Schlussbericht vom 31.03.2023

zu IGF-Vorhaben Nr. 21115N

Thema

Additive Fertigung, Laserdirektstrukturierung und chemische Metallisierung von Duroplasten: Material- und Prozessentwicklung (FLaeDle)

Berichtszeitraum

01.04.2020 bis 30.09.2022

Forschungsvereinigung

Hahn-Schickard-Gesellschaft e.V.

Forschungseinrichtung(en)

Forschungseinrichtung 1:
Hahn-Schickard
Allmandring 9 b, 70569 Stuttgart

Forschungseinrichtung 2:
Universität Stuttgart
Institut für Mikrointegration
Allmandring 9b,70569 Stuttgart

Forschungseinrichtung 3:
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Institut für Mikrosystemtechnik IMTEK
Professur für Werkstoffprozesstechnik
Georges-Köhler-Allee 102, 79110 Freiburg

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Inhalt

Thema 1
Berichtszeitraum 1
Forschungsvereinigung 1
Forschungseinrichtung(en) 1
Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse im Berichtszeitraum 3
AP 1: Detail-Konzeption der Arbeiten und Auswahl der Ausgangsmaterialien 3
AP 2.1: Erarbeitung von laseraktivierbaren Formulierungen für die Additive Fertigung 4
AP 2.2: Erarbeitung stabiler Harzdispersionen für die Additive Fertigung 5
AP 3.1: Charakterisierung der Polymerisierbarkeit der Harzformulierungen 5
AP 3.2: Charakterisierung des gehärteten Materials aus der Additiven Fertigung 6
AP 4: Prozesserarbeitung und Charakterisierung von additiv gefertigten 2D-Testsubstraten 7
AP 5: Erarbeitung des Laseraktivierungsprozesses 11
AP 6: Erarbeitung des außenstromlos chemischen Metallisierungsprozesses 12
AP 7: Optimierung der Harzformulierung 17
AP 8: Prozessübertragung auf 3D-Bauteile 17
AP 9: Aufbau und Test 3D-Technologiedemonstrator 17
AP 10: Ausarbeitung von Empfehlungen 17
Fazit 18
Anwendungsmöglichkeiten und Nutzen für KMU 18
Verwendung der Zuwendung 18
Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit 19
Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft 19
Danksagung 21

Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse im Berichtszeitraum

AP 1: Detail-Konzeption der Arbeiten und Auswahl der Ausgangsmaterialien

Ziel des Projekts ist die Herstellung von dreidimensionalen Schaltungsträgern (mechatronic integrated device, MID) über das additive Fertigungsverfahren digital light processing. Dazu soll ein entsprechendes Material formuliert und der Verarbeitungsprozess entwickelt werden. Der Lösungsweg ist ein photopolymerisierbares Harz auf Acrylatbasis mit einem Füllstoff und einem speziellen Additiv anzumischen, über digital light processing (DLP) zu einem Bauteil zu verarbeiten und in Folgeprozessen zu einem mechatronischen Grundkörper zu veredeln. Der Füllstoff soll auf den speziellen Anwendungsfall angepasste Materialeigenschaften ermöglichen. Das Additiv dient in den Folgeprozessen dazu, in einer Metallsalzlösung die Abscheidung von Metall auf der Oberfläche des Bauteils lokal katalytisch zu begünstigen. Der Prozess lehnt sich damit an die Laserdirektstrukturierung (LDS) der Firma LPKF an, bei der ebensolche LDS-Additive eingesetzt werden. Die Additive werden üblicherweise in thermoplastische Werkstoffe eingearbeitet und das Material über Spritzguss zu Bauteilen verarbeitet. Nach dem Spritzgießen wird mit einem Laserstrahl die Oberfläche selektiv bearbeitet, wobei nach der Theorie die Additive freigelegt und aktiviert werden. Mit den selektiv aktivierten Oberflächen werden die Bauteile in einer Serie von nasschemischen Badprozessen behandelt und so auf den aktivierten Bereichen Metall abgeschieden, das den elektrisch leitfähigen Teil des Materialverbunds bildet. Typisch sind hier Schichten aus der Materialfolge Kupfer (als leitfähige Schicht), Nickel (als Diffusionssperre) und Gold (als Korrosionsschutz und Löthilfe).

Zu Beginn des Projekts wurden in AP 1 ein Lastenheft mit Zielvorgaben zu den physikalischen Eigenschaften der Harzformulierung ausgearbeitet.

- Das Material soll eine Wärmeleitfähigkeit von mindestens 1 W/m·K aufweisen und einen Wärmeausdehnungskoeffizienten möglichst nah an dem von Kupfer (16 ppm/K) haben.
- Aufgrund der vorhandenen Anlagentechnik soll das Harz bei einer Wellenlänge von 365 nm polymerisierbar sein und eine Viskosität von unter 1.1 Pa·s bei 28 °C aufweisen.
- Da der Aufbau von größeren Bauteilen mittels DLP einige Stunden dauern kann, wird eine stabile, homogene Dispersion über einen Zeitraum von mindestens 11 Stunden angestrebt.
- Da die Schichtdicke, in der das Material verarbeitet werden kann, direkt von dem Durchmesser der Füllstoffpartikel abhängt, sollen diese nicht größer als 10 µm sein.
- Das Material soll zu Reinigungszwecken löslich in Isopropanol sein.
- Um Bauteilverzug zu vermeiden, soll der Materialschrumpf während der Polymerisation gering sein.

Basierend auf diesen Anforderungen wurde am IMTEK eine Mischung aus multifunktionalen Acrylaten als Monomere ausgewählt, zur Sicherung der schnellen Polymerisierbarkeit. Zudem sollen Aluminiumoxid Mikropartikel als Füller dienen um die geforderte hohe Wärmeleitfähigkeit von 1 W/m·K zu gewährleisten.

Die Harzmischungen sollen auf kommerziellen Stereolithographie- bzw. digital light processing-Anlagen verarbeitet werden können. Diese sind in der Industrie ausreichend verbreitet. Da

solche Anlagen für die Verarbeitung großer Materialvolumina ausgelegt sind, die in der Entwicklungsphase nicht sinnvoll im Labor hergestellt werden können, wurde festgelegt, einen am IFM vorhanden Prozessprüfstand an die Anforderungen des Projektes anzupassen und für die Erarbeitung des Prozesses der additiven Fertigung einzusetzen.

Für den Laser Direkt Strukturierungs-Prozess (LDS) wurden bei Hahn-Schickard Stuttgart (HS-S) zwei Laserquellen ausgewählt. Ein nanosekunden-gepulster Infrarotlaser („IR-Laser“, Wellenlänge 1064 nm) und ein pikosekunden-gepulster grün-Laser („PS-Laser“, Wellenlänge 532 nm). Der IR-Laser ist in der Industrie verbreiteter, hat sich jedoch in der Vergangenheit bei manchen Substratmaterialien als nicht tauglich erwiesen. Der Metallisierungsprozess wird an den produzierten Substraten mit Standard-Bädern erarbeitet, um einen späteren Prozesstransfer in die Industrie möglichst einfach zu gestalten.

AP 2.1: Erarbeitung von laseraktivierbaren Formulierungen für die Additive Fertigung

Von Seiten der Industriepartner wurden 6 potentielle LDS-Additive zur Verfügung gestellt, die hinsichtlich ihrer Verwendung für die Stereolithographie getestet werden sollten. Dies sind:

- Fa. Budenheim: D21.005.1
- Fa. LPKF: Aktivator Typ 4
- Fa. Keeling & Walker: ThermoxStanoStat P15G, ThermoxStanoStat P40W, Stanostat CPM10M und Stanostat CP5CM

Ähnlich wie das LPKF Typ 4 Additiv und im Gegensatz zu den Additiven D21.005.1, ThermoxStanoStat P15G, sowie ThermoxStanoStat P40W, sind die zwei neuen Additive (Stanostat CPM10M und Stanostat CP5CM) mit einer Beschichtung versehen. Sie befinden sich jedoch auch beim Hersteller noch im Versuchsstadium. Die Partikelgröße der LDS-Additive wurde mittels Lichtstreuung charakterisiert, zur Abschätzung des auftretenden Streuverhaltens der Partikel während der Polymerisation. Zudem wurde die spezifische Oberfläche über die BET-Methode analysiert, um den Bedarf an Stabilisatoren zu ermitteln, vgl. Tabelle 1.

