in einem integrierten
Simulationssystem
FAPS, 188 Seiten, 88 Bilder. 1993.
ISBN 3-446-17731-0.

Band 38: Robert Schmidt-Hebbel
Laserstrahlbohren durchflußbestimmen-
der Durchgangslöcher
LFT, 145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tab. 1993.
ISBN 3-446-17778-7.

Band 39: Norbert Lutz
Oberflächenfeinbearbeitung
keramischer Werkstoffe mit
XeCl-Excimerlaserstrahlung
LFT, 187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tab. 1994.
ISBN 3-446-17970-4.

Band 40: Konrad Grampp
Rechnerunterstützung bei Test und
Schulung an Steuerungssoftware von
SMD-Bestücklinien
FAPS, 178 Seiten, 88 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18173-3.

Band 41: Martin Koch
Wissensbasierte Unterstützung der
Angebotsbearbeitung in der
Investitionsgüterindustrie
FAPS, 169 Seiten, 68 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18174-1.

Band 42: Armin Gropp
Anlagen- und Prozeßdiagnostik beim
Schneiden mit einem gepulsten
Nd:YAG-Laser
LFT, 160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18241-1.

Band 43: Werner Heckel
Optische 3D-Konturerfassung und
on-line Biegewinkelmessung mit
dem Lichtschnittverfahren
LFT, 149 Seiten, 43 Bilder, 11 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18243-8.

Band 44: Armin Rothhaupt
Modulares Planungssystem zur
Optimierung der Elektronikfertigung
FAPS, 180 Seiten, 101 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18307-8.

Band 45: Bernd Zöllner
Adaptive Diagnose in der
Elektronikproduktion
FAPS, 195 Seiten, 74 Bilder, 3 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18308-6.

Band 46: Bodo Vormann
Beitrag zur automatisierten
Handhabungsplanung komplexer
Blechbiegeteile
LFT, 126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18345-0.

Band 47: Peter Schnepf
Zielkostenorientierte Montageplanung
FAPS, 144 Seiten, 75 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18397-3.

Band 48: Rainer Klotzbücher
Konzept zur rechnerintegrierten
Materialversorgung in flexiblen
Fertigungssystemen
FAPS, 156 Seiten, 62 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18412-0.

Band 49: Wolfgang Greska
Wissensbasierte Analyse und
Klassifizierung von Blechteilen
LFT, 144 Seiten, 96 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18462-7.

Band 50: Jörg Franke
Integrierte Entwicklung neuer
Produkt- und Produktionstechnologien
für räumliche spritzgegossene
Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 196 Seiten, 86 Bilder, 4 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18448-1.

Band 51: Franz-Josef Zeller
Sensorplanung und schnelle
Sensorregelung für Industrieroboter
FAPS, 190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18601-8.

Band 52: Michael Solvie
Zeitbehandlung und
Multimedia-Unterstützung in
Feldkommunikationssystemen
FAPS, 200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tab. 1996.
ISBN 3-446-18607-7.

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

Band 54: Thomas Rebhahn
Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung
mit Excimerlasern - Systemkomponenten
und Verfahrensoptimierungen
LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tab. 1996.
ISBN 3-87525-075-3.

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

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

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

Band 58: Markus Schultz
Fertigungsqualität beim
3D-Laserstrahlschweißen von
Blechformteilen
LFT, 165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-080-X.

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

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

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

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

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

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

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

Band 66: Wolfgang Blöchl
Erweiterte Informationsbereitstellung
an offenen CNC-Steuerungen zur
Prozeß- und Programmoptimierung
FAPS, 168 Seiten, 96 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-091-5.

Band 67: Klaus-Uwe Wolf
Verbesserte Prozeßführung und
Prozeßplanung zur Leistungs- und
Qualitätssteigerung beim
Spulenwickeln
FAPS, 186 Seiten, 125 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-092-3.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Band 80: Sorin Niederkorn
Meßeinrichtung zur Untersuchung
der Wirkflächenreibung bei umformtech-
nischen Prozessen
LFT, 99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-105-9.

Band 81: Stefan Schubert
Regelung der Fokusslage beim Schweißen
mit CO₂-Hochleistungslasern unter
Einsatz von adaptiven Optiken
LFT, 140 Seiten, 64 Bilder, 3 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-106-7.

Band 82: Armando Walter Colombo
Development and Implementation of
Hierarchical Control Structures of
Flexible Production Systems Using High
Level Petri Nets
FAPS, 216 Seiten, 86 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-109-1.

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

Band 84: Knuth Götz
Modelle und effiziente Modellbildung
zur Qualitätssicherung in der
Elektronikproduktion
FAPS, 212 Seiten, 129 Bilder, 24 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-112-1.

Band 85: Ralf Luchs
Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT FAPS, 176 Seiten, 126 Bilder, 30 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-113-7.

Band 86: Frank Pöhlau
Entscheidungsgrundlagen zur Einführung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID) FAPS, 144 Seiten, 99 Bilder. 1999.
ISBN 3-87525-114-8.

Band 87: Roland T. A. Kals
Fundamentals on the miniaturization of sheet metal working processes LFT, 128 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-115-6.

Band 88: Gerhard Luhn
Implizites Wissen und technisches Handeln am Beispiel der Elektronikproduktion FAPS, 252 Seiten, 61 Bilder, 1 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-116-4.

Band 89: Axel Sprenger
Adaptives Streckbiegen von Aluminium-Strangpreßprofilen LFT, 114 Seiten, 63 Bilder, 4 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-117-2.

Band 90: Hans-Jörg Pucher
Untersuchungen zur Prozeßfolge Umformen, Bestücken und Laserstrahllöten von Mikrokontakten LFT, 158 Seiten, 69 Bilder, 9 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-119-9.

Band 91: Horst Arnet
Profilbiegen mit kinematischer Gestalterzeugung LFT, 128 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-120-2.

Band 92: Doris Schubart
Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung beim Abtragen mit CO₂-Laserstrahlung LFT, 133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-122-9.

Band 93: Adrianus L. P. Coremans
Laserstrahlsintern von Metallpulver - Prozeßmodellierung, Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahlgesinterter Metallkörper LFT, 184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-124-5.

Band 94: Hans-Martin Biehler
Optimierungskonzepte für Qualitätsdatenverarbeitung und Informationsbereitstellung in der Elektronikfertigung FAPS, 194 Seiten, 105 Bilder. 1999.
ISBN 3-87525-126-1.

Band 95: Wolfgang Becker
Oberflächen Ausbildung und tribologische Eigenschaften excimerlaserstrahlbearbeiteter Hochleistungskeramiken LFT, 175 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-127-X.

Band 96: Philipp Hein
Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren: Modellierung, Prozeßauslegung und Prozeßführung LFT, 129 Seiten, 57 Bilder, 7 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-128-8.

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

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

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

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

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

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

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

Band 104: Harald Rottbauer
Modulares Planungswerkzeug zum
Produktionsmanagement in der
Elektronikproduktion
FAPS, 166 Seiten, 106 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-139-3.
Band 111: Jürgen Göhringer
Integrierte Telediagnose via Internet
zum effizienten Service von
Produktionssystemen
FAPS, 178 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-147-4.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Band 123: Mark Geisel
Prozeßkontrolle und -steuerung beim
Laserstrahlschweißen mit den Methoden
der nichtlinearen Dynamik
LFT, 135 Seiten, 46 Bilder, 2 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-180-6.

