Mechatronische Funktionsintegration auf additiv gefertigten Bauteilen aus Standardkunststoffen mittels laserbasierter Oberflächenbearbeitung und selektiver Metallabscheidung über nasschemische Prozesse

Mechatronic functional integration on additively manufactured components made of standard plastics using laser-based surface processing and selective metal deposition via chemical plating

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

Dipl.-Ing. Tobias Vieten

aus Lahnstein

Hauptberichter: **Prof. Dr.-Ing. André Zimmermann**

Mitberichter: **Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke**

Tag der mündlichen Prüfung: **14.03.2024**

Institut für Mikrointegration der Universität Stuttgart

2024

oberfläche
strukturen
additiv
lds
laserbearbeitung
fremdabscheidung
fertigungsverfahren
fertigung
herstellung
material
schicht
schichtdicke
bauteil
verfahren
lösung
leitfähigkeit
aufgebaut
am-mid
µm
struktur
negativlack
aktivierung
selektivität
partikel
grün-laser
laserparameter
untersuchungen
prozess
parametersätze
industrie
metallschicht
wasser
lack
widerstand
literatur
bekeimung
maskierungsmaterial
metallabscheidung
laserstrahlung
bauteiloberfläche

materialien
bauteile
widerstand
industrie
verfahren
parameter
haftfestigkeit
metallabscheidung
aufbau
maskierung
oberflächen
additiven
nasschemische
laserstrahlung
grundkörper
digital
lack
schichten
metallschicht
mid
eigenschaften
kupfer
bauteiloberfläche
prozesse
formel
sancho-verfahren
palladium
Ω/mm
n/mm²
µm
laser
bauteil
rauheit
selektivität
zuverlässigkeit
lösungsmittel
außenstromlos
nanopartikel
grün-laser
am-mid
oberflächenqualität

VORWORT UND WIDMUNG

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Mikrointegration (IFM) der Universität Stuttgart. An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die mich während meiner Promotion unterstützt haben.

Prof. Dr.-Ing. André Zimmermann möchte ich großen Dank aussprechen für die Möglichkeit der Anfertigung der vorliegenden Arbeit, das damit verbundene Vertrauen in mich und die regelmäßigen Besprechungen. Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke danke ich herzlich für die Übernahme des Zweitgutachtens. Besonderer Dank geht an Dr. Kerstin Gläser und Dr. Thomas Günther für die Motivation und die moralische Unterstützung über den gesamten Promotionsprozess hinweg.

Ich danke Sascha Weser, Alexander Schilling und Florian Janek für die Hilfestellung bei meinen Versuchen und die vielen gemeinsamen Stunden im Labor, teilweise bis spät in der Nacht.

Mein besonders herzlicher Dank geht an alle Mitglieder der Gruppe Drucktechnik, aktuelle wie ehemalige, für die sehr kollegiale Zusammenarbeit und die tolle Atmosphäre in der Arbeitsgruppe. Dank Euch gab es keine Tage, an denen ich nicht gerne am Institut war. Diesen Dank kann ich tatsächlich auf alle Kolleginnen und Kollegen im Haus ausweiten, ein Team, mit dem ich gerne abends noch gemeinsam im Innenhof gesessen habe, das insbesondere in schwierigen Zeiten zueinander hält und sich weit über die Grenzen des Erwartbaren einsetzt.

Mein herzlichster Dank geht jedoch an meine gesamte Familie, die mich immer unterstützt und mir den Rücken freigehalten haben. Insbesondere meine Frau Lisa und meine Tochter Kira, die häufig auf mich verzichten mussten sowie meinen Eltern und Schwiegereltern, die meine Abwesenheit bestmöglich aufgefangen haben.

Danke!

Ich widme diese Arbeit meinen Eltern, ohne deren Opferbereitschaft ich es nie bis hierhin geschafft hätte. Danke, dass ihr mich geliebt und umsorgt habt, mir Werte vermittelt habt ohne dabei meine eigenen Entscheidungen einzuschränken. Den größten Einfluss auf meinen Werdegang als Ingenieur hatte unbestritten durch sein Vorbild mein Vater, weswegen ich es umso mehr bedaure, dass er den Abschluss meiner Promotion so knapp nicht mehr erleben durfte. Vielen Dank aus vollem Herzen für eure Mühen, eure sanften Stimmen, das liebevolle Zuhause und die stete Unterstützung!

INHALTSVERZEICHNIS

Abkürzungsverzeichnis vii
Symbolverzeichnis ix
Formelverzeichnis x
Kurzfassung xi
Abstract xiii
1. Einleitung 1
1.1. Zielsetzung 8
1.2. Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit 10
2. Additiv gefertigte mechatronische Systeme: bestehende Prozessketten 12
2.1. Klassifizierung additiver Fertigungsverfahren 12
2.2. Verfahren zur mechatronischen Funktionalisierung 19
2.3. Literaturbekannte Verfahrenskombinationen 26
2.4. Fertigungsstrategien und kommerzielle Lösungen 35
3. Vorüberlegungen 38
3.1. Lackbasierte LDS-Verfahren 40
3.2. Metallabscheidung auf nicht additiv gefertigten 3D-Körpern über selektive Bekeimung 40
3.3. Metallabscheidung auf additiv gefertigten 3D-Körpern über selektive Bekeimung 43
4. Das SANCHO-Verfahren zur mechatronischen Funktionsintegration 49
4.1. Modellprozess der additiven Fertigung 50
4.2. Maskierung der Bauteiloberfläche 58
4.3. Laserbearbeitung der Maskierung 69
4.4. Nasschemische Aktivierung, Lösen der Maske und Metallabscheidung 76
5. Charakterisierung des Prozesses 84
5.1. Eigenschaften der Funktionsstrukturen 84
5.2. Transferierbarkeit auf andere AM-Verfahren 103

6. Diskussion der Ergebnisse 115
6.1. Additive Fertigung 115
6.2. Maskierung 117
6.3. Laserstrukturierung 121
6.4. Aktivierung und Metallabscheidung 122
6.5. Charakterisierung der metallischen Strukturen 123
6.6. Transfer auf unterschiedliche AM-Prozesse 124
7. Designregeln 127
7.1. Additive Fertigung 127
7.2. Maskierung 128
7.3. Laserbearbeitung 129
7.4. Nasschemische Prozesse 130
7.5. Zuverlässigkeit 131
8. Zusammenfassung und Ausblick 132
Literaturverzeichnis 134
Anhang 154
A Laserparameter 154
B Oberflächenaufrauung durch Laserstrahlung 156
C Bauteilgeometrien 164
D Prozesscharakterisierung 165
Über den Autor 170

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AM	Additive Manufacturing / additive Fertigung
AM-MID	Additively Manufactured Mechatronic Integrated Devices
Au	Gold (von lat. *aurum*)
AVT	Aufbau- und Verbindungstechnik
BJT	Binder Jetting
CAS RN	Chemical Abstracts Service Registry Number
CIJ	Continuous InkJet
CNC	Computer Numerical Control
CPS	Cyber-Physical Systems
CTE	Coefficient of Thermal Expansion / Wärmeausdehnungskoeffizient
Cu	Kupfer (von lat. *cuprum*)
DED	Directed Energy Deposition
DLP	Digital Light Processing (ein VPP-Verfahren)
DMD	Digital Micromirror Device
DoD	Drop-on-Demand
DW	Direct-Write
HBPT	Hot-Bump-Pull-Tests (auch: Hot-Pin-Pull-Tests)
HDT	Heat Deflection Temperature (ähnlich Wärmeformbeständigkeit)
IoT	Internet of Things
KI	Künstliche Intelligenz
KOH	Kaliumhydroxid
LDS	Laser-Direktstrukturierung
LED	Light Emitting Diode
LIFT	Laser Induced Forward Transfer
LISA	Laser Induced Selective Activation
MEX	Material Extrusion
MID	Mechatronic Integrated Device, alternativ: Molded Interconnect Device
MJT	Material Jetting
MKS	Mäander-Kamm-Struktur
Ni	Nickel
PBF	Powder Bed Fusion
Pd	Palladium
PGMEA	Propylenglycolmonomethyletheracetat (Lösungsmittel)
RFA	Röntgenfluoreszenzanalyse
SCBD	Supersonic Cluster Beam Deposition

SHL	Sheet Lamination
SIPA	Selektive Ionogene Palladiumaktivierung
SLA	Stereolithography (ein VPP-Verfahren)
SLS	Selective Laser Sintering (ein PBF-Verfahren)
Sn	Zinn (von lat. *stannum*)
UAM	Ultrasonic Additive Manufacturing (ein SHL-Verfahren)
UV	Ultraviolett
VIA	Vertical Interconnect Access (Durchkontaktierung)
VPP	Vat Photopolymerisation
WTP	Water Transfer Printing

SYMBOLVERZEICHNIS

Symbol	Bedeutung	Einheit
A	Fläche	m^2
b	Breite	m
d	Schichtdicke	m
d_{Cu}	Idealisierte Kupferschichtdicke	m
d_S	Strahldurchmesser	m
E_P	Pulsenergie	J
f	Pulsfrequenz	Hz
g	Gravitationskonstante	$m \cdot s^{-2}$
H_m	Mittlere Einstrahlung	$J \cdot m^{-2}$
l	Länge	m
P	Mittlere Laserleistung	W
R	Widerstand	Ω
s_L	Längspitch	m
s_Q	Querpitch	m
T_G	Glasübergangstemperatur	°C
$Ü_P$	Pulsüberdeckung	m
$Ü_{P,r}$	Relative Pulsüberdeckung	-
v	Geschwindigkeit	$m \cdot s^{-1}$
η	Viskosität	$Pa \cdot s$
κ	Elektrische Leitfähigkeit	$m \cdot \Omega^{-1} \cdot m^{-2}$
ρ	Dichte	$kg \cdot m^{-3}$
ρ_{sp}	Spezifischer elektrischer Widerstand	$\Omega \cdot m^2 \cdot m^{-1}$

FORMELVERZEICHNIS

Formel 4.1: Schichtdicke beim Tauchbeschichten mit Solen (Schichtdicke d, Viskosität η, Ziehgeschwindigkeit v, Soldichte ϱ, Gravitationskonstante g) [255]. 62

Formel 4.2: Pulsenergie E_P (mittlere Laserleistung P, Pulsfrequenz f). 71

Formel 4.3: Längspitch s_L (Vorschubgeschwindigkeit v, Pulsfrequenz f). 71

Formel 4.4: relative Pulsüberdeckung $Ü_{P,r}$ (Pulsüberdeckung $Ü_P$, Längspitch s_L, Strahldurchmesser d_s). 71

Formel 4.5: mittlere Einstrahlung H_m (mittlere Laserleistung P, Vorschubgeschwindigkeit v, Querpitch s_Q, Längspitch s_L). 72

Formel 4.6: relative Pulsüberdeckung $Ü_P$, Längspitch s_L, Strahldurchmesser d_s. 73

Formel 4.7: mittlere Einstrahlung H_m, mittlere Laserleistung P, Vorschubgeschwindigkeit v, Strahldurchmesser d_s. 73

Formel 4.8 Reaktion der Kupferabscheidung mit Formaldehyd als Elektronenspender 82

Formel 5.1: elektrischer Widerstand R (spezifischer Widerstand $ϱ_{sp}$, Querschnittsfläche A, Länge l, elektrische Leitfähigkeit κ). 101

Formel 5.2: idealisierte Kupferschichtdicke d_{Cu} (elektrischer Widerstand R, Querschnittsfläche A, Breite b, Länge l, elektrische Leitfähigkeit κ) 102

KURZFASSUNG

Die aktuelle industrielle Revolution (Industrie 4.0) erhält ihr Momentum zu großen Teilen aus Wertschöpfung, die auf intelligenten, vernetzten Produkten und darauf aufbauenden Dienstleistungen basiert. Derartige Produkte müssen per Definition sowohl mechanische als auch elektrische Funktionen tragen, sind also mechatronische Systeme. Die Herstellung der Basiskörper solcher Systeme über additive Fertigungsverfahren birgt Vorteile in der erreichbaren Komplexität, Reduktion der Anzahl an Einzelkomponenten und der kostengünstigen sowie nachhaltigen Fertigung kleiner Stückzahlen.

In der vorliegenden Arbeit wird eine Prozesskette vorgestellt, die es ermöglicht, additiv gefertigte 3D-Körper zu einem mechatronischen Bauteil zu veredeln, indem unmittelbar auf der Oberfläche elektrisch leitfähige Strukturen erzeugt werden. Die Prozesskette basiert auf der Maskierung der Bauteiloberfläche und dem selektiven Abtrag der Maskierung entsprechend der Schaltungsgeometrie mittels Laserstrahlung, bei dem auch die Bauteiloberfläche bearbeitet wird. In einem nasschemischen Badprozess werden dann nacheinander die Oberfläche mit Palladiumkeimen beaufschlagt, die Maskierung final entfernt und Metallschichten (Cu/Ni/Au) außenstromlos abgeschieden. Der Prozess ist somit nicht auf Spezialwerkstoffe angewiesen, sondern ermöglicht den Einsatz branchenbekannter Materialien aus dem Bereich der additiven Fertigung, sofern diese nicht elektrisch leitfähig sind. Als Maskierungsmaterial wurden eine anorganische Schicht in Form eines Natriumsilikatglases und eine organische Schicht in Form eines photostrukturierbaren Negativlacks untersucht. Das anorganische Maskierungsmaterial musste aufgrund starker Rissbildung auf 3D-

Bauteilen jedoch zunächst verworfen werden. Das Verfahren wurde unter Verwendung des Digital Light Processing als Modellprozess der additiven Fertigung erarbeitet und die erzeugten Metallschichten hinsichtlich Haftfestigkeit (Hot-Bump-Pull-Tests), Leitfähigkeit (Vierleitermessung) und Oberflächenrauheit (Weißlichtinterferometrie) charakterisiert. Dabei konnten Haftfestigkeiten und Leitfähigkeiten der Metallschicht vergleichbar mit industriell gängigen, spritzgegossenen laser direktstrukturierten Mechatronic Interconnect Devices aufgezeigt werden. Zum Nachweis der Transferierbarkeit des Verfahrens auf andere additive Fertigungsverfahren wurden Bauteile mit vier weiteren Verfahren, Stereolithographie, PolyJet, selektives Lasersintern und HP Multi Jet Fusion, prozessiert und die Metallstrukturen charakterisiert. In allen Fällen konnte, trotz der stark unterschiedlichen Oberflächeneigenschaften, eine gute Selektivität der Metallabscheidung gezeigt werden. Abschließend wurden Designregeln für das Verfahren aufgestellt.

ABSTRACT

The current industrial revolution (Industry 4.0) derives much of its momentum from value creation based on intelligent, interconnected products and related data based services. Such products, by definition, must carry both mechanical and electrical functions, making them mechatronic systems. The production of the base structures of such systems through additive manufacturing processes offers advantages in achievable complexity, reduction of individual components, and cost-effective as well as sustainable production of small quantities.

This thesis presents a process chain that allows for enhancing additively manufactured 3D structures into mechatronic components by creating electrically conductive structures directly on their surfaces. The process chain is based on masking the component's surface and selectively removing the masking according to the circuit geometry using laser radiation, which also modifies the component's surface thereunder. In a wet-chemical bath process, the surface is then exposed to palladium nuclei, the masking is fully removed, and metal layers (Cu/Ni/Au) are deposited by electroless plating. This process is not reliant on specialized materials, enabling the use of industry-standard materials from the additive manufacturing field, as long as they are not electrically conductive. As masking materials, an inorganic layer in the form of sodium silicate glass and an organic layer in the form of photosensitive negative resist were investigated. However, for the time being the inorganic masking material had to be discarded due to significant cracking if applied on 3D components. The procedure was developed using Digital Light Processing as a model process for additive manufacturing and the resulting metal layers were characterized for adhesion strength (hot bump pull tests),

conductivity (four-point measurement), and surface roughness (white-light interferometry). Adhesion strength and conductivity comparable to industrially common injection-molded laser direct structured mechatronic interconnect devices was achieved. To demonstrate the transferability of the process to other additive manufacturing processes, components built with four additional methods, i.e. stereolithography, Stratasys PolyJet, selective laser sintering, and HP Multi Jet Fusion, were processed and the metal structures were characterized. In all cases, despite markedly different surface properties, good selectivity of metal deposition was observed. Finally, design rules for the process were established.

1. EINLEITUNG

In der Geschichte der industriellen Fertigung, die sich in der Mitte des 18. Jahrhunderts etablierte, gab es mehrere Perioden, in denen diverse Erfindungen zu einem signifikanten Umbruch in der Industrie und einer Steigerung von Produktivität führten. Im heutigen Sprachgebrauch hat sich der Begriff der industriellen Revolutionen (angelsächsischer Sprachraum) oder auch „Industrie X.0“ (deutscher Sprachraum) etabliert, wobei Industrie 1.0 für die Epoche der Mechanisierung, Industrie 2.0 für die Epoche der Elektrifizierung und Massenproduktion, Industrie 3.0 für die Epoche der mechanischen sowie elektronischen Automatisierung und Industrie 4.0 für die Epoche der Vernetzung und Datenauswertung steht (Abb. 1.1) [1]. Jede der industriellen Revolutionen beschreibt ein Produktionsumfeld, dessen Wandel eine preisgünstigere Herstellung von Waren sowie für die entsprechende Zeit vollkommen neuartige, den Markt durchdringende Produkte (Innovationen) ermöglicht. Während es bei den ersten drei industriellen Revolutionen noch so war, dass Produktinnovationen im Großen und Ganzen erst nach der Weiterentwicklung der Produktionstechnologien entstanden, stellt sich dies bei der vierten industriellen Revolution anders dar. Diese basiert weitgehend auf der intelligenten Vernetzung von Maschinen oder Prozessen und damit insbesondere auf Weiterentwicklungen im Bereich von Software auf Basis der Produktionstechnologien aus der vorangegangen „digitalen Revolution“ (Industrie 3.0). Die Weiterentwicklung der Produktionstechnologie verläuft damit aktuell im Wettlauf zu den Visionen neuer Produkte.