Tabelle 1 – Tabellarische Zusammenfassung der LDS-Additive

LDS-Additiv	reaktives Metall	BET [m^2/g]	D_{50} [µm]	Beschichtet
D21.005.1	Cu	2.07	1.44	Nein
LPKF Typ 4	Cu	5.78	0.45	Ja
ThermoxStanoStat P15G	Sb	6.39	0.29	Nein
ThermoxStanoStat P40W	Sb	5.47	0.33	Nein
StanoStat CPM10M	Sb	9.64	12.39	Ja
Stanostat CP5CM	Sb	2.68	1.25	Ja

AP 2.2: Erarbeitung stabiler Harzdispersionen für die Additive Fertigung

Die Dispersionen wurden am IMTEK mithilfe einer Planetenkugelmühle homogenisiert, wobei sich ein Zeitfenster von 30 min als ausreichend erwies um die Füllstoffpartikel gleichmäßig zu verteilen und größere Agglomerate aufzubrechen. Die Homogenität wurde über ortsaufgelöste Röntgenfluoreszenz nachgewiesen und die Agglomerate über Lichtstreuung charakterisiert. Als initialer Füllstoff wurde CT1200SG (Almatis), ein Aluminiumoxid mit einer Partikelgröße von ca. 1 µm, in einer Konzentration von 50 vol% eingesetzt. Zudem wurden jeweils 5 gew.% LDS-Additiv hinzugesetzt. Polyethylenglykol und Toluolsulfonsäure wurden als Stabilisatoren getestet. In beiden Fällen ergab sich ein Anstieg der Viskosität über die geforderten 1.1 Pa s. Darüber hinaus wurde 2-[2-(2-methoxyethoxy)ethoxy]-Essigsäure (TODS) in verschiedenen Konzentrationen getestet. Hierbei wurde die Stabilität über Sedimentationsversuche überprüft. Nach Ablauf von 19 Stunden wurde eine Probe von der Oberfläche gezogen. Mittels Thermogravimetrie wurde der Feststoffgehalt bestimmt und mit der Ausgangsdispersion verglichen. Eine stabile Lösung wurde definiert als eine Abreicherung des Feststoffanteils von < 1 gew.%. Hierbei wurde eine Oberflächenbelegung der Partikel mit TODS von ca. 150 %, d.h. 0.0256 mmol/m², als ausreichend ermittelt.

Aufgrund der starken Lichtstreuung der CT1200SG Füllpartikel während der additiven Fertigung, wurden Mischungen mit größeren Aluminiumoxidpartikeln hergestellt. Hierbei wurde das kommerzielle Produkt Silatherm 1432 Plus-012 verwendet. Der D50-Wert dieses Füllstoffes liegt bei etwa 5 µm, was gegenüber CT1200SG eine verstärkte Sedimentation zur Folge hat. Um wieder eine Abreicherung von <1 gew% nach der Sedimentation zu erreichen, wurde die Viskosität der Suspension, welche einen Füllstoffgehalt von 50 vol% hat, auf 4.3 Pa·s angehoben. Die LDS-Additivmenge wurde konstant gehalten. Genauso behielt man die gleiche Partikeloberflächenbeladungsmenge mit TODS.

AP 3.1: Charakterisierung der Polymerisierbarkeit der Harzformulierungen

Die Dispersionen wurden hinsichtlich ihrer Polymerisierbarkeit im relevanten UV-Bereich von 365 – 405 nm getestet. Die Mischung mit dem LDS-Additiv LPKF Typ 4 ließ sich nicht aushärten, da das Additiv eine hohe UV-Absorption zwischen 320 und 420 nm aufweist, siehe Abb. 1.

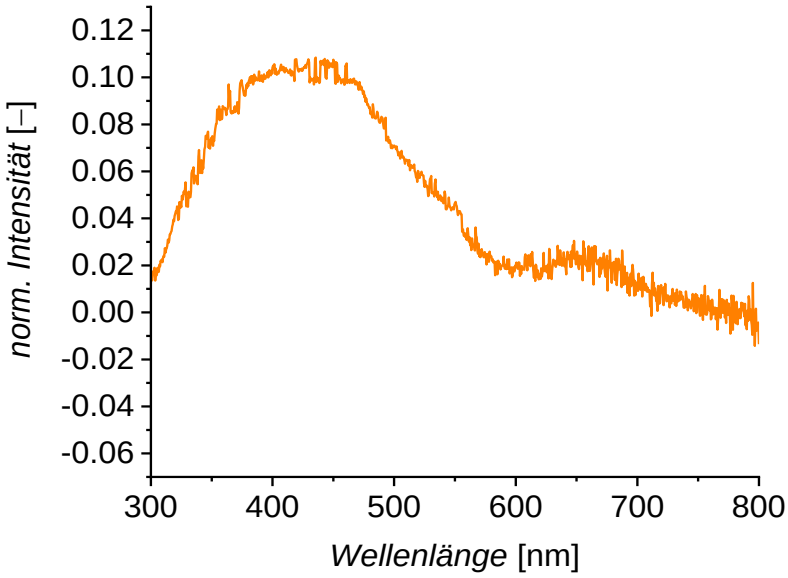


Abbildung 1: UV-Vis Absorptionsspektrum des LDS-Additivs LPKF Typ 4

Alle anderen untersuchten LDS-Additive störten die Polymerisation nicht.

AP 3.2: Charakterisierung des gehärteten Materials aus der Additiven Fertigung

Da zu Beginn des Projektes keine Harzformulierung in ausreichender Menge für den DLP-Prüfstand am IFM vorhanden war, wurden zunächst 2 mm starke, 10 cm x 10 cm große Platten gerakelt und schichtweise in 50-100 µm Schritten polymerisiert. Anschließend wurden Testkörper manuell aus den Platten gefräst. Die gerakelten Platten erwiesen sich haptisch als sehr brüchig und neigten zur Ablösung einzelner Schichten. Durch eine Neuformulierung des Materials konnten die Brüchigkeit reduziert werden. Es wurde versucht, Prüfkörper mit Hilfe einer DLP-Versuchsanlage am IMTEK herzustellen (siehe Abbildung 2). Die Wellenlänge der Anlage liegt bei 405 nm und die Belichtung erfolgt im Bottom-Up-Verfahren. Materialmischungen mit hohem Füllgrad ließen sich jedoch nicht herstellen, da der Füllstoff Licht im Wellenlängenbereich um 405 nm stark streut. Aus diesem Grund wurden die Mischungen mit dem gewünschten Füllgrad von 50 vol% weiterhin gerakelt, um Prüfkörper für die thermische Leitfähigkeitsmessung und die Messung der mechanischen Eigenschaften herzustellen. Die Messung der Prüfkörper mit einem Füllstoffgehalt von 50 vol% ergab eine thermische Leitfähigkeit von 1.7 W/m·K. Der E-Modul liegt bei etwa 980 MPa, die Zugfestigkeit bei 21 MPa und die Bruchdehnung bei etwa 2 %.

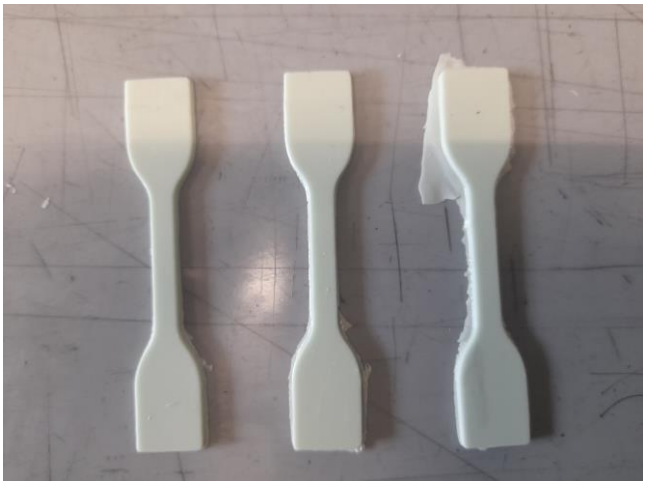


Abbildung 2: Am IMTEK additiv gefertigte Zugstäbe mit mittlerem Füllstoffgehalt.

Die gerakelten Proben von Harzformulierungen mit unterschiedlichen Füllgraden (10, 30 und 50 Vol% Al_2O_3) wurden am IFM mittels thermomechanischer Analyse (TMA) untersucht, um den Wärmeausdehnungskoeffizienten (coefficient of thermal expansion, CTE) und die Glasübergangstemperatur (T_G) zu ermitteln. Dabei ergaben sich die Werte aus Tabelle 2.

Tabelle 2: CTE und T_G bei verschiedenen Füllgraden.

