

Laserbasierte Herstellung multifunktionaler Packages am Beispiel von innovativen Mikrodrehgebern für die Automatisierungs- und Kraftfahrzeugtechnik

Nils Heininger

LPKF Laser & Electronics AG, Garbsen, Deutschland

Dirk Ahrendt, Wolfgang Eberhardt, Heinz Kück

Hahn-Schickard-Institut für Mikroaufbautechnik, Stuttgart, Deutschland

Lars Blassmann, Christoph Hanisch, Stephan Schauz

Festo AG & Co. KG, Esslingen, Deutschland

Zusammenfassung

Spritzgegossene Schaltungsträger (Moulded Interconnect Devices - MIDs) eröffnen die Chance, Elektronik und Mechanik miteinander zu verbinden. Neben der größeren Gestaltungsfreiheit im Vergleich zu konventionellen Schaltungsträgern bietet die MID-Technologie zudem ein enormes Rationalisierungspotenzial durch die Verkürzung der Prozesskette. Zudem tragen 3D-Leiterplatten durch die Reduzierung der Teileanzahl zur Miniaturisierung elektronischer Baugruppen bei.

Wesentliche Einsatzgebiete für die MID-Technologie sind multifunktionale Packages für die Automobilelektronik und die Telekommunikation, daneben aber z.B. auch Computer-, Industrieelektronik oder die Medizintechnik.

Mit dem von LPKF entwickelten Laser-Direkt-Strukturierungsverfahren (LDS) ist es möglich, hochauflösende Schaltungslayouts auf komplexen dreidimensionalen Trägerstrukturen zu realisieren und damit die bisher getrennten Einheiten Gehäuse und Leiterplatte funktionell zu integrieren.

Die Grundlage des Verfahrens bilden dotierte Thermoplaste, auf denen die zu realisierenden Leiterbahnen mittels Laser gezielt aktiviert und anschließend im chemischen Bad metallisiert werden können.

Im weiteren werden die technischen, wie wirtschaftlichen Vorteile dieses Verfahrens angesprochen, so wie die Umsetzung anhand von zwei Beispielen aus der Industrieautomatisierungstechnik sowie der Kraftfahrzeugtechnik.

Abstract

Moulded Interconnect Devices – MIDs present the chance to combine electronic and mechanical parts. Compared to conventional circuits, MID technology offers a greater freedom of design and, due to the shortened process chain, a tremendous potential of rationalization. Moreover, by reducing the number of required parts, three-dimensional circuit carriers contribute to the miniaturization of electronic components.

Main application areas of MID technology are multifunctional packages for automobile electronics and telecommunication, but also computer technology, industry electronics, or medical technology.

With LPKF's Laser Direct Structuring process (LDS) it is possible to produce high-resolution circuit layouts on complex three-dimensional carrier structures, thus integrating casings and circuit boards that previously were separate units in one unit.

The process is based on doted thermoplastic materials on which the tracks that are to be realized are activated by means of targeted laser radiation and then metallized in a chemical bath.

Further discussed are technical and economical advantages of this process, as well as using it for specific applications. One from the industry automation and one from the automotive area.

1 Einleitung

Die ständig steigenden Forderungen nach mehr Funktionsintegration und höherer Leistungsverdichtung bei gleichzeitiger Miniaturisierung und Gewichtseinsparung sowie reduzierten Stückkosten erzeugen insbesondere auf Automobilhersteller, Maschinen- und Anlagenbauer sowie Hersteller von Konsumgütern oder Haushaltsgeräten im globalen Markt einen enormen Wettbewerbsdruck. Diesem Druck kann nur durch ständige Neu- und Weiterentwicklungen begegnet werden, wobei dem Fortschritt auf der Baugruppenebene eine besonders große Bedeutung zukommt. Als wichtige Bauelemente der Sensortechnik werden z. B. Drehgeber bei Kraftfahrzeugen, Maschinen und vielen Geräten zur Erfassung von Position und Drehzahl für die verschiedensten Aufgaben in großen Stückzahlen eingesetzt.

Neben der Miniaturisierung der Sensoren, der Erhöhung von Funktionsdichte und Zuverlässigkeit spielt insbesondere die Reduzierung der Stückkosten eine entscheidende Rolle. Um bei Mikrodrehgebern ein nachhaltiges Miniaturisierungs- und Kostenreduzierungs-potenzial für künftige Sensorgenerationen zu erschließen, ist der Einsatz von leistungsfähigen mikrosystemtechnischen Chip-Bauelementen, z. B. GMR-Magnetfeldsensoren, in Verbindung mit modernsten Gehäuse- und Aufbautechniken unerlässlich.

Mit einem vom Bundesministerium für Forschung und Entwicklung (BMBF) geförderten Forschungsprojektes soll die Eignung laserbasierter Herstellungsverfahren für multifunktionale Packages am Beispiel von innovativen Mikrodrehgebern für die Automatisierungs- und Kraftfahrzeugtechnik untersucht werden. In dem Verbundvorhaben IMDAKT (Innovative Mikrodrehgeber für Automatisierungs- und Kraftfahrzeugtechnik) werden geeignete Systemkonzepte auf der Basis verfügbarer mikrotechnischer Transducer-Bausteine und mikroelektronischer Schaltkreis-Chips erarbeitet und anschließend die Gehäuse- und Aufbautechnik auf der Basis von Laser MID Technik (MID = Molded Interconnect Device) und Flip-Chip-Technik realisiert. Am Beispiel von zwei konkreten Produkten wird die industrielle Fertigungstauglichkeit, die Funktionsfähigkeit und die grundsätzliche Zuverlässigkeit unter den harten Bedingungen in der Industriepneumatik bzw. für Automobilanwendungen erprobt.

Im folgenden wird das laserbasierte Fertigungsverfahren für Herstellung spritzgegossener Schaltungsträger vorgestellt, sowie die verfahrensspezifischen Design-Regeln, auf deren Basis die multifunktionalen Packages konzipiert sind. Abschließend werden die aktuellen Qualifizierungsergebnisse der so hergestellten Mikrodrehgeber diskutiert.

2 Stand der Technik

2.1 Drehzahlsensoren in der Kraftfahrzeugtechnik

Die meisten der bisher eingesetzten aktiven Sensoren im Automobilbereich basieren auf Leiterplattensubstraten oder sind in Drahtbondtechnik auf ein Stanzgitter aufgebaut, und mit einer Moldmasse vergossen. In beiden Fällen müssen die Sensorträger anschließend separat in einem i.d.R. thermoplastisch spritzgegossenen Gehäuse verpackt werden.

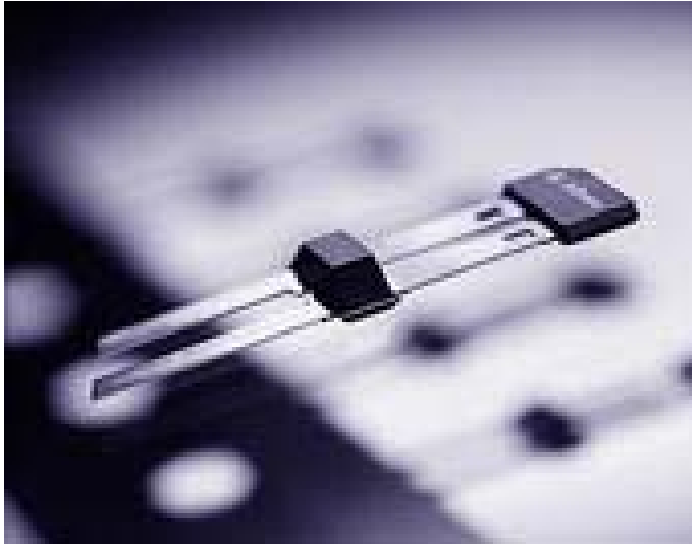


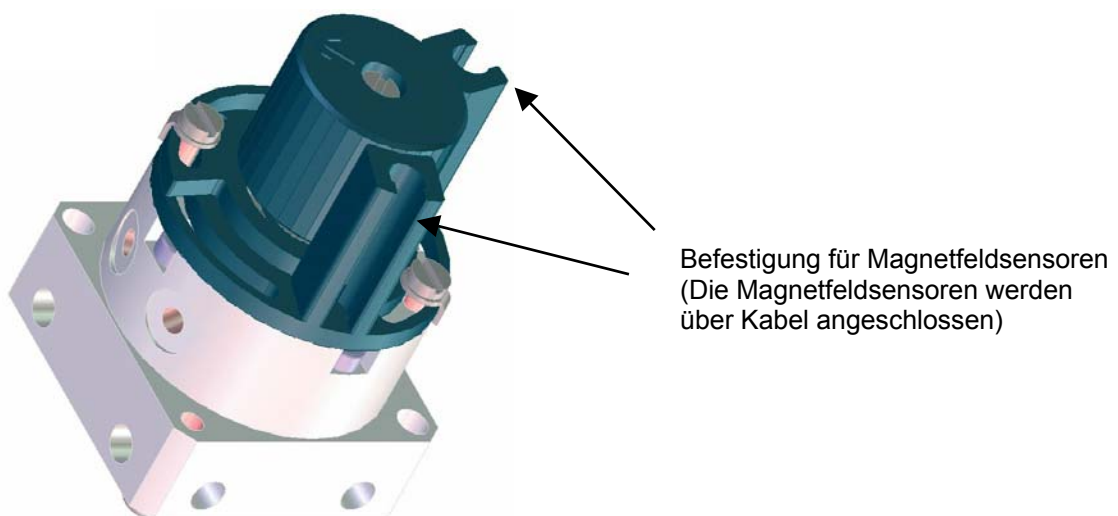
Bild 1: Unverpackter Drehzahlsensor in Stanzgittertechnik (Infineon)