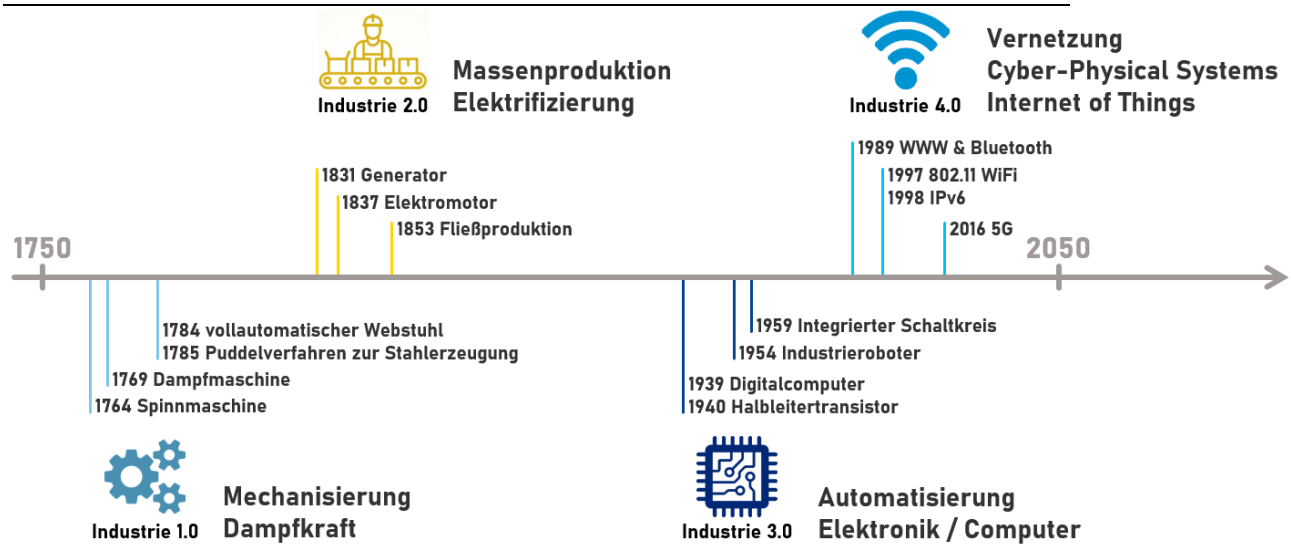


Abb. 1.1: Wichtige Erfindungen und Meilensteine der Industriegeschichte – Industrie 1.0 bis 4.0.

Produktseitig wichtige Innovationstreiber der aktuellen Zeit sind Cyber-Physical Systems (CPS) und das Internet der Dinge (en: Internet of Things, IoT). Diese basieren u.a. auf mechatronischen Bauteilen, die um die Fähigkeit erweitert werden, in Netzwerken zu kommunizieren und zu kooperieren. Fertigungsseitig gibt es dazu zwei wichtige Wegbereiter, nämlich erstens Gordon Moore's Gesetz der Schaltkreisdichte (1965), das besagt, dass sich die Anzahl der integrierten Schaltkreise, die auf einem Mikrochip Platz haben, in Zeitabständen von rund zwei Jahren verdoppelt [2], und zweitens Jakob Nielsen's Gesetz der Internetbandbreite (1983), welches vorhersagt, dass sich die Netzverbindungsgeschwindigkeiten für High-End-Heimanwender etwa alle 21 Monate verdoppeln [3]. Die beiden Gesetzmäßigkeiten, die den jeweiligen technologischen Fortschritt mit fast gleicher Geschwindigkeit voran schreiten sehen, ermöglichen über die Leistungssteigerung und Miniaturisierung der nötigen Elektronik die Ausstattung von immer mehr „dummen" Gegenständen mit intelligenten Funktionen sowie Netzwerkbildung und damit auch neue Service-Dienstleistungen von Industrie- bis Privatkunden über die Ökonomisierung der gesammelten Daten [4]. Auf derartige Datensätze sind letztendlich auch die künstliche

Intelligenz (KI) bzw. maschinelles Lernen angewiesen, die in immer mehr Anwendungen einen Fortschritt ermöglichen, der auf Basis algorithmischer Programmierung unmöglich erscheint.

Um Sensorik, Netzwerk- und Datenverarbeitungstechnik in Produkte zu integrieren, sind Schaltungsträger nötig, die die erforderlichen elektronischen Bauelemente untereinander elektrisch und das Gesamtsystem in sich mechanisch verbinden. Den Standard stellt hier die Leiterplatte dar, ein starres Verbundmaterial, in der Regel aus Epoxidharz und Glasfasermatten, das vollflächig mit Kupferfolie kaschiert und über Ätzprozesse zu einem Schaltungsträger mit diskreten, leitenden Strukturen veredelt wird. Die Leiterplattentechnologie wurde über Jahrzehnte mit den Zielen niedriger Herstellungskosten und hoher Zuverlässigkeitsstandards weiterentwickelt. Das Miniaturisierungspotential ist jedoch aufgrund der starren, zweidimensionalen Formgebung begrenzt. Auch sogenannte Flex-Leiterplatten, die auf einer eindimensional biegbaren Polyimid-Trägerfolie basieren, lassen sich nur bis zu einem gewissen Grad an vorhandene Bauraumbeschränkungen anpassen.

Für eine bessere Bauraumintegration wird seit den 1970er Jahren das Technologiefeld der 3D-Schaltungsträger entwickelt. Diese bestehen aus einem isolierenden 3D-Grundkörper mit auf der Oberfläche aufgebrachten Leiterbahnstrukturen. Der sich daraus ergebende Vorteil ist, neben der besseren Bauraumanpassung und dem Miniaturisierungspotential, vor allem die Reduktion der Anzahl benötigter Teile in einer Baugruppe durch mechatronische Funktionsintegration und die damit einhergehende Komplexitätsreduktion. In der Anwendung ist der Stand der Technik der spritzgegossene Schaltungsträger (en: Molded Interconnect Device, MID), in der Regel auf Basis von speziellen Thermoplast-Materialien, die ein katalytisches Additiv für eine selektive außenstromlos nasschemische Metallabscheidung beinhalten. Zu der Fertigung von MID existieren jedoch

verschiedene Prozessketten [5][6]. In aktuellen Forschungsprojekten konnte auch die Eignung von Duroplasten [7] und Keramiken [8] als Substratmaterial gezeigt werden. Damit einhergehend wurde die Begriffsdefinition zu Mechatronic Integrated Device (MID) erweitert, um neue Formgebungsverfahren des Basiskörpers abzudecken. Dies ist nicht zuletzt notwendig, da beginnend im Jahr 1999 [9] und intensiver seit 2012 daran geforscht wird, additive Fertigungsverfahren (en: Additive Manufacturing, AM) für den Aufbau von dreidimensionalen Schaltungsträgern zu qualifizieren (vgl. auch Abb. 2.2). Die additive Fertigung birgt eine Reihe vorteilhafter Eigenschaften gegenüber herkömmlichen Fertigungsverfahren:

» **Gestaltungsfreiheit**: unter dem Leitsatz „Complexity For Free“ ergeben sich aufgrund der Arbeitsweise von AM-Verfahren (Aufbau eines Bauteils Schicht für Schicht) weniger Einschränkungen bei der geometrischen Auslegung von Bauteilen. So sind, je nach eingesetztem Verfahren, Merkmale von Hinterschneidungen über Hohlräume bis hin zu Baugruppen, die aus ineinander verschachtelten Bauteilen bestehen, ohne zusätzlichen Fertigungsaufwand erzeugbar. Jedes Verfahren birgt jedoch einen individuellen Satz an Gestaltungsregeln, die beachtet werden müssen. Die hohe Gestaltungsfreiheit ermöglicht die Entwicklung vollkommen neuartiger Produkte, erfordert jedoch auch ein Umdenken der Konstrukteure. Ein Beispiel hierfür ist die Biomimetik [10][11].

» **Wirtschaftlichkeit bei kleinen Stückzahlen**: da additive Fertigungsverfahren werkzeuglos (im Sinne eines geometriespezifischen Werkzeugs) arbeiten und das eingesetzte Material bis auf ggf. benötigte Stützstrukturen häufig gänzlich im Bauteil landet, kann ab dem ersten Teil kostengünstig produziert werden. Dies ermöglicht die schnelle und

wirtschaftliche Produktion von Prototypen. Mit der Weiterentwicklung von AM-Verfahren zu qualifizierten Fertigungsverfahren liegt der Nutzen heute vor allem in der Produktion von Einzelanfertigungen wie individualisierten Produkten, Fertigungshilfsmitteln oder Retrofit-Anwendungen. Unter dem Leitsatz „Complexity For Free“ können je nach Verfahren jedoch auch mehrere Bauteile parallel aufgebaut werden, ohne dass die Aufbauzeit proportional ansteigt. Dies kann eine Kosten- bzw. Zeitersparnis bei kleinen bis mittelgroßen Serien möglich machen.

» **Nachhaltigkeit** [12]: AM-Verfahren tragen prinzipiell über verschiedene Ansätze bei, Produkte nachhaltiger zu machen. Der zunächst offensichtlichste Punkt ist der, dass gegenüber subtraktiven Verfahren in der Regel deutlich weniger Abfall entsteht. Gleichzeitig werden keine geometriespezifischen Werkzeuge benötigt, wie dies sonst bei Urform- oder subtraktiven Verfahren der Fall ist (Abb. 1.2). Konstruktionsseitig können Bauteile auf das minimal benötigte Material ausgelegt werden, wodurch Material- und Energieeinsparungen im gesamten Lebenszyklus möglich sind. Weiterhin können manche additive Fertigungsverfahren eingesetzt werden, um Bauteile zu reparieren, anstatt neue produzieren zu müssen. Da AM-Verfahren zu den digitalen Prozessen gehören und keine produktspezifischen Fertigungsmittel benötigt werden, kann einerseits eine dezentrale Fertigung zu der Verkürzung von Transportwegen und der Reduktion von Verpackungsmaterial genutzt werden. Andererseits kann durch die Möglichkeit, unterschiedlichste Produkte flexibel zu fertigen, Lagerlogistik minimiert werden.

Da die additive Fertigung eine Vielzahl von Verfahren unter einem Begriff vereint, ist es nicht verwunderlich, dass die hier aufgezählten Merkmale bei den einzelnen Verfahren in unterschiedlichem Ausmaß ausgeprägt sind. Dies lässt sich gut am Beispiel des Materialverbrauchs zeigen. So bauen

manche Verfahren prinzipiell einen Block in der Größe des kompletten Bauraums auf, in dem die eigentlichen Bauteile enthalten sind, während andere Verfahren eingesetzt werden, um komplexe Bauteile zu reparieren, was sogar gegenüber einer Neuproduktion mittels AM Material einspart. Die unterschiedlichen Verfahrensklassen werden in Abschnitt 2.1 erläutert.

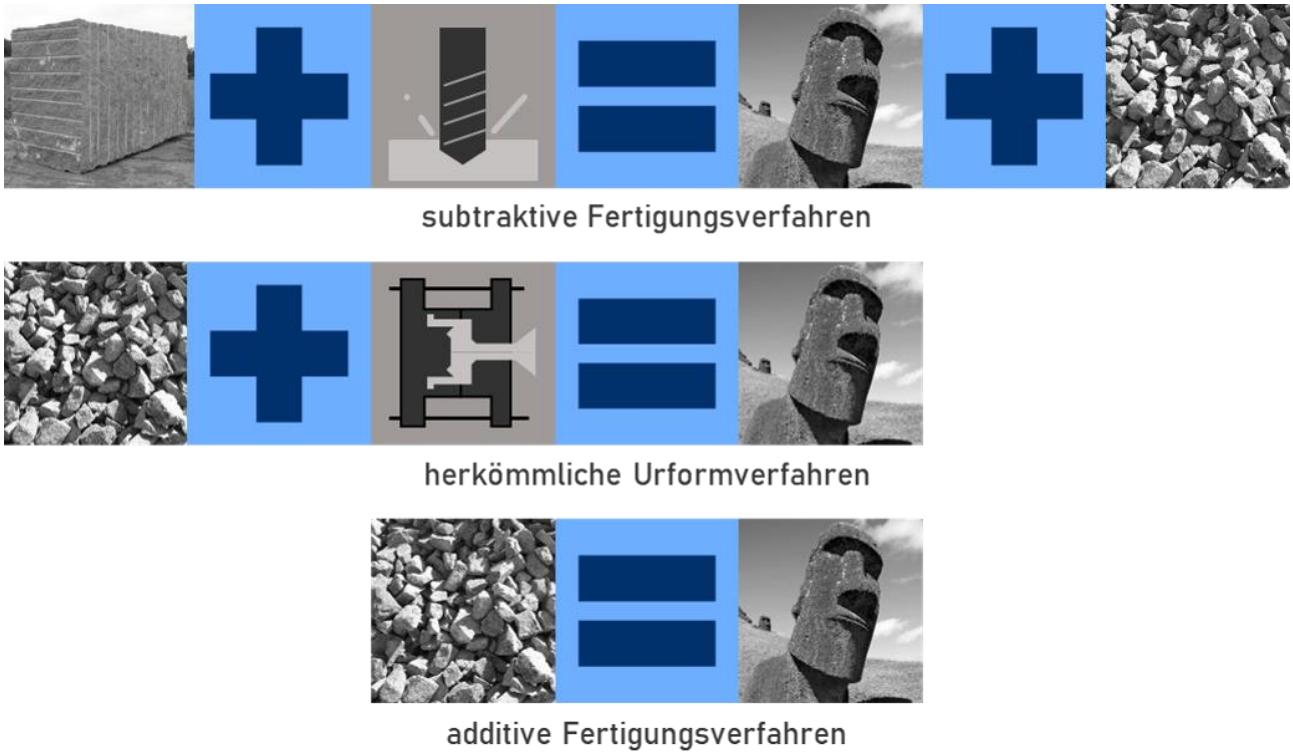


Abb. 1.2: Stoffströme in verschiedenen Fertigungsverfahren. Oben: subtraktive Verfahren; Mitte: herkömmliche Urformverfahren; Unten: additive Fertigung.

Die Branchen und Anwendungsbereiche, die aus additiv gefertigten mechatronischen Baugruppen einen Mehrwert ziehen können, sind vielfältig. Wie eingangs erwähnt, findet aktuell der Umbruch der **industriellen Fertigung** hin zur Industrie 4.0 statt, bei der sensorisierte und vernetzte Maschinen eingesetzt werden. Bis sich Fertigungsanlagen amortisiert haben, können viele Jahrzehnte vergehen, so dass es sich aktuell lohnt, bereits existierende Anlagen über ein Retrofit-Projekt mit zusätzlicher Elektronik auszustatten [13]. Entsprechend dem Anlagenbau, der kundenspezifisch und in kleinen Stückzahlen arbeitet, werden dazu häufig Systeme eingesetzt, die als Einzelanfertigungen oder

Kleinstserienprodukte gefertigt werden. Hier können MID auf Basis additiver Fertigungsverfahren die oben genannten Vorteile ausspielen. Im Bereich der **Consumer-Goods** möchten sich Nutzer heutzutage von der Masse abheben, und es ist ein Trend zu individualisierten Produkten zu erkennen. Beispielsweise bieten inzwischen Firmen wie Adidas, Nike, Reebok, Puma und Under Armour individuell angepasste, additiv gefertigte Turnschuhe an [14]. Passend dazu bietet Kornit Digital (ehemals Voxel8 Inc., eine 2014 aus der Harvard Universität ausgegründete Firma) Anlagen zur additiven Fertigung von individualisierten Kleidungsstücken an. In diesem Segment könnten durch eine mechatronische Integration beispielsweise eine Messung der Belastungsverteilung in der Sohle integriert, oder durch das Einbringen eines Fitness-Trackers die Schuhe in das IoT eingegliedert werden. Ein ähnliches Bild ergibt sich in der **Medizintechnik**, wo seit jeher an den Patienten angepasste Implantate und Prothesen hergestellt werden. Auch hier werden heute bereits AM-Verfahren zu deren Fertigung eingesetzt, um Kosten und vor allem die Wartezeit vor einer Operation zu reduzieren oder um neuartige Strukturen herzustellen, in die beispielsweise Knochen gut einwachsen können. Ein Zusatznutzen durch eine mechatronische Integration könnte die Überwachung des Heilungsprozesses oder des Implantat-Verschleißes sein [15][16][17]. Ein weiteres Beispiel sind die „3D Printed Electronic Personalized Therapy Devices“, patentiert durch die US-amerikanische Firma Sciperio [18]. Sciperio hat sich damit Trainingsgeräte in der Form eines Videospiels schützen lassen, bei denen einige oder alle Teile, Schaltkreise und Sensoren additiv gefertigt sind und zur Durchführung einer personalisierten Therapie sowie zur Verfolgung von Trainingsdaten gedacht sind. Ein klassischer Anwendungsbereich für AM-Verfahren ist die **Luft- und Raumfahrttechnik**. Hier werden große Hürden in Kauf genommen, die eingesetzten AM-Materialien und -Verfahren nach den

anspruchsvollen Richtlinien der Branche zu zertifizieren, da das hohe Materialeinsparungspotential und das damit einhergehende geringere Bauteilgewicht eine dringend notwendige Senkung des Kraftstoffverbrauchs in Aussicht stellt [19][20]. In der Luft- und Raumfahrttechnik wird insbesondere die Zuverlässigkeit des Gesamtsystems betrachtet, die sich aus der Zuverlässigkeit aller Einzelkomponenten ableitet. Wo eine Komponente nicht abschließend als zuverlässig eingestuft werden kann, wird sie redundant ausgeführt, um im Gesamtsystem wieder eine Ausfallwahrscheinlichkeit von (in der Regel) maximal neun Sigma zu erreichen. Über in Bauteile integrierte Sensoren, die beispielsweise in Echtzeit Informationen über die mechanische oder thermische Belastung ausgeben, könnten Bauteile mit geringerem Sicherheitsfaktor konstruiert oder weniger redundant ausgeführt werden, um wiederum Gewicht einzusparen. Die hier aufgezählten Anwendungsbereiche können selbstverständlich nur einen unvollständigen Einblick geben. Letztendlich kann aktuell vermutlich jede Branche auf dem einen oder anderen Weg einen Mehrwert aus dem in dieser Arbeit vorgestellten Verfahren ziehen.