Füllgrad	**CTE in ppm/K (unterhalb / oberhalb T_G)**	**T_G in °C**
10 vol%	37 / 153	74
30 vol%	26 / 120	88
50 vol%	19 / 75	95

Dies zeigt, dass Harzmischungen mit einem Füllgrad von etwa 50 vol% gute Voraussetzungen haben, um langlebige MID herzustellen. Der CTE von unter 20 ppm/K liegt bereits sehr nahe an dem von Reinkupfer (16 ppm/K), aus dem später die leitenden Strukturen aufgebaut sind. Dadurch ergibt sich bei Temperaturschwankungen eine geringe Differenz in der Wärmeausdehnung zwischen Metallschicht und Substrat. Dieser „missmatch“ führt sonst durch auf und abschwellende mechanische Spannungen zwischen den Materialien zu einem Großteil der Ausfälle von elektronischen Schaltungsträgern.

AP 4: Prozesserarbeitung und Charakterisierung von additiv gefertigten 2D-Testsubstraten

Um die am IMTEK entwickelten Harzmischungen im Labormaßstab (< 1 Liter) verarbeiten zu können, wurde ein am IFM vorhandener Testaufbau nach dem Prinzip des digital light processing umgerüstet. Einige der Mischungen wurden auf dieser Laboranlage untersucht und Probekörper aufgebaut. Mit der Laboranlage werden die Harzmischungen nach dem Top-Down-Prinzip mit einer Wellenlänge von 365 nm belichtet. Top-Down bedeutet, dass die Bauplattform in eine Wanne mit Harz abgesenkt wird, während das Bauteil entsteht. Dabei wird durch einen Projektor Schicht für Schicht von oben belichtet. Dagegen wird bei dem Bottom-Up-Prinzip das Bauteil an der Unterseite einer Plattform hängend aus einer Wanne mit Harz herausgezogen und durch den Wannenboden von unten Schicht für Schicht belichtet. Das Top-Down-Prinzip birgt gegenüber dem Bottom-Up-Prinzip einige Vorteile. So ist Beispielsweise die

Anfälligkeit für das Ablösen eines Bauteils durch zu hohes Gewicht bei der Top-Down Ausführung prinzipbedingt nicht vorhanden. Da während des Aufbaus zwar Scherkräfte auf das Bauteil wirken können, jedoch üblicherweise keine Zugkräfte, besteht auch eine bessere Toleranz gegenüber schlechter Anhaftung an der Bauplattform. Da die hier verwendeten Füllstoffe nicht am Polymerisationsprozess beteiligt sind, erhöhen sie nicht nur das Bauteilgewicht (Dichte), sondern verringern auch die Anhaftung an der Plattform.

Der durch das Top-Down-Prinzip benötigte Materialauftrag wird in der Laboranlage durch eine Rakel realisiert. Nach der Belichtung durch den Projektor wird das Bauteil einige Millimeter unter die Harzoberfläche abgesenkt. Das Bauteil wird dann, nach einer kurzen Haltezeit, wieder so weit angehoben, dass sich die Bauteiloberfläche im Abstand einer Schichtstärke unter der Arbeitsebene/Harzoberfläche befindet. Die Rakel, deren Unterseite sich ebenfalls in der Arbeitsebene befindet, streift bei ihrer Überfahrt das überschüssige Material, so dass ein neuer Belichtungszyklus beginnen kann. Die Bauplattform besteht aus einem Lochblech, um beim Eintauchen in das Harzbad möglichst widerstandsarm das Umströmen bzw. Überströmen des Bauteils zu ermöglichen. Durch die unebene Oberfläche des Lochblechs kann die Rakel in den ersten Schichten nicht verfahren werden, da sie mit der Plattform kollidieren könnte. Es ist daher nötig, die Bauteile auf wenigen mm hohen Stützstrukturen aufzubauen. Die Geometrietreue ist für diese Stützstrukturen nicht sonderlich ausschlaggebend, weshalb auf eine Rakelüberfahrt verzichtet werden kann. Stattdessen wird durch eine Wartezeit dem Harz die Möglichkeit gegeben, durch die Schwerkraft teilweise vom Bauteil zu fließen. Ist ein ausreichend großer Abstand zwischen Rakel und Plattform gegeben, wechselt der Betriebsmodus auf den Rakelbetrieb.

Die eingesetzte Wellenlänge von 365 nm hat sich ebenfalls als vorteilhaft im Rahmen der Verarbeitung der Harzsysteme herausgestellt. Die Aluminiumoxidpartikel tendieren bei höheren Wellenlängen (beispielsweise 405 nm) dazu das einfallende Licht zu streuen. Dadurch ist es insbesondere bei hohen Füllgraden so, dass Ränder von Bauteilen keine scharfen Kanten bzw. starke Maßabweichungen durch Überbelichtung aufweisen. Dieses Verhalten ist bei 365 nm Wellenlänge nicht aufgetreten.

Um die Verarbeitbarkeit der Acrylharzsysteme zu untersuchen, wurden Probekörper aufgebaut. Der Fokus der Untersuchungen liegt bei der Verarbeitung nach dem DLP-Prinzip auf den Belichtungsparametern und der Schichtstärke. Durch die Füllstoffe ist die Schichtstärke nach unten hin typischerweise auf einen Wert, der etwa dem 10-fachen Durchmesser der Füllstoffpartikel entspricht, begrenzt. Bei geringeren Schichtstärken würden verkeilte oder agglomerierte Partikel die Rakelkräfte auf das Bauteil übertragen, was zu der Zerstörung des Bauteils führen kann. Nach oben ist die Schichtstärke ebenfalls begrenzt, da ab einer gewissen Dicke die Schichten nicht mehr ausreichend durchpolymerisieren und sich somit nicht mehr mit der darunterliegenden Schicht verbinden. Da die polymerisierte Oberfläche nur noch geringfügig strahlungsdurchlässig ist, lässt sich diesem Effekt nur bedingt durch eine Erhöhung der Belichtungsenergie entgegenwirken. Für die Polymerisation ist die über Strahlung eingebrachte Energiemenge ausschlaggebend. Diese ergibt sich physikalisch aus dem Produkt aus der Lichtleistung des Projektors und der Belichtungsdauer. Die Leistung des Projektors ist bei der Laboranlage in ihrem derzeitigen Entwicklungsstand nicht steuerbar. Somit ist der Hauptparameter, der für eine gegebene Schichtstärke variiert wird, die Belichtungsdauer. Dem untergeordnet kann bei gewissen Oberflächendefekten, wie beispielsweise einer wulstartigen Materialanhäufung, die Rakelgeschwindigkeit reduziert werden. Dies ist jedoch stark abhängig

von den Bestandteilen des zu bearbeitenden Materials und den daraus hervorgehenden Eigenschaften.

Für die Einstellung der korrekten Belichtungsparameter wird nach einer ausreichend langen Belichtungsdauer gesucht, die zu einem zusammenhängenden Bauteil führt. Das Bauteil darf sich jedoch während dem Aufbau nicht so stark verziehen, dass die Rakel mit aufragenden Bauteilkanten kollidiert. Bei einer zu lang gewählten Belichtungsdauer polymerisiert das Harz so stark, dass nachfolgende Schichten zu wenig Angriffspunkte haben, um sich durch Polymerisation fest mit der vorhergehenden Schicht zu verbinden. So entsteht kein festes Bauteil und die einzelnen Schichten delaminieren. Reduziert man sukzessive die Belichtungsdauer, entsteht in der Regel eine feste Verbindung zwischen den Schichten. Hier kam es jedoch häufig zum Verzug des Bauteils. Bei der Polymerisation erhöht sich die Dichte des Werkstoffs, und das Volumen der belichteten Harzmenge nimmt entsprechend in allen Raumrichtungen ab. Durch eine feste Verbindung zwischen der frischen Schicht und der bereits geschrumpften wird die frische Schicht am Schrumpf gehindert. Dadurch entstehen innere, mechanische Spannungen im Bauteil, die geometrieabhängig mehr oder weniger stark die Bauteilränder nach oben biegen. Wird die Belichtungsdauer nun weiter abgesenkt, reduziert sich der Polymerisierungsgrad innerhalb der Schichten und damit der Schrumpf, sowie infolge dessen auch der Verzug. Bei weiterer Reduzierung der Belichtungsdauer sind Bauteile zunächst nach dem Aufbau zu weich, um sie ohne eine Veränderung der Geometrie von der Plattform zu lösen. Bei weiterer Reduzierung tritt der oben beschriebene Effekt auf, dass sich die Schichten aufgrund mangelnder Belichtungsenergie nicht mehr untereinander verbinden und das Bauteil delaminiert.

Abbildung 3: Plattengeometrie 52 mm × 12 mm × 2 mm auf Stützstruktur; durch Verzug von Stützstrukturen abgelöst.