Neben dem mangelnden Miniaturisierungspotential bei der Stanzgitterlösung sind bei beiden Technologien ebenso die Einsparmöglichkeiten ausgeschöpft und künftig kann keine wesentliche Kostenreduzierung erwartet werden. Vor diesem Hintergrund erscheint es als besonders sinnvoll, eine flexible Lösung für das Substrat mit hohem Miniaturisierungspotential, wie z.B. die MID-Technologie in Betracht zu ziehen.

Um im gleichen Maße auch die Fügetechnik des Aktiven Sensorelementes zu optimieren, bietet sich gerade im Fine-Pitch-Bereich an die Nackchip-Verarbeitung als Aufbau- und Verbindungstechnik zu untersuchen, mit dem Ziel deutlich kleinere und kostengünstigere Drehzahlsensoren zu realisieren.

2.2 Drehgeber in der Automatisierungstechnik

Entsprechend kleine Sensoren werden derzeit schon als kontaktlose Miniaturpositionssensoren in der Pneumatik auf keramischen Substraten aufgebaut, die anschließend in einem sehr aufwendigen Produktionsschritt in entsprechende Gehäuse eingebaut und dort vergossen werden.



Befestigung für Magnetfeldsensoren
(Die Magnetfeldsensoren werden
über Kabel angeschlossen)

Bild 2: Aktuelle Version des Drehgebers für pneumatische Drehantriebe

Bild 2 zeigt einen derzeit eingesetzten Drehgeber im Bereich der Industrieautomatisierung, der über zwei Magnetfeldsensoren verfügt. Die Magnetfeldsensoren werden in die senkrechten Nuten eingesetzt, vergossen und mit Kabeln angeschlossen. Auf Grund dieser Technik gibt es für die Integration eines Sensor-Dies in ein Gehäuseteil eines Positionssensors keine bekannte Alternative, die sowohl einen günstigen Kostenrahmen ermöglicht als auch den in dieser Einbaugeometrie erforderlichen Integrationsgrad erreicht. Für die Pneumatik besteht der Ansporn darin, dass mit der Kombination aus MID-Substraten und in Flip-Chip-Technik verarbeitbaren Dies insgesamt eine Technologie eingeführt wird, welche für unterschiedlichste Integrationsaufgaben in der Pneumatik, aber auch darüber hinaus, nutzbar wird.

Das im Verbundprojekt als Demonstrator einer neuen Produktreihe von Positionssensoren für pneumatische Drehantriebe zu realisierende Funktionsmuster, das in Bild 3 schematisch dargestellt ist, wird sowohl die mit der neuen Aufbau- und Verbindungstechnik im Zusammenhang mit der Verarbeitung nacktem Sensorchips auf einem Kunststoffsubstrat stehenden Probleme lösen als auch eine neue Generation von Positionssensoren bereit stellen.

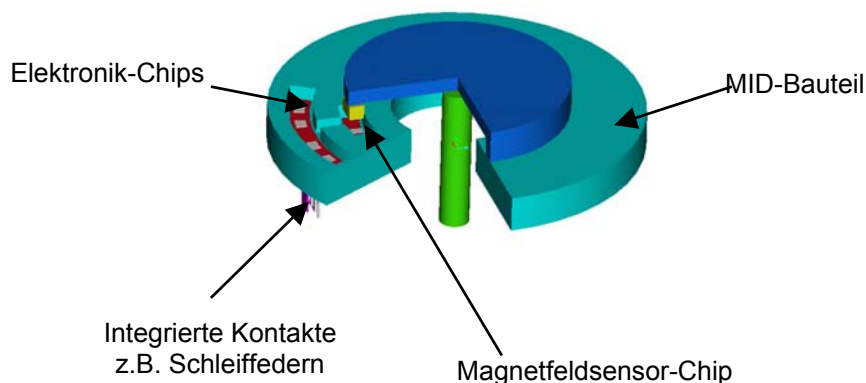


Bild 3: Schematische Darstellung des künftigen miniaturisierten Drehgebers für pneumatische Drehantriebe mit MID-Bauteil

2.3 Flip-Chip-Technik auf MIDs

Der Einsatz von MIDs für die Aufbau- und Verbindungstechnik von Mikrosystemen hat insbesondere in jüngster Zeit sehr gute Fortschritte gemacht [1-3] ebenso wie Flip-Chip-Techniken für den Aufbau von Nackt-Chips auf ebenen Substraten, d. h. Leiterplatten, Keramiksubstraten und Glassubstraten [4,5]. Daher war es im Verbundprojekt sinnvoll zu untersuchen, wie die hohen Anforderungen künftiger Drehgeber durch eine Kombination aus Mikrospritzgießtechnik, laseraktivierter selektiver Metallisierung von MID Gehäusen und Flip-Chip-Technik erreicht werden können, obwohl die Flip-Chip-Technik in Verbindung mit MID Substraten bisher noch nicht bekannt war.

Die Flip-Chip-Technik stellt hohe Anforderungen an die Strukturfeinheit, die Oberflächenqualität und die mechanischen Eigenschaften der Substrate, die bei MID Baugruppen noch längst nicht Stand der Technik sind. Dies ist einer der

Hauptgründe warum das LPKF-LDS-Verfahren als lasergestütztes MID-Verfahren zum Einsatz kommt, denn nur damit sind entsprechend feine Pitches bei gleichzeitig kurzer Prozesskette möglich.

3 Das LPKF-LDS-Verfahren

Bislang wurden MID-Produkte mit echten dreidimensionalen Strukturen überwiegend im Zwei-Komponenten-Spritzguss (2K-Technik) mit anschließender chemischer Oberflächenaktivierung und selektiver Metallisierung hergestellt – einem Verfahren mit hohen Initialkosten, das nur bei hohen Stückzahlen wirtschaftlich ist. Dagegen bietet die MID-Herstellung unter Einsatz der Laserstrukturierung die Möglichkeit, auf die 2K-Technik zu verzichten und den Schaltungsträger-Rohling mittels Ein-Komponenten-Spritzguss zu fertigen.

Dabei zeichnet sich das additive LPKF-LDS-Verfahren im Vergleich zur subtraktiven Laserstrukturierung durch eine sehr kurze Prozesskette aus. Die wesentlichen Prozessschritte sind in Abbildung 4 dargestellt.