Band 124: Gerd Eßer
Laserstrahlunterstützte Erzeugung
metallischer Leiterstrukturen auf
Thermoplastsubstraten für die
MID-Technik
LFT, 148 Seiten, 60 Bilder, 6 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-171-7.

Band 125: Marc Fleckenstein
Qualität laserstrahl-gefügter
Mikroverbindungen elektronischer
Kontakte
LFT, 159 Seiten, 77 Bilder, 7 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-170-9.

Band 126: Stefan Kaufmann
Grundlegende Untersuchungen zum
Nd:YAG- Laserstrahlfügen von Silizium
für Komponenten der Optoelektronik
LFT, 159 Seiten, 100 Bilder, 6 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-172-5.

Band 127: Thomas Fröhlich
Simultanes Löten von Anschlußkontak-
ten elektronischer Bauelemente mit
Diodenlaserstrahlung
LFT, 143 Seiten, 75 Bilder, 6 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-186-5.

Band 128: Achim Hofmann
Erweiterung der Formgebungsgrenzen
beim Umformen von
Aluminiumwerkstoffen durch den Ein-
satz prozessangepasster Platinen
LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 4 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-182-2.

Band 129: Ingo Kriebitzsch
3 - D MID Technologie in der
Automobilelektronik
FAPS, 129 Seiten, 102 Bilder, 10 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-169-5.

Band 130: Thomas Pohl
Fertigungsqualität und Umformbarkeit
laserstrahlgeschweißter Formplatinen
aus Aluminiumlegierungen
LFT, 133 Seiten, 93 Bilder, 12 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-173-3.

Band 131: Matthias Wenk
Entwicklung eines konfigurierbaren
Steuerungssystems für die flexible
Sensorführung von Industrierobotern
FAPS, 167 Seiten, 85 Bilder, 1 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-174-1.

Band 132: Matthias Negendanck
Neue Sensorik und Aktorik für
Bearbeitungsköpfe zum
Laserstrahlschweißen
LFT, 116 Seiten, 60 Bilder, 14 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-184-9.

Band 133: Oliver Kreis
Integrierte Fertigung - Verfahrensin-
tegration durch Innenhochdruck-Umfor-
men, Trennen und Laserstrahlschweißen
in einem Werkzeug sowie ihre tele- und
multimediale Präsentation
LFT, 167 Seiten, 90 Bilder, 43 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-176-8.

Band 134: Stefan Trautner
Technische Umsetzung produktbezoge-
ner Instrumente der Umweltpolitik bei
Elektro- und Elektronikgeräten
FAPS, 179 Seiten, 92 Bilder, 11 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-177-6.

Band 135: Roland Meier
Strategien für einen produktorientierten
Einsatz räumlicher spritzgegossener
Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-178-4.

Band 136: Jürgen Wunderlich
Kostensimulation - Simulationsbasierte
Wirtschaftlichkeitsregelung komplexer
Produktionssysteme
FAPS, 202 Seiten, 119 Bilder, 17 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-179-2.

Band 137: Stefan Novotny
Innenhochdruck-Umformen von Blechen
aus Aluminium- und Magnesiumlegie-
rungen bei erhöhter Temperatur
LFT, 132 Seiten, 82 Bilder, 6 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-185-7.

Band 138: Andreas Licha
Flexible Montageautomatisierung zur
Komplettmontage flächenhafter Produkt-
strukturen durch kooperierende
Industrieroboter
FAPS, 158 Seiten, 87 Bilder, 8 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-189-X.

Band 139: Michael Eisenbarth
Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und
Verbindungstechnik für mechatronische
Baugruppen
FAPS, 207 Seiten, 141 Bilder, 9 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-190-3.

Band 140: Frank Christoph
Durchgängige simulationsgestützte
Planung von Fertigungseinrichtungen der
Elektronikproduktion
FAPS, 187 Seiten, 107 Bilder, 9 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-191-1.

Band 141: Hinnerk Hagenah
Simulationsbasierte Bestimmung der
zu erwartenden Maßhaltigkeit für das
Blechbiegen
LFT, 131 Seiten, 36 Bilder, 26 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-192-X.

Band 142: Ralf Eckstein
Scherschneiden und Biegen metallischer
Kleinstteile - Materialeinfluss und
Materialverhalten
LFT, 148 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-193-8.

Band 143: Frank H. Meyer-Pittroff
Excimerlaserstrahlbiegen dünner
metallischer Folien mit homogener
Lichtlinie
LFT, 138 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-196-2.

Band 144: Andreas Kach
Rechnergestützte Anpassung von
Laserstrahlschneidbahnen
an Bauteilabweichungen
LFT, 139 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-197-0.

Band 145: Stefan Hierl
System- und Prozesstechnik für das
simultane Löten mit Diodenlaserstrahlung
von elektronischen Bauelementen
LFT, 124 Seiten, 66 Bilder, 4 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-198-9.

Band 146: Thomas Neudecker
Tribologische Eigenschaften keramischer
Blechumformwerkzeuge- Einfluss einer
Oberflächenendbearbeitung mittels
Excimerlaserstrahlung
LFT, 166 Seiten, 75 Bilder, 26 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-200-4.

Band 147: Ulrich Wenger
Prozessoptimierung in der Wickeltechnik
durch innovative maschinenbauliche und
regelungstechnische Ansätze
FAPS, 132 Seiten, 88 Bilder, 0 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-203-9.

Band 148: Stefan Slama
Effizienzsteigerung in der Montage durch
marktorientierte Montagestrukturen und
erweiterte Mitarbeiterkompetenz
FAPS, 188 Seiten, 125 Bilder, 0 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-204-7.

Band 149: Thomas Wurm
Laserstrahljustieren mittels Aktoren-Entwicklung
von Konzepten und Methoden für die rechnerunterstützte Modellierung
und Optimierung von komplexen
Aktorsystemen in der Mikrotechnik
LFT, 122 Seiten, 51 Bilder, 9 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-206-3.

Band 150: Martino Celeghini
Wirkmedienbasierte Blechumformung:
Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss
von Werkstoff und Bauteilgeometrie
LFT, 146 Seiten, 77 Bilder, 6 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-207-1.

Band 151: Ralph Hohenstein
Entwurf hochdynamischer Sensor- und
Regelsysteme für die adaptive
Laserbearbeitung
LFT, 282 Seiten, 63 Bilder, 16 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-210-1.

Band 152: Angelika Hutterer
Entwicklung prozessüberwachender
Regelkreise für flexible
Formgebungsprozesse
LFT, 149 Seiten, 57 Bilder, 2 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-212-8.

Band 153: Emil Egerer
Massivumformen metallischer Kleinstteile
bei erhöhter Prozesstemperatur
LFT, 158 Seiten, 87 Bilder, 10 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-213-6.

Band 154: Rüdiger Holzmann
Strategien zur nachhaltigen Optimierung
von Qualität und Zuverlässigkeit in
der Fertigung hochintegrierter
Flachbaugruppen
FAPS, 186 Seiten, 99 Bilder, 19 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-217-9.