Die in den Studien untersuchten Harzsysteme zeigten eine starke Volumenschwindung. Erkennbar war dies insbesondere an länglichen Platten (Quader mit Kantenmaßen 52 mm × 12 mm × 2 mm). Diese neigen zusätzlich geometriebedingt besonders zum Verzug. Proben mit dieser Geometrie konnten in der Regel nicht erfolgreich aufgebaut werden. Das Problem kann an dem Ergebnis eines Versuchs erläutert werden, das in Abbildung 3 gezeigt wird. Durch eine Reduzierung der Belichtungsdauer tritt gut sichtbar eine Delamination der Schichten im Prozess auf. Eine weitere Reduzierung würde hier also zu einem schlechteren Ergebnis führen. Der Schrumpf des Materials, und damit der Bauteilverzug, ist gleichzeitig noch so stark, dass der Probekörper von den Stützstrukturen abgezogen wurde. Eine längere Belichtungsdauer ist demnach auch nicht zielführend. Eine Lösung dieses Problems wäre möglicherweise die

Polymerisation zu verlangsamen. Dadurch könnte ein Teil der Volumenschwindung stattfinden, bevor zwei Schichten sich miteinander verbunden haben. Auf Materialseite könnte dies durch eine Reduktion des Photoinitiators erfolgen. Alternativ wäre es technisch gegebenenfalls möglich zu diesem Zweck die Belichtungsleistung zu reduzieren, entweder über einen intermittierenden LED-Betrieb oder die Reduktion der LED-Spannung. Leider können beide technischen Lösungswege an der Laboranlage am IFM nicht untersucht werden, da sie aus technischen Gründen nicht zur Verfügung stehen. Somit waren die in den Versuchsreihen aufbaubaren Geometrien stark eingeschränkt.

Abbildung 4 zeigt beispielhaft ein Bauteil, an dem man erkennen kann, dass der Bauteilverzug auch nach dem Aufbau weiter voran schreitet. Das Bauteil ist in der oberen Bildhälfte abgebildet in seinem Zustand unmittelbar nach Fertigung und Reinigung. Bauteilverzug ist hier bereits erkennbar. In der unteren Bildhälfte ist das Bauteil nach einer Zeitspanne von etwa 7 Tagen abgebildet. Dort erkennt man deutlich eine stärkere Abweichung von der Originalgeometrie. Hervorgerufen wird der fortschreitende Bauteilverzug zum Beispiel durch Relaxation (Abbau von Eigenspannungen im Bauteil) oder Nachpolymerisation.

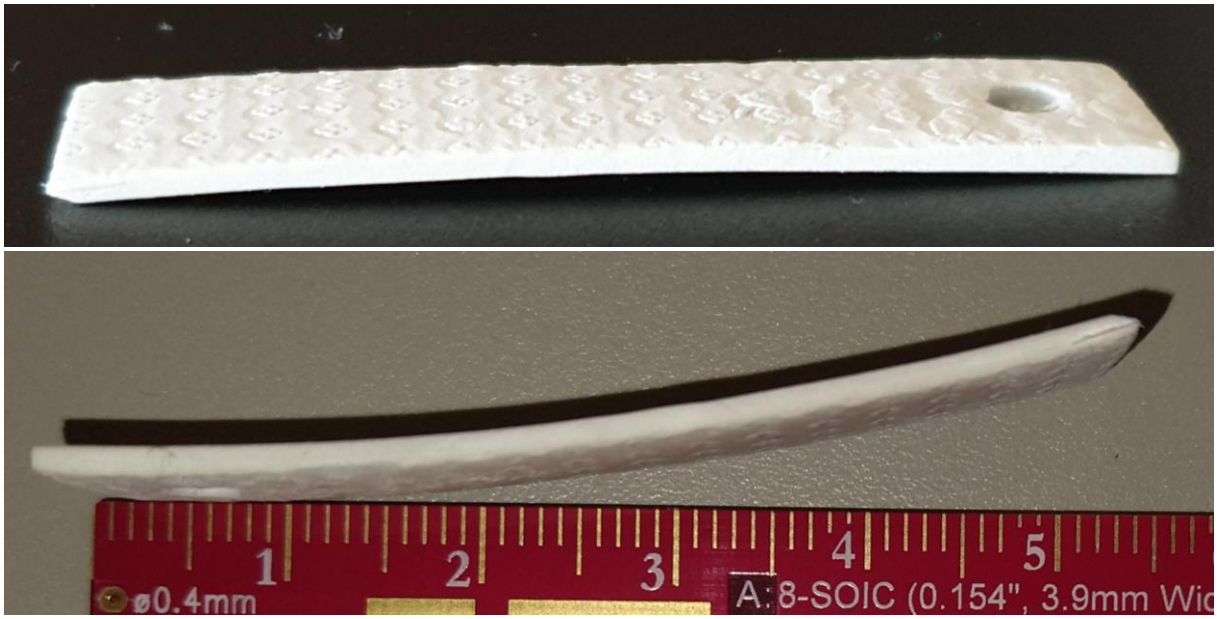


Abbildung 4: Additiv gefertigtes Bauteil mit Verzug nach der Fertigung (oben) und Tage nach der Fertigung (unten).

Kleinere Würfel sind geometriebedingt nicht sehr anfällig für Bauteilverzug. Die Struktur ist daher geeignet, höhere Bauteile aufzubauen. Die dadurch verlängerte Aufbauzeit wurde genutzt, um das Sedimentierverhalten des Füllstoffs zu beobachten. Dazu wurde ein Würfel mit 7 mm Kantenlänge auf Stützen aufgebaut. Das Abtauchen der Plattform, das üblicherweise für den Materialauftrag genutzt wird, wurde für diesen Versuch abgestellt. Die geringe Menge an Material, die die Rakel üblicherweise in ihrer Bewegung verdrängt, ist aufgrund der geringen Querschnittsfläche innerhalb der Schicht (7 mm × 7 mm = 49 mm²) ausreichend, um die gesamte Bauteiloberfläche zu benetzen. Die Plattform senkt sich in jedem Zyklus nur noch um den Betrag einer Schichtdicke ab, so dass deren Pumpwirkung entfällt, die in jeder Schicht dem Absenken der Füllstoffpartikel entgegenwirkt. Da in jeder Schicht die aktuell vorliegende Partikelkonzentration in der Bauteilstruktur eingeschlossen wird, können die Auswirkungen des Absetzverhaltens der Füllstoffpartikel im Harzsystem verdeutlicht werden. Abbildung 5 zeigt Beispielhaft solch eine Würfelgeometrie. Es ist deutlich zu erkennen, dass der obere Teil des

Würfels optisch deutlich klarer bis transparent erscheint. Das lässt darauf schließen, dass trotz der geringen Bauteilhöhe von 7 mm nach ca. drei Vierteln des Aufbaus nur noch eine stark reduzierte Anzahl an Füllstoffpartikeln an der Badoberfläche zur Verfügung stand. Durch die Patentierung verschiedener Materialauftragsmechanismen sind DLP-Anlagen häufig auch ohne einen Prozess mit Materialumwälzwirkung ausgeführt. Gleichzeitig sind Prozesszeiten von 12 bis 24 Stunden nicht unüblich. Entsprechend muss das Absetzverhalten bei der Wahl der Anlage zur Verarbeitung der Harzsysteme beachten werden.

Abbildung 5: Würfelgeometrie mit 7 mm Kantenlänge. Im oberen Bereich ohne Füllstoff.

AP 5: Erarbeitung des Laseraktivierungsprozesses

Die am IMTEK hergestellten Proben wurden bei Hahn-Schickard Stuttgart mit zwei verschiedenen Strahlquellen bearbeitet. Die beiden Quellen unterscheiden sich ihn Wellenlänge und Pulslänge. Die erste Quelle erzeugt einen pikosekunden gepulsten Laserstrahl mit einer Wellenlänge von 532 nm (Grün). Die zweite Quelle erzeugt einen nanosekunden gepulsten Laserstrahl mit einer Wellenlänge von 1024 nm (Infrarot/IR). Auf den Proben wurden Parameterstudien durchgeführt. Dabei wurden die Parameter Leistung, Frequenz und Verfahr-Geschwindigkeit variiert (Tabelle 3).