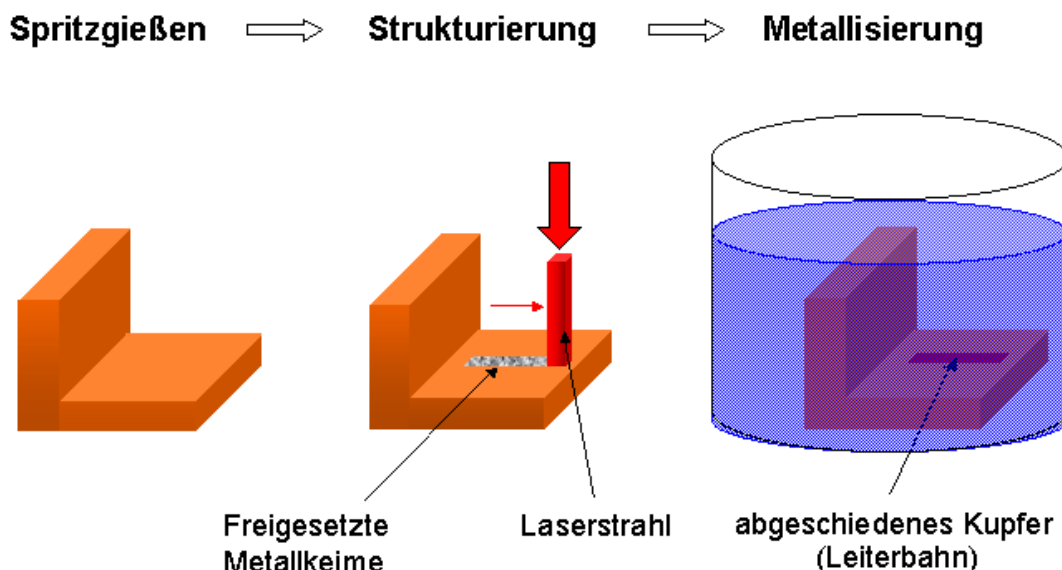


Bild 4: Prozessschritte des LPKF-LDS-Verfahrens

Die Laser-Direkt-Strukturierung bietet gegenüber konventionellen Verfahren weitere Vorteile in der Erstellung extrem feiner Leiterbahnstrukturen. Außerdem bietet dieses Verfahren eine hohe Flexibilität hinsichtlich des Leiterbildes, da sich Modifizierungen leicht durch Änderungen der Strukturierungsdaten realisieren lassen. Eine nachträgliche Anpassung des Leiterbahnentwurfs ist also nicht mit einer Werkzeugänderung verbunden. Gerade diese Flexibilität erlaubt es dem Anwender, die Laser-Direkt-Strukturierung für den Produktentwicklungsprozess einzusetzen, mit der Gewissheit, in der Folge gleichzeitig einen Serienprozess zur Verfügung zu haben, was eine aufwendige Überführung von der Prototypen- zum Serienfertigung überflüssig macht.

Für den Serieneinsatz des LDS-Verfahrens stellen die bedarfsgerechte Auswahl und die industrielle Verfügbarkeit von, in der Elektronikindustrie üblichen,

laseraktivierbaren Kunststoffen wichtige Voraussetzungen dar. Diese ist gesichert durch intensive Materialentwicklung und entsprechende Lizenzverträge mit den jeweiligen Kunststoffherstellern. So hat die Fa. LPKF mittlerweile Vereinbarungen mit der BASF AG, der Bayer Material Science AG (seit 01.07.04 LANXESS), der Degussa AG sowie der Ticona GmbH getroffen.

3.1 Wirkprinzip

Um die Nachteile der herkömmlichen MID-Verfahren [6-11] zu umgehen, werden die thermoplastischen Werkstoffe derart modifiziert, dass eine metallorganische Komplexverbindung gelöst, oder feinstdispersiert im Werkstoff vorliegt. Diese spezielle chemische Verbindung lässt sich durch aufgebrauchte Laserstrahlung derart modifizieren, dass sie eine selektive Metallabscheidung in den bestrahlten Bereichen für den folgenden Metallisierungsprozessschritt katalysiert. Vorzugsweise handelt es sich um eine Chelat-Komplex-Verbindung eines Edelmetalls – entweder auf Palladium (Pd^{2+})- oder Kupfer(Cu^{2+})-Basis [12]. Der metallorganische Komplex hat diverse Anforderungen zu erfüllen. Die thermische Stabilität muss den Verarbeitungstemperaturen der thermoplastischen Matrix genügen und er muss sich beim Eintrag energiereicher Laserstrahlung definiert in das Metallatom und die organischen Ligandenbruchstücke spalten lassen. Weitere Kriterien sind:

- eine gute Verträglichkeit mit der Polymermatrix
- keine Beeinträchtigung der elektrischen Eigenschaften
- eine ausreichende Löslichkeit, bzw. Verteilung in der Matrix
- keine katalytische Aktivität, die zum Abbau der Polymerketten führt
- Extraktionsbeständigkeit
- keine Toxizität

Eine wesentliche Größe für die Qualifizierung von elektronischen Baugruppen ist die Haftfestigkeit der Leiterbahnen. Um zu gewährleisten, dass die Leiterbahnen auch nach jeweiligen Umweltzyklen eine ausreichende Haftung auf dem Substrat aufweisen, ist eine entsprechend hohe Ausgangshaftfestigkeit gefordert. Diese liegt in der Leiterplattentechnik nach DIN IEC 326 zwischen 0,6 – 1,1 N/mm. In diesem Zusammenhang kommt eine weitere wichtige Eigenschaft der eingesetzten Laserstrahlung zum Tragen: Sie ist nicht nur in der Lage den Metallkomplex selektiv und homolytisch zu spalten, sondern die Strahlung führt zu einer sog. Ablation der Polymeroberfläche. Hierbei wird die Strahlungsenergie durch die Polymermoleküle absorbiert. Die Moleküle werden angeregt und in Schwingungen versetzt. Beim Erreichen einer Mindestenergie werden idealerweise die Bindungen zwischen den Molekülketten aufgebrochen. In der Praxis führt die Einwirkung der Laserstrahlung aber neben der rein photochemischen Ablation zu einer Relaxation und damit zu einem thermischen Verdampfen des Materials (Abbildung 5). Dieser Sublimationsprozess liegt insbesondere dann mehrheitlich vor, wenn langwellige Laserstrahlung, wie z.B. die eines Nd:YAG Lasers ($\lambda = 1064 \text{ nm}$) eingesetzt wird.

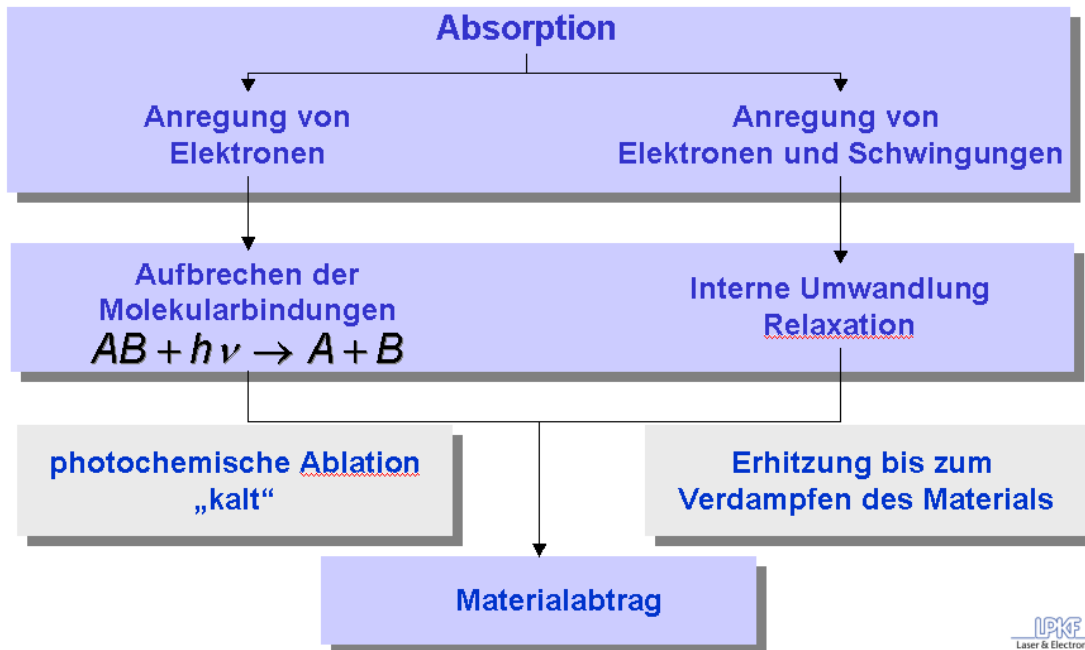


Bild 5: Prinzipielle Prozesse bei der Laserablation

Durch eine geeignete Modifikation des Polymers, mit nicht - oder nur schwer ablatierbaren Füllstoffen (meist anorganischer Natur), entstehen durch die Laserbestrahlung mikroskopisch kleine Kavernen und Hinterschneidungen, die ohne aufwendige Nachbehandlungen eine gute Haftung zwischen Kunststoff und sich darauf abscheidender Metallschicht ermöglicht. Die prinzipielle Wirkweise der Laserstrahlung auf die Kunststoffoberfläche ist in Abbildung 6 verdeutlicht.