1.1. ZIELSETZUNG

Wie zuvor bereits angedeutet, basiert die heute gebräuchliche Fertigungsstrategie für MID auf dem Spritzguss von Materialien, die 3 - 7 % eines metallhaltigen Additivs (z.B. das Kupfer-Chrom-Spinell $CuCr_2O_4$) enthalten, das sich nach einer Aktivierung als Katalysator für eine außenstromlos nasschemische Metallabscheidung eignet [21]. Die Aktivierung erfolgt in der Regel über den Laser-Direktstrukturierungsprozess (LDS) selektiv mit einem Laserstrahl, um z.B. diskrete Leiterbahnstrukturen auf der Oberfläche der isolierenden Grundkörper zu erzeugen. Das bedeutet jedoch, dass ein Großteil des

Additivs ungenutzt im Inneren des Grundkörpers ruht. Dies ist aus mehreren Blickwinkeln nachteilig. Aus ökonomischer Sicht ist von Nachteil, dass der Preis eines LDS-additivierten Spritzgussgranulats sich um etwa 50 % gegenüber der Standardvariante erhöht [22]. Aus ökologischer Sicht ist zu bemängeln, dass die Rezyklierung des Polymers durch die vergleichsweise geringen Mengen sortenrein nicht wirtschaftlich, gemeinsam mit nicht additivierten Materialien jedoch technisch nicht sinnvoll ist. Und zu guter Letzt spricht aus konstruktiver Sicht dagegen, dass das Additiv sich negativ auf die mechanischen und elektrischen Eigenschaften des Polymers auswirkt [21]. Zudem sind Hersteller mit diesem Verfahren auf eine Kombination aus einer Anlage zur Laserbearbeitung und einem dazu passenden, lizensierten LDS-Material angewiesen.

Für Spritzgussbauteile und Folien aus thermoplastischen und duroplastischen Materialien wurden in den letzten 10 Jahren Verfahren entwickelt, die ohne eincompoundierte Additive auskommen. Stattdessen werden die Bauteile nach der Laserstrukturierung in ein Aktivierungsbad getaucht, aus dem sich die Aktivatoren an der strukturierten Substratoberfläche anlagern. In die aufgerauten und porös zerklüfteten Strukturen der laserbearbeiten Oberflächen wandern die Aktivatoren dabei tiefer ein, als in die glatte Originaloberfläche. So werden in einem nachfolgenden, auf den Prozess fein abgestimmten, Spülprozess nur die Aktivatoren entfernt, die auf den nicht strukturierten Bereichen anlagern. Für thermoplastische Materialien sind hier die Arbeiten von Zhang zu nennen, deren LISA-Verfahren (Laser-Induced Selective Activation) auf einem Palladium-Zinn-Komplex als Aktivator basiert [23][24]. Für duroplastische Materialien wurde in der Arbeit von Kordass das SIPA-Verfahren (Selektive-Ionogene-Palladiumaktivierung) entwickelt, das eine ionogene Palladiumsulfatlösung zur Aktivierung verwendet [22]. Für

Polyimidfolien ist die Arbeit von Ren et al. zu nennen, in der mit einer Silbernitratlösung bekeimt wird [25]. In Abschnitt 3.2 werden diese Verfahren näher betrachtet.

Die Verfahren wurden für die Anwendung auf spritzgegossenen Substraten oder Folien entwickelt. Sie führen für diese Arbeit jedoch zu folgender Grundthese:

> Über eine selektive Oberflächenmodifikation durch einen Laserstrahl und anschließende nasschemische Bekeimung und Metallabscheidung sollte es direkt auf der Oberfläche von additiv gefertigten Polymer-Grundkörpern möglich sein, eine mechatronische Funktionsintegration zu implementieren.
>
> **Grundthese**

Der Vorteil einer solchen Prozesskette liegt in der Möglichkeit, die in Unternehmen bereits etablierten Materialien für AM-Verfahren weiter einzusetzen, so dass anwendungsspezifische Materialeigenschaften wie Hochfrequenztauglichkeit, Biokompatibilität oder Wärmeleitfähigkeit mit einer elektrischen Schaltung kombiniert werden können, ohne den großen Aufwand einer Materialentwicklung betreiben zu müssen.

1.2. Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit

Zunächst wird im folgenden Kapitel ein systematischer Einblick in den Stand der Technik und die relevante Literatur gegeben. Dazu werden die unterschiedlichen Arten additiver Fertigungsverfahren erläutert und die Verfahren vorgestellt, mit denen additiv gefertigte Bauteile zu mechatronischen Baugruppen veredelt werden können. Zudem werden die zugehörigen Veröffentlichungen systematisch aufgearbeitet, um darzustellen, inwiefern das Thema additiv gefertigter Mechatronik in vielfältiger Ausprägung weltweit Aufmerksamkeit erhält.

In Kapitel 3 werden einige Vorüberlegungen und Untersuchungen dargelegt, die zur Auswahl der vorgestellten Prozesskette führen. Das Verfahren selbst wird in Kapitel 4 anhand eines Modellprozesses der additiven Fertigung und eines Modellmaterials erarbeitet. In Kapitel 5 werden die zwei wichtigsten Forderungen an das Verfahren validiert, indem die Eigenschaften der stromtragenden Strukturen charakterisiert werden und die Transferierbarkeit des Verfahrens auf andere AM-Prozesse gezeigt wird. In Kapitel 6 werden die Ergebnisse diskutiert und in Kapitel 7 Designregeln für das Verfahren formuliert. Kapitel 8 fasst die Ergebnisse der Arbeit noch einmal zusammen und gibt einen Ausblick auf mögliche weiterführende Arbeiten.

2. ADDITIV GEFERTIGTE MECHATRONISCHE SYSTEME: BESTEHENDE PROZESSKETTEN

Um das hier vorgestellte Verfahren in einen größeren Kontext einordnen zu können, soll zunächst ein Überblick über die Technologien gegeben werden, die zum Aufbau von MID auf Basis additiv gefertigter Grundkörper (en: additively manufactured mechatronic integrated devices, AM-MID) eingesetzt werden. Dazu wird zuerst auf die Klassifizierung der additiven Fertigungsverfahren eingegangen, gefolgt von den Technologien zur Erzeugung der leitfähigen Strukturen. Zuletzt wird versucht, einen möglichst vollständigen Einblick in die relevante Literatur und die dort untersuchten Prozessketten zu geben.

2.1. KLASSIFIZIERUNG ADDITIVER FERTIGUNGSVERFAHREN

Die additiven Fertigungsverfahren sind nach DIN 8580 Teil der Urformverfahren [26]. Sie werden in der Norm DIN EN ISO/ASTM 52900 klassifiziert und es werden relevante Begriffe definiert [27]. Der Begriff „Additive Fertigung“ beschreibt demnach eine Gruppe von Formgebungsverfahren, die Bauteile durch Hinzufügen von Material Schicht für Schicht aus formlosen Halbzeugen aufbauen, wie z.B. Pulvern, Filamenten oder Flüssigkeiten. Dies geschieht direkt aus digitalen Geometriedaten ohne den Einsatz von produktspezifischen Werkzeugen. Seit der Erfindung der Stereolithographie (SLA) durch Charles W. Hull im Jahr 1984 ist eine Vielzahl an Verfahren entwickelt worden, die der additiven Fertigung zuzuordnen sind. Die Norm unterteilt diese Verfahren in sieben Klassen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben werden. Obwohl der Begriff „3D-Druck“ in den Medien (und teilweise leider auch

im wissenschaftlichen/technischen Kontext) verallgemeinernd für alle additiven Fertigungsverfahren verwendet wird, verbindet die Norm diesen Begriff ausschließlich mit der „Fertigung von Gegenständen durch Auftragen eines Materials mit einem Druckkopf, einer Düse oder einer anderen *Drucktechnologie*“, also insbesondere die auf der Drop on Demand (DoD) Methode basierenden Material Jetting (MJT) und Binder Jetting (BJT) Verfahren [27]. Sie merkt weiterhin an, dass es ein „Häufig in einem *nichttechnischen Kontext* als Synonym für additive Fertigung […] verwendeter Begriff“ ist und weiter: „bis heute wird dieser Begriff insbesondere mit Maschinen in Verbindung gebracht, die niedrigpreisig und/oder von insgesamt geringer Leistungsfähigkeit sind“ [27]. Betrachtet man den entsprechenden englischen Begriff „3D-printing“, ist dieser, inklusive der Abkürzung 3DP, sogar durch eine Gruppe des Massachusetts Institute of Technology spezifisch für ein von ihnen entwickeltes BJT-Verfahren geschützt. Entsprechend enthält z.B. auch die Richtlinie VDI 3405 die Anmerkung „Additive Fertigung wird immer häufiger auch als 3-D-Drucken bezeichnet, jedoch steht in dieser Richtlinie 3-D-Drucken nur für ein bestimmtes additives Verfahren.“ [28]. Die Erfahrung, die man unter anderem auf einschlägigen Messen und Kongressen macht, ist, dass die undifferenzierte Verwendung des Begriffs aufgrund der großen Vielfalt an Verfahren und deren unterschiedlichen Entwicklungsständen zu Verwirrung und Enttäuschung bei potentiellen Anwendern führt und damit zu einer unnötigen Verlängerung des „Tals der Enttäuschungen“ bzw. „Trough of Disillusionment“ im Hype-Zyklus nach Gartner [29] für die additive Fertigung insgesamt (siehe auch Abb. 2.1).

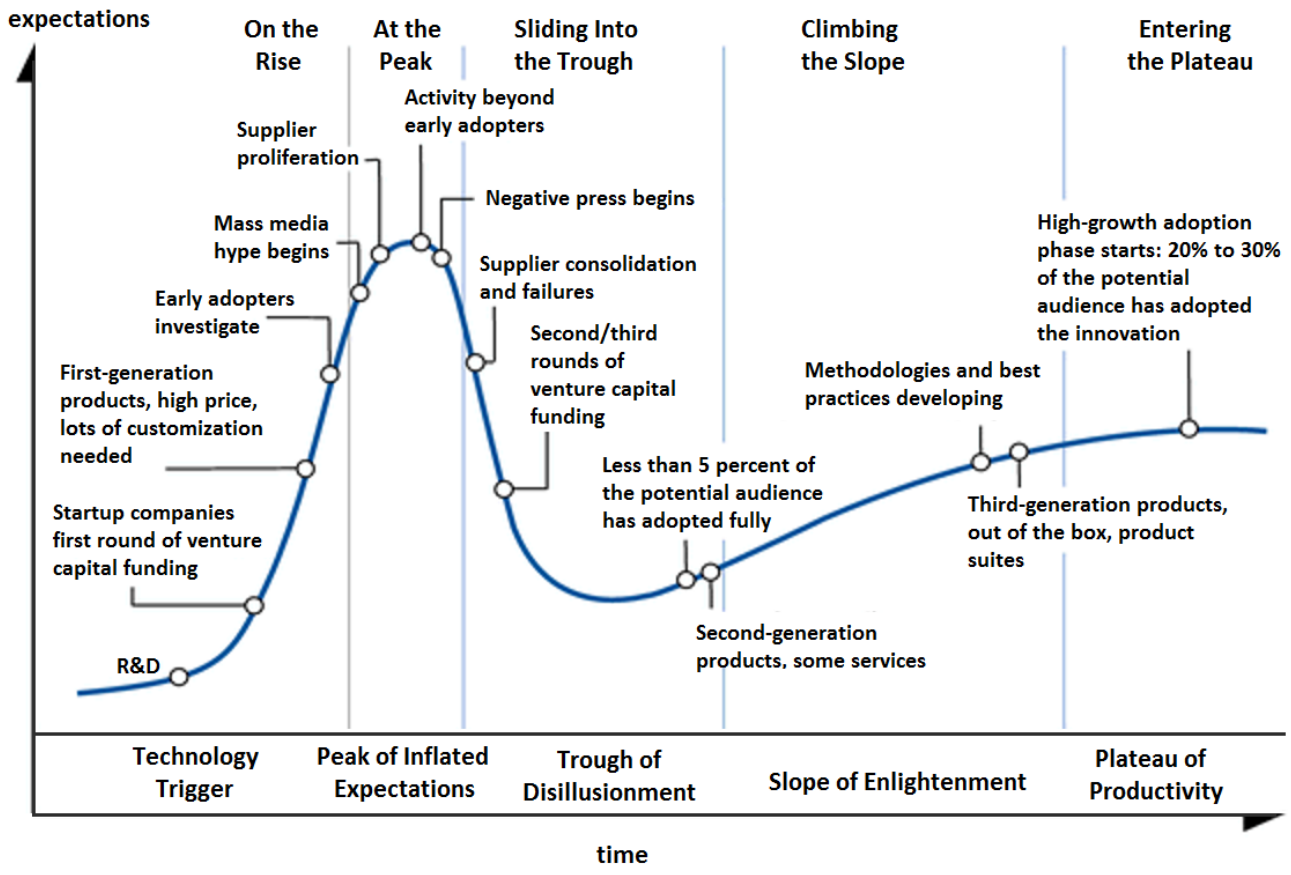


Abb. 2.1: Hype-Zyklus nach Gartner. Die Überlappung der Entwicklungsphasen verschiedener additiver Fertigungsverfahren bei gleichzeitiger Verallgemeinerung durch den Begriff „3D-Druck" führt zu einem zeitgleichen positiven Medienhype für manche Verfahren und einer damit einhergehenden nicht erfüllbaren Erwartungshaltung bei potentiellen Anwendern für andere Verfahren (Bildquelle: [30]).

2.1.1. FREISTRAHL-BINDEMITTELAUFTRAG (EN: BINDER JETTING, BJT)

Basierend auf der Drop-on-Demand (DoD) Methode, die aus der InkJet-Technologie bekannt ist, werden bei BJT-Prozessen Pulverwerkstoffe dünn auf ein Druckbett aufgetragen und über ein aufgedrucktes Bindemittel selektiv miteinander verbunden [31][32][33]. Aufgrund des recht einfachen Verfahrens kann im Prinzip jeder beliebige Feststoff als Grundwerkstoff verwendet werden, solange er mit einer geeigneten und druckbaren Flüssigkeit als Bindemittel gepaart werden kann. Durch den Einsatz von mehreren Druckköpfen können verschiedene Bindemittel parallel eingesetzt werden, um Bauteile mit unterschiedlichen „Zonen" bzw. Eigenschaftsgradienten zu erzeugen. Die erzeugten Bauteile haben

prinzipbedingt eine körnige Oberfläche (entsprechend der Größenverteilung der Pulverpartikel) und mechanisch sind sie in der Regel spröde bei geringer Festigkeit. Je nach eingesetztem Pulver und Bindemittel kann in einem Nachfolgeschritt das Bindemittel ausgetrieben und das Bauteil gesintert werden, was mit entsprechendem Sinterschwund und der daraus resultierenden Maßhaltigkeit einhergeht.

2.1.2. Materialauftrag mit gerichteter Energieeinbringung (en: directed energy deposition, DED)

Durch eine Düse wird Material an den Arbeitspunkt gefördert, wo es durch einen Laser- oder Elektronenstrahl aufgeschmolzen und mit dem Zielobjekt verschweißt wird [31][32][34]. Obwohl DED-Fertigungsverfahren ebenfalls schichtweise arbeiten, liegt die Besonderheit in deren Anwendung häufig darin, dass die Schichten nicht zwangsläufig eben sind. Stattdessen wird der Prozesskopf über ein Mehrachsensystem entlang der Oberfläche des (ggf. komplexen) Substrats bewegt. Verwendete Materialien müssen schmelzbar sein und liegen in Form von Pulvern oder Filamenten vor. In der Regel werden Metalle eingesetzt. Die Verfahren haben prozessbedingt üblicherweise keine gute Auflösung bzw. Maßhaltigkeit und die Oberflächen werden von der Geometrie der Schweißbahnen dominiert, weswegen eine mechanische Nacharbeit nötig ist, um das Bauteil in seine endgültige Form zu bringen.

2.1.3. Materialextrusion (en: material extrusion, MEX)

Flüssige Materialien werden durch eine Düse auf einer Bauplattform abgelegt, während diese sich relativ zueinander bewegen [31][32]. So kann vektorbasiert ein Bauteil aufgebaut werden. Die Verfahren der MEX-Klasse bedienen unter den additiven Fertigungsverfahren wahrscheinlich die größte Anwendungsbandbreite, angefangen bei

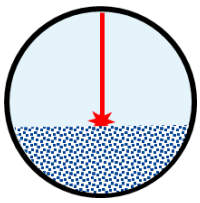
Anlagen, mit denen durch Ausbringen von schnellhärtendem Beton ganze Häuser aufgebaut werden, über Druckbehälter mit angeschlossener Dosiernadel (Dispenssystem), durch die Hydrogele zu Organen verarbeitet oder Lebensmittel in Form gebracht werden, bis hin zur Fused Filament Fabrication (FFF), dem aufgrund der günstigen und einfachen Bauweise am weitesten verbreiteten additiven Fertigungsverfahren. FFF-Anlagen verarbeiten Filamente, die in einer Heizstrecke aufgeschmolzen werden und nach dem Ablegen auf der Bauplattform wieder erstarren. In der Regel bestehen sie aus Thermoplasten, die mit einer Vielzahl von Füllstoffen wie Holz, Glas, Metall oder Keramik in Form von Pulvern und Fasern versehen werden können. Bauteile können durch den Einsatz mehrerer Düsen oder Materialwechselsysteme als Verbund aus unterschiedlichen Werkstoffen aufgebaut werden. Alternativ lassen sich mit einem weiteren Material auch wasserlösliche Stützstrukturen aufbauen, was die Oberflächenqualität an den unterstützten Bereichen erhöht und den Aufwand für die Bauteilnachbereitung reduziert. Die erreichbare Oberflächenqualität, Maßgenauigkeit und Auflösung sind schlechter im Vergleich zu Freistrahl-Materialauftrag- oder badbasierten Photopolymerisations-Technologien, mit kleineren Düsendurchmessern und damit einhergehend stark steigenden Bauzeiten lassen sich diese Eigenschaften jedoch verbessern.