Tabelle 3: Parameterstudien der Laserstrukturierung

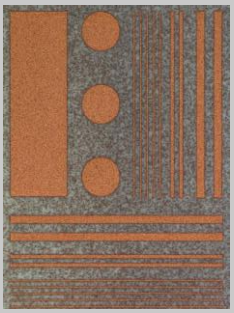
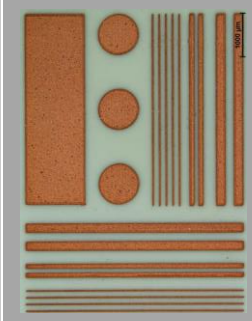
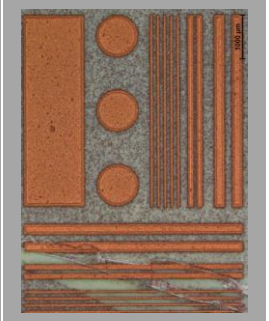
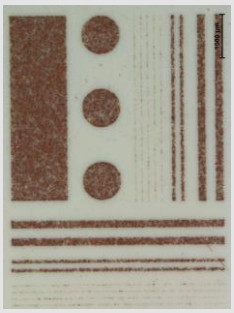
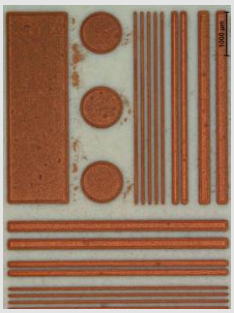
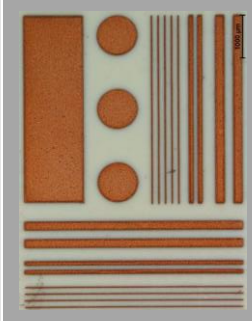
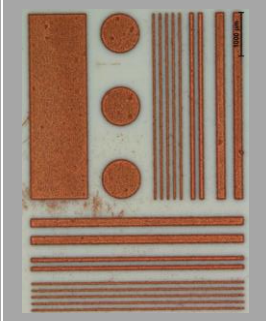
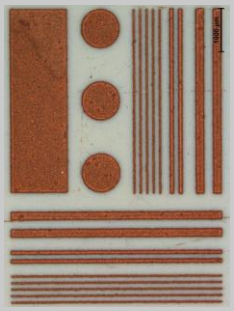
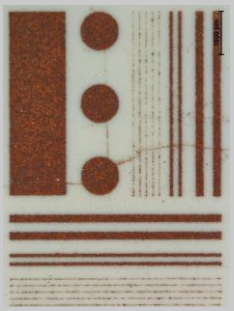
	Wellenlänge in nm	Leistung in W	Frequenz in kHz	Geschwindigkeit in m/s
Quelle 1 (Grün)	532	0.8 – 10	200 / 274	1.4 / 3.0
Quelle 2 (IR)	1064	0.8 – 10	100 / 125	1.0 / 2.5

Die Einkopplung des Laserstrahls in das Material war trotz der hellen Färbung und den reflektiven Eigenschaften des Füllstoffs bei beiden Strahlquellen gut. Die Ergebnisse der Parameterstudien sind jedoch erst nach der Metallabscheidung sichtbar und werden daher im folgenden Abschnitt behandelt (vgl. AP 6). Aufgrund der höheren Verbreitung in der Industrie ist die Verwendung eines IR-Lasers vorzuziehen. Dies scheint auf Basis der aktuellen Ergebnisse möglich zu sein.

AP 6: Erarbeitung des außenstromlos chemischen Metallisierungsprozesses

Die initial durch Rakeln am IMTEK erstellten Proben wurden bei HS-S laserstrukturiert, gereinigt und im Becherglasmaßstab in industriellen Metallisierungslösungen prozessiert, um auf den strukturierten Bereichen selektiv eine Kupferschicht zu erzeugen. Einen Ausschnitt der Ergebnisse zeigen die Abbildungen in Tabelle 4. Gut erkennbar ist, dass ein gleichmäßiges Anspringverhalten der Kupfermetallisierung auf den strukturierten Bereichen sowohl mit allen drei Additiv-Varianten, als auch bei beiden Laserquellen möglich ist. Gleichzeit zeigt sich auf den gerakelten Proben ein deutliches Maß an Fremdabscheidung, welche jedoch lokal unterschiedlich ausgeprägt ist und dabei nicht mit den laserstrukturierten Bereichen korreliert.

Tabelle 4: Teilergebnis der ersten Laserstudie nach der Metallabscheidung

	IR-Laser, ns-gepulst		Grün-Laser, ps-gepulst	
D21.005.1				
ThermoxStanoStat P15G				
ThermoxStanoStat P40W				

Insbesondere ist durch das Rakeln und Belichten auf einer Glasunterlage bei den Proben eine sehr glatte (unten) und eine eher raue Seite (oben) entstanden. Die großflächige Fremdabscheidung zeigt sich vornehmlich auf der rauen Seite und an Defekten wie z.B. Rissen. Aber auch auf additiv gefertigten Proben ist die gesamte Oberfläche von punktueller Fremdabscheidung überzogen. Da das Anspringverhalten der laserstrukturierten Bereiche bereits in diesem frühen Status sehr gut aussieht, ist es für eine selektive Metallabscheidung hauptsächlich wichtig, die Fremdabscheidung zu unterdrücken. Entsprechend beschäftigen sich die folgenden Arbeiten fast ausschließlich mit diesem Ziel.

Versuchsreihen an Proben mit unterschiedlich hohem Füllstoffgehalt (10, 30 und 50 vol%) zeigten, dass Fremdabscheidung stärker auftritt, wenn mehr Füllstoff im Material enthalten ist. Dieses Verhalten wurde durch Messungen am Rasterelektronenmikroskop näher untersucht. Abbildung 6 zeigt sechs Aufnahmen, an denen das Ergebnis der Untersuchungen gut erläutert werden kann. In der oberen Zeile sind Bilder dargestellt, die von einer Probe ohne Füllstoff aufgenommen wurden. In der unteren Zeile sind Aufnahmen von einer Probe mit 50 vol% Füllstoffgehalt dargestellt. In beiden Zeilen sind jeweils drei Aufnahmen der selben Stelle auf der jeweiligen Probe zu sehen. Von links nach rechts wurden die Aufnahmen mittels Sekundärelektronenmessung, Rückstrahlelektronenmessung und energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX) erzeugt. Die roten und weißen Kreise deuten auf markante Stellen auf den Proben hin.

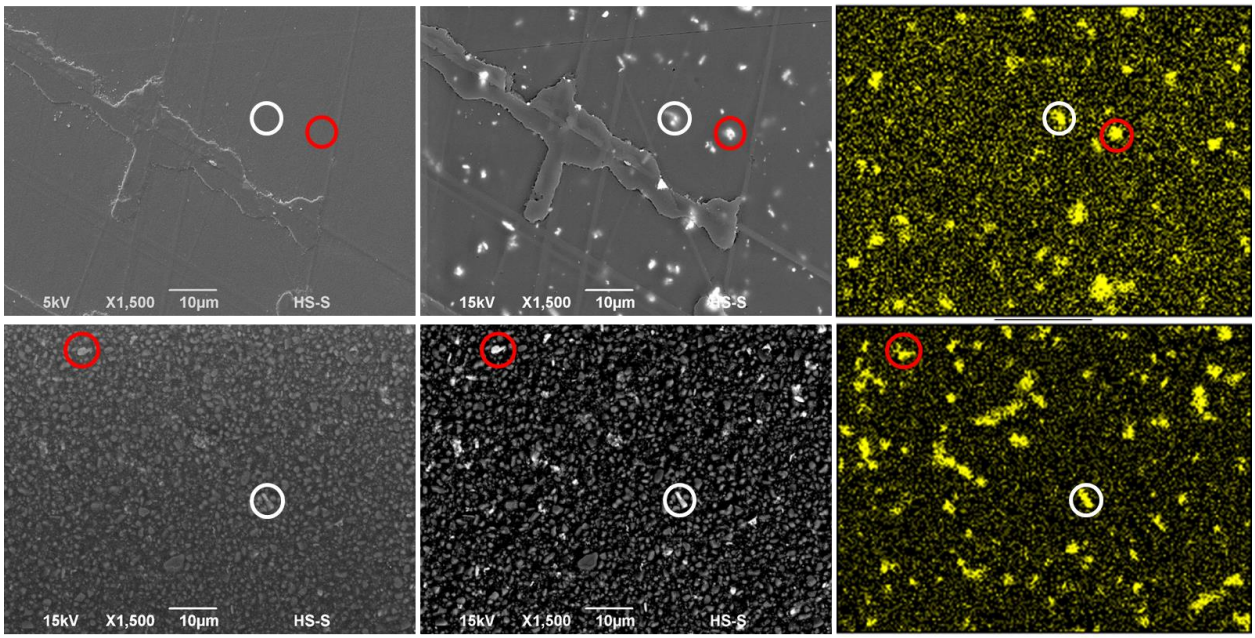


Abbildung 6: REM- und EDX-Aufnahmen zweier nicht-metallisierter Proben mit kupferhaltigem LDS-Additiv. Obere Reihe: Probe ohne Füllstoff; untere Reihe: Probe mit Füllstoff; Linke Spalte: Sekundärelektronenaufnahme; mittlere Spalte: Rückstreuelektronenaufnahme; rechte Spalte: EDX-Aufnahme (Kupfersignal). Die drei Aufnahmen in einer Zeile zeigen die gleiche Stelle der jeweiligen Probe.