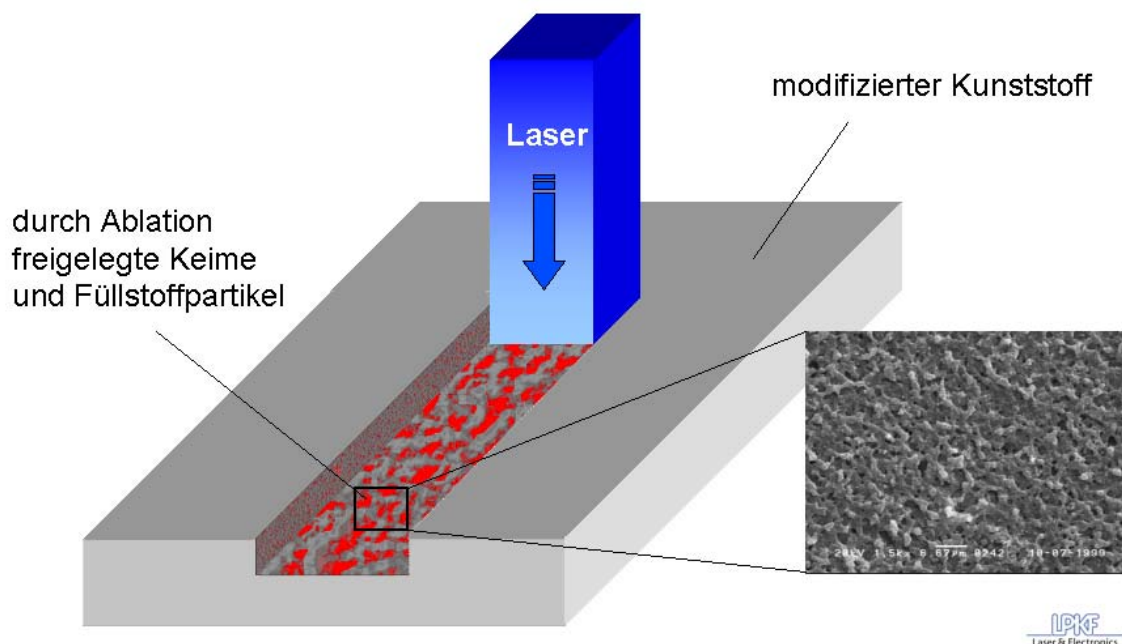


Bild 6: Prinzipdarstellung der Laserdirektstrukturierung

3.2 Modulares 3D-Lasersystem für das LDS-Verfahren

Der MicroLine 3D Industrial ist ein speziell für die Laser-Direkt-Strukturierung, von spritzgegossenen Schaltungsträgern, entwickeltes Lasersystem. Ein wesentlicher Vorteil der Lasermaterialbearbeitung liegt in der rückkopplungsfreien Materialeinwirkung bei gleichzeitig hohen Prozessgeschwindigkeiten. Darüber hinaus wird das Schaltungslayout durch die binäre Ansteuerung eines optischen Bearbeitungskopfes erzeugt und ist nicht durch die Geometrie eines fixen Werkzeuges (z.B. Prägestempel, 2K-Werkzeug) vorgegeben. Daraus resultieren kürzere Vorlaufzeiten sowie eine hohe Flexibilität und Wirtschaftlichkeit.

Kern jedes LPKF Microline 3D Lasersystems ist der bereits angesprochene Bearbeitungskopf mit drei optischen Achsen. Mit einer sehr schnellen Ansteuerung und einer hoch exakten Optik können Strukturen kleiner $100\ \mu\text{m}$ auf dreidimensionalen Formteilen erzeugt werden. Der fokussierte Strahl eines diodengepumpten Festkörperlaser der Wellenlänge $1064\ \text{nm}$ wird durch Spiegel nahe zu massenträgheitlos über die Oberfläche des Schaltungsträgers abgelenkt. Dabei wird der Strahl von einer f-Theta-Linse in der Bearbeitungsebene fokussiert. Ein Lineartranslator, ein Teleskop mit einer ansteuerbaren beweglichen Linse, gestattet durch die gezielte Defokussierung des Teleskops den Fokushub in longitudinaler Richtung. Die Kombination aus Teleskop und Spiegel-Ablenk-Einheit ermöglicht es, den Laserstrahl entlang komplexer dreidimensionaler Oberflächentopographien mit hohen Vorschubgeschwindigkeiten von bis zu $4000\ \text{mm s}^{-1}$ zu führen (Abbildung 7).

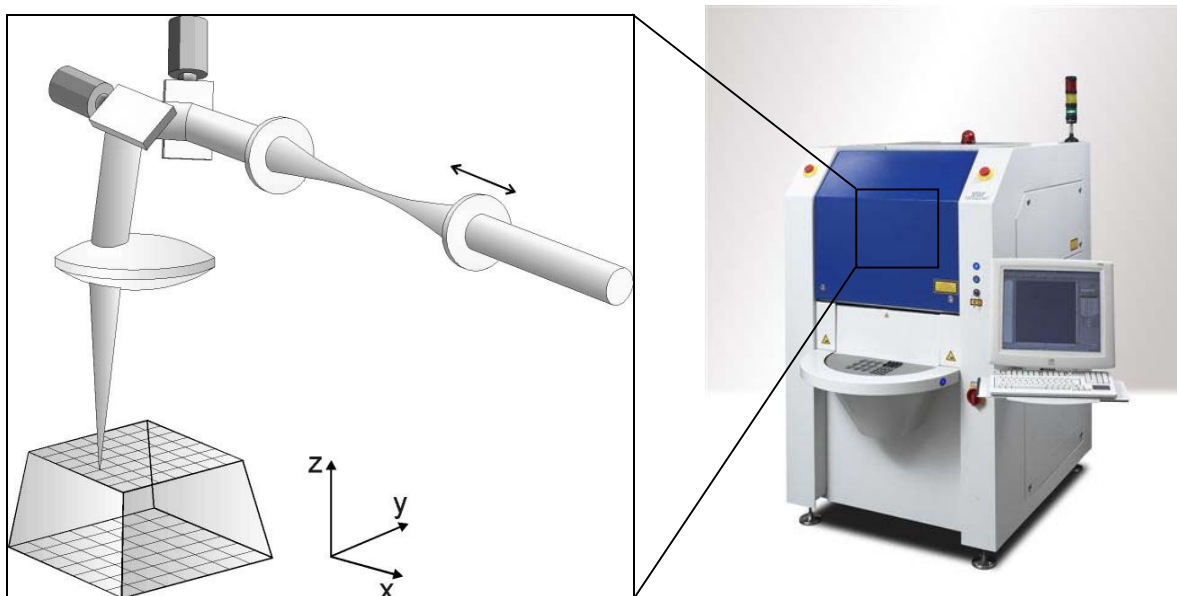


Bild 7: Bearbeitungskopf mit drei optischen Achsen / LPKF MicroLine 3D Industrial

Neben der reinen Strukturierungsdauer, der sog. Hauptzeit bestimmt die Zu- und Abführung der zu strukturierenden Bauteile die Zykluszeit und damit den Durchsatz bei der Laser-Direkt-Strukturierung. Daher ist ein wesentlicher Augenmerk auf die effiziente Gestaltung des Bauteilhandlings zu legen. Da spritzgegossene Schaltungsträger die unterschiedlichsten Bauformen und –größen haben, wird in der Regel das Bauteilhandling, auf die zu bearbeitende Bauteilgeometrie angepasst. Als Basis steht ein Rundschalttisch mit Vision-System zur Bauteilantastung sowie eine,

als Durchlaufanlage konzipierte Variante mit einem Werkstückträgersystem zur Verfügung (Abbildung 8).

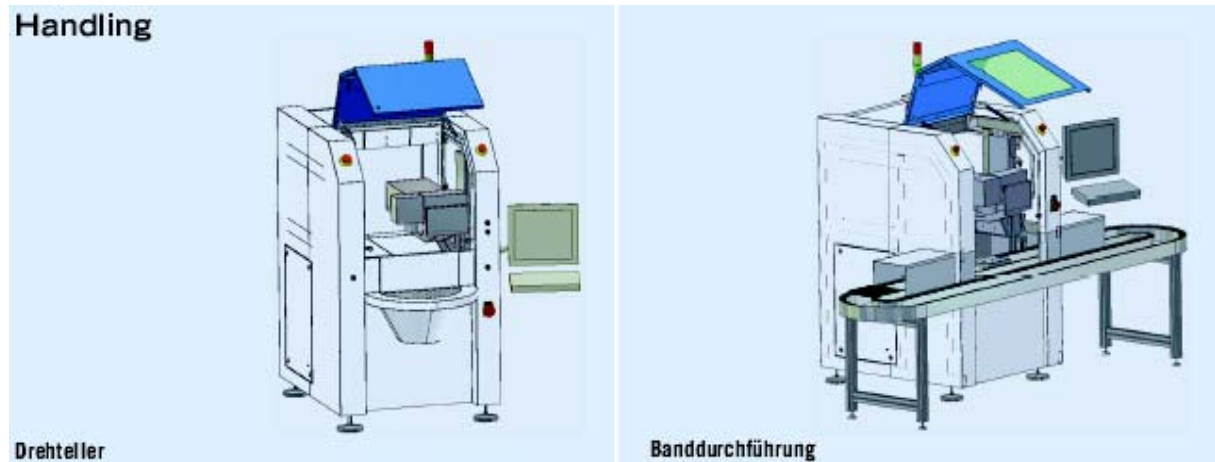


Bild 8: Unterschiedliche Handlingvarianten am LPKF MicroLine 3D Industrial

3.3 Thermoplastmaterialien für den Serieneinsatz

Es stehen eine Reihe interessanter technischer Kunststoffe zur Verfügung, die in der Elektronikindustrie eingesetzt werden. Für den Einsatz als MID ist das Portefeuille jedoch deutlich eingeschränkt. Wesentliche Kriterien sind zum einen die Metallisierbarkeit, bzw. deren Haftfestigkeit und zum anderen die, bei der SMD-Bestückung notwendige Temperaturbeständigkeit.