2.1.4. FREISTRAHL-MATERIALAUFTRAG (EN: MATERIAL JETTING, MJT)

Analog zum BJT basieren auch die Verfahren des MJT auf der DoD-Methode. Allerdings wird das Bauteil hier ausschließlich aus den verdruckten Materialien auf einem Druckbett aufgebaut [31][32][35]. Die eingesetzten Materialien können zum einen aus flüssigen Werkstoffen wie z.B. Photopolymeren oder geschmolzenem Wachs bestehen, die nach dem Auftrag einer Schicht entsprechend erhitzt, abgekühlt oder bestrahlt werden, um auszuhärten. Zum anderen können mit Nanopartikeln

angereicherte Tinten gedruckt werden, bei denen nach dem Schichtauftrag das Lösemittel verdampft und die Nanopartikel gesintert werden. So ist es möglich, beispielsweise auch metallische Bauteile aufzubauen. Durch den Einsatz eines zweiten Druckkopfes kann ein wasserlösliches oder schmelzbares Material zum Aufbau von Stützstrukturen dienen. Werden mehrere Druckköpfe in einer Anlage verbaut, können, wie bei BJT-Verfahren, verschiedene Materialien parallel gedruckt und Bauteile mit lokal unterschiedlichen Eigenschaften sowie Gradienten hergestellt werden. Mit MJT-Verfahren aufgebaute Bauteile haben im Vergleich zu anderen additiven Fertigungsverfahren eine sehr gute Oberflächenqualität und Auflösung.

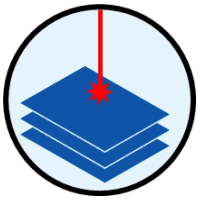
2.1.5. PULVERBETTBASIERTES SCHMELZEN (EN: POWDER BED FUSION, PBF)



Eine Strahlquelle wird über die Bauplattform gelenkt, um in einer dünnen Schicht Pulverkörner lokal miteinander und dem darunter liegenden Material zu verschmelzen [31][32][36]. Dazu werden entweder Laser in Kombination mit Galvanoscannern oder Elektronenstrahlen mit entsprechenden elektromagnetischen Strahlablenkungseinheiten eingesetzt und so vektorbasiert das Bauteil aufgebaut. Eine in die Anlage integrierte Heizung temperiert die Baukammer bis knapp unter die Sintertemperatur des Pulvers, um die erforderliche Leistung der Strahlquelle zu reduzieren. Die eingesetzten Materialien sind zwar hauptsächlich Thermoplaste oder Metalle, inzwischen werden aber auch Anlagen angeboten, die qualifiziert sind, Keramikpulver zu verarbeiten. Die hergestellten Bauteile können als Struktur- und Funktionsteile verwendet werden, und Stützstrukturen sind nur bei bestimmten Werkstoffen notwendig, um Baueilverzug entgegen zu wirken. Insbesondere bei metallischen Materialien ist das Entfernen der Stützstrukturen mit hohem Aufwand verbunden, z.B. durch Fräsen,

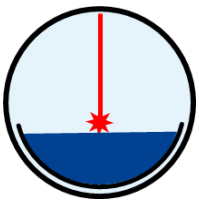
Schleifen oder Erodieren. Bauteile haben ohne Nachbehandlungsschritte eine körnige Oberfläche durch anhaftende oder verschweißte Pulverpartikel und lasergesinterte Teile haben eine offenporöse Struktur.

2.1.6. SCHICHTLAMINIERUNG (EN: SHEET LAMINATION, SHL)



Das Ausgangsmaterial bilden Rollen von Metall- bzw. Polymerfolien oder Papier, die Lage für Lage entsprechend dem Werkstoff miteinander verschweißt oder verklebt werden [31][32][37]. Die Außenkontur der einzelnen Bauteilschichten werden mittels Laserstrahlung, Fräser oder Klinge ausgeschnitten und das überschüssige Material in Einzelflächen zerteilt, um ein nachträgliches Entnehmen des Bauteils aus dem andernfalls soliden Block zu ermöglichen. Für den Aufbau von Funktionsbauteilen ist das Verfahren nicht verbreitet, jedoch lassen sich durch die gute Skalierbarkeit auch sehr große Anschauungsmuster, wie z.B. Designstudien oder Windkanalmodelle von Kraftfahrzeugen im Maßstab 1:1, herstellen. Aktuell ist die Verfahrensklasse industriell nicht relevant und es gibt am Markt nur einen Hersteller für Anlagen nach dem SHL-Prinzip. Die Fabrisonic LLC, Lewis Center, Ohio verarbeitet Metallfolien mit einem Ultraschallschweiß-Verfahren [38].

2.1.7. BADBASIERTE PHOTOPOLYMERISATION (EN: VAT PHOTOPOLYMERISATION, VPP)



Diese Verfahren verwenden Licht, um UV-vernetzende Kunststoffe aus dem flüssigen Zustand selektiv auszuhärten [31][32][39]. Als formgebende Energiequelle kommen verschiedene Systeme zum Einsatz. Im Falle der eingangs erwähnten Stereolithographie findet durch einen UV-Laser in Kombination mit Galvanoscannern eine vektorbasierte Belichtung (eindimensional) statt. Beim Digital Light Processing (DLP®, Texas Instruments) wird mit Hilfe von Mikrospiegelarrays (en: Digital

Micromirror Device, DMD™, Texas Instruments) die Schichtinformation flächig auf das Photopolymer belichtet (zweidimensional). Die Lichtquelle stellen dabei UV-LEDs dar. Die einzelnen VPP-Verfahren gibt es in der Regel in zwei Varianten. Variante eins arbeitet im „top-down" Betrieb, was bedeutet, dass das Harzbad von oben (top) belichtet wird und sich die Plattform mit dem Entstehen des Bauteils Schicht für Schicht in die Wanne absenkt (down). Variante zwei arbeitet dagegen im „bottom-up" Betrieb, das Harzbad wird also entsprechend durch den Wannenboden von unten (bottom) belichtet und das Bauteil, das kopfüber an der Bauplattform hängt, wird Schicht für Schicht aus dem Bad nach oben gezogen (up). Da der Wannenboden dafür transparent sein muss, wird er in der Regel mit einer Glasplatte oder Folie ausgestattet, von der das Bauteil nach jeder Belichtung durch eine Auf-Ab-Bewegung der Plattform abgelöst werden muss, bei der gleichzeitig flüssiges Material in den Arbeitsbereich nachströmen kann. Bauteile, die mit VPP-Verfahren hergestellt werden, haben in der Regel eine gute Oberflächenqualität und Detailtreue. Weiter ist es möglich, das Photopolymer mit verschiedensten Füllstoffen anzureichern, so dass vielfältige Materialeigenschaften eingestellt werden können. Auf der anderen Seite ist es nur schwierig und unter großem Materialverlust möglich, Bauteile aus verschiedenen Materialien herzustellen [40], was unter anderem dazu führt, dass die häufig benötigten Stützstrukturen die Oberflächenqualität beeinträchtigen und aufwändige Nachbearbeitungsschritte eingeführt werden müssen.

2.2. VERFAHREN ZUR MECHATRONISCHEN FUNKTIONALISIERUNG

Grundsätzlich gibt es zwei Wege, um die stromtragenden Strukturen von AM-MID zu erzeugen. Entweder wird mit dem eingesetzten Verfahren direkt ein leitfähiger Werkstoff verarbeitet, beispielsweise additive

Fertigungsverfahren oder Direct-Write-Verfahren, oder es werden Bereiche des Grundkörpers für eine anschließende außenstromlos nasschemische Metallabscheidung modifiziert, indem katalytisch wirkende Stoffe selektiv aufgebracht oder freigelegt werden. Zur Erzeugung der entsprechenden Geometrien wird eine Vielzahl von Verfahren eingesetzt. Der Großteil lässt sich in drei Kategorien einteilen - additive Fertigungsverfahren, laserbasierte Prozesse und Direct-Write-Verfahren. Diese drei Kategorien und ausgewählte weitere Verfahren werden in den folgenden Abschnitten erläutert. Da im Rahmen dieser Arbeit nicht auf alle Verfahren im Detail eingegangen werden kann, sei hiermit für tiefer gehende Informationen auf die entsprechenden, in Tabelle 2.1 aufgeschlüsselten, Quellen verwiesen.

2.2.1. Verfahren der Additiven Fertigung

Prinzipiell können die Verfahren, mit denen Grundkörper additiv gefertigt werden, auch zur Erzeugung der Strukturen der elektrischen Schaltung genutzt werden [41][42]. Zunächst ist es bei manchen Verfahren möglich, beide Strukturen in einem Prozessschritt zu erzeugen, indem mit einer Anlage zwei unterschiedliche Werkstoffe abwechselnd verarbeitet werden. Wo dies nicht möglich ist, kann entweder ein weiteres Verfahren in die Anlage integriert oder eine Prozesskette bestehend aus mehreren AM-Verfahren eingesetzt werden, um zuerst den Grundkörper und im Anschluss die Strukturen der Schaltung aufzubauen. Zur groben Erläuterung der Funktionsweise der einzelnen AM-Verfahren sei hier auf Abschnitt 2.1 verwiesen.

2.2.2. Laserbasierte Prozesse

Zur selektiven Oberflächenmodifikation werden häufig Laser eingesetzt, da sie zu den werkzeuglosen bzw. digitalen Prozessen gehören, auf dreidimensionalen Oberflächen arbeiten können und einen, für industrielle

Zwecke, angemessenen Durchsatz haben. Für die Erzeugung von AM-MID kann bei den laserbasierten Prozessen zwischen der Laser-Direktstrukturierung und der Laserbearbeitung unterschieden werden.

2.2.2.1 LASER-DIREKTSTRUKTURIERUNG

Die Laser-Direktstrukturierung (LDS) ist ein durch die LPKF Laser & Electronics SE geschütztes Verfahren zur Erzeugung von Metallstrukturen auf der Oberfläche von Spritzgussbauteilen [21]. Die Kernkomponente der LDS stellen spezielle Polymer-Werkstoffe dar. Sie sind mit Additiven versetzt, die durch einen Laserstrahl freigelegt werden, so dass durch deren katalytische Wirkung in einer außenstromlos nasschemischen Metallabscheidung die leitfähigen Strukturen an den laserstrukturierten Bereichen entstehen. Die Additive können entweder, wie beschrieben, in den Grundwerkstoff eingearbeitet werden oder es wird nachträglich ein Lack aufgetragen, der die Additive enthält (LPKF ProtoPaint LDS, vgl. auch Abschnitt 3.1). Für den Aufbau von AM-MID werden analog Verfahren auf Basis beider Varianten erforscht, unter anderem, da das Schutzrecht für das LDS-Verfahren vor einiger Zeit abgelaufen ist. Zudem existieren von einigen Herstellern LDS-fähiger Spritzgussgranulate auch lizensierte kommerzielle Filamente für das FFF-Verfahren, die ursprünglich für den Aufbau von MID-Prototypen gedacht waren [43][44].

2.2.2.2 LASERBEARBEITUNG

Die Laserbearbeitung umfasst lasergestützte Verfahren, die weder, wie die LDS, auf speziellen Materialien mit zuvor beigefügten Additiven für die außenstromlos nasschemische Metallabscheidung basieren, noch zu den Direct-Write-Verfahren gehören (vgl. Abschnitt 2.2.3). Beispiele hierfür sind:

» Vollfläche Metallabscheidung auf der Substratoberfläche und Vereinzeln der Leiterbahnstrukturen durch Abtragen des Metalls per Laser [45].

» Selektives Aufrauen der Substratoberfläche per Laser mit anschließender nasschemischer Bekeimung und Metallabscheidung nach dem in Abschnitt 1.1 erläuterten Prinzip [46].

» Aufbau eines stark Al_2O_3-haltigen Grünlings, der unter speziellen Bedingungen zu einem keramischen Substrat gebrannt wird, so dass anschließend eine selektive Materialmodifikation an der Oberfläche durch einen Laser und eine darauf basierende außenstromlose nasschemische Metallabscheidung erfolgen kann (Analog zum Prozess von Ermantraut et al. [47]).

» Aufbau eines polymeren Grundkörpers mit metallischem Füllstoff (unterhalb der Perkolationsschwelle) und nachträgliches Sintern der Metallpartikel bei gleichzeitigem Verdampfen der Polymermatrix mittels Laserstrahlung [48].

» Tauchen eines mit einem Haftvermittler versehenen Substrats in eine nanopartikuläre Kupfertinte. Mittels Laserstrahlung werden die Cu-Nanopartikel selektiv gesintert und das überschüssige Material abgewaschen [49].

2.2.3. DIRECT-WRITE VERFAHREN

Für die Gruppe der Direct-Write (DW) Verfahren gibt es verschiedene Definitionen. Für diese Arbeit wird die Definition nach Hon et al. verwendet, da sie die DW-Verfahren insbesondere von den AM-Verfahren abgrenzt. DW-Verfahren sind demnach solche, die eingesetzt werden, um funktionale oder strukturelle Materialien präzise in digital definierten Bereichen auf einer Substratoberfläche abzulegen [50], im Gegensatz zu AM-Verfahren also nicht für den Aufbau von 3D-Strukturen eingesetzt werden. Einige relevante Verfahren werden im Folgenden vorgestellt.

» Die **InkJet**-Technologie hat in den letzten Jahrzehnten in Form von Tintenstrahldruckern ihren Weg in fast jeden Haushalt gefunden. Die gleiche Technologie, mit der sonst Pigmente auf Papier, Polymer oder Stoff gedruckt werden, wird in Forschung und Industrie eingesetzt, um mit leitfähigen Nanopartikeln gefüllte Funktionstinten auf Substrate zu drucken [51][52]. Durch eine anschließende Aufheizung werden die flüssigen Anteile der Tinte ausgetrieben und die Nanopartikel zu leitfähigen Strukturen gesintert. Prinzipiell werden dazu die Tinten tropfenweise auf das Substratmaterial aufgebracht. Technologisch wird jedoch zwischen der Continuous-Inkjet (CIJ) und der Drop-on-Demand (DoD) -Technologie unterschieden. In der CIJ-Technologie wird das Bestreben eines kontinuierlich ausgestoßenen Tintenstrahls, in einzelne Tropfen zu zerfallen, genutzt, um Tropfen zu erzeugen. Soll im Druckbild eine Lücke entstehen, werden die unnötigerweise produzierten Tropfen über elektrische Felder in einen Auffangbehälter abgelenkt. In der DoD-Technologie werden die Tropfen nur dann erzeugt, wenn sie für das Druckbild tatsächlich benötigt werden. Dies geschieht über gezielte Druckänderungen in einer Kammer kurz vor der Düse. Generell darf bei den InkJet-Verfahren der Abstand zwischen Düse und Substrat nicht mehr als wenige mm betragen, da das Druckbild sonst an Schärfe verliert. Dies sorgt für eine eingeschränkte 3D-Fähigkeit der Technologie.

» Für das **Aerosol Jet**-Verfahren werden nanopartikuläre Tinten, ähnlich denen des InkJet-Verfahrens, über ein Trägergas zu einem Aerosol verarbeitet und durch eine Düse auf das Substrat aufgebracht [53][52]. Ein Hüllgasstrom sorgt dabei dafür, dass der Strahl über eine möglichst große Strecke fokussiert bleibt, so dass der Arbeitsabstand zum Substrat etwa um den Faktor 2 größer sein kann, als bei InkJet-Verfahren. Auch

hier werden die Tinten in einem nachfolgenden Schritt getrocknet und die Nanopartikel zu einer leitfähigen Struktur gesintert.

» **Dispenstechnologien** basieren auf einer Düse, im einfachsten Fall einer Dosiernadel, durch die Flüssigkeiten aus einem druckbeaufschlagten Reservoir auf die Substratoberfläche abgelegt werden [52]. Für die Erzeugung leitfähiger Strukturen werden dazu Metallpartikeltinten oder leitfähige Klebstoffe verarbeitet. Im Vergleich zu der InkJet- oder AerosolJet-Technologie können mit Dispensverfahren deutlich höherviskose Materialien verarbeitet werden.

» Bei der **Supersonic Cluster Beam Deposition** (SCBD) werden metallische Nanopartikel über ein Trägergas auf Überschallgeschwindigkeit beschleunigt und auf die Substratoberfläche geschleudert [54]. Dabei dringen sie zunächst in das Substrat ein, so dass ein Formschluss zwischen den beiden Materialien entsteht. Durch höhere Beschichtungszeiten wächst die Schicht um bis zu einige hundert Nanometer auf dem Substrat auf.

» Für das **Water Transfer Printing** (WTP) werden mit der InkJet-Technologie Strukturen auf eine wasserlösliche Trägerfolie gedruckt [55]. Legt man diese Folie in ein Wasserbad, löst sie sich auf und hinterlässt die gedruckten Strukturen auf der Wasseroberfläche. Durch ein geschicktes Eintauchen des Substrats werden die Strukturen auf dessen Oberfläche transferiert.

» Für das **Laser Induced Forward Transfer**-Verfahren (LIFT) wird eine transparente Trägerfolie bis auf etwa hundert Mikrometer an die Substratoberfläche gebracht [56]. Auf der dem Substrat zugewandten Seite ist auf der Folie das Material für die funktionalen Strukturen in einer dünnen Lage aufgebracht. Mit einem Laserstrahl wird das zu

transferierende Material durch die Trägerfolie hindurch belichtet, so dass es verdampft und auf der Substratoberfläche wieder kondensiert.