Band 155: Marco Nock
Biegeumformen mit
Elastomerwerkzeugen Modellierung,
Prozessauslegung und Abgrenzung des
Verfahrens am Beispiel des Rohrbiegens
LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 13 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-218-7.

Band 156: Frank Niebling
Qualifizierung einer Prozesskette zum
Laserstrahlsintern metallischer Bauteile
LFT, 148 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-219-5.

Band 157: Markus Meiler
Großserientauglichkeit trockenschmier-
stoffbeschichteter Aluminiumbleche im
Presswerk Grundlegende Untersuchun-
gen zur Tribologie, zum Umformverhal-
ten und Bauteilversuche
LFT, 104 Seiten, 57 Bilder, 21 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-221-7.

Band 158: Agus Sutanto
Solution Approaches for Planning of
Assembly Systems in Three-Dimensional
Virtual Environments
FAPS, 169 Seiten, 98 Bilder, 3 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-220-9.

Band 159: Matthias Boiger
Hochleistungssysteme für die Fertigung
elektronischer Baugruppen auf der Basis
flexibler Schaltungsträger
FAPS, 175 Seiten, 111 Bilder, 8 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-222-5.

Band 160: Matthias Pitz
Laserunterstütztes Biegen höchstfester
Mehrphasenstähle
LFT, 120 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-223-3.

Band 161: Meik Vahl
Beitrag zur gezielten Beeinflussung des
Werkstoffflusses beim Innenhochdruck-
Umformen von Blechen
LFT, 165 Seiten, 94 Bilder, 15 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-224-1.

Band 162: Peter K. Kraus
Plattformstrategien - Realisierung
einer varianz- und kostenoptimierten
Wertschöpfung
FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 0 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-226-8.

Band 163: Adrienn Cser
Laserstrahlschmelzabtrag - Prozessana-
lyse und -modellierung
LFT, 146 Seiten, 79 Bilder, 3 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-227-6.

Band 164: Markus C. Hahn
Grundlegende Untersuchungen zur
Herstellung von Leichtbauverbundstruk-
turen mit Aluminiumschaumkern
LFT, 143 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-228-4.

Band 165: Gordana Michos
Mechatronische Ansätze zur Optimie-
rung von Vorschubachsen
FAPS, 146 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-230-6.

Band 166: Markus Stark
Auslegung und Fertigung hochpräziser
Faser-Kollimator-Arrays
LFT, 158 Seiten, 115 Bilder, 11 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-231-4.

Band 167: Yurong Zhou
Kollaboratives Engineering Management
in der integrierten virtuellen Entwicklung
der Anlagen für die Elektronikproduktion
FAPS, 156 Seiten, 84 Bilder, 6 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-232-2.

Band 168: Werner Enser
Neue Formen permanenter und lösbarer elektrischer Kontaktierungen für mechatronische Baugruppen
FAPS, 190 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-233-0.

Band 169: Katrin Melzer
Integrierte Produktpolitik bei elektrischen und elektronischen Geräten zur Optimierung des Product-Life-Cycle
FAPS, 155 Seiten, 91 Bilder, 17 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-234-9.

Band 170: Alexander Putz
Grundlegende Untersuchungen zur Erfassung der realen Vorspannung von armierten Kaltfließpresswerkzeugen mittels Ultraschall
LFT, 137 Seiten, 71 Bilder, 15 Tab. 2006.
ISBN 3-87525-237-3.

Band 171: Martin Prechtel
Automatisiertes Schichtverfahren für metallische Folien - System- und Prozesstechnik
LFT, 154 Seiten, 45 Bilder, 7 Tab. 2006.
ISBN 3-87525-238-1.

Band 172: Markus Meidert
Beitrag zur deterministischen Lebensdauerabschätzung von Werkzeugen der Kaltmassivumformung
LFT, 131 Seiten, 78 Bilder, 9 Tab. 2006.
ISBN 3-87525-239-X.

Band 173: Bernd Müller
Robuste, automatisierte Montagesysteme durch adaptive Prozessführung und montageübergreifende Fehlerprävention am Beispiel flächiger Leichtbauteile
FAPS, 147 Seiten, 77 Bilder, 0 Tab. 2006.
ISBN 3-87525-240-3.

Band 174: Alexander Hofmann
Hybrides Laserdurchstrahlsschweißen von Kunststoffen
LFT, 136 Seiten, 72 Bilder, 4 Tab. 2006.
ISBN 978-3-87525-243-9.

Band 175: Peter Wölflick
Innovative Substrate und Prozesse mit feinsten Strukturen für bleifreie Mechatronik-Anwendungen
FAPS, 177 Seiten, 148 Bilder, 24 Tab. 2006.
ISBN 978-3-87525-246-0.

Band 176: Attila Komlodi
Detection and Prevention of Hot Cracks during Laser Welding of Aluminium Alloys Using Advanced Simulation Methods
LFT, 155 Seiten, 89 Bilder, 14 Tab. 2006.
ISBN 978-3-87525-248-4.

Band 177: Uwe Popp
Grundlegende Untersuchungen zum Laserstrahlstrukturieren von Kaltmassivumformwerkzeugen
LFT, 140 Seiten, 67 Bilder, 16 Tab. 2006.
ISBN 978-3-87525-249-1.

Band 178: Veit Rückel
Rechnergestützte Ablaufplanung und Bahngenerierung Für kooperierende Industrieroboter
FAPS, 148 Seiten, 75 Bilder, 7 Tab. 2006.
ISBN 978-3-87525-250-7.

Band 179: Manfred Dirscherl
Nicht-thermische Mikrojustiertechnik mittels ultrakurzer Laserpulse
LFT, 154 Seiten, 69 Bilder, 10 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-251-4.

Band 180: Yong Zhuo
Entwurf eines rechnergestützten integrierten Systems für Konstruktion und Fertigungsplanung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3D-MID)
FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 5 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-253-8.

Band 181: Stefan Lang
Durchgängige Mitarbeiterinformation zur Steigerung von Effizienz und Prozesssicherheit in der Produktion
FAPS, 172 Seiten, 93 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-257-6.

Band 182: Hans-Joachim Krauß
Laserstrahlinduzierte Pyrolyse präkeramischer Polymere
LFT, 171 Seiten, 100 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-258-3.

Band 183: Stefan Junker
Technologien und Systemlösungen für die flexibel automatisierte Bestückung permanent erregter Läufer mit oberflächenmontierten Dauermagneten
FAPS, 173 Seiten, 75 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-259-0.

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

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

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

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

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

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

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

Band 191: Ralf Völkl
Stochastische Simulation zur Werkzeug-
lebensdaueroptimierung und Präzisions-
fertigung in der Kaltmassivumformung
LFT, 178 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-272-9.

Band 192: Massimo Tolazzi
Innenhochdruck-Umformen verstärkter
Blech-Rahmenstrukturen
LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 7 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-273-6.

Band 193: Cornelia Hoff
Untersuchung der Prozesseinflussgrößen
beim Presshärten des höchstfesten
Vergütungsstahls 22MnB5
LFT, 133 Seiten, 92 Bilder, 5 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-275-0.

Band 194: Christian Alvarez
Simulationsgestützte Methoden zur
effizienten Gestaltung von Lötprozessen
in der Elektronikproduktion
FAPS, 149 Seiten, 86 Bilder, 8 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-277-4.