Oft ist die Auswahl an Thermoplasten zusätzlich durch das MID-Herstellungsverfahren noch weiter eingeschränkt. So können z.B. beim Zwei-Komponenten-Spritzgießen oft nur Thermoplaste mit speziellen rheologischen Eigenschaften (z.B. niedrige Schmelzviskosität um feine Kavitäten zu füllen) eingesetzt werden.

Die vorgenannten Beschränkungen gelten für die Materialien zur Laser-Direkt-Strukturierung prinzipiell nicht. Die Verarbeitung erfolgt im Ein-Komponenten - Spritzguss und erfordert daher keine besonderen Verarbeitungseigenschaften. Die Aktivierung und die anschließende Haftung der Metallisierung wird durch das unter 2.1 beschriebene Oberflächentreatment (Wechselwirkung: Material – Laser) erzeugt. Lediglich die für viele Anwendungen geforderte Temperaturbeständigkeit schränkt das Portefeuille an zur Verfügung stehenden Werkstoffen ein. Wird jedoch nicht gelötet und ist auch aus anderem Grund keine erhöhte Wärmeformbeständigkeit gefordert kann prinzipiell jeder Thermoplast für die Laser-Direkt-Strukturierung modifiziert werden. Die derzeit qualifizierten und zur Verfügung stehenden Materialien sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Property	Unit	Ultradid®T 4381 LDS	Vectra® E820i LDS	Vectra® E840i LDS	Pocan DP7102 LDS	Pocan TP710-003	Pocan DPT7140 LDS
Polymertype	-	PA6/6T	LCP	LCP	PBT	PBT	PET/PBT
Mold shrinkage	%	constrained 0,47	parallel/normal 0,3 / 1,4	parallel/normal 0,1 / 0,5	parallel/normal 1,3/1,3	parallel/normal 1,4 / 1,4	parallel/normal 0,24 / 0,98
Post-shrinkage	%	-	-	-	parallel/normal 0,1 / 0,3	parallel/normal 0,3 / 0,3	parallel/normal 0,05 / 0,22
Tensile strength	Mpa	110	116	102	55	51	110
Tensile modulus	Mpa	9000	9000	9300	5600	5500	12000
Strain at break	%	2,1	4	3,4	2	3,3	1,5
Charpy impact strength	kJ/m ²	40	19	19	25	40	25
Density	g/cm ³	1,52	1,79	1,79	1,57	-	1,75
Melt volume-flow rate (MVR)	cm ³ /10min	-	-	-	10	5	16 *
Melting temp. DSC	°C	295	335	335	225	225	-
Deflection temp. (HDT/A) 1,8MPa	°C	265 * ²	220	220	115	110	250 * ²
Content of material/filler	%	35	40	44	25	25	40

* = 280°C/2,16 kg

*² = 0,45MPa

Tabelle 1: Vergleich Materialkennwerte

3.4 Metallisierung der laseraktivierten Bauteile

Die in 3.1 beschriebene lasergestützte Spaltung der Metallkomplexe erzeugt eine Keimbildung, die eine Metallabscheidung in eben diesen laseraktivierten Bereichen katalysiert. Für diesen Prozess werden i.d.R. chemische Kupferelektrolyten verwendet, die typischerweise 5...8 µm Kupferdicken erzeugen. Anschließend kann ein entsprechendes Oberflächenfinish aufgebracht werden. In Tabelle 2 ist ein beispielhafter Metallisierungsarbeitsgang dargestellt, der einem industriellen Standardprozess entspricht. Zu beachten ist die verkürzte Prozesskette verglichen mit Standard-Kunststoffmetallisierungen. Ökologisch bedenkliche Beiz- und Bekeimungsschritte, die von der vollflächigen Kunststoffmetallisierung, bzw. dem Zwei-Komponenten-Spritzguss bekannt sind, entfallen.

	Operation	Process	Temperature	Time (minutes)
1	Ultrasonic	*Ronashed NT-10	60°C	7
2	Rinse	Running deionised water	Cold	1
3	Rinse	Running water (city)	Cold	1
4	Electroless	Circuposit 3D-MID	55°C	30
5	Rinse	Running water (city)	Cold	1
6	Rinse	Running deionised water	Cold	1
7	Pd Catalyst	Ronamerse MID Catalyst	RT	1
8	Electroless	Ronamax MID	88°C	14
9	Rinse	Running water (city)	Cold	1
10	Rinse	Running deionised water	Cold	1
11	Electroless	Auroelectroless MID	85°C	10
12	Rinse	Running water (city)	Cold	1
13	Rinse	Running deionised water	Cold	1
14	Dry			

Tabelle 2: Prozessfolge Metallisierung (Rohm & Haas GmbH)

Typischerweise wird die Metallisierung per Gestell oder im Trommelverfahren durchgeführt. Die Integration der LDS-Metallisierprozesse in serientaugliche Anlagentechnik erfordert ein umfassendes Know-how zur Einhaltung vorgegebener Prozessfenster und eine technisch gut gelöste Online-Analytik der Metallisierbadparameter. Abbildung 9 zeigt eine automatische Serienanlage der Fa. Schaal MID Technology GmbH zur Metallisierung von MID-Teilen, in der alle Metallisierungs-Prozessstufen für das LDS-Verfahren integriert sind.



Bild 9: Automatische Galvanik-Anlage (Schaal)

4 Verfahrensgerechte Konzeption der Mikrodrehgeber

4.1 Bauteilgestaltung

Das LPKF-LDS-Verfahren ermöglicht die Strukturierung entlang beliebiger Oberflächentopographien, soweit keine Strahlabschattung vorliegt und die Flächen in der Projektion erreicht werden. Innerhalb von Sekunden strukturiert der Laserstrahl das Leiterbild direkt vom Rechner auf die Oberfläche des dreidimensionalen Spritzgießformteils. Dabei erfüllt der Laser die unter 3.1 beschriebenen zwei Aufgaben: Zum einen wird im Bereich des Leiterbildes der dotierte LDS-Kunststoff aktiviert und zum anderen erzeugt der Laser eine mikrorauhe Oberfläche, die wiederum eine ausreichende Haftung der Leiterbahnen gewährleistet. Die dreidimensionale Laserstrukturierung nach dem LPKF-LDS-Verfahren setzt zum einen voraus, dass die Fokussierung exakt entlang der Oberflächentopographie des Bauteils geführt wird, zum anderen eine verfahrensgerechte Konstruktion eben dieses Kunststoffbauteils, so wie die des zu strukturierenden Schaltungslayouts.

Um die Laserstrukturierung im Rahmen des LPKF-LDS-Verfahrens ebenso kosteneffizient zu gestalten ist die Zykluszeit pro Bauteil zu minimieren. Diese wird im wesentlichen durch die Handlingzeit und die Strukturierungszeit bestimmt, die sich wiederum proportional zur Layoutfläche verhält. Die Handlingzeit wird maßgeblich durch die Anzahl der Positionen bestimmt, in denen das Bauteil gehandhabt werden muss. Beides, Layoutfläche und Anzahl der Positionen ist durch entsprechendes Design des Bauteils zu minimieren.

Mit dem LPKF-LDS-Verfahren können Schrägen, bzw. Flanken von maximal 75° strukturiert werden (Abbildung 10). Es sind auch größere Flankenwinkel möglich, jedoch muss gewährleistet sein, dass alle Flächen in der Projektion (unter Einhaltung des max. möglichen Flankenwinkels) erreicht werden, andernfalls muss das Bauteil in mehreren Positionen laserstrukturiert werden, was sich negativ auf die Zykluszeit und damit auf die Wirtschaftlichkeit auswirkt.