» Für die Plasmadust-Technologie wird aus einem kalt-aktiven Atmosphärendruck-Plasma eine metallische Struktur direkt auf der Bauteiloberfläche abgeschieden [57]. Das Beschichtungspulver, beispielsweise aus Kupfer, Silber, Zinn, Metalllegierungen oder Mischsystemen, wird kontinuierlich einem nicht-thermischen Plasma (120 - 250 °C) zugeführt und Schichtdicken zwischen 1 und 1000 µm erzeugt. Da das Verfahren bereits auf einem Plasmastrahl basiert, kann durch eine entsprechende Prozesssteuerung die separate Aktivierung der Bauteiloberfläche, wie sie zum Teil für das InkJet- oder Aerosol Jet-Verfahren notwendig ist, entfallen.

2.2.4. Weitere Verfahren

In der Literatur sind weitere Verfahren beschrieben, die sich jedoch keiner bestimmten Kategorie zuordnen lassen. Hervorzuheben sind hier das Einbetten von Draht und das Befüllen von Mikrokanälen mit leitfähigen Materialien. Das Einbetten von Draht wird aktuell ausschließlich in Kombination mit dem FFF-Verfahren eingesetzt. Dazu wird z.B. ein weiterer Prozesskopf in die FFF-Anlage integriert, der nach dem Aufbau einer Polymerschicht den Draht über Ultraschall- oder Wärmeschweißen in das Material einbettet. Ein Vorteil dieses Verfahrens liegt in der vergleichsweise hohen Stromtragfähigkeit der Leiterbahnen [58]. Für das Verfahren des Befüllens von Mikrokanälen ist bereits die Konstruktion und der Aufbau des Grundkörpers geometriegebend für die späteren funktionalen Strukturen. Dazu werden offene (an der Oberfläche liegende) oder geschlossene (im Grundkörper verlaufende) Kanäle erzeugt, die später entweder mit einer sinterfähigen Tinte oder mit einer leitfähigen Flüssigkeit befüllt werden [59].

2.3. LITERATURBEKANNTE VERFAHRENSKOMBINATIONEN

Im Folgenden soll ein möglichst vollständiger Überblick über den Stand der Technik in der Literatur gegeben werden. Dabei werden die in Abschnitt 2.1 und Abschnitt 2.2 vorgestellten Kategorien der Verfahren für die Erzeugung von Grundkörper und Funktionsstrukturen verwendet. Zudem werden nur Arbeiten vorgestellt, in denen auf Basis additiv gefertigter Substrate Schaltungsträger erzeugt wurden. Arbeiten, in denen reine Antennen- oder Sensorstrukturen erzeugt wurden, werden, aufgrund der großen Vielzahl an Veröffentlichungen in diesem Bereich, nicht betrachtet. Ebenso fließen Review-Artikel nicht in die Betrachtungen mit ein. Insgesamt wurden 190 Veröffentlichungen für den Stand der Technik einbezogen. Abb. 2.2 gibt einen Überblick über die Anzahl der Publikationen nach Erscheinungsjahr und Regionen sowie über die Anzahl der veröffentlichten Prozesse, aufgeschlüsselt nach den eingesetzten Technologien (Hinweis: da in manchen Veröffentlichungen mehrere Prozesse vorgestellt werden, wird hier zwischen Publikation und Prozess unterschieden). Abb. 2.3 hebt die veröffentlichungsstärksten Arbeitsgruppen hervor. In Tabelle 2.1 wird ein detaillierterer Überblick über die veröffentlichten Prozesse gegeben, aufgeschlüsselt nach den verwendeten Technologien für die Erzeugung von Grundkörpern und Funktionsstrukturen.

2.3.1. ÜBERBLICK

Die ersten Untersuchungen zu AM-MID wurden von Todd Anderson (Universität von Arizona) mit Unterstützung von Paul Calvert und Hugh Denham durchgeführt und 1999 auf dem Symposium on Smart Structures and Materials in Newport Beach, Kalifornien vorgestellt. Dort präsentierten sie einen Prozess, bei dem mithilfe zweier Dispensköpfe ein Epoxidharz und eine leitfähige Epoxid-Silber-Tinte verarbeitet werden können. Sie

bauten damit Quader mit integrierten leitfähigen Strukturen auf und bestückten sie nachträglich mit Sensoren [9]. Im Jahr 2001 stellten F. Ting, I. Gibson und W. Cheung von der Universität Hong Kong ihre Arbeiten zu funktionalisierten Selective Laser Sintering (SLS) Bauteilen vor. Durch die prozessbedingt poröse Struktur der Polyamid-Bauteile war es ihnen möglich, mit einem selbstgebauten Dispenssystem eine Mischung aus Graphit, Acrylat und Lösungsmitteln (Conductive Carbon Cement) oberflächennah in die Bauteilstruktur einzubringen und so leitfähige Kanäle zu erzeugen [60]. Beide Arbeitskreise scheinen sich nach den genannten Veröffentlichungen nicht mehr mit der Thematik befasst zu haben. Ab dem Jahr 2004 greift die Arbeitsgruppe um Ryan Wicker an der Universität von Texas am Standort El Paso das Thema AM-MID auf und forscht seitdem kontinuierlich daran. In ihrer ersten Veröffentlichung wurde ein Prozess vorgestellt, bei dem ein Dispenssystem zum Aufbringen leitfähiger Pasten in eine Stereolithographieanlage integriert worden ist, um funktionale Prototypen zu erzeugen [61].

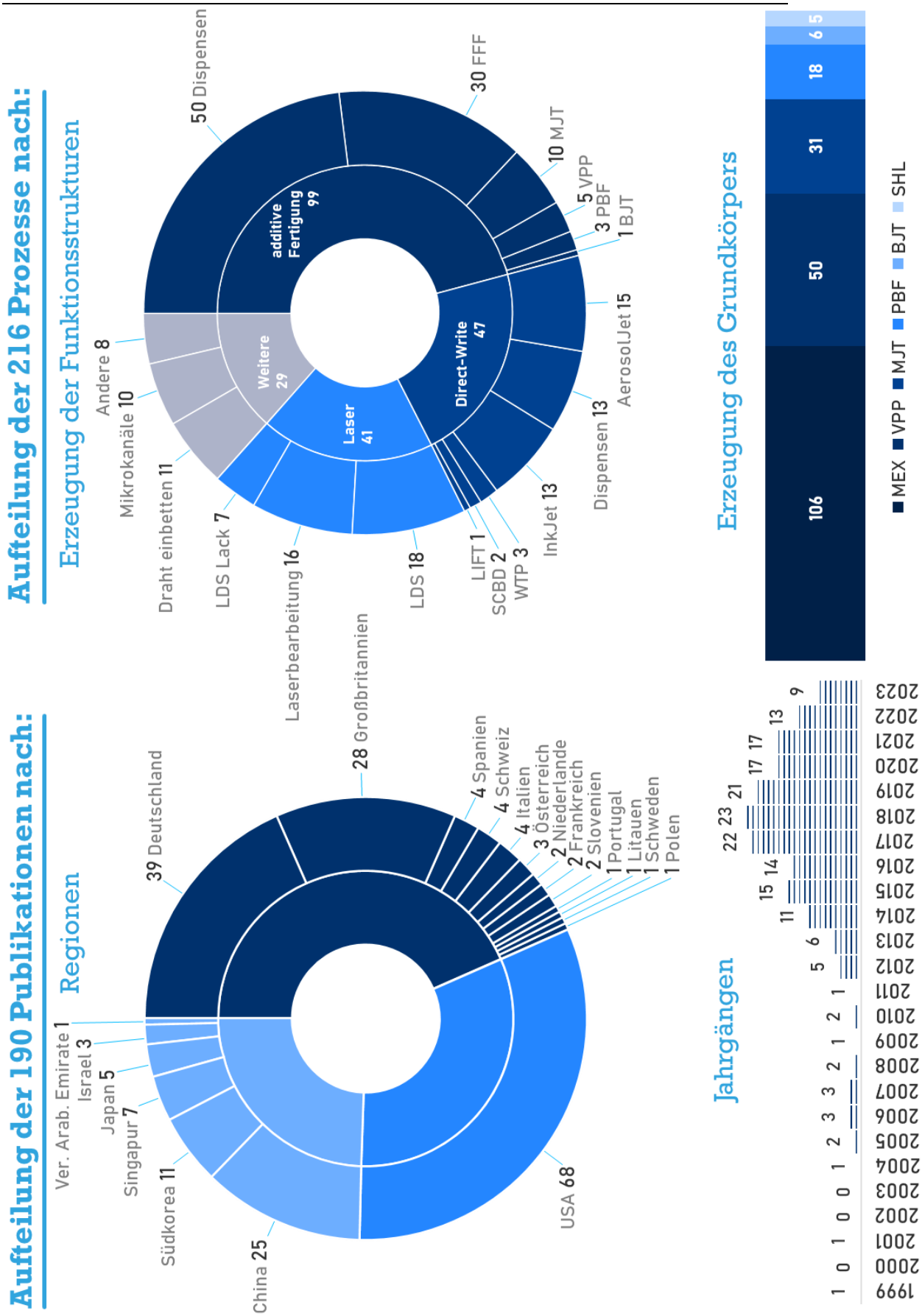


Abb. 2.2: Aufteilung der Publikationen nach Regionen und Jahrgängen (links); Aufteilung der veröffentlichten Prozesse nach Erzeugung des Grundkörpers und der Funktionsstrukturen (rechts).

Ein verstärktes Interesse an AM-MID ist in der internationalen Literatur etwa ab dem Jahr 2012 zu verzeichnen und erreichte in den Jahren 2017 bis 2019 einen bisherigen Höchststand (Abb. 2.2: Jahrgänge). Die meiste Forschung wurde in den USA gefolgt von Deutschland, Großbritannien, China und Südkorea betrieben. In Großbritannien, der drittstärksten Region, wurde bislang jedoch fast ausschließlich in den Jahren 2016 bis 2020 publiziert. Betrachtet man die in den Publikationen erwähnten Förderlinien, ist das abrupte Ende wahrscheinlich auf das Auslaufen eines Rahmenförderprogramms, eventuell wegen des Austritts Großbritanniens aus der EU, zurückzuführen. Das Ausbleiben der britischen Publikationen kann jedoch den absteigenden Verlauf der Veröffentlichungen nach 2019 erklären. Das Jahr 2023 kann aufgrund des Erscheinungstermins dieser Arbeit nicht vollständig abgebildet werden.

Etwa die Hälfte aller vorgestellten Prozessketten beinhaltet den Aufbau des Grundkörpers mittels FFF. Dies ist aller Wahrscheinlichkeit nach darin begründet, dass entsprechende Anlagen günstig in der Beschaffung und relativ einfach in der Handhabung sind, weswegen sie heutzutage in fast allen Forschungseinrichtungen für den Aufbau von Hilfsmitteln eingesetzt werden. Ein knappes Viertel entfällt auf wannenbasierte Photopolymerisationsverfahren. Für die Erzeugung der Funktionsstrukturen wurde wiederum in fast der Hälfte der Prozessketten ein additives Fertigungsverfahren eingesetzt. Grob ein Sechstel entfallen jeweils auf Direct-Write, laserbasierte und sonstige Prozesse.

Tabelle 2.1: Übersicht über die Literatur zur Herstellung von AM-MID aufgeschlüsselt nach den Verfahrenskombinationen. Die mit einem Stern (*) versehenen Einträge beinhalten einen zusätzlichen Arbeitsschritt, bei dem stromtragende Strukturen mittels außenstromlos nasschemischer oder (selten) galvanischer Metallabscheidung erzeugt bzw. nachverstärkt werden. Der mit einem Δ versehene Eintrag stellt ein Sonderverfahren dar, welches ein Photopolymerisationsverfahren verwendet, das auf Trockenresist statt auf flüssigem Harz basiert.

Funktionalisierung			Grundkörper						
			MEX: FFF	MEX: Dispensen	VPP	MJT	PBF	BJT	SHL
additive Fertigung		FFF	[41] [62] [63] [64] [65] [66] [67] [68] [69] [70] [71] [72] [73] [74] [75] [76] [77]* [78]* [79]* [80]* [81]* [82] [83]* [84] [85] [86]* [87] [88]* [89]	[76]					
		Dispensen	[76] [90] [91] [92] [93] [94] [95] [96] [58] [97] [98] [99]	[9] [76] [90] [100] [101] [102] [103] [104] [105] [106] [107]	[61] [108] [109] [110] [111] [112] [113] [114] [115] [116] [117] [118] [119] [120] [121]	[76] [92] [122] [123] [124] [125]	[126]	[127] [128]	[129] [130] [131]
		VPP			[42] [132]* [133]* [134]* [135]*				
		MJT				[136] [137] [138] [139] [140] [141] [142]* [143] [144]	[145]		
		PBF	[146] [147]				[148]		
		BJT						[149]	
	Laser	LDS Prozess	[45] [150] [151]	[152]	[13] [153] [154] [155] [156] [157] [158] [159]		[160] [161] [162] [163] [164] [165]		
		LDS Lack	[166]		[166] [167]	[168]	[166] [167] [169]		
		Laserbearbeitung	[45]* [48] [46]* [170]* [171]* [49] [172]* [173] [174]* [175]+Lack		[49] [176]*	[49] [177]	[49]		
	Direct-Write	InkJet / PiezoJet	[76] [178] [179] [180]	[76]	[181]	[182] [183] [184] [185] [186]		[187]* [188]	
		AerosolJet	[76] [150] [189] [190] [191] [192]	[76]	[153] [189] [193] [194] [195]*	[76] [196]	[197] [198]		
		Dispensen	[199] [200]*		[201] [202] [203] [204] [205] [206]	[139] [140]	[60] [197]		[207]
		SCBD	[208] [209]						
		WTP	[210]			[210]		[210]	
		LIFT			[211]Δ				
	Weitere	Einbetten von Draht	[58] [212] [213] [214] [215] [216] [217] [218] [219] [220] [221]						
		Befüllte Mikrokanäle	[59] [222] [223] [224] [225]		[226] [227] [228]	[229] [230]*			
		Sonstige	Air Brush: [231]: Photostrukturierung: [237]* [238]*		Lackieren + Schleifen: [232]* [233]*	Lackieren und Lasersintern: [234]	Stempeldruck: [235]		Siebdruck: [236]

Im Folgenden werden die veröffentlichungsstärksten Wissenschaftler bzw. Arbeitsgruppen (mehr als fünf Veröffentlichungen oder relevanter Teil eines Netzwerks) und ihre Arbeitsgebiete kurz vorgestellt. Einen Überblick dazu gibt auch Abb. 2.3.

» **Ryan Wicker**, **Eric MacDonald** und **David Espalin** an der University of Taxas at El Paso: Die Arbeitsgruppen der drei Professoren sind im Bereich Aerospace and Mechanical Engineering bzw. dem W. M. Keck Center for 3D Innovation angesiedelt. Sie kooperieren stark untereinander und veröffentlichen häufig gemeinsam. Ryan Wicker startete 2004 mit Veröffentlichungen, in denen eine Stereolithographie-Anlage mit integriertem Dispenssystem vorgestellt wurde [61][117][119]. Seit 2006 veröffentlicht Eric MacDonald mit ihm zu dieser Technologiekombination [108][203][228][205][114][109][118][226]. Im Jahr 2013 veröffentlichten sie zum ersten Mal gemeinsam mit David Espalin, und der Fokus ihrer Arbeiten schwenkte auf das Multi^{3D} System, das mit einem 6-Achs-Industrieroboterarm Bauteile während des Aufbaus zu verschiedenen Stationen transferieren kann [212][219][58][216][218][220][217][221]. Zu diesen Stationen gehören zwei industrielle FFF-Anlagen und ein CNC-System, mit dem Draht durch Ultraschall eingebettet sowie Dispens- und Pick & Place-Operationen durchgeführt werden können.

» **Ji Li** (heute Southeast University, China), **Robert Kay** (heute University of Leeds), **Russel Harris** (University of Leeds) und **Richard Hague** (University of Nottingham): Seit dem Jahr 2016 kann man in Großbritannien einen sehr aktiven Kreis von Wissenschaftlern erkennen (etwa 10 Arbeitsgruppen an verschiedenen britischen Universitäten, vgl. auch Abb. 2.3), die intensiv untereinander kooperieren und dabei verschiedene Technologien miteinander kombinieren. Zunächst starten

im Jahr 2016 Untersuchungen zu der Kombination aus Bottom-Up DLP und Dispensen [201][202][120] sowie Ultrasonic Additive Manufacturing (UAM) mit Dispensen [131][129][130] oder Siebdruck [236]. Ab 2018 wurde der Fokus stärker auf die Funktionalisierung von FFF-Bauteilen mittels außenstromlos chemischer Metallabscheidung verlegt. Die Selektivität der Metallabscheidung wurde dabei entweder über den LDS-Prozess [171], Photolithographie [237][238][172] oder den Einsatz eines zweiten FFF-Materials erreicht. Ji Li wechselte bereits im Jahr 2016 von der Loughborough University an die Southeast University in China, kooperierte jedoch weiterhin mit seinen ehemaligen britischen Kollegen. Im Jahre 2020 stoppen die Veröffentlichungen aus Großbritannien wie zuvor erwähnt nach etwa 3 Jahren abrupt. Ji Li veröffentlicht seitdem jedoch weiterhin zu den Kombinationen FFF und nasschemischer Metallabscheidung [80][83] sowie Stereolithographie und LDS-Prozess [154]. Im Jahr 2022 zeigte er Untersuchungen zu dem Aufbau von AM-MID über Dispensverfahren (Grundkörper und funktionale Strukturen) [105] sowie Dispensen in Kombination mit dem LDS-Prozess [152].

Richard Hague veröffentlichte in den Jahren 2015 bis 2017 ausschließlich unabhängig von den oben genannten Wissenschaftlern über die Funktionalisierung von Material Jetting-Bauteilen mittels Material Jetting [137][138] und InkJet-Druck [186][141].