Band 195: Andreas Kunze
Automatisierte Montage von makrome-
chatronischen Modulen zur flexiblen
Integration in hybride
Pkw-Bordnetzsysteme
FAPS, 160 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-278-1.

Band 196: Wolfgang Hußnätter
Grundlegende Untersuchungen zur
experimentellen Ermittlung und zur
Modellierung von Fließortkurven bei
erhöhten Temperaturen
LFT, 152 Seiten, 73 Bilder, 21 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-279-8.

Band 197: Thomas Bigl
Entwicklung, angepasste Herstellungsverfahren
und erweiterte Qualitätssicherung
von einsetzungsgerechten elektronischen
Baugruppen
FAPS, 175 Seiten, 107 Bilder, 14 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-280-4.

Band 198: Stephan Roth
Grundlegende Untersuchungen zum
Excimerlaserstrahl-Abtragen unter
Flüssigkeitsfilmen
LFT, 113 Seiten, 47 Bilder, 14 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-281-1.

Band 199: Artur Giera
Prozesstechnische Untersuchungen
zum Rührreibschweißen metallischer
Werkstoffe
LFT, 179 Seiten, 104 Bilder, 36 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-282-8.

Band 200: Jürgen Lechler
Beschreibung und Modellierung
des Werkstoffverhaltens von
presshärtbaren Bor-Manganstählen
LFT, 154 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-286-6.

Band 201: Andreas Blankl
Untersuchungen zur Erhöhung der
Prozessrobustheit bei der Innenhoch-
druck-Umformung von flächigen Halb-
zeugen mit vor- bzw. nachgeschalteten
Laserstrahlfügeoperationen
LFT, 120 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-287-3.

Band 202: Andreas Schaller
Modellierung eines nachfrageorientierten
Produktionskonzeptes für mobile
Telekommunikationsgeräte
FAPS, 120 Seiten, 79 Bilder, 0 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-289-7.

Band 203: Claudius Schimpf
Optimierung von Zuverlässigkeitsunter-
suchungen, Prüfabläufen und Nachar-
beitsprozessen in der Elektronikproduk-
tion
FAPS, 162 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-290-3.

Band 204: Simon Dietrich
Sensoriken zur Schwerpunktslagebestim-
mung der optischen Prozessemissionen
beim Laserstrahl-tiefschweißen
LFT, 138 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-292-7.

Band 205: Wolfgang Wolf
Entwicklung eines agentenbasierten
Steuerungssystems zur
Materialflussorganisation im
wandelbaren Produktionsumfeld
FAPS, 167 Seiten, 98 Bilder. 2009.
ISBN 978-3-87525-293-4.

Band 206: Steffen Polster
Laserdurchstrahlungsschweißen
transparenter Polymerbauteile
LFT, 160 Seiten, 92 Bilder, 13 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-294-1.

Band 207: Stephan Manuel Dörfler
Rührreibschweißen von walzplattiertem
Halbzeug und Aluminiumblech zur
Herstellung flächiger Aluminiumschaum-
Sandwich-Verbundstrukturen
LFT, 190 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-295-8.

Band 208: Uwe Vogt
Seriennahe Auslegung von Aluminium
Tailored Heat Treated Blanks
LFT, 151 Seiten, 68 Bilder, 26 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-296-5.

Band 209: Till Laumann
Qualitative und quantitative Bewertung
der Crashtauglichkeit von höchstfesten
Stählen
LFT, 117 Seiten, 69 Bilder, 7 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-299-6.

Band 210: Alexander Diehl
Größeneffekte bei Biegeprozessen-
Entwicklung einer Methodik zur
Identifikation und Quantifizierung
LFT, 180 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-302-3.

Band 211: Detlev Staud
Effiziente Prozesskettenauslegung für das
Umformen lokal wärmebehandelter und
geschweißter Aluminiumbleche
LFT, 164 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-303-0.

Band 212: Jens Ackermann
Prozesssicherung beim Laserdurchstrahl-
schweißen thermoplastischer Kunststoffe
LPT, 129 Seiten, 74 Bilder, 13 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-305-4.

Band 213: Stephan Weidel
Grundlegende Untersuchungen zum
Kontaktzustand zwischen Werkstück
und Werkzeug bei umformtechnischen
Prozessen unter tribologischen
Gesichtspunkten
LFT, 144 Seiten, 67 Bilder, 11 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-307-8.

Band 214: Stefan Geißdörfer
Entwicklung eines mesoskopischen
Modells zur Abbildung von Größeneffek-
ten in der Kaltmassivumformung mit
Methoden der FE-Simulation
LFT, 133 Seiten, 83 Bilder, 11 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-308-5.

Band 215: Christian Matzner
Konzeption produktspezifischer Lösun-
gen zur Robustheitssteigerung elektroni-
scher Systeme gegen die Einwirkung von
Betaung im Automobil
FAPS, 165 Seiten, 93 Bilder, 14 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-309-2.

Band 216: Florian Schüßler
Verbindungs- und Systemtechnik für
thermisch hochbeanspruchte und
miniaturisierte elektronische Baugruppen
FAPS, 184 Seiten, 93 Bilder, 18 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-310-8.

Band 217: Massimo Cojutti
Strategien zur Erweiterung der Prozess-
grenzen bei der Innhochdruck-Umform-
ung von Rohren und Blechpaaren
LFT, 125 Seiten, 56 Bilder, 9 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-312-2.

Band 218: Raoul Plettke
Mehrkriterielle Optimierung komplexer
Aktorsysteme für das Laserstrahljustieren
LFT, 152 Seiten, 25 Bilder, 3 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-315-3.

Band 219: Andreas Dobroschke
Flexible Automatisierungslösungen für
die Fertigung wickeltechnischer Produkte
FAPS, 184 Seiten, 109 Bilder, 18 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-317-7.

Band 220: Azhar Zam
Optical Tissue Differentiation for
Sensor-Controlled Tissue-Specific
Laser Surgery
LPT, 99 Seiten, 45 Bilder, 8 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-318-4.

Band 221: Michael Rösch
Potenziale und Strategien zur Optimie-
rung des Schablonendruckprozesses in
der Elektronikproduktion
FAPS, 192 Seiten, 127 Bilder, 19 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-319-1.

Band 222: Thomas Rechtenwald
Quasi-isothermes Laserstrahlintern von
Hochtemperatur-Thermoplasten - Eine
Betrachtung werkstoff-prozessspezifi-
scher Aspekte am Beispiel PEEK
LPT, 150 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-320-7.

Band 223: Daniel Craiovan
Prozesse und Systemlösungen für die
SMT-Montage optischer Bauelemente auf
Substrate mit integrierten Lichtwellenlei-
tern
FAPS, 165 Seiten, 85 Bilder, 8 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-324-5.

Band 224: Kay Wagner
Beanspruchungsangepasste
Kaltmassivumformwerkzeuge durch
lokal optimierte Werkzeugoberflächen
LFT, 147 Seiten, 103 Bilder, 17 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-325-2.

Band 225: Martin Brandhuber
Verbesserung der Prognosegüte des Ver-
sagens von Punktschweißverbindungen
bei höchstfesten Stahlgüten
LFT, 155 Seiten, 91 Bilder, 19 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-327-6.