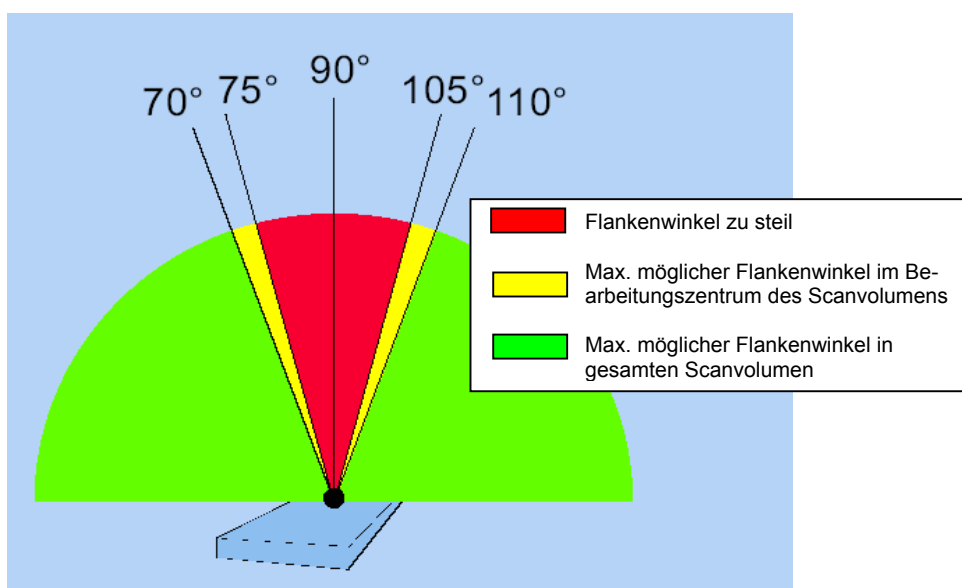


Bild 10: Zulässige Flankenwinkel bei der Laser Direktstrukturierung

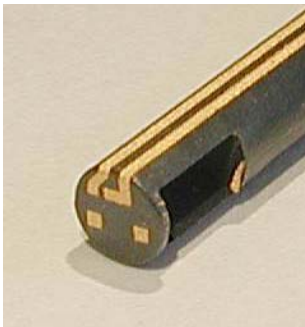
4.2 Layoutgestaltung

Das elektrische Leiterbahnlayout wird so gestaltet, dass es den maximalen Arbeitsbereich von 200 mm x 200 mm in der XY-Ebene, sowie einen Fokushub in Z-Richtung von maximal 24 mm nicht überschreitet.

Grundsätzlich lassen sich mit dem LPKF-LDS-Verfahren feinste Strukturen mit bis zu 150 µm Breite erzeugen. Für die vorliegenden beiden Anwendungsbeispiele sind minimal 200 µm Leiterbahnen notwendig, die in den feinsten Bereichen ca. 400 µm Pitch aufweisen. Bei der Layoutgestaltung ist darauf zu achten, dass die Kupferschichtdicken typischerweise im Bereich 5...8 µm liegen. Es können auch Kupferschichtdicken > 8 µm erzeugt werden. Dies allerdings nur elektrolytisch, d.h. stromführend. Das setzt wiederum voraus, dass das Leiterbahnlayout zusammenhängend ist, bzw. Opferstrompfad in dem Layout vorgesehen sind, die nach der Metallisierung wieder aufgetrennt werden müssen.

4.3 Positioniermarken / Fiducials

Bei Verwendung des LPKF MicroLine 3D Industrial mit integriertem Vision System besteht die Möglichkeit, eine automatische Korrektur der Strukturierungsdaten relativ zu dem zu strukturierenden Bauteil vorzunehmen. Das Visionssystem erkennt die Position des Kunststoffbauteils über frei definierbare Fiducials (Passermarken), nimmt anschließend eine Online-Datenkorrektur vor und dreht, verschiebt oder skaliert die Strukturierungsdaten entsprechend. Die maximale Größe der Fiducials kann 7 mm x 6 mm betragen. Bei der vorliegenden Anwendung werden diese idealerweise als Bohrung ausgeführt.



Rotationssensorgehäuse



Positionssensor

Bild 11: 3D-CAD Konstruktionsmodelle der Mikrodrehgeber unter Berücksichtigung der vorgenannten Konstruktionsrichtlinien (HSG-IMAT, Festo)

5 Aufbau der Mikrodrehgeber am Beispiel des Positionssensors

5.1 Materialauswahl

Für das Laser Direkt Strukturierungs-Verfahren sind prinzipiell alle unter 3.1, Tabelle 1 aufgeführten Werkstoffe geeignet. Da auf dem Positionssensorgehäuse neben dem aktiven Bauelement noch eine Reihe passiver SMD-Komponenten bestückt werden und der sich aus dem entsprechenden Löttemperatur-Profil ergebenden mindest Wärmeformbeständigkeit werden ein teilaromatische Polyamid (PA6/6T) der Fa. BASF, das LCP der Fa. Ticona, sowie ein PET/PBT-Blend der Fa. LANXESS als in Frage kommenden Serienwerkstoffe ausgewählt (vgl. Tabelle 1).

5.2 Laserstrukturierung und anschließende Metallisierung

Die aus den ausgewählten Materialien spritzgegossenen Substrate werde anschließend, wie unter 3.2 beschrieben, auf einer LPKF MicroLine 3D Industrial Laseranlage mit dem entsprechenden Schaltungslayout strukturiert. Die Metallisierung der Laser-aktivierten Bereiche erfolgt ebenfalls wie unter 3.4 beschrieben. Der Schichtaufbau wurde wie folgt gewählt:

Chemisch Kupfer: 5 μm

Chemisch Nickel: 3 μm

Flash-Gold: 0,1 μm

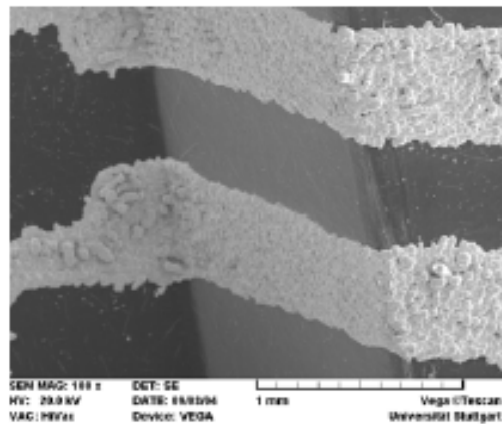
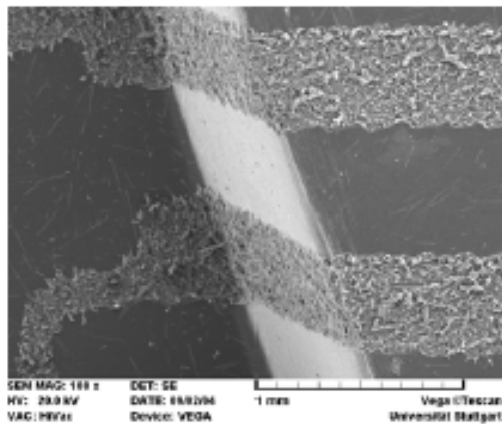


Bild 12: REM Aufnahmen nach Laserstrukturierung bzw. Metallisierung (HSG-IMAT)

5.2 Aufbau- und Verbindungstechnik

Auf dem Positionssensor werden neben dem eigentlichen ASIC eine Diode (Mmelf), zwei Transistoren (SOT23) sowie 2 Kondensatoren und ein Widerstand (beides 0603) aufgebaut. Gemäß den Anforderungen an die Belastung und Zuverlässigkeit wurde ein bleifreier Dampfphasen-Lötprozess mit geringem Temperaturgradienten ausgewählt. Abbildung 13 zeigt das Temperaturprofil für ein SnAg(Cu)-Lot welches ebenfalls für diese Anwendung ausgewählt wurde.