EDX-Aufnahmen ermöglichen es, die Verteilung einzelner Atomsorten im Material bis zu einer gewissen Tiefe darzustellen. Das gelb eingefärbte Signal in der rechten Spalte deutet hier auf die Anwesenheit von Kupfer hin, welches in dem verwendeten LDS-Additiv enthalten ist. Man kann somit die LDS-Additiv-Partikel erkennen, zwei davon wurden jeweils durch einen Kreis markiert. Rückstrahlelektronen-Messungen ermöglichen es, über die Kontrastwerte die Oberfläche der Probe darzustellen. Gleichzeitig erreichen den Detektor aber auch Elektronen, die bis zu einer gewissen Materialtiefe eingedrungen sind und dort zurück gestreut wurden.

Durch die vergleichsweise hohe Atommasse des Kupfers streuen an den Partikeln auch mehr Elektronen zurück, weswegen sie in der mittleren Spalte als helle Strukturen dargestellt werden. Auch hier findet man dieselben Partikel wieder durch die roten und weißen Kreise markiert. Sekundärelektronenmessungen stellen lediglich die Oberfläche der Probe über ein Kontrastbild dar. Betrachtet man nun die obere Zeile, liegen an der Oberfläche keine Partikel vor. Füllstoffpartikel sind in dieser Probe nicht enthalten und LDS-Additiv-Partikel liegen nur unterhalb der Oberfläche vor. In der unteren Zeile hingegen erkennt man an der Oberfläche dieselben LDS-Additiv-Partikel wieder, die auch in der mittleren und rechten Spalte zu sehen waren (vergleiche rote und weiße Kreise). Aus den sechs Aufnahmen kann also geschlossen werden, dass das LDS-Additiv durch die Füllstoffpartikel an die Oberfläche verdrängt wird, wahrscheinlich durch Unterschiede in der Dichte der Partikel (die Partikelgröße ist ähnlich).

Bisher war es allgemein anerkannte Theorie, dass LDS-Additive erst durch die Einwirkung der Laserstrahlung aktiv werden und vorher nicht katalytisch wirken. Die starke Fremdabscheidung an den Proben bei bloßer Anwesenheit der LDS-Additive, stellt dies jedoch infrage. In einer Versuchsreihe wurden daher die LDS-Additive in die kommerzielle Kupfersalzlösung gegeben, die im Prozess zu Metallabscheidung eingesetzt wird. Nach der beschriebenen Theorie sollte in diesem Versuch keine Veränderung des Additivs oder der Lösung auftreten. Das Ergebnis dieses Versuchs ist in Abbildung 7 dargestellt.

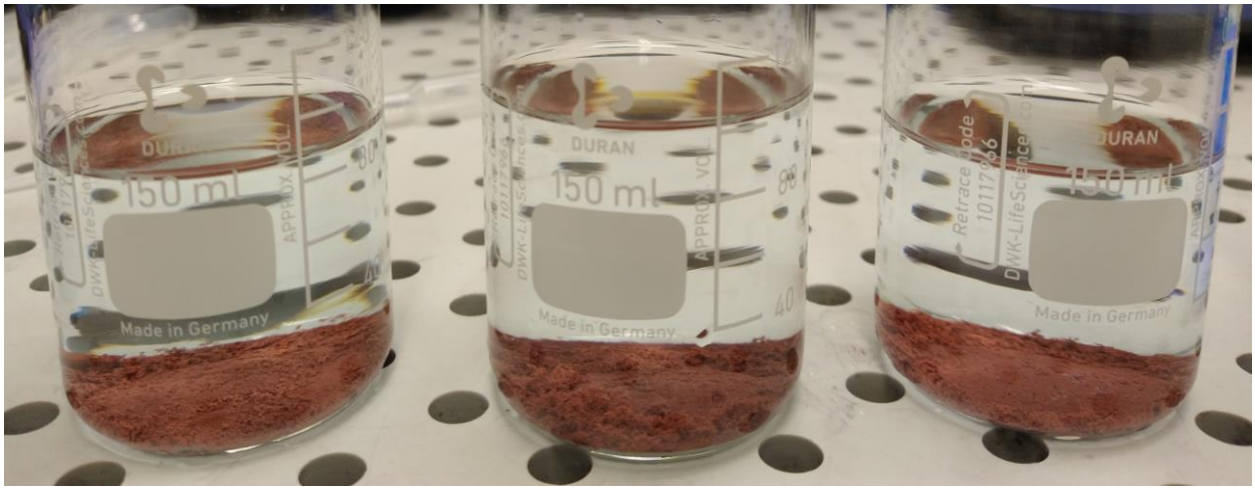


Abbildung 7: LDS-Adiitive in Kupfersalzlösung. Alle Additive haben zu Kupferabscheidungen geführt.

Die typische Zeitspanne für die Abscheidung einer Kupferschicht auf Bauteilen beträgt etwa zwei Stunden. Dementsprechend sollten die unbehandelten LDS-Additive in diesem Zeitrahmen keinerlei Kupferabscheidung provozieren, um für den Prozess geeignet zu sein. Die Additive wurden zusätzlich teilweise einer UV-Bestrahlung und teilweise einer Wärmebehandlung ausgesetzt, um die entsprechenden Belastungen bei dem Aufbau eines Bauteils mittels digital light processing sowie dem Temperschritt nach dem Aufbau zu simulieren. Alle untersuchten LDS-Additive (siehe Tabelle 1) und deren Varianten (UV- bzw. wärmebehandelt) waren bereits nach 60 bis 75 Minuten stark mit Kupfer überzogen. Eine Ausnahme stellt das LDS-Additiv LPKF Typ4 dar, das erst nach 150 min Aktivität (Gasbildung) zeigte. Dieses wurde jedoch zu Beginn des Projekts als mögliches LDS-Additiv ausgeschlossen, da es die Polymerisation des Harzes unterbindet. Die Becherglasversuche zeigen somit, dass gängige kommerzielle LDS-Additive auch ohne eine vorangegangene Laserstrukturierung katalytisch wirken. Üblicherweise werden die Additive in Spritzgussmaterialien eingesetzt, wo Prozessbedingt immer eine dünne Polymerschicht die Oberfläche der Bauteile bildet (→ Spritzhaut). Dies gilt für die Additive

Fertigung (und offensichtlich auch für den Rakelprozess) nicht, weswegen hier im Gegensatz zum Spritzguss großflächig Fremdabscheidung auftritt.

Es wurden zwei Lösungsansätze verfolgt.

1. Saures / alkalisches Vortauchen der Bauteile zur „Deaktivierung“ der LDS-Additive an der Oberfläche
2. Beschichten der Partikel, um sie für die Prozessdauer zu passivieren. Laserstrahlung sollte die Beschichtung entfernen können.

Lösungsansatz 1: Vortauchen der Bauteile

Testbauteile wurden vor der Laserstrukturierung in alkalischer, saurer oder beiden Lösungen vorbehandelt. Die Einwirkzeit betrug 10 min bei 70 °C. Anschließend wurden die Bauteile mit den üblichen Prozessbädern behandelt um Metall abzuscheiden und die katalytische Wirksamkeit der LDS-Additive an der Oberfläche beurteilen zu können. Abbildung 8 zeigt das Ergebnis der Versuche.

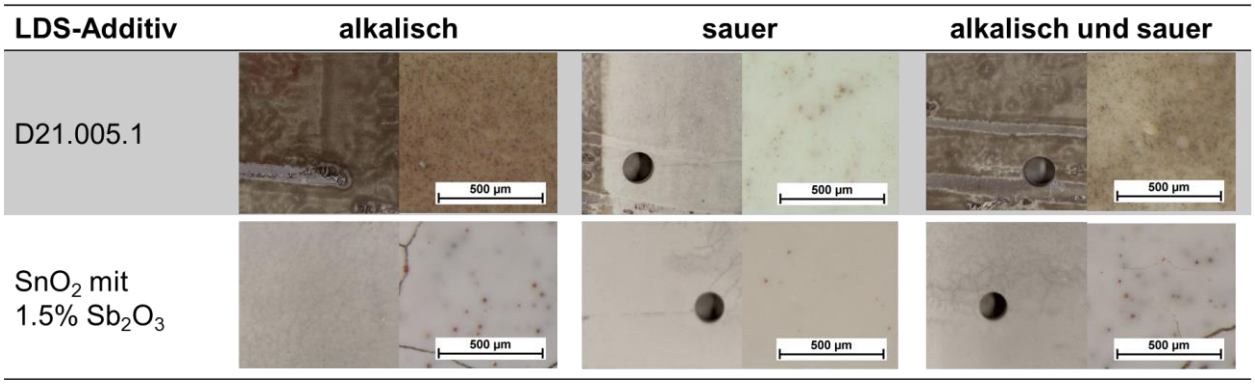


Abbildung 8: Aufnahmen von Proben nach nasschemischer Prozesskette (Vortauchen und Metallabscheidung) zur Unterdrückung der Fremdabscheidung.