» **Michael Schmidt** und **Jörg Franke** an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg: Michael Schmidt veröffentlichte zuerst im Jahr 2010 über die Kombination des Selective Laser Sintering (SLS) mit dem LDS-Prozess [160]. Bis 2016 folgten darauf Stereolithographie mit LDS [153], AerosolJet [153] und Dispensen [110][111] sowie FFF mit Dispensen [97]. Jörg Franke veröffentlicht seit 2011 zu AM-MID, zunächst

über die Kombination von Stereolithographie mit AerosoJet (teils unterstützt durch außenstromlose nasschemische Metallabscheidung) [194]. Darauf folgten die Kombinationen SLA mit AerosolJet bzw. LDS [153], Binder Jetting mit Dispensen [128] und FFF mit AerosolJet [190] sowie PiezoJet [180]. Aktuelle Veröffentlichungen befassen sich mit der Erzeugung leitfähiger Bronzestrukturen auf Keramikplatten mittels Selective Laser Melting, also keinen AM-MID nach der Definition in dieser Arbeit.

» **Nathan Lazarus** am US Army Research Laboratory in Adelphi: Seit dem Jahr 2018 veröffentlicht Nathan Lazarus über den Aufbau von AM-MID mittels FFF, indem zwei unterschiedliche Materialien verarbeitet werden. Gestützt werden die untersuchten Ansätze durch den Einsatz des kommerziell erhältlichen Electrifi Filaments, das an der Duke University entwickelt wurde. Die stromtragenden Strukturen wurden zunächst über galvanische Metallabscheidung erzeugt [79][81][78], später über eine nachträgliche Steigerung der Leitfähigkeit des Filaments über Licht [64] und seit 2022 über außenstromlos chemische Metallabscheidung [86].

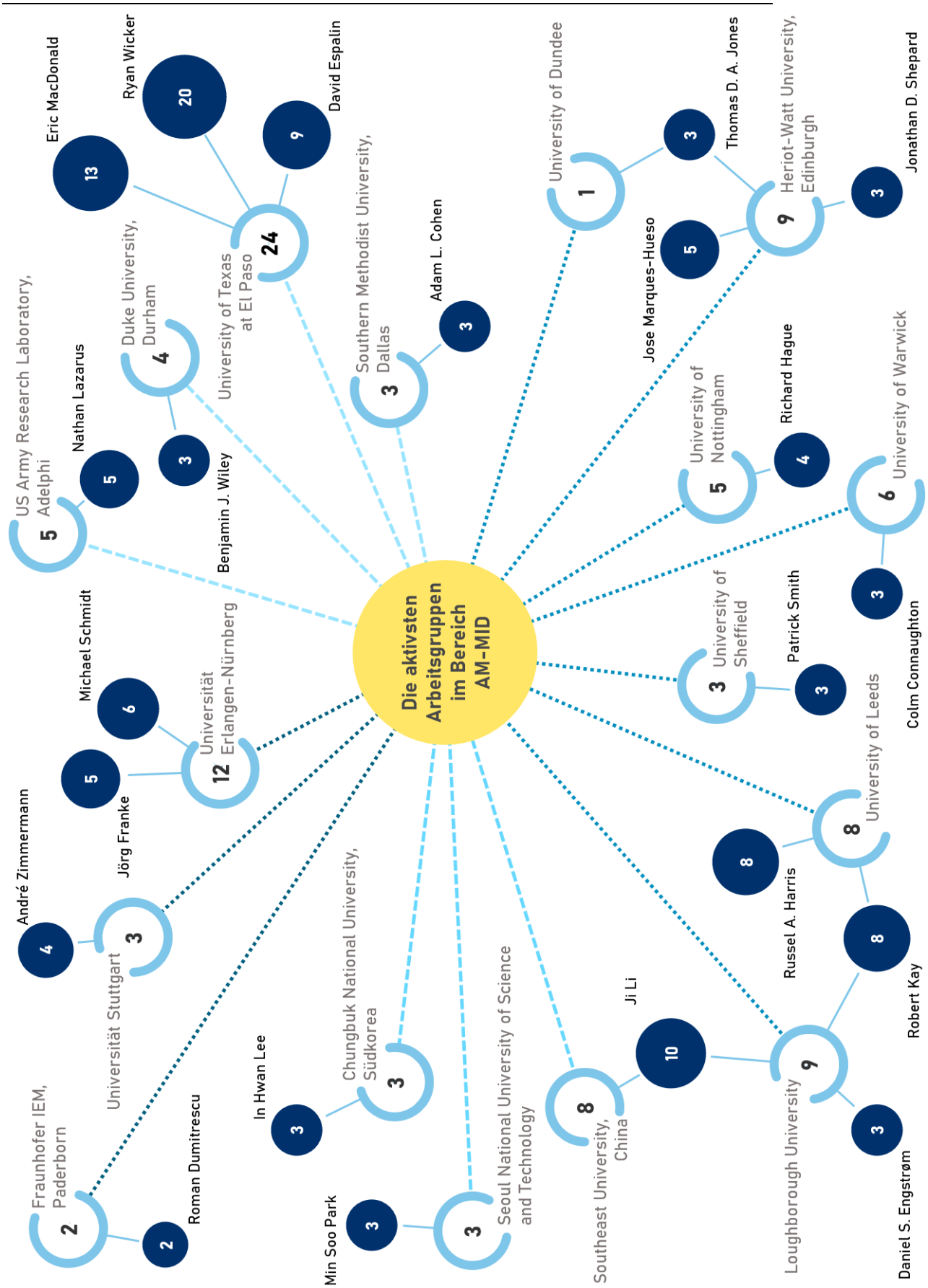


Abb. 2.3: Übersicht über die aktivsten Arbeitsgruppen im Bereich AM-MID und deren Anzahl themenrelevanter Veröffentlichungen.

2.4. Fertigungsstrategien und kommerzielle Lösungen

Die Prozesse zum Aufbau von AM-MID lassen sich in drei Kategorien einteilen: (**a**) Grundkörper und Funktionsstrukturen werden mit demselben Verfahren hergestellt, (**b**) die Funktionsstrukturen werden koinzident zum Grundkörper mit einem anderen Verfahren erstellt und (**c**) Grundkörper und Funktionsstrukturen werden nacheinander in einer Prozesskette erstellt. Die drei Kategorien sollen im Folgenden erläutert und gleichzeitig einige am Markt vorhandene Fertigungslösungen vorgestellt werden.

2.4.1. Herstellung mit demselben Verfahren

Wie zuvor erläutert, ist es bei einigen additiven Fertigungsverfahren möglich, mehrere Materialien parallel zu verarbeiten. Dies betrifft insbesondere die Verfahren der Materialextrusion und des Freistrahl-Materialauftrags. Aber auch für andere Klassen gibt es Ansätze, die Verarbeitung mehrerer Materialien zu ermöglichen [40][239]. Entsprechend können mit solchen Verfahren ohne weitere Prozesse AM-MID aufgebaut werden, indem ein leitfähiges und ein nicht leitfähiges Material miteinander kombiniert werden. Neben der kurzen Aufbauzeit können leitfähige Strukturen so auch im Inneren von Bauteilen verlaufen. Ein Beispiel für eine kommerziell erhältliche Anlage, die nach diesem Prinzip arbeitet, ist das Dragonfly-System der 2012 gegründeten Firma nano dimension aus Israel. Das System fällt in die Kategorie des Freistahl-Materialauftrags und erzeugt Schaltungsträger über die Materialkombination eines Photopolymers und einer Silbernanotinte. Es ist zur Prototypenfertigung von Leiterplatten gedacht und daher aktuell nicht in der Lage, Freiform-3D-Körper aufzubauen. Über eine Kooperation mit dem Fraunhofer IPA in Stuttgart wird jedoch an der dazu nötigen Anlagentechnik gearbeitet [240]. Ein weiteres Beispiel ist die NeuroStone™ Technologie der japanischen Firma Murata Manufacturing Co., Ltd. Auch

hier wird der Freistrahl-Materialauftrag eingesetzt, um keramische (LTCC) und metallische (Kupfer) Nanopartikeltinten zeitgleich mit einem Stützmaterial zu verarbeiten. Durch eine thermische Nachbehandlung wird das Stützmaterial aus dem Bauteil ausgetrieben und die keramischen bzw. metallischen Nanopartikel miteinander versintert [143][241].

2.4.2. Herstellung über koinzidente Verfahren

Die Herstellung von AM-MID über mehrere, koinzident ablaufende Prozesse ist ein häufig verwendeter Ansatz. Dabei werden neben dem Verfahren zum Aufbau des Grundkörpers beispielweise ein weiteres additives Fertigungsverfahren, ein Direct-Write-Verfahren oder ein Verfahren zum Einbetten von Draht in einer Anlage oder einer Fertigungsstruktur integriert. Die Fertigungsdauer erhöht sich dadurch gegebenenfalls gegenüber der Herstellung mit demselben Verfahren, der Zugriff auf das Bauteilinnere ist für die Erzeugung von leitfähigen Strukturen jedoch auch hier gegeben. Aus der Literatur sind hier die Anlagen „m4 3D printer“ von Roach et al. [76] sowie die NextFactory von Tilford et al. [139] und die Multi^{3D} Fertigungsumgebung von Coronel et al. [220] hervorzuheben. Zwei Beispiele für kommerziell verfügbare Lösungen sind die Anlagen der Firmen Neotech AMT und voxel8. Die 2006 gegründete Firma Neotech AMT GmbH aus Nürnberg entwickelt und vertreibt ein 5-Achs-System für die Herstellung dreidimensionaler Schaltungsträger („printed electronics“) [242]. Neben den vielen Modulen, die den Direct-Write Methoden zuzuschreiben sind, wird für das System auch ein FFF-Modul angeboten, was den Aufbau von AM-MID inklusive Pick & Place von elektronische Bauteilen ermöglicht. Die US-amerikanische Firma voxel8 wurde 2014 aus der Arbeitsgruppe von Jennifer Ann Lewis an der Harvard Universität ausgegründet [243]. Lewis kombinierte FFF mit einem Dispenssystem, um AM-MID aufbauen zu können. Das System fand

jedoch keine nennenswerte Verbreitung. Voxel8 wurde 2021 von Kornit Digital aufgekauft und umstrukturiert mit dem Ziel, Anlagen für die Produktion von Textilien und Schuhen zu entwickeln [244].

2.4.3. Herstellung über Prozessketten

Bei der Herstellung von AM-MID über Prozessketten wird zunächst der Grundkörper additiv gefertigt und erst nachträglich über weitere Prozesse veredelt. Dies ist üblicherweise der Fall bei AM-MID, die auf laserbasierten Prozessen [48] oder befüllten Mikrokanälen [59] basieren, und zwangsläufig bei Prozessen, die eine chemische Metallabscheidung beinhalten [77]. In der Regel steht bei solchen Prozessketten nur die Oberfläche der Grundkörper für eine Funktionalisierung zur Verfügung. Andererseits eignen sie sich häufig besser für die Produktion größerer Stückzahlen. Ein kommerzieller Anbieter für eine ganzheitliche Fertigungslösung ist bislang nicht bekannt. Jedoch können für bestimmte Prozessketten alle benötigten Anlagen und Materialien einzeln kommerziell erworben werden. Ein Beispiel hierfür ist der Aufbau von FFF-Bauteilen mittels LDS-fähiger Filamente [44] mit anschließender Laseraktivierung und außenstromloser, nasschemischer Metallabscheidung.

3. VORÜBERLEGUNGEN

Wie in Abschnitt 1.1 erläutert wurde, soll ein Verfahren erarbeitet werden, das es allgemein auf Isolatormaterialien (mit Fokus auf Kunststoffen) ermöglicht, additiv gefertigte Grundkörper zu AM-MID weiterzuverarbeiten. Das jeweils zugrundeliegende AM-Verfahren und -Material soll dabei möglichst frei wählbar bleiben, um die Hürden für Unternehmen, die bereits AM-Verfahren etabliert haben oder auf branchenspezifische Werkstoffe angewiesen sind, möglichst gering zu halten. Aus Gründen der Zuverlässigkeit sollen die stromtragenden Strukturen direkt auf die Oberfläche appliziert werden, ohne eine zusätzliche, permanente Zwischenschicht einzuführen. Wie der Einblick in den Stand der Technik gezeigt hat, steht ein derartiges Verfahren derzeit nicht zur Verfügung. Betrachtet man die in Abschnitt 2.4 vorgestellten Fertigungsstrategien, muss dazu auf die Herstellung über eine Prozesskette zurückgegriffen werden. Die Herstellung der elektrischen Strukturen mit demselben Verfahren wie der Grundkörper entfällt, da ein einheitlicher Prozess per Definition nicht existieren kann und entsprechend für jedes AM-Verfahren eine gesonderte Lösung entwickelt werden müsste. Ebenso verhält es sich bei der Herstellung über koinzidente Verfahren, da hier die Integration des Verfahrens zur Herstellung der elektrischen Strukturen in eine Vielzahl unterschiedlicher Anlagen erfolgen müsste, mit entsprechend unterschiedlichen Umgebungsbedingungen. Nur über den Einsatz einer Prozesskette, die möglichst unabhängig von dem eingesetzten AM-Verfahren und -Material ist, kann diese Problematik umgangen werden. Das bedeutet gleichzeitig, dass, im Gegensatz zu den beiden ausgeschlossenen Fertigungsstrategien, das Bauteilinnere für eine Funktionalisierung nicht zur Verfügung steht. Sehr viele Produkte können

jedoch auf Basis eines einlagigen Schaltungslayouts oder mithilfe einer Entflechtung durch Null-Ohm-Widerstände realisiert werden. Betrachtet man die in Abschnitt 2.2 vorgestellten Verfahren zur mechatronischen Funktionalisierung, stehen nun noch die Direct-Write-Verfahren und die laserbasierten Verfahren zur Diskussion. Aus wirtschaftlicher Sicht werden AM-Verfahren als Chargenprozess betrachtet. In einem Bauzyklus können dabei häufig mehrere Bauteile gleichzeitig aufgebaut werden, je nach Verfahren, Bauteilgröße und Bauraum durchaus auch mehrere hundert Stück. Sowohl die Laserbearbeitung als auch die DW-Verfahren sind ebenfalls Chargenprozesse, jedoch werden hier typischerweise Einzelbauteile oder Nutzen mit Chargengrößen von wenigen Bauteilen prozessiert. Folgeprozesse wie Sinterschritte oder nasschemische Metallabscheidung sind industriell hingegen wieder mit großen Chargen üblich oder sogar kontinuierlich darstellbar. Für die Skalierung eines AM-MID-Verfahrens hin zu großen Stückzahlen wäre es entsprechend zuerst notwendig, die Anlagen für die Laserbearbeitung bzw. das DW-Verfahren redundant auszuführen. Dabei hat die Laserbearbeitung gegenüber den DW-Verfahren einen deutlichen Geschwindigkeitsvorteil und stellt daher in der Regel kein Nadelöhr im Prozessablauf dar. Betrachtet man real existierende Produkte, die MID-Bauteile enthalten, so findet man entsprechend auch deutlich mehr Beispiele für laserbasierte Prozesse (insbesondere LDS-Bauteile) als für DW-Verfahren. Es lässt sich demnach eine höhere Akzeptanz der Industrie für einen laserbasierten Prozess schlussfolgern, der hier entsprechend angestrebt werden soll. Zudem müssen die mit den DW-Verfahren verarbeiteten Tinten und Pasten in der Regel bei Temperaturen über 100 °C gesintert werden, um die elektrische Leitfähigkeit herzustellen. Dies schränkt die Auswahl des Grundmaterials auf solche Werkstoffe ein, die Glasübergangstemperaturen deutlich über der Sintertemperatur besitzen, da sonst die Eigenspannungen, die über den

schichtweisen Aufbau der additiven Fertigung in das Bauteil eingebracht werden, zu Bauteilverzug führen und das Bauteil unbrauchbar machen.

3.1. LACKBASIERTE LDS-VERFAHREN

Ein bereits bestehendes, kommerzielles Verfahren, um AM-MID auf Basis einer Laserbearbeitung herzustellen, ist das Produkt ProtoPaint LDS der Firma LPKF Laser & Electronics SE aus Garbsen [245][166]. Es besteht aus einem Lack, der LDS-Aktivatoren enthält und direkt auf ein Bauteil aufgebracht werden kann, um so über eine Laserstrukturierung und nasschemische außenstromlose Metallabscheidung leitfähige Strukturen auf dem Bauteil zu erzeugen. Der Lack ist jedoch lediglich für die Herstellung von Prototypen geeignet, da sich unter Beanspruchung des Bauteils die Metallschicht samt Lack häufig vom Substratmaterial löst. Insbesondere die Lebensdauer des Systems unter Temperaturwechselbeanspruchung ist durch den Lack im Schichtaufbau, speziell bei ungefüllten Substratwerkstoffen, über den Effekt des CTE-Mismatch stark herabgesetzt [246]. Zudem sind derartige Lacke bei unbehandelten AM-Bauteiloberflächen aufgrund von deren Rauheit und Porosität nur schwierig zuverlässig aufzubringen. Auch der von Mager et al. beschriebene Prozess, basierend auf einem LDS-fähigen Lack, funktioniert erst nach einer zweistufigen Bauteilvorbehandlung mit Grundierungs- und Füllmaterial [167]. ProtoPaint LDS wird aktuell von LPFK nicht mehr zum Kauf angeboten. Von einem Verfahren, basierend auf einem Lack, der LDS-Additive enthält, wird daher abgesehen.