Band 226: Peter Sebastian Feuser
Ein Ansatz zur Herstellung von
pressgehärteten Karosseriekomponenten
mit maßgeschneiderten mechanischen
Eigenschaften: Temperierte Umform-
werkzeuge. Prozessfenster, Prozesssimu-
lation und funktionale Untersuchung
LFT, 195 Seiten, 97 Bilder, 60 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-328-3.

Band 227: Murat Arbak
Material Adapted Design of Cold Forging
Tools Exemplified by Powder
Metallurgical Tool Steels and Ceramics
LFT, 109 Seiten, 56 Bilder, 8 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-330-6.

Band 228: Indra Pitz
Beschleunigte Simulation des
Laserstrahlumformens von
Aluminiumblechen
LPT, 137 Seiten, 45 Bilder, 27 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-333-7.

Band 229: Alexander Grimm
Prozessanalyse und -überwachung des
Laserstrahlhartlötens mittels optischer
Sensorik
LPT, 125 Seiten, 61 Bilder, 5 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-334-4.

Band 230: Markus Kaupper
Biegen von höhenfesten Stahlblechwerk-
stoffen - Umformverhalten und Grenzen
der Biegebarkeit
LFT, 160 Seiten, 57 Bilder, 10 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-339-9.

Band 231: Thomas Kroiß
Modellbasierte Prozessauslegung für
die Kaltmassivumformung unter
Brücksichtigung der Werkzeug- und
Pressenauffederung
LFT, 169 Seiten, 50 Bilder, 19 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-341-2.

Band 232: Christian Goth
Analyse und Optimierung der Entwick-
lung und Zuverlässigkeit räumlicher
Schaltungsträger (3D-MID)
FAPS, 176 Seiten, 102 Bilder, 22 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-340-5.

Band 233: Christian Ziegler
Ganzheitliche Automatisierung
mechatronischer Systeme in der Medizin
am Beispiel Strahlentherapie
FAPS, 170 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-342-9.

Band 234: Florian Albert
Automatisiertes Laserstrahllöten
und -reparaturlöten elektronischer
Baugruppen
LPT, 127 Seiten, 78 Bilder, 11 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-344-3.

Band 235: Thomas Stöhr
Analyse und Beschreibung des
mechanischen Werkstoffverhaltens
von presshärtbaren Bor-Manganstählen
LFT, 118 Seiten, 74 Bilder, 18 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-346-7.

Band 236: Christian Kägeler
Prozessdynamik beim
Laserstrahlschweißen verzinkter
Stahlbleche im Überlappstoß
LPT, 145 Seiten, 80 Bilder, 3 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-347-4.

Band 237: Andreas Sulzberger
Seriennahe Auslegung der Prozesskette
zur wärmeunterstützten Umformung
von Aluminiumblechwerkstoffen
LFT, 153 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-349-8.

Band 238: Simon Opel
Herstellung prozessangepasster
Halbzeuge mit variabler Blechdicke
durch die Anwendung von Verfahren
der Blechmassivumformung
LFT, 165 Seiten, 108 Bilder, 27 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-350-4.

Band 239: Rajesh Kanawade
In-vivo Monitoring of Epithelium
Vessel and Capillary Density for the
Application of Detection of Clinical
Shock and Early Signs of Cancer Develop-
ment
LPT, 124 Seiten, 58 Bilder, 15 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-351-1.

Band 240: Stephan Busse
Entwicklung und Qualifizierung eines
Schneidclinchverfahrens
LFT, 119 Seiten, 86 Bilder, 20 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-352-8.

Band 241: Karl-Heinz Leitz
Mikro- und Nanostrukturierung mit kurz
und ultrakurz gepulster Laserstrahlung
LPT, 154 Seiten, 71 Bilder, 9 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-355-9.

Band 242: Markus Michl
Webbasierte Ansätze zur ganzheitlichen
technischen Diagnose
FAPS, 182 Seiten, 62 Bilder, 20 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-356-6.

Band 243: Vera Sturm
Einfluss von Chargenschwankungen
auf die Verarbeitungsgrenzen von
Stahlwerkstoffen
LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 9 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-357-3.

Band 244: Christian Neudel
Mikrostrukturelle und mechanisch-technologische Eigenschaften
widerstandspunktgeschweißter
Aluminium-Stahl-Verbindungen für
den Fahrzeugbau
LFT, 178 Seiten, 171 Bilder, 31 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-358-0.

Band 245: Anja Neumann
Konzept zur Beherrschung der
Prozessschwankungen im Presswerk
LFT, 162 Seiten, 68 Bilder, 15 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-360-3.

Band 246: Ulf-Hermann Quentin
Laserbasierte Nanostrukturierung mit
optisch positionierten Mikrolinsen
LPT, 137 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-361-0.

Band 247: Erik Lamprecht
Der Einfluss der Fertigungsverfahren
auf die Wirbelstromverluste von
Stator-Einzelzahnblechpaketen für den
Einsatz in Hybrid- und Elektrofahrzeugen
FAPS, 148 Seiten, 138 Bilder, 4 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-362-7.

Band 248: Sebastian Rösel
Wirkmedienbasierte Umformung von
Blechhalbzeugen unter Anwendung
magnetorheologischer Flüssigkeiten als
kombiniertes Wirk- und Dichtmedium
LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 12 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-363-4.

Band 249: Paul Hippchen
Simulative Prognose der Geometrie
indirekt pressgehärteter Karosseriebauteile für die industrielle Anwendung
LFT, 163 Seiten, 89 Bilder, 12 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-364-1.

Band 250: Martin Zubeil
Versagensprognose bei der Prozesssimulation von Biegeumform- und Falzverfahren
LFT, 171 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-365-8.

Band 251: Alexander Kühl
Flexible Automatisierung der
Statorenmontage mit Hilfe einer
universellen ambidexteren Kinematik
FAPS, 142 Seiten, 60 Bilder, 26 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-367-2.

Band 252: Thomas Albrecht
Optimierte Fertigungstechnologien
für Rotoren getriebeintegrierter
PM-Synchronmotoren von
Hybridfahrzeugen
FAPS, 198 Seiten, 130 Bilder, 38 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-368-9.

Band 253: Florian Risch
Planning and Production Concepts for
Contactless Power Transfer Systems for
Electric Vehicles
FAPS, 185 Seiten, 125 Bilder, 13 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-369-6.

Band 254: Markus Weigl
Laserstrahlschweißen von Mischverbindungen aus austenitischen und ferritischen korrosionsbeständigen Stahlwerkstoffen
LPT, 184 Seiten, 110 Bilder, 6 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-370-2.

Band 255: Johannes Noneder
Beanspruchungserfassung für die Validierung von FE-Modellen zur Auslegung von Massivumformwerkzeugen
LFT, 161 Seiten, 65 Bilder, 14 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-371-9.

Band 256: Andreas Reinhardt
Ressourceneffiziente Prozess- und Produktionstechnologie für flexible Schaltungsträger
FAPS, 123 Seiten, 69 Bilder, 19 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-373-3.

Band 257: Tobias Schmuck
Ein Beitrag zur effizienten Gestaltung globaler Produktions- und Logistiknetzwerke mittels Simulation
FAPS, 151 Seiten, 74 Bilder. 2014.
ISBN 978-3-87525-374-0.