Das Vortauchen führte in keinem Fall zu einer Reduktion der Fremdabscheidung, zerstörte jedoch insbesondere bei alkalischer Einwirkung die Integrität der Bauteile.

Lösungsansatz 2: Beschichten der LDS-Additive

Kommerzielle LDS-Additive gibt es Teilweise auch mit einer aufgebrachten Beschichtung. Ein Beispiel dafür ist das Additiv Typ4 von LPKF, das in den beschriebenen Becherglasversuchen die höchste Standzeit erreicht hatte. Aus dem PA wurden im Versuchsstadium befindliche LDS-Additive mit Beschichtung zur Verfügung gestellt. Darüber hinaus wurden kommerziell erhältliche Additive beschafft. Zu guter Letzt wurden am IMTEK zwei unbeschichtete Additive mit einer Polymerschicht überzogen, teils mit Ethylenglykoldimethacrylat (EGDMA), teils mit Di-p-toluoyl-D-tartaric Acid (DTTA). Die Polymere sind die gleichen, wie sie auch in der Harzmischung eingesetzt werden. Dadurch soll eine gute Einbindung der Additive in die Harzmischung ermöglicht werden. Die Additive wurden sukzessive in den oben beschriebenen Becherglasversuchen untersucht. Eine Liste der untersuchten Additive und die Ergebnisse der Versuche findet sich in Tabelle 5.

Tabelle 5: LDS-Additive für Zeitstandversuche im Kupferelektrolyt. Oben: kommerzielle Additive; unten: am IMTEK beschichtete Additive.

Probe	Laseradditiv		Reaktion nach [min]
Budenheim	D21.005.1	Nicht beschichtet	60
Keeling & Walker	ThermoxStanostat CP 15G	Nicht beschichtet	60
Keeling & Walker	ThermoxStanostat CPM 10 M	Beschichtet	75
Keeling & Walker	ThermoxStanostat CP5CM	Beschichtet	75
LPKF	Typ 4	Beschichtet	150
Merck	Iriotec 8850	Beschichtet	210

Probe	Laseradditiv	MPS [mg/m²]	EGDMA [mg/m²]	DTTA [mg/m²]	Reaktion nach [min]
DG-220118-MRP-1	D21.005.1	19	10	-	< 110
DG-220118-MRP-2	D21.005.1	19	48	-	< 110
DG-220118-MRP-3	D21.005.1	19	97	-	< 110
DG-220118-MRP-4	D21.005.1	19	969	-	< 110
DG-220118-MRP-5	ThermoxStanoStat CP 15G	6	10	-	< 110
DG-220118-MRP-6	ThermoxStanoStat CP 15G	6	48	-	< 110
DG-220118-MRP-7	ThermoxStanoStat CP 15G	6	97	-	< 110
DG-220118-MRP-8	ThermoxStanoStat CP 15G	6	969	-	< 110
DG-220126-MRP-1	D21.005.1	19	-	10	< 110
DG-220126-MRP-2	D21.005.1	19	-	48	< 60
DG-220126-MRP-3	D21.005.1	19	-	97	< 60
DG-220126-MRP-4	D21.005.1	19	-	969	< 110
DG-220126-MRP-5	ThermoxStanoStat CP 15G	6	-	10	> 170
DG-220126-MRP-6	ThermoxStanoStat CP 15G	6	-	48	< 170
DG-220126-MRP-7	ThermoxStanoStat CP 15G	6	-	97	-
DG-220126-MRP-8	ThermoxStanoStat CP 15G	6	-	969	-

Bei den kommerziellen Additiven erreicht das Produkt Iriotec 8850 der Firma Merck über 3.5 Stunden Standzeit bevor eine Reaktion mit der Kupfersalzlösung auftritt. Bei den am IMTEK beschichteten Proben erreichte die Probe DG-220126-MRP-5 über 170 min. Die letzten beiden Proben konnten aufgrund der Bildung von Klümpchen nicht korrekt untersucht werden.

Die Additive Iriotec 8850 und DG-220126-MRP-5 wurden am IMTEK in Harzmischungen eingearbeitet und Probekörper durch Rakeln erstellt. Diese wurden bei Hahn-Schickard Laserstrukturiert und Metallisiert. In beiden Fällen war weiterhin starke Fremdabscheidung zu beobachten. Das Ergebnis der Versuche mit DG-220126-MRP-5 ist in Abbildung 9 dargestellt. Es wurden dabei zwei verschiedene Varianten untersucht. Links ist eine Aufnahme eines Probekörpers dargestellt, dessen Material wie üblich in einer Kugelmühle gemischt wurde. Rechts ist eine Aufnahme eines Probekörpers dargestellt, dessen Material mit einem Rührwerk gemischt wurde.

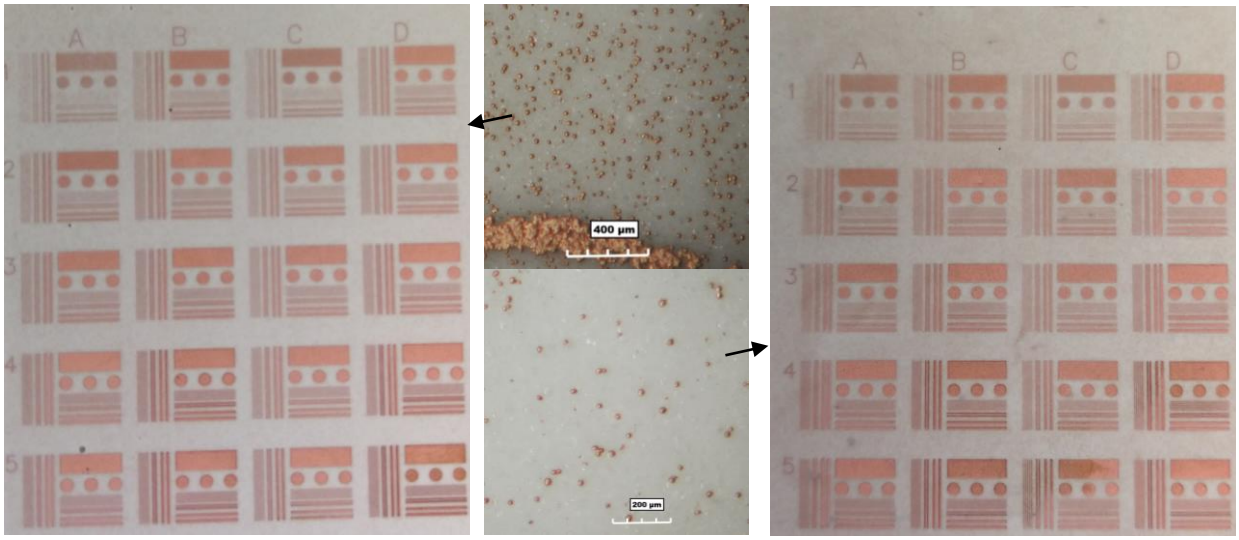


Abbildung 9: Versuche mit dem beschichteten LDS-Additiv DG-220126-MRP-5. Links und Mitte oben: Mischen der Harzmischung in Kugelmühle; Rechts und Mitte unten: Mischen der Harzmischung in Rührwerk.

Wie erwähnt ist in beiden Fällen noch starke Fremdabscheidung zu beobachten. Im Falle des Rührwerks ist sie jedoch feiner und weniger stark ausgeprägt als im Fall der Kugelmühle. Dies lässt vermuten, dass die Beschichtung während des Anmischens beschädigt wird. Immerhin sind dem Material stark abrasiv wirkende Aluminiumoxid-Partikel beigefügt. Der Mischvorgang in der Kugelmühle ist durch die Mahlkörper mechanisch beanspruchender als der im Rührwerk. Es ist daher davon auszugehen, dass das Beschichten der Additive, insbesondere mit Polymeren, nicht zu einer ausreichenden Passivierung im späteren Werkstoff führen kann.

AP 7: Optimierung der Harzformulierung

Wie in den vorherigen Punkten beschrieben, wurde die Harzformulierung daraufhin optimiert eine bessere Verarbeitbarkeit mittels digital light processing zu erreichen. Dies geschieht durch die Verwendung größerer Füllstoffe, was die Lichtstreuung heruntersetzt. Des Weiteren wurde die Viskosität des Materials erhöht, um weiterhin eine niedrige Sedimentation des Füllstoffes zu ermöglichen. Das LDS-Additiv wurde ebenfalls angepasst, mit dem Ziel, die Fremdabscheidung zu vermindern.