3.2. METALLABSCHEIDUNG AUF NICHT ADDITIV GEFERTIGTEN 3D-KÖRPERN ÜBER SELEKTIVE BEKEIMUNG

Wie in Abschnitt 1.1 erläutert, gibt es für die selektive nasschemische Metallabscheidung auf polymeren Grundkörpern bereits literaturbekannte

Verfahren. Sie beruhen auf einer laserbasierten selektiven Oberflächenmodifikation, die zu einem von der nicht mit dem Laser bearbeiteten Oberfläche abweichenden Aufnahmeverhalten der entsprechenden Katalysator-Suspensionen für die spätere nasschemische Metallabscheidung führt. Nach dem Eintauchen der laserstrukturierten Grundkörper in die Katalysator-Suspension wird in einem Waschvorgang der Katalysator von den Originaloberflächen wieder entfernt. Durch die besondere Topologie in den laserstrukturierten Bereichen lässt er sich dort nur deutlich langsamer wieder abwaschen, was zu dem gewünschten selektiven Anspringverhalten der chemisch-reduktiven Metallabscheidung führt. In den zwei folgenden Abschnitten werden zwei solche Verfahren vorgestellt.

3.2.1. LASER-INDUZIERTE SELEKTIVE AKTIVIERUNG (LISA)

Das LISA-Verfahren wurde 2010 von Yang Zhang an der technischen Universität von Dänemark in Kooperation mit dem Hahn-Schickard Institut in Stuttgart entwickelt [23]. Unter Verwendung eines neodym-dotierten Yttrium-Aluminium-Granat (Nd:YAG) Gravur-Lasers, der mit einer Wellenlänge von 1064 nm im Infrarot-Bereich emittiert, werden Bauteiloberflächen in einem Wasserbad bearbeitet. Das Wasserbad stellte sich nach vorausgegangenen Untersuchungen als notwendig heraus, um eine ausreichende Qualität bei der Abscheidung metallischer Strukturen zu erreichen. Destilliertes Wasser absorbiert in der eingesetzten Wellenlänge nur geringfügig, kühlt jedoch die Bauteiloberfläche, um einerseits ein Verbrennen des Polymers zu vermeiden, andererseits aber auch die Schmelze rasch wieder erstarren zu lassen, bevor sich größere Geometrieänderungen ergeben können. So entsteht in den bearbeiteten Bereichen eine feinporöse Struktur, die ein besseres Benetzungsverhalten und einen stärkeren Diffusionsprozess im Bekeimungsbad bewirkt. Als

Bekeimungsmedium wird eine nanokolloidale Palladium-Zinn (Pd-Sn)-Suspension eingesetzt. Das Verfahren wurde mit spritzgegossenen Bauteilen aus verschiedenen thermoplastischen Materialien wie Polycarbonat (PC), Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS), Polybutylenterephthalat/Polyethylenterephthalat (PBT/PET), Polyethylen (PE), Polystyrol (PS), Polymethylmethacrylat (PMMA), Polyetherimid (PEI) und Polyetheretherketon (PEEK) untersucht. In einer Folgearbeit wurden zudem erfolgreich weitere industrielle Laserquellen auf ihre Eignung im LISA-Prozess auf den Werkstoffen PC und PBT/PET untersucht [247].
Der LISA-Prozess wurde 2022 durch Ren et al. aufgegriffen und auf duroplastische Polyimid-Folien übertragen [25]. Zur Bearbeitung der Werkstückoberfläche unter deionisiertem Wasser setzten sie einen Faserlaser mit einer Wellenlänge von 1064 nm ein. Als Bekeimungsmedium wurde eine Silbernitratlösung verwendet, aus der Silberionen in die porösen Strukturen der bearbeiteten Oberflächen eindringen und nach einer Reinigung im Ultraschallbad auch nur dort verbleiben, um eine selektive Metallabscheidung zu ermöglichen.

3.2.2. SELEKTIVE IONOGENE PALLADIUMAKTIVIERUNG (SIPA)

In Anlehnung an das zuvor vorgestellte LISA-Verfahren wurde 2021 in der Arbeit von Timo Kordass das SIPA-Verfahren vorgestellt [22]. Das Ziel war hier, duroplastische Moldmassen, die im Bereich des Verkapselns von Siliziumchips verwendet werden, mit Fein-Pitch-Strukturen mechatronisch zu funktionalisieren. Nach seinen Untersuchungen ist das LISA-Verfahren jedoch für Anwendungen mit Leiterbahnabständen unter 200 µm nur bedingt geeignet. In seiner Arbeit werden verschiedene Nd:YAG-Festkörperlaser mit einer Wellenlänge von 1064 nm und unterschiedlichen Fokusdurchmessern eingesetzt, um auf hochgefüllten, epoxidbasierten Moldmassen durch Materialabtrag auf der Substratoberfläche selektiv eine

mikroporöse Struktur zu erzeugen. Die Laserbearbeitung findet hierbei im Gegensatz zum LISA-Verfahren an Luft statt. Bei der anschließenden Tauchbehandlung in einer ionogenen Palladiumsulfatlösung führt die Strukturierung zu einer gesteigerten Hydrophilie der Oberfläche und gibt gleichzeitig Palladiumpartikeln den Raum, tiefer in das Substrat hinein zu diffundieren. Über diesen Mechanismus erhöht sich gegenüber der unbehandelten Oberfläche nach entsprechenden Waschprozessen die Menge an aufgenommenem Katalysator, was über nachfolgende nasschemische Prozesse eine selektive Metallabscheidung ermöglicht.

3.3. METALLABSCHEIDUNG AUF ADDITIV GEFERTIGTEN 3D-KÖRPERN ÜBER SELEKTIVE BEKEIMUNG

Sowohl die Arbeit von Kordass [22] als auch die Arbeit von Zhang [23] kommen zu dem Ergebnis, dass die selektive Bekeimung mit Pd-Kolloiden hauptsächlich auf Diffusionsprozessen in und aus den mikroporösen Strukturen der laserbearbeiteten Oberflächen basiert (schaum- bzw. schwammartige Struktur). Die Diffusionsgeschwindigkeit und -tiefe unterscheidet sich zwischen strukturierten und unstrukturierten Bereichen aufgrund der unterschiedlichen Topologie, wobei unbearbeitete, spritzgegossene Bauteile oder Folien zunächst eine sehr glatte und dichte Oberfläche besitzen, die durch den Laserstrahl aufgebrochen wird. Beispielsweise wird in der Arbeit von Zhang die Rauheit der Oberflächen vor der Laserstrukturierung mit etwa $S_a = 0.6\ \mu m$, danach mit bis zu $S_a = 5.7\ \mu m$ angegeben. Dies entspricht einer Erhöhung in etwa um den Faktor 10. Additiv gefertigte Bauteile weisen prozessbedingt in der Regel ohne eine Nachbearbeitung eine deutlich rauere Oberfläche auf. Besonders pulverbasierte Verfahren erzeugen Oberflächen mit einer Struktur, die durch fest anhaftende Pulverpartikel gebildet wird und zum Teil nicht

mediendicht ist. So wird etwa in der Arbeit von Proes eine Rauheit von SLS-Bauteilen (PA12-Pulver mit 60 µm mittlerem Partikeldurchmesser) von etwa S_Z = 140 µm angegeben [165]. Die folgende Tabelle 3.1 gibt einige Werte für die gemessene Oberflächenrauheit auf AM-Bauteilen aus der Literatur wieder.

Tabelle 3.1: Auszug aus der Literatur über Oberflächenrauheit von AM-Bauteilen nach Prozesskategorie.

AM Kat.	Anlage / Material	R_a in µm	S_z in µm	Quelle
VPP	3D Systems SLA 350 / Epoxy 5190	40		[248]/[249]
VPP	3D Systems / Acrylat	7.6		[31]/[250]
MJT	3D Systems Actua 2100 / thermoJet 45	30		[248]/[249]
MEX	Stratasys FDM 1650 / ABS 400	40		[248]/[249]
SHL	Helisys LOM 1015 / MRP 014	27		[248]/[249]
BJT	Z Corp Z402 / ZP 11	27		[248]/[249]
PBF	3D Systems / Polyamid ungefüllt	43.7		[31]/[250]
PBF	EOS P390 / PA12 Pulver		140	[165]

Durch eine Laserbearbeitung eine darüber hinaus gehende Aufrauhung um ein Vielfaches des entsprechenden Rauheitswertes zu erreichen, erscheint nicht aussichtsreich. In der öffentlich geförderten Studie LasMet3D wurde die selektive Bekeimung additiv gefertigter Bauteile durch eine Aufrauhung der Oberfläche mittels Laserstrahlung untersucht [251]. Dazu wurden mit dem DLP-Verfahren aufgebaute Bauteile verwendet, die bereits vergleichsweise glatte und geschlossene Oberflächen aufweisen. Ein zufriedenstellendes Ergebnis in Form einer selektiven Metallabscheidung wurde nicht erreicht. Betrachtet man weitere Arbeiten aus der Literatur, die ähnliche Ansätze verfolgt haben, erkennt man auch dort die geschilderte Problematik. So berichten Ratautas et al. von der SSAIL-Methode, bei der FFF-Bauteile aus PC/ABS laserbearbeitet, mit Silbernitrat bekeimt und außenstromlos nasschemisch metallisiert werden. Auch wenn lediglich ein kleiner Ausschnitt der Probenoberfläche abgebildet ist, erkennt man im Vergleich zu den ebenfalls untersuchten, spritzgegossenen Proben, dass die FFF-Bauteile die stärkste Fremdabscheidung aufweisen [46].

Als Nachweis wurde in dieser Arbeit eine Versuchsreihe an DLP-Bauteilen durchgeführt. Die Bauteile, in Form einer einfachen Plattengeometrie, wurden aus dem Werktoff PLASTCure Rigid 10500 (Prodways Materials GmbH, Friedberg) hergestellt [252]. Nähere Informationen zum Herstellungsprozess vgl. Abschnitt 4.1. Zum Vergleich wurden sowohl liegend als auch stehend aufgebaute Bauteile untersucht. Liegend aufgebaute Bauteile haben auf der untersuchten Fläche eine für den Prozess geringstmögliche Rauheit, da durch die Belichtung die Oberfläche des flüssigen Harzes eingefroren wird. Aufgrund des schichtweisen Aufbaus sind die Oberflächen bei stehend aufgebauten Proben rauer, entsprechen damit aber auch eher der Oberfläche eines 3D-Körpers. Auf den Bauteilen ist eine Matrix aus 50 Feldern aufgespannt, die mit unterschiedlichen Parametern mittels Laserstrahlung bearbeitet werden können. Fünf Felder blieben unbearbeitet, um die Rauheit des unbearbeiteten Bauteils zu ermitteln. Die übrigen 45 Felder wurden mit zwei verschiedenen Strahlquellen nach den Parametersets aus Anhang A bearbeitet (vgl. dazu auch Abschnitt 4.3). Zudem wurde jeweils eine Probe mit einer Überfahrt und eine Probe mit 3 Überfahrten bearbeitet. Eine Übersicht gibt Tabelle 3.2.

Tabelle 3.2: Versuchsübersicht zur Vorstudie über die Oberflächenaufrauhung additiv gefertigter Substrate mittels Laserstrahlung

Orientierung DLP	Laserquelle	Anzahl Überfahrten	Auswertung S_a	Auswertung S_z
Liegend	IR-Laser (1064 nm)	1	Abb. A.1	Abb. A.2
Liegend	IR-Laser (1064 nm)	3	Abb. A.3	Abb. A.4
Stehend	IR-Laser (1064 nm)	1	Abb. A.5	Abb. A.6
Stehend	IR-Laser (1064 nm)	3	Abb. A.7	Abb. A.8
Liegend	Grün-Laser (532 nm)	1	Abb. 3.1	Abb. 3.2
Liegend	Grün-Laser (532 nm)	3	Abb. A.11	Abb. A.12
Stehend	Grün-Laser (532 nm)	1	Abb. A.13	Abb. A.14
Stehend	Grün-Laser (532 nm)	3	Abb. A.15	Abb. A.16

Pro Feld wurden 5 Messungen mit einem Weißlichtinterferometer (Wyko NT9100, Veeco, Plainview, New York, USA) durchgeführt und Mittelwert sowie Standardabweichung der S_a- und S_z-Werte ermittelt. Die Diagramme

in Abb. 3.1 und Abb. 3.2 sowie in Anhang B zeigen die Ergebnisse der Messungen. Der Wert für die Originaloberfläche basiert auf 25 Einzelmessungen und ist in den Diagrammen bei X = 0 eingetragen sowie zusätzlich durch einen grauen Balken markiert. Die Probe (siehe auch Abb. 3.3), die in den beiden Diagrammen betrachtet wird, zeigt in der Versuchsreihe den größten Anstieg in Bezug auf die Rauheitskennwerte. Sie wurde liegend aufgebaut, mit dem Pikosekunden-gepulsten grünen Laser bearbeitet und es wurde eine Überfahrt durchgeführt. Dennoch erzeugt keiner der untersuchten Parameterkombinationen zumindest eine zuverlässige Verdoppelung der S_a- oder S_z-Werte, geschweige denn eine Erhöhung um den Faktor zehn wie in der Arbeit von Zhang beschrieben. Ähnlich stellt es sich auch bei den übrigen Proben dar, teilweise ist sogar ein glättender Effekt feststellbar. Entsprechend ist nach der Aktivierung und Kupferabscheidung keine Selektivität, die für eine mechatronische Funktionalisierung nutzbar wäre, feststellbar (Abb. 3.3 rechts). Die Metallabscheidung auf den bearbeiteten und unbearbeiteten Oberflächen startete in diesem Versuch zeitgleich, so dass die Verbesserung des Verhaltens über eine Änderung der Prozessparameter unwahrscheinlich ist.

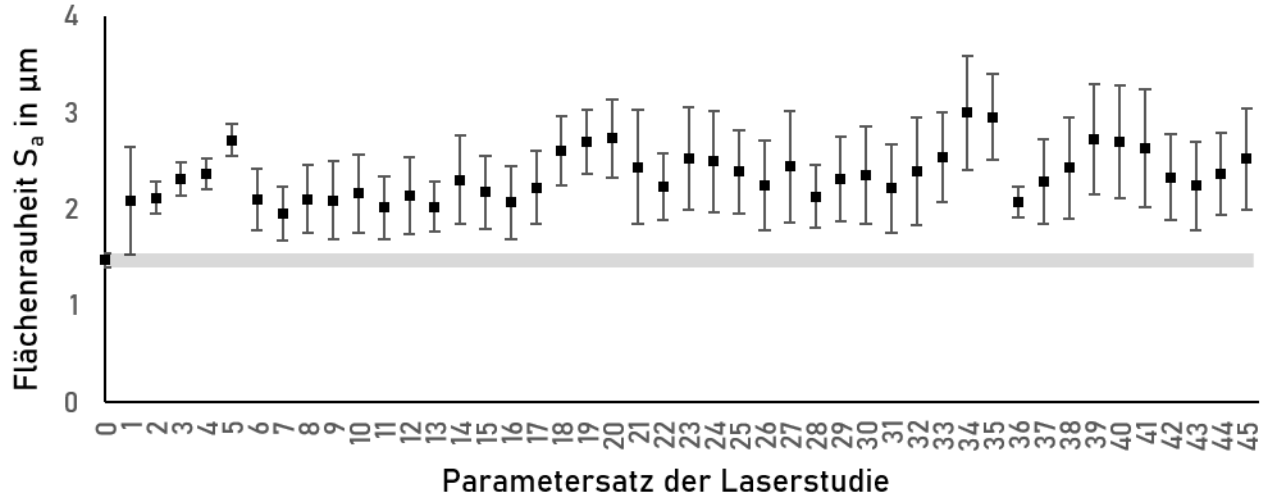


Abb. 3.1: Rauheitswerte (S_a) auf laserbearbeiteten Oberflächen. Liegend aufgebautes DLP-Bauteil aus dem Werkstoff PLASTCure Rigid 10500 (glattere Originaloberfläche). Laserstudie Grün-Laser (siehe Anhang A), eine Überfahrt. Wert X = 0 entspricht Originaloberfläche.

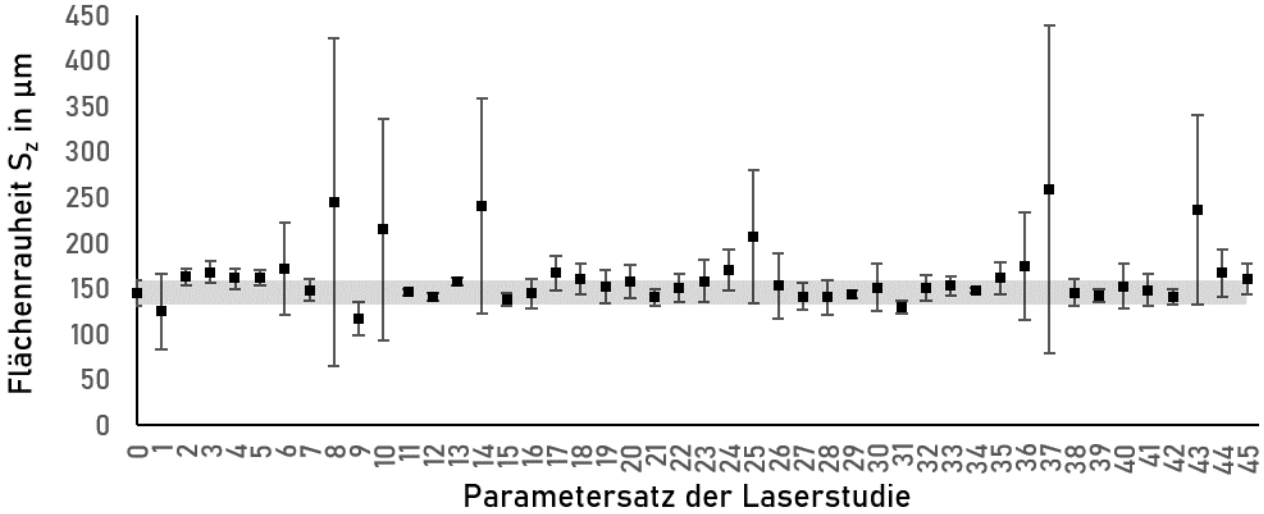


Abb. 3.2: Rauheitswerte (S_z) auf laserbearbeiteten Oberflächen. Liegend aufgebautes DLP-Bauteil aus dem Werkstoff PLASTCure Rigid 10500 (glattere Originaloberfläche). Laserstudie Grün-Laser (siehe Anhang A), eine Überfahrt. Wert X = 0 entspricht Originaloberfläche.