Band 258: Bernd Eichenhüller
Untersuchungen der Effekte und Wechselwirkungen charakteristischer Einflussgrößen auf das Umformverhalten bei Mikroumformprozessen
LFT, 127 Seiten, 29 Bilder, 9 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-375-7.

Band 259: Felix Lütteke
Vielseitiges autonomes Transportsystem basierend auf Weltmodellerstellung mittels Datenfusion von Deckenkameras und Fahrzeugsensoren
FAPS, 152 Seiten, 54 Bilder, 20 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-376-4.

Band 260: Martin Grüner
Hochdruck-Blechumformung mit formlos festen Stoffen als Wirkmedium
LFT, 144 Seiten, 66 Bilder, 29 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-379-5.

Band 261: Christian Brock
Analyse und Regelung des Laserstrahltiefschweißprozesses durch Detektion der Metaldampffackelposition
LPT, 126 Seiten, 65 Bilder, 3 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-380-1.

Band 262: Peter Vatter
Sensitivitätsanalyse des 3-Rollen-Schubbiegens auf Basis der Finite Elemente Methode
LFT, 145 Seiten, 57 Bilder, 26 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-381-8.

Band 263: Florian Klämpfl
Planung von Laserbestrahlungen durch simulationsbasierte Optimierung
LPT, 169 Seiten, 78 Bilder, 32 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-384-9.

Band 264: Matthias Domke
Transiente physikalische Mechanismen
bei der Laserablation von dünnen
Metallschichten
LPT, 133 Seiten, 43 Bilder, 3 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-385-6.

Band 265: Johannes Götz
Community-basierte Optimierung des
Anlagenengineerings
FAPS, 177 Seiten, 80 Bilder, 30 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-386-3.

Band 266: Hung Nguyen
Qualifizierung des Potentials von
Verfestigungseffekten zur Erweiterung
des Umformvermögens aushärtbarer
Aluminiumlegierungen
LFT, 137 Seiten, 57 Bilder, 16 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-387-0.

Band 267: Andreas Kuppert
Erweiterung und Verbesserung von Ver-
suchs- und Auswertetechniken für die
Bestimmung von Grenzformänderungs-
kurven
LFT, 138 Seiten, 82 Bilder, 2 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-388-7.

Band 268: Kathleen Klaus
Erstellung eines Werkstofforientierten
Fertigungsprozessfensters zur Steigerung
des Formgebungsvermögens von Alumi-
niumlegierungen unter Anwendung einer
zwischen geschalteten Wärmebehandlung
LFT, 154 Seiten, 70 Bilder, 8 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-391-7.

Band 269: Thomas Svec
Untersuchungen zur Herstellung von
funktionsoptimierten Bauteilen im
partiellen Presshärtprozess mittels lokal
unterschiedlich temperierter Werkzeuge
LFT, 166 Seiten, 87 Bilder, 15 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-392-4.

Band 270: Tobias Schrader
Grundlegende Untersuchungen zur
Verschleißcharakterisierung beschichte-
ter Kaltmassivumformwerkzeuge
LFT, 164 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-393-1.

Band 271: Matthäus Brela
Untersuchung von Magnetfeld-Messme-
thoden zur ganzheitlichen Wertschöp-
fungsoptimierung und Fehlerdetektion
an magnetischen Aktoren
FAPS, 170 Seiten, 97 Bilder, 4 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-394-8.

Band 272: Michael Wieland
Entwicklung einer Methode zur Prognose
adhäsiven Verschleißes an Werkzeugen
für das direkte Presshärten
LFT, 156 Seiten, 84 Bilder, 9 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-395-5.

Band 273: René Schramm
Strukturierte additive Metallisierung
durch kaltaktives
Atmosphärendruckplasma
FAPS, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-396-2.

Band 274: Michael Lechner
Herstellung beanspruchungsangepasster
Aluminiumblechhalbzeuge durch
eine maßgeschneiderte Variation der
Abkühlgeschwindigkeit nach
Lösungsglühen
LFT, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-397-9.

Band 275: Kolja Andreas
Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit
auf das Werkzeugeinsatzverhalten beim
Kaltfließpressen
LFT, 169 Seiten, 76 Bilder, 4 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-398-6.

Band 276: Marcus Baum
Laser Consolidation of ITO Nanoparticles
for the Generation of Thin Conductive
Layers on Transparent Substrates
LPT, 158 Seiten, 75 Bilder, 3 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-399-3.

Band 277: Thomas Schneider
Umformtechnische Herstellung
dünnwandiger Funktionsbauteile
aus Feinblech durch Verfahren der
Blechmassivumformung
LFT, 188 Seiten, 95 Bilder, 7 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-401-3.

Band 278: Jochen Merhof
Sematische Modellierung automatisierter
Produktionssysteme zur Verbesserung
der IT-Integration zwischen Anlagen-
Engineering und Steuerungsebene
FAPS, 157 Seiten, 88 Bilder, 8 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-402-0.

Band 279: Fabian Zöller
Erarbeitung von Grundlagen zur
Abbildung des tribologischen Systems
in der Umformsimulation
LFT, 126 Seiten, 51 Bilder, 3 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-403-7.

Band 280: Christian Hezler
Einsatz technologischer Versuche zur
Erweiterung der Versagensvorhersage
bei Karosseriebauteilen aus höchstfesten
Stählen
LFT, 147 Seiten, 63 Bilder, 44 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-404-4.

Band 281: Jochen Böning
Integration des Systemverhaltens von
Automobil-Hochvoltleitungen in die
virtuelle Absicherung durch
strukturmechanische Simulation
FAPS, 177 Seiten, 107 Bilder, 17 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-405-1.

Band 282: Johannes Kohl
Automatisierte Datenerfassung für disk-
ret ereignisorientierte Simulationen in
der energieflexiblen Fabrik
FAPS, 160 Seiten, 80 Bilder, 27 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-406-8.

Band 283: Peter Bechtold
Mikroschockwellenumformung mittels
ultrakurzer Laserpulse
LPT, 155 Seiten, 59 Bilder, 10 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-407-5.

Band 284: Stefan Berger
Laserstrahlschweißen thermoplastischer
Kohlenstofffaserverbundwerkstoffe mit
spezifischem Zusatzdraht
LPT, 118 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-408-2.

Band 285: Martin Bornschlegl
Methods-Energy Measurement - Eine
Methode zur Energieplanung für
Fügeverfahren im Karosseriebau
FAPS, 136 Seiten, 72 Bilder, 46 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-409-9.

Band 286: Tobias Rackow
Erweiterung des Unternehmenscontrol-
lings um die Dimension Energie
FAPS, 164 Seiten, 82 Bilder, 29 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-410-5.

Band 287: Johannes Koch
Grundlegende Untersuchungen zur
Herstellung zyklisch-symmetrischer
Bauteile mit Nebenformelementen durch
Blechmassivumformung
LFT, 125 Seiten, 49 Bilder, 17 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-411-2.

Band 288: Hans Ulrich Vierzigmann
Beitrag zur Untersuchung der
tribologischen Bedingungen in der
Blechmassivumformung - Bereitstellung
von tribologischen Modellversuchen und
Realisierung von Tailored Surfaces
LFT, 174 Seiten, 102 Bilder, 34 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-412-9.