AP 8: Prozessübertragung auf 3D-Bauteile

Wurde nicht bearbeitet, da es aufgrund der zuvor beschriebenen Problematik nicht sinnvoll war. Stattdessen wurden umfassende Versuche zur Fremdabscheidungsproblematik durchgeführt.

AP 9: Aufbau und Test 3D-Technologiedemonstrator

Wurde nicht bearbeitet, da es aufgrund der zuvor beschriebenen Problematik nicht sinnvoll war. Stattdessen wurden umfassende Versuche zur Fremdabscheidungsproblematik durchgeführt.

AP 10: Ausarbeitung von Empfehlungen

Wurde nicht bearbeitet, da es aufgrund der zuvor beschriebenen Problematik nicht sinnvoll war. Stattdessen wurden umfassende Versuche zur Fremdabscheidungsproblematik durchgeführt.

Fazit

Das Projektziel war es, einen hochgefüllten Werkstoff zu erarbeiten, der mit dem additiven Fertigungsverfahren digital light processing verarbeitbar ist und der es ermöglicht, derart hergestellte Bauteile über eine anschließende Laserbearbeitung und nasschemische Metallisierung zu mechatronischen Bauteilen weiter zu verarbeiten. Hierbei ist ein thermischer Ausdehnungskoeffizient möglichst nahe an dem von Kupfer (16 ppm/K) anzustreben. Diese Eigenschaft wurde für die Harzmischung mit dem gewählten Füllstoff Aluminiumoxid bei einem Füllgrad von etwa 50 Vol% erreicht. Durch den hohen Füllgrad war, wie zuvor beschrieben, die Weiterverarbeitung zu einem mechatronischen System nicht mehr zuverlässig möglich. Nichtsdestotrotz konnte gezeigt werden, dass das gleiche Materialsystem mit niedrigeren Füllgraden über die gesamte Prozesskette verarbeitbar ist. Auch wenn dies nicht das Ziel des Projekts war, zeigt es doch eine Möglichkeit, derartige Systeme für Anwendungen mit niedrigeren Anforderungen additiv zu fertigen.

Das Projektziel wurde demnach nicht erreicht.

Aus der letzten Sitzung des Projektbegleitenden Ausschusses kam der Wunsch aus der Wirtschaft nach einem Folgeprojekt auf. Mit den Erfahrungen aus dem Projekt FLaeDle scheint dies mit einem neuen Forschungsansatz sinnvoll und möglich. Dies gilt es nun auszuarbeiten.

Anwendungsmöglichkeiten und Nutzen für KMU

Die letzte Sitzung des Projektbegleitenden Ausschusses zeigte, dass aus der Wirtschaft weiterhin Interesse an einem Material mit den hier angestrebten Eigenschaften bestünde. Tatsächlich wurde parallel zur Projektlaufzeit durch eine deutsche Forschungseinrichtung ein Patent eingereicht, das ein selektiv metallisierbares Material für das additive Fertigungsverfahren digital light processing beschreibt. Das Patent gilt für ungefüllte Materialien, was einerseits vermuten lässt, dass dort ähnliche Probleme in der Entwicklung aufgetaucht sind. Andererseits zeigt sich auch hierin deutlich die Relevanz des Themas. Die Verwertbarkeit eines gefüllten Materials wäre, wie zuvor beschrieben, aufgrund der verbesserten Materialeigenschaften für den Einsatz in *Produkten* noch einmal ungleich höher. Einen ersten Schritt in diese Richtung geht das hier vorgestellte Material mit Füllgraden bis etwa 20 Vol%.

Verwendung der Zuwendung

Forschungseinrichtung 1: Hahn-Schickard
Wissenschaftlich-technisches Personal: 23 Personenmonate
Technisches Fachpersonal: 9 Personenmonate

Forschungseinrichtung 2: Universität Stuttgart
Wissenschaftlich-technisches Personal: 21 Personenmonate

Forschungseinrichtung 3: Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Wissenschaftlich-technisches Personal: 36 Personenmonate

Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die im Rahmen des Forschungsvorhabens durchgeführten Arbeiten waren für die Erreichung der Forschungsziele notwendig und angemessen.

Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Durchgeführte Transfermaßnahmen

	Ziel	Ort/Rahmen	Datum/Zeitraum
Maßnahme A: **Projektbegleitender Ausschuss (PA)**	A1: Projektvorstellung, weiteres Vorgehen	1. PA-Sitzung	25.11.2020
	A2: Vorstellung Zwischenergebnisse, Diskussion weiteres Vorgehen	2. PA-Sitzung	13.07.2021
	A3: Vorstellung weiterer Ergebnisse, Diskussion weiteres Vorgehen	3. PA-Sitzung	09.05.2022
	A4: Abschluss-präsentation und Diskussion der erzielten Ergebnisse	4. PA-Sitzung	29.09.2022
Maßnahme B: **Mitgliederver-sammlung, Netzwerke**	B1: Multiplikation der Projektergebnisse, Information von po-tenziellen Industrie-partnern außerhalb des PA	Jährliche Mitglieder-versammlung Hahn-Schickard	2022
	B2: wie B1	OE-A, 3D-MID e.V.	2022
Maßnahme C: **Messen**	C 1: Multiplikation der Projektergebnisse	LOPEC	2022
Maßnahme D: **Fachzeitschriften**	D1: Multiplikation der Projektergebnisse und Information von potenziellen Industriepartnern außerhalb des PA	PLUS	06/2022
Maßnahme E: **Publikation im Internet**	E1: Multiplikation der Projektergebnisse und Information von potenziellen	Webseite von HS-S	04/2020

	Industriepartnern außerhalb des PA		
	E2: wie E1	Webseite vom IMTEK	nach Projektabschluss
	E3: wie E1	Webseite vom IFM	04/2020
Maßnahme G: Fachtagungen	G1: Multiplikation der Projektergebnisse und Information von potenziellen Industriepartnern außerhalb des PA.	MST-Kongress in Ludwigsburg **	2021
Maßnahme H: Publikation im Internet	H1: Bereitstellung des Abschlussberichtes zur Nutzbarmachung der Ergebnisse für interessierte KMU	Webseite von Hahn-Schickard	nach Projektabschluss
	H2: wie H1	Webseite von IFM	nach Projektabschluss

**Additive Fertigung, Laserdirektstrukturierung und chemische Metallisierung von Duroplasten: Material- und Prozessentwicklung - C. Pfeifer, T. Vieten, J.Jung, K. Gläser, T. Hanemann, MikroSystemTechnik Kongress 2021, 08.-10.11.2021, Stuttgart-Ludwigsburg, FRG, VDE Verlag GmbH, Berlin, ISBN 978-3-8007-5656-8, 372-375.

Geplante Transfermaßnahmen (Maßnahmen F und L werden aufgrund nicht erreichter Projektziele als nicht sinnvoll erachtet und werden daher nicht mehr durchgeführt.

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Datum/Zeitraum
Maßnahme F: Fachzeitschrift	F1: Multiplikation der Projektergebnisse und Information von potenziellen Industriepartnern außerhalb des PA	z.B. Plus, IEEE, Advanced Materials, RapidX	-
Maßnahme I: Jahresberichte	I1: Publikation der Forschungsergebnisse im Jahresbericht der Forschungsstelle	Jahresbericht Hahn-Schickard	nach Projektabschluss
Maßnahme J: Akademische Lehre	J1: Übernahme der Ergebnisse in die akademische Lehre	Lehrveranstaltung „Aufbau- und Verbindungstechnik-Technologien“ des IFM im Masterprogramm der Universität Stuttgart	Sommersemester nach Projektabschluss

Maßnahme K: Akquisition von Firmen	K1: Akquisition von Firmen für geeignete Kooperationen zur Produktentwicklung, z.B. Direktaufträge, Verbundprojekte, Applikationszentrum	Direkte Akquisition im Kreis der Mitglieder von Hahn-Schickard und bei Firmen, insbesondere KMU	nach Projektabschluss
Maßnahme L: Richtlinien	L1: Publikation der erzielten Ergebnisse über den GMM-Fachausschuss 5.6 in die Richtlinie zur Herstellung von MID	Richtlinie zur Herstellung von MID	-

Danksagung

Das IGF-Vorhaben Nr. 21115 N der Forschungsvereinigung Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e. V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und –entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Für diese Förderung sei gedankt.

Dem projektbegleitenden Ausschuss sei für die Unterstützung und die wertvollen Hinweise aus den zahlreichen Diskussionen gedankt.