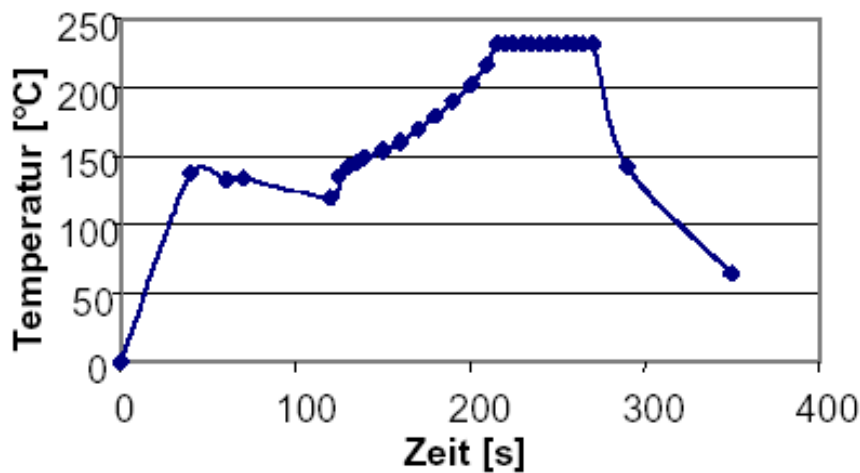


Bild 13: Temperatur-Profil für bleifreien Dampfphasen-Lötprozess (HSG-IMAT)

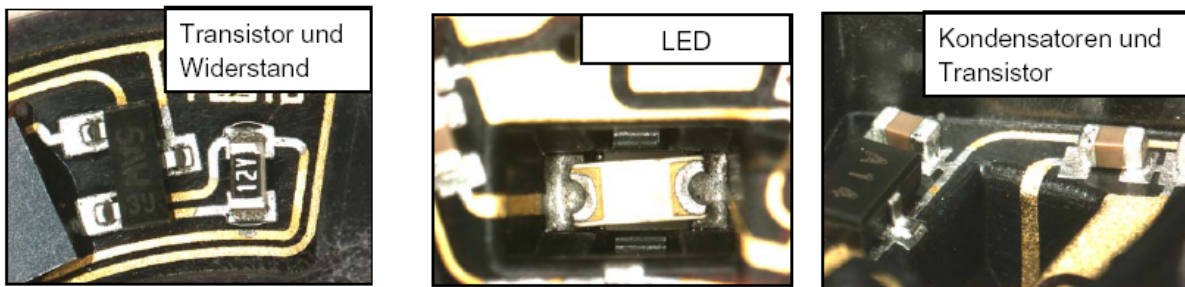


Bild 14: Dampfphasengelötete SMD Bauelemente (HSG-IMAT)

Die Bestückung der Flip-Chips erfolgt nach dem Standard SMD-Lötprozess mittels Leitkleben und ggf. anschließendem Underfillprozess. Außer dem Klebstoffsystem selbst stellt die Dosierung bei feinsten Abständen insbesondere bei 3D-Geometrien, wo der Schablonendruck nicht mehr angewendet werden kann, und die bei der Klebetechnik erforderliche hoch genaue Platzierung der Nackt-Chips eine Herausforderung dar. Der Aufbau der Nacktchips wurde sowohl mit isotrop leitfähigem Kleber (ICA) und nichtleitendem Kleber (NCA) durchgeführt.

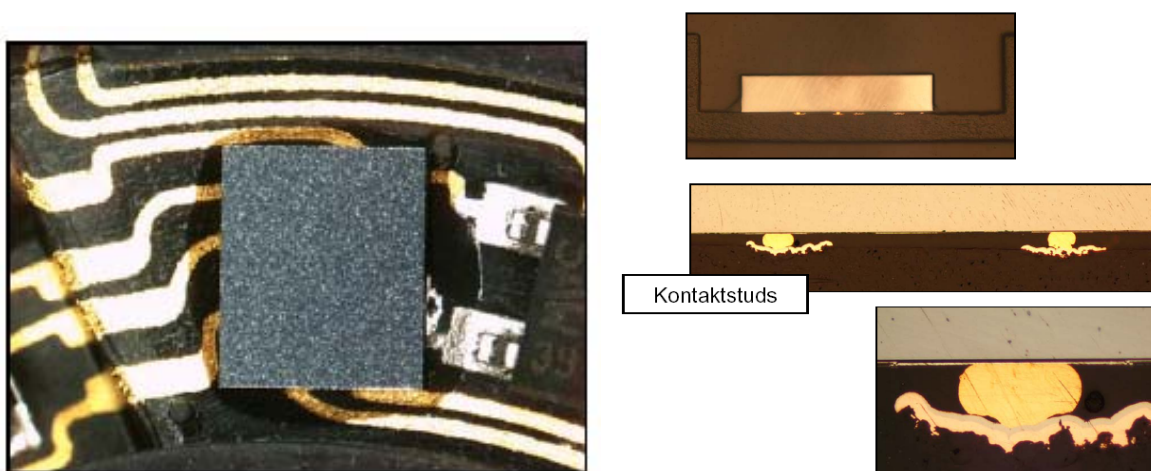


Bild 14: Geklebter Flip-Chip, Schliff der Klebeverbindung (HSG-IMAT)

Die eingesetzten Chips sind mit Au-Studs versehen. Aufgrund des Chiplayouts, bei dem sich alle 4 Pads am Rand der Unterseite des Chips befinden, wurde beim Aufbau der Muster mit ICA ein mit definierten Füllkörpern gefüllter Klebstoff als „Abstandshalter“ auf der den Pads gegenüberliegenden Seite eingesetzt, um ein Verkippen des Chips bei der Montage und der Aushärtung des Klebstoffs zu verhindern. Bei der Verwendung von NCA ist dies nicht erforderlich, da ein am Bestückungskopf angelegtes Vakuum das Verkippen während des Aushärtens verhindert.

6 Qualifizierungsergebnisse am Beispiel des Rotationssensors

Aufgrund der hohen Anforderungen in Bezug auf Temperaturbelastbarkeit kommt für die Anwendung als Rotationssensor im Kraftfahrzeug-Bereich nur ein Werkstoff mit besonders niedrigem Wärmeausdehnungskoeffizienten in Frage. Gerade bei der Flip-Chip Bestückung spielt insbesondere das Verhalten bei Wärmewechselbelastung eine entscheidende Rolle. Die aufgrund des unterschiedlichen Wärmeausdehnungsverhalten von Substrat und Chip verursachte Schwächung der Kontaktierung ist ein wesentlich zu prüfendes Kriterium. Aus den für Automobil-Anwendungen bekannten Qualitätsanforderungen, die eine Funktion der Baugruppe über der gesamten Lebensdauer unter allen Belastungsfällen gewährleisten sollen, leiten sich folgende zu prüfende Anforderungen an das MID-Konzept ab:

- Temperatur-Schock-Lagerung
1000 Zyklen bei -40° C / 150°C (2-Kammer-Paternoster-Schrank)
- Hochtemperatur-Lagerung
1000 Stunden bei 150°C
- Feuchte-Lagerung
1000 Stunden bei 85 % relativer Feuchte / 85°C

Im Anschluss an die o.a. Prüfungen werden sog. „end-of-life“-Prüfungen durchgeführt, bei denen die Zeit, bzw. Zyklusanzahl bis zu Versagen des Bauteils ermittelt wird.

Weder bei der Hochtemperatur-Lagerung, noch nach Feuchte-Lagerung waren Ausfälle zu verzeichnen. Jedoch zeigen die Ergebnisse nach Temperatur-Schock-Lagerung den bereits angesprochenen Einfluss der Wärmeausdehnung deutlich. So ist eine höhere Ausfallwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der Orientierung des Flip-Chips zur Spritzgießrichtung des Substrates zu verzeichnen (vgl. Bild 15).

Die Ergebnisse in Bild 15 zeigen z.B., dass bei Längs-Orientierung des Nacktchips und Auswahl einer geeigneten Leitkleber/Underfill Kombination (C) eine zuverlässige Flip-Chip Kontaktierung auch nach 1000 Zyklen gewährleistet ist.

Bei Quer-Orientierung der Flip-Chip I/Os zeichnet sich jedoch eine deutliche Ausfallwahrscheinlichkeit durch Wärmewechselbelastung ab.