Band 289: Thomas Senner
Methodik zur virtuellen Absicherung
der formgebenden Operation des
Nasspressprozesses von
Gelege-Mehrschichtverbunden
LFT, 156 Seiten, 96 Bilder, 21 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-414-3.

Band 290: Sven Kreitlein
Der grundoperationsspezifische
Mindestenergiebedarf als Referenzwert
zur Bewertung der Energieeffizienz in
der Produktion
FAPS, 185 Seiten, 64 Bilder, 30 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-415-0.

Band 291: Christian Roos
Remote-Laserstrahlschweißen verzinkter
Stahlbleche in Kehlnahtgeometrie
LPT, 123 Seiten, 52 Bilder, 0 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-416-7.

Band 292: Alexander Kahrmanidis
Thermisch unterstützte Umformung von
Aluminiumblechen
LFT, 165 Seiten, 103 Bilder, 18 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-417-4.

Band 293: Jan Tremel
Flexible Systems for Permanent
Magnet Assembly and Magnetic Rotor
Measurement / Flexible Systeme zur
Montage von Permanentmagneten und
zur Messung magnetischer Rotoren
FAPS, 152 Seiten, 91 Bilder, 12 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-419-8.

Band 294: Ioannis Tsoupis
Schädigungs- und Versagensverhalten
hochfester Leichtbauwerkstoffe unter
Biegebeanspruchung
LFT, 176 Seiten, 51 Bilder, 6 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-420-4.

Band 295: Sven Hildering
Grundlegende Untersuchungen zum
Prozessverhalten von Silizium als
Werkzeugwerkstoff für das
Mikroscherschneiden metallischer Folien
LFT, 177 Seiten, 74 Bilder, 17 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-422-8.

Band 296: Sasia Mareike Hertweck
Zeitliche Pulsformung in der
Lasermikromaterialbearbeitung –
Grundlegende Untersuchungen und
Anwendungen
LPT, 146 Seiten, 67 Bilder, 5 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-423-5.

Band 297: Paryanto
Mechatronic Simulation Approach for
the Process Planning of Energy-Efficient
Handling Systems
FAPS, 162 Seiten, 86 Bilder, 13 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-424-2.

Band 298: Peer Stenzel
Großserientaugliche Nadelwickeltechnik
für verteilte Wicklungen im
Anwendungsfall der E-Traktionsantriebe
FAPS, 239 Seiten, 147 Bilder, 20 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-425-9.

Band 299: Mario Lušić
Ein Vorgehensmodell zur Erstellung
montageführender Werkerinformations-
systeme simultan zum
Produktentstehungsprozess
FAPS, 174 Seiten, 79 Bilder, 22 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-426-6.

Band 300: Arnd Buschhaus
Hochpräzise adaptive Steuerung und
Regelung robotergeführter Prozesse
FAPS, 202 Seiten, 96 Bilder, 4 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-427-3.

Band 301: Tobias Laumer
Erzeugung von thermoplastischen
Werkstoffverbunden mittels simultanem,
intensitätsselektivem
Laserstrahlschmelzen
LPT, 140 Seiten, 82 Bilder, 0 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-428-0.

Band 302: Nora Unger
Untersuchung einer thermisch unter-
stützten Fertigungskette zur Herstellung
umgeformter Bauteile aus der höherfes-
ten Aluminiumlegierung EN AW-7020
LFT, 142 Seiten, 53 Bilder, 8 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-429-7.

Band 303: Tommaso Stellan
Design of Manufacturing Processes for
the Cold Bulk Forming of Small Metal
Components from Metal Strip
LFT, 146 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-430-3.

Band 304: Bassim Bachy
Experimental Investigation, Modeling,
Simulation and Optimization of Molded
Interconnect Devices (MID) Based on
Laser Direct Structuring (LDS) / Experi-
mentelle Untersuchung, Modellierung,
Simulation und Optimierung von Molded
Interconnect Devices (MID) basierend
auf Laser Direktstrukturierung (LDS)
FAPS, 168 Seiten, 120 Bilder, 26 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-431-0.

Band 305: Michael Spahr
Automatisierte Kontaktierungsverfahren
für flachleiterbasierte
Pkw-Bordnetzsysteme
FAPS, 197 Seiten, 98 Bilder, 17 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-432-7.

Band 306: Sebastian Suttner
Charakterisierung und Modellierung
des spannungszustandsabhängigen
Werkstoffverhaltens der Magnesium-
legierung AZ31B für die numerische
Prozessauslegung
LFT, 150 Seiten, 84 Bilder, 19 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-433-4.

Band 307: Bhargav Potdar
A reliable methodology to deduce
thermo-mechanical flow behaviour of
hot stamping steels
LFT, 203 Seiten, 98 Bilder, 27 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-436-5.

Band 308: Maria Löffler
Steuerung von Blechmassivumformpro-
zessen durch maßgeschneiderte
tribologische Systeme
LFT, viii u. 166 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-133-1.

Band 309: Martin Müller
Untersuchung des kombinierten Trenn-
und Umformprozesses beim Fügen art-
ungleicher Werkstoffe mittels
Schneidclinchverfahren
LFT, xi u. 149 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab.
2018. ISBN: 978-3-96147-135-5.

Band 310: Christopher Kästle
Qualifizierung der Kupfer-Drahtbond-
technologie für integrierte Leistungs-
module in harschen Umgebungs-
bedingungen
FAPS, xii u. 167 Seiten, 70 Bilder, 18 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-145-4.

Band 311: Daniel Vipavc
Eine Simulationsmethode für das
3-Rollen-Schubbiegen
LFT, xiii u. 121 Seiten, 56 Bilder, 17 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-147-8.

Band 312: Christina Ramer
Arbeitsraumüberwachung und autonome
Bahnplanung für ein sicheres und
flexibles Roboter-Assistenzsystem
in der Fertigung
FAPS, xiv u. 188 Seiten, 57 Bilder, 9 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-153-9.

Band 313: Miriam Rauer
Der Einfluss von Poren auf die
Zuverlässigkeit der Lötverbindungen
von Hochleistungs-Leuchtdioden
FAPS, xii u. 209 Seiten, 108 Bilder, 21 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-157-7.

Band 314: Felix Tenner

Kamerabasierte Untersuchungen der Schmelze und Gasströmungen beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche

LPT, xxiii u. 184 Seiten, 94 Bilder, 7 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-160-7.

Band 315: Aarief Syed-Khaja

Diffusion Soldering for High-temperature Packaging of Power Electronics

FAPS, x u. 202 Seiten, 144 Bilder, 32 Tab.
2018. ISBN 978-3-87525-162-1.

Band 316: Adam Schaub

Grundlagenwissenschaftliche Untersuchung der kombinierten Prozesskette aus Umformen und Additive Fertigung

LFT, xi u. 192 Seiten, 72 Bilder, 27 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-166-9.

Band 317: Daniel Gröbel

Herstellung von Nebenformelementen unterschiedlicher Geometrie an Blechen mittels Fließpressverfahren der Blechmassivumformung

LFT, x u. 165 Seiten, 96 Bilder, 13 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-168-3.

Band 318: Philipp Hildenbrand

Entwicklung einer Methodik zur Herstellung von Tailored Blanks mit definierten Halbzeugeigenschaften durch einen Taumelprozess

LFT, ix u. 153 Seiten, 77 Bilder, 4 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-174-4.

Band 319: Tobias Konrad

Simulative Auslegung der Spann- und Fixierkonzepte im Karosserierohrbau: Bewertung der Baugruppenmaßhaltigkeit unter Berücksichtigung schwankender Einflussgrößen

LFT, x u. 203 Seiten, 134 Bilder, 32 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-176-8.

Band 320: David Meinel

Architektur applikationsspezifischer Multi-Physics-Simulationskonfiguratoren am Beispiel modularer Triebzüge

FAPS, xii u. 166 Seiten, 82 Bilder, 25 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-184-3.

Band 321: Andrea Zimmermann

Grundlegende Untersuchungen zum Einfluss fertigungsbedingter Eigenschaften auf die Ermüdungsfestigkeit kaltmassivumgeformter Bauteile

LFT, ix u. 160 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-190-4.

Band 322: Christoph Amann

Simulative Prognose der Geometrie nassgepresster Karosseriebauteile aus Gelege-Mehrschichtverbunden

LFT, xvi u. 169 Seiten, 80 Bilder, 13 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-194-2.

Band 323: Jennifer Tenner

Realisierung schmierstofffreier Tiefziehprozesse durch maßgeschneiderte Werkzeugoberflächen

LFT, x u. 187 Seiten, 68 Bilder, 13 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-196-6.

Band 324: Susan Zöller

Mapping Individual Subjective Values to Product Design

KTmfk, xi u. 223 Seiten, 81 Bilder, 25 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-202-4.

Band 325: Stefan Lutz
Erarbeitung einer Methodik zur
semiempirischen Ermittlung der
Umwandlungskinetik durchhärtender
Wälzlagerstähle für die Wärme-
behandlungssimulation
LFT, xiv u. 189 Seiten, 75 Bilder, 32 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-209-3.

Band 326: Tobias Gnibl
Modellbasierte Prozesskettenabbildung
rührreibgeschweißter Aluminium-
halbzeuge zur umformtechnischen
Herstellung höchstfester Leichtbau-
strukturteile
LFT, xii u. 167 Seiten, 68 Bilder, 17 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-217-8.

Band 327: Johannes Bürner
Technisch-wirtschaftliche Optionen zur
Lastflexibilisierung durch intelligente
elektrische Wärmespeicher
FAPS, xiv u. 233 Seiten, 89 Bilder, 27 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-219-2.

Band 328: Wolfgang Böhm
Verbesserung des Umformverhaltens von
mehrlagigen Aluminiumblechwerk-
stoffen mit ultrafeinkörnigem Gefüge
LFT, ix u. 160 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-227-7.

Band 329: Stefan Landkammer
Grundsatzuntersuchungen, mathemati-
sche Modellierung und Ableitung einer
Auslegungsmethodik für Gelenkantriebe
nach dem Spinnenbeinprinzip
LFT, xii u. 200 Seiten, 83 Bilder, 13 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-229-1.

Band 330: Stephan Rapp
Pump-Probe-Ellipsometrie zur Messung
transienter optischer Materialeigen-
schaften bei der Ultrakurzpuls-Laser-
materialbearbeitung
LPT, xi u. 143 Seiten, 49 Bilder, 2 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-235-2.

Band 331: Michael Scholz
Intralogs Execution System mit
integrierten autonomen, servicebasierten
Transportentitäten
FAPS, xi u. 195 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-237-6.

Band 332: Eva Bogner
Strategien der Produktindividualisierung
in der produzierenden Industrie im Kon-
text der Digitalisierung
FAPS, ix u. 201 Seiten, 55 Bilder, 28 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-246-8.

Band 333: Daniel Benjamin Krüger
Ein Ansatz zur CAD-integrierten
muskuloskelettalen Analyse der Mensch-
Maschine-Interaktion
KTmfk, x u. 217 Seiten, 102 Bilder, 7 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-250-5.

Band 334: Thomas Kuhn
Qualität und Zuverlässigkeit laserdirekt-
strukturierter mechatronisch integrierter
Baugruppen (LDS-MID)
FAPS, ix u. 152 Seiten, 69 Bilder, 12 Tab.
2019. ISBN: 978-3-96147-252-9.

Abstract

In consideration of the increasing demand for multifunctional mechatronic systems, MID technology offers promising potential for the production of highly integrated mechatronic assemblies in function-optimized designs. However, uncertainties with regard to quality and reliability inhibit the use of customized MID solutions, in particular in rough and safety-relevant areas. In this context, key factors influencing quality along the multi-stage and interdisciplinary manufacturing process of LDS-MID are highlighted and necessary measures for quality assurance in manufacturing explained. The further main focuses of the present work result from the characteristic failure causes and restrictions, which impair a broader expansion of LDS-MID. These are the delamination of the metallization, the formation of conductor cracks as well as the thermal damage of conductors. Derived from this, systematic investigations pursue the objectives to determine and increase the adhesion strength of LDS metallization, to avoid conductor cracks under thermal load and to significantly increase the current carrying capacity by the use of metal core MID. Based on the methods and findings developed, existing uncertainties regarding the suitability of LDS applications for use in demanding fields of application are reduced and useful indications for an effective enhancement of the robustness of LDS-MID are presented.

Angesichts des zunehmenden Bedarfs an multifunktionalen mechatronischen Systemen bietet die MID-Technologie vielversprechende Potenziale zur Herstellung hochintegrierter mechatronischer Baugruppen in funktionsoptimalem Design. Unsicherheiten hinsichtlich der Qualität und Zuverlässigkeit hemmen jedoch insbesondere in rauen und sicherheitsrelevanten Bereichen den Einsatz individueller MID-Lösungen. Vor diesem Hintergrund werden einleitend die wesentlichen qualitätsbeeinflussenden Faktoren entlang des mehrstufigen, multidisziplinären Herstellungsprozesses von LDS-MID aufgezeigt und erforderliche Maßnahmen zur Qualitätssicherung in der Fertigung erläutert. Die weiteren Schwerpunkte der vorliegenden Arbeit ergeben sich aus den charakteristischen Ausfallursachen und Einschränkungen, die eine weitere Verbreitung von LDS-MID beeinträchtigen. Als diese sind die Delamination der Metallisierung, die Entstehung von Leiterbahnrisen und das thermische Versagen von Leiterbahnen zu nennen. Systematische Untersuchungen verfolgen davon abgeleitet die Zielstellungen, die Metallisierungshaftfestigkeit von LDS-MID zu bestimmen und zu steigern, Leiterbahnrisse bei thermischer Belastung zu vermeiden sowie durch den Einsatz von Metallkern-MID die Stromtragfähigkeit signifikant zu erhöhen. Auf Grundlage der erarbeiteten Methoden und Erkenntnisse werden bestehende Unsicherheiten in Bezug auf die Eignung von LDS-Anwendungen für ihren Einsatz in anspruchsvollen Applikationsfeldern abgebaut und wertvolle Anhaltspunkte zur effektiven Steigerung der Robustheit von LDS-MID aufgezeigt.