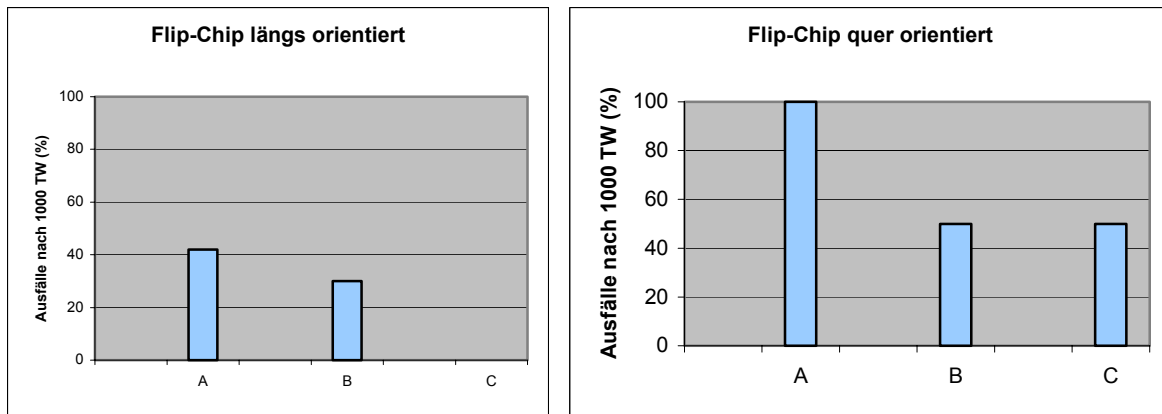


Bild 15: Ausfälle nach Temperatur-Schock-Lagerung, Vergleich längs/quer

Diese Ergebnisse korreliert mit dem gemessenen Wärmeausdehnungskoeffizienten des jeweiligen Materials, d.h. je höher der Wärmeausdehnungskoeffizient ist, je höher ist auch die Ausfallwahrscheinlichkeit nach Temperatur-Schock. Da der Wärmeausdehnungskoeffizient maßgeblich durch die Wahl der Füllstoffe des Thermoplasten beeinflusst wird, wurde durch geeignete Materialauswahl versucht die Ausdehnung zu minimieren. Da das rein Mineral-gefüllte LCP (E820i LDS) hohe Wärmeausdehnung zeigt, wurde für die Drehzahlsensoren ein mit 30% Glasfaser gefülltes LCP verwendet (LCP MID GF30). Durch die Orientierung der Glasfasern kann man in Spritzrichtung eine sehr geringe Materialausdehnung unter Wärmeeinfluss erreichen, welches das gute Ergebniss mit „null“ Prozent Ausfällen bei längs orientierten Flip Chips zeigt.

Um auch quer zur Spritzrichtung, bzw. zum Nacktchip ein entsprechend zuverlässiges Ergebnis zu erzielen, wurde ein neuer LCP-Typ entwickelt, der mit anderen Füllstoffen ausgestattet ein stärker isotropes Ausdehnungsverhalten zeigt. Tabelle 2 zeigt den Vergleich verschiedener LCP Typen.

Eigenschaft	Einheit	LCP-MID GF30	Vectra E820i LDS	Vectra LP1223
Polymerbasis	-	E130i	E820i	E540i
Zugfestigkeit	Mpa	150	116	75
Zug-E-Modul	Mpa	15000	9000	8300
Bruchdehnung	%	1,6	4	2,3
Wärmeformbest. (HDT/A) 1,8MPa	°C	280	220	k.A.
Wärmeausdehnung (-50°C...200°C)	10 ⁻⁶ K ⁻¹	k.A.	parallel/normal 23 / 55	parallel/normal 12 / 10
Wärmeausdehnung (25°C...85°C)	10 ⁻⁶ K ⁻¹	parallel/normal 10 / 41	parallel/normal 23 / 52	parallel/normal 10 / 9
Wärmeausdehnung (-40°C...150°C)	10 ⁻⁶ K ⁻¹	k.A.	parallel/normal 23 / 90	parallel/normal 21 / 41
Wärmeausdehnung (-40°C...150°C)	10 ⁻⁶ K ⁻¹	k.A.	k.A.	parallel/normal 8 / 27

Tabelle 3: Materialeigenschaften unterschiedlicher LCP-Typen

7 Zusammenfassung

Im IMDAKT Projekt konnte erfolgreich am Beispiel von zwei Mikro-Drehgeber-Konzepten gezeigt werden, dass die Kombination aus MID als Substrat und Flip-Chip als Aufbau und Verbindungstechnik höchste Integration, bei gleichzeitig einfacher Prozesskette zulässt und sich gerade dadurch wirtschaftlich Vorteile bieten. Im speziellen eignet sich die Laser-Direkt-Strukturierung als Herstellungsverfahren für die MID-Substrate, da diese Technologie als Laser-gestütztes Verfahren sowohl feine Pitches bedienen kann, wie auch eine vergleichsweise kurze und damit wirtschaftliche Prozesskette bietet. Die anschließend durchgeführten Zuverlässigkeitstests zeigen, dass es auch mit thermoplastischen Substraten möglich ist, höchsten Anforderungen gerecht zu werden. Deutlich wird dabei auch, dass die Werkstoffauswahl, insbesondere bei der Flip-Chip Kontaktierung in Hinblick auf die Wärmeausdehnung der Materialien, eine ganz entscheidende Rolle spielen.

8 Danksagung

Die vorgestellten Untersuchungen wurden im Rahmen des vom Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Verbundprojektes „IMDAKT – Innovative Mikrodrehgeber für die Automatisierungs- und Kraftfahrzeugtechnik“ durchgeführt (VDI / VDE-IT, Förderkennzeichen:16SV1714). Die Autoren möchten hiermit den Dank an alle beteiligten Projektpartner aussprechen.

6 Literatur

- [1] U. Kessler, H. Kück, W. Eberhardt: Adhesive Technology For Flipchip Assembly on Moulded Interconnect Devices (MID); Proceedings of The Sixth IEEE CPMT Conference on High Density Microsystem Design and Packaging and Failure Analysis (HDP'04) June 30-July03 2004; Baolong Hotel, Shanghai; p.242-247
- [2] U. Scholz, W. Eberhardt, U. Keßler, H. Kück, "Flip Chip Assembly on Laser Patterned Molded Interconnect Devices (MID)", MICRO SYSTEM Technologies 2003, München, 08.10.2003
- [3] Y. Yagi et al.: Micro Camera Module with MID Using Flip-Chip Mounting Technology ; Proceedings MID 2002, Erlangen, 25.-26.09.2002
- [4] W. Eberhardt, T. Gerhäuser, M. Giousouf, H. Kück, R. Mohr, D. Warkentin: Innovative concept for the fabrication of micromechanical sensor and actuator devices using selectively metalized polymers; Sensors and Actuators A 97-98 (2002), 473-477
- [5] W. Eberhardt, H. Kück, M. Münch, P. Schilling, M. Ashauer, R. Briegel, "MID-Gehäuse für ein Durchfluss-Sensorsystem", Kunststoffe 3/2003, S. 51ff.
- [6] Scheel, W. (Hrsg.): Baugruppentechologie der Elektronik, 2. erweiterte Ausg., Verlag Leuze, Saulgau, 1999

- [7] Kunststoff-Metallisierung – Handbuch für Theorie und Praxis, Saulgau, 1991
- [8] Ebneht, H.: Metallisieren von Kunststoffen, expert-Verlag, Renningen-Malmsheim, 1995
- [9] Steffen, H.: Kupfer in der Leiterplattentechnik. In: Kanani, N. (Hrsg.): Kupferschichten, 1. Aufl., Leuze Verlag, Saulgau, 2000
- [10] Jehn, H. A.: Galvanische Schichten, expert-Verlag, Ehningen, 1993
- [11] Forschungsvereinigung Räumlich Elektronischer Baugruppen 3-D MID e.V. (Hrsg.): „Herstellungsverfahren, Gebrauchsanforderungen und Materialkennwerte Räumlicher Elektronischer Baugruppen 3-D MID“, Handbuch für Anwender und Hersteller, 1. gebundene Ausg., Erlangen, 2004
- [12] „Laserunterstützte, volladditive Metallisierung hochtemperaturbeständiger Kunststoffe für 3D-MIDs“, R. Schlüter, J. Kickelhain, M. Hüske, Ulmer Gespräche, 05/2002
- [13] Naundorf, G., Wißbrock, H.: Neuartige Wirkprinzipien und Werkstoffe zur lasergestützten Fertigung elektronischer Schaltungsträger, PLUS 3 (2000) 1 S. 1029-1304
- [14] Naundorf, G., Wißbrock, H.: A fundamentally new mechanism for additive metallization of polymeric substrates in ultra fine line Technology illustrated for 3D-MID, in: Proceedings of the 4. International Congress Molded Interconnect Devices, Erlangen 27. u. 28. September 2000
- [15] Naundorf, G., Wißbrock, H.: Feinstrukturierte Metallisierung von Polymeren – Ein neues Wirkprinzip am Beispiel 3-D MID, Metalloberfläche 11/2000, 54. Jahrgang
- [16] Wißbrock, H.: Laser-Direkt-Strukturieren von Kunststoffen – Ein neuartiges Verfahren im Spiegel eingeführter MID-Technologien, Kunststoffe 11/2002, Vol. 92, S. 101-105