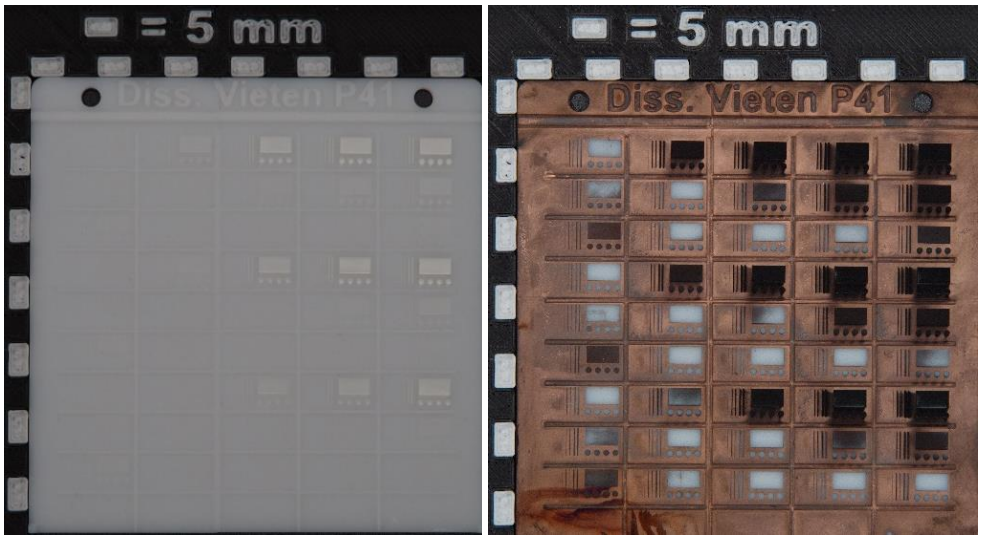


Abb. 3.3: DLP-Bauteil zur Ermittlung der Oberflächenaufrauhung durch Laserstrahlung aus dem DLP-Werkstoff PLASTCure Rigid 10500 (liegend aufgebaut). Laserstudie Grün-Laser (siehe Anhang A), eine Überfahrt. Links: nach Laserbearbeitung; Rechts: nach Kupferabscheidung.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass auf diversen Beispielen additiv gefertigter Bauteile die Unterschiede in der Oberflächenbeschaffenheit durch eine Laserbearbeitung nicht ausreichend sind für eine selektive Metallabscheidung. Daraus wird der Schluss gezogen, dass sich ein derartiges Verfahren nicht ohne weiteres eignet für die Herstellung von AM-MID, basierend auf einem beliebigen AM-Verfahren.

Für einen funktionsfähigen Prozess darf die Aktivatorlösung im besten Fall nicht mit den Oberflächen in Kontakt kommen, auf denen kein Metall abgeschieden werden soll. Eine Lösung wäre, sie mit DW-Verfahren selektiv aufzubringen. Aufgrund der Überlegungen zu Beginn dieses Kapitels soll jedoch explizit nicht auf einen DW-Prozess zurückgegriffen, sondern ein laserbasierter Prozess erarbeitet werden. Ein weiterer Lösungsweg besteht darin, die Oberfläche des Bauteils mit einer temporären Maskierung vor dem Kontakt mit der Aktivatorlösung zu schützen. Wird die Maske durch Laserstrahlung abgetragen, ermöglicht dies eine selektive Bekeimung der Bauteiloberfläche. Nach der Bekeimung kann das Maskierungsmaterial wieder abgelöst und die potentiell auf ihr befindlichen Aktivatorpartikel mit entfernt werden. Diese Prozessfolge ergänzt die ursprünglich angestrebte Prozesskette im besten Fall nur um wenige nasschemische Tauchschritte, was sich industriell wirtschaftlich darstellen lässt.

Die in Abschnitt 1.1 aufgestellte Grundthese ist damit zum Teil wiederlegt und wird modifiziert zu:

Grundthese

Über eine Maskierung und deren selektive Entfernung durch einen Laserstrahl sowie anschließende nasschemische Bekeimung und Metallabscheidung sollte es direkt auf der Oberfläche von additiv gefertigten Polymer-Grundkörpern möglich sein, eine mechatronische Funktions-integration zu implementieren.

4. DAS SANCHO-VERFAHREN ZUR MECHATRONISCHEN FUNKTIONSINTEGRATION

Das in dieser Arbeit vorgestellte Verfahren fällt unter die in Abschnitt 2.4.3 vorgestellte Variante zum Aufbau von AM-MID über Prozessketten. Da ein Prozess analog zum SIPA-Verfahren [22], wie zuvor gezeigt, auf additiv gefertigte Bauteile nicht zuverlässig anwendbar ist, wird ein neuer Ansatz erarbeitet, das SANCHO-Verfahren: Mechatronische Funktionsintegration mittels selektiver Metallabscheidung auf additiv gefertigten Bauteilen über nasschemische Prozesse und laserbasierte Oberflächenbearbeitung.

Die Prozesskette startet mit dem Aufbau des Grundkörpers über ein beliebiges additives Fertigungsverfahren. Das Bauteil wird über ein Tauchverfahren mit einem Maskierungsmaterial beschichtet. Mittels Laserstrahlung wird die Maskierung teilweise wieder abgetragen und so die Bereiche der Bauteiloberfläche freigelegt, die später das Schaltungslayout abbilden. Durch das Eintauchen des Bauteils in eine Aktivatorlösung, werden katalytisch wirkende Keime an der Oberfläche angelagert und dringen, wo möglich, durch Diffusionsvorgänge auch in diese ein. Die Maskierung und die darauf befindlichen Keime werden über geeignete Lösungsmittel wieder vom Bauteil entfernt, um ungewollte Metallabscheidung und negative Auswirkungen auf die Verwendbarkeit des AM-MID zu vermeiden. Das selektiv bekeimte Bauteil wird über weitere Badprozesse einer außenstromlos nasschemischen Metallisierung unterzogen, bei der durch die katalytische Wirkung der verbliebenen Keime an der Bauteiloberfläche eine Reduktion der Metallsalze im Elektrolyt stattfindet und damit die gewünschte Metallabscheidung auf der Bauteiloberfläche. Die eingesetzten Metalle sind produktspezifisch, üblich

sind für MID und Leiterplatte die Abscheidung von Schichtfolgen bestehend aus Kupfer als elektrisch leitender Schicht, Nickel als Diffusionssperre und Gold als Oxidationsschutz. Die Erarbeitung der einzelnen Prozessschritte wird in den folgenden Abschnitten beschrieben.

4.1. MODELLPROZESS DER ADDITIVEN FERTIGUNG

Für die Erzeugung elektronischer Produkte werden in der Regel hochspezialisierte Materialien eingesetzt, deren Eigenschaften auf ihren jeweiligen Einsatzzweck zugeschnitten sind. Zwei dieser Materialien sind FR4-Materialien und Gehäuse-Moldmassen. FR4 ist das Standardmaterial für Leiterplatten und besteht aus einem Laminat von Glasfasergewebematten in einer Epoxid-Matrix. Eine der Hauptzielgrößen bei der Entwicklung von FR4 ist der Wärmeausdehnungskoeffizient (en: coefficient of thermal expansion, CTE) auf der Oberfläche, der mit 14 - 17 ppm/K exakt an den der Kupferleiterbahnen (16 - 17 ppm/K) angepasst wird. Dies reduziert das thermomechanische Missverhältnis zwischen Substratmaterial und Leiterbahn und erhöht damit die Zuverlässigkeit des Gesamtsystems, indem thermomechanische Spannungen weitestgehend unterbunden werden. Analog sind epoxidbasierte Moldmassen für Mikrochip-Gehäuse mit Werten im mittleren einstelligen Bereich an den CTE von Silizium (2.6 - 3.3 ppm/K) angepasst, indem sie stark mit z.B. SiO_2-Partikeln angereichert werden. Da die hier angestrebte Prozesskette für die Herstellung von AM-MID den Aufbau von Polymerkörpern mit aufgebrachten Leiterbahnstrukturen aus Kupfer vorsieht, liegt es aus Gründen der Zuverlässigkeit nahe, als Beispielmaterial einen Verbundwerkstoff ähnlich dem FR4 einzusetzen. Mit diesem Material wird das Verfahren zunächst erarbeitet und dann auf andere AM-Prozesse und Materialien übertragen.

4.1.1. Additive Fertigung mittels Digital Light Processing

Für die Verarbeitung gefüllter Duroplaste eignen sich entweder Dispensverfahren (aus der Klasse Materialextrusion) oder wannenbasierte Photopolymerisationsverfahren (VPP). Dispensverfahren haben den Vorteil, dass sie Werkstoffe mit höherer Viskosität verarbeiten können, was einen höheren Füllgrad und damit niedrigeren CTE ermöglicht. Sie arbeiten jedoch sehr langsam, insbesondere, wenn Wert auf Auflösung und Oberflächenqualität gelegt wird. Die Verfahren der VPP arbeiten vergleichsweise zügig und sind daher im Hinblick auf den industriellen Einsatz vorzuziehen. Insbesondere Verfahren, die den Arbeitsbereich flächig von oben belichten (Top-Down) sind hier aus verschiedenen Gründen im Vorteil. Erstens sind sie durch die flächige Belichtung noch etwas schneller als z.B. laserbasierte Verfahren. Zweitens können durch den Einsatz einer Rakel und das Entfallen der Pumpbewegung zwischen Arbeitsbühne und Wannenboden höherviskose Materialien verarbeitet werden. Drittens können sich Bauteile, bedingt durch die insbesondere bei gefüllten Materialien höhere Dichte, im Bottom-Up-Betrieb leicht von der Plattform lösen und den Prozess fehlschlagen lassen. Für VPP-Prozesse gibt es kommerziell erhältliche Materialien, die auf Acrylaten, Epoxiden und/oder Polyurethanen basieren und bereits mit Glaskugeln gefüllt sind. Diese sind häufig auf einen bestimmten Anlagentyp und einen schmalen Wellenlängenbereich ausgelegt. Für die Prozessentwicklung wird in dieser Arbeit das Photopolymer PLASTCure Rigid 10500 (Firma Prodways Materials GmbH, Friedberg, Deutschland) verwendet [252], das aus einer Mischung aus Acrylaten und Epoxiden besteht und nach eigenen Messungen mit knapp 60 m% SiO_2-Pulver gefüllt ist [253]. Verarbeitet wird das Material auf einer ProMaker L5000 Digital Light Processing-Anlage (Firma Prodways, Montigny-le-Bretonneux, Frankreich), die nach dem Top-Down-Prinzip den Arbeitsbereich mit einer Wellenlänge von 365 nm

belichtet. Sehr ähnliche Materialien anderer Anbieter sind z.B. Somos PerForm (Stratasys) oder Accura HPC (3D Systems).

4.1.2. POSTPROCESSING

Nach dem Aufbau müssen Bauteile aus VPP-Anlagen von eventuell vorhandenen Stützstrukturen und anhaftendem Harz befreit und in einer UV-Kammer vernetzt werden. Der vom Hersteller Prodways vorgeschlagene Nachbehandlungsprozess für das hier verwendete Material PLASTCure Rigid 10500 beinhaltet die Reinigung der Bauteile für wenige Minuten in einem Ultraschallbad mit 2-Propanol (Isopropylalkohol, IPA), anschließende Trocknung und eine finale UV-Belichtung unter einer Quecksilberdampflampe in Stickstoffatmosphäre (hier: PCU 90, Fa. Innovation MediTech, Unna). Das Material vernetzt bei Raumtemperatur noch bis zu 7 Tage nach und erreicht dann seine endgültigen Eigenschaften. Durch einen Temperschritt kann der Prozess beschleunigt und ggf. die Festigkeitskennwerte verbessert werden. Der vorgeschlagene Reinigungsprozess ist in der Anwendung jedoch nicht ausreichend, um produzierte Bauteile zuverlässig zu reinigen. Nach dem Entfernen der Bauteile aus der Anlage bleibt eine dünne Schicht unpolymerisiertes Material auf der Oberfläche zurück. Durch das Reinigen mit IPA wird der Matrix-Anteil zwar entfernt, der enthaltene Füllstoff bleibt jedoch als anhaftende Schicht zurück. Abb. 4.1 zeigt beispielhaft solche Ablagerungen auf einem Bauteil mittels Auflicht- und Rasterelektronenmikroskopie (REM). Auch eine deutliche Erhöhung der Reinungsdauer führt zu keiner Verbesserung. Derlei verschmutzte Oberflächen stellen ein Risiko für die Robustheit nachfolgender Prozesse, wie der selektiven Metallabscheidung, dar und können noch im fertigen Produkt zu frühzeitigen Ausfällen führen.

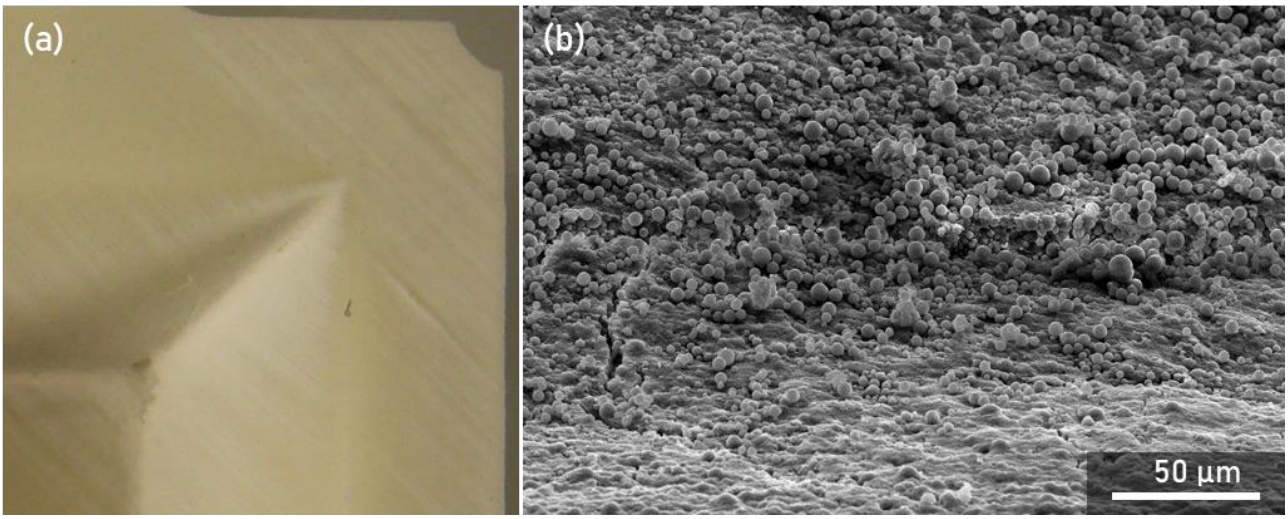


Abb. 4.1: Oberfläche mit SiO_2-Füllstoffablagerungen: (a) Mikroskop-Aufnahme; (b) REM-Aufnahme

Ein alternativer Reinigungsweg muss geometrieunabhängig einsetzbar sein, sollte möglichst keine manuellen Schritte enthalten und die Oberfläche nicht derart verändern, dass nachfolgende Prozessschritte gestört werden. Strahlprozesse wie CO_2-Schneestrahl-Reinigung oder Salzstrahlen sind aufgrund des hohen manuellen Arbeitsaufwandes schlecht geeignet. Mechanische Prozesse wie Gleitschleifen erreichen nicht zuverlässig alle Oberflächen (insbesondere kleine Rücksprünge), können leicht feine Strukturen zerstören und verändern lokal unterschiedlich die Geometrie des Werkstücks (bspw. konkave und konvexe Kanten). Geeignet sind dagegen insbesondere nasschemische Badprozesse, wie die ursprüngliche Reinigung mit IPA. Daher wurden unterschiedliche Lösungsmittel als Ersatz für IPA untersucht. Dabei wurde darauf geachtet, dass die verschiedenen Lösungsmittel in ihrer Polarität variieren. Eine Liste der untersuchten Lösungsmittel und deren Polarität zeigt Tabelle 4.1. Keines der untersuchten Lösungsmittel zeigte in seiner Reinigungswirkung eine Verbesserung gegenüber IPA.

Eine weitere Möglichkeit der Reinigung mittels nasschemischer Badprozesse ist das Ätzen. So wäre es mit Flusssäure, der wässrigen Säure von Fluorwasserstoff (HF), möglich, den SiO_2-Füllstoff von der Oberfläche zu ätzen. Dieser Prozess ist aus der Siliziumtechnik bekannt, Flusssäure ist

jedoch in relevanten Konzentrationen stark gesundheitsgefährdend und entsprechend mit einem hohen Sicherheitsaufwand verbunden.

Tabelle 4.1: Übersicht über die untersuchten Lösungsmittel und deren Polarität in Coulomb Meter

Bezeichnung	CAS RN	Dipolmoment
N-Ethyl-2-pyrrolidon (NEP)	98 2687-91-4	1.47×10^{-30} Cm
2-Propanol (IPA)	67-63-0	5.54×10^{-30} Cm
Propylenglycolmonomethyletheracetat (PGMEA)	108-65-6	6.03×10^{-30} Cm
Propanon (Aceton)	67-64-1	9.54×10^{-30} Cm
Dimethylsulfoxid (DMSO)	67-68-5	13.00×10^{-30} Cm

Stattdessen erscheint es sinnvoller, eine geringfügige Schicht des Polymers über einen Ätzprozess abzutragen und so die Haftung zwischen Bauteil und Verunreinigung zu verringern. Dies ist mit entsprechend konzentrierten alkalischen Lösungen möglich. Für die Untersuchung der Reinigungswirkung wurde für eine Versuchsreihe Kalilauge, die wässrige Lösung von Kaliumhydroxid (KOH), im Verhältnis 200 g pro Liter angesetzt. In dieser Lösung wurden Probekörper bei zwei verschiedenen Temperaturen, 45 °C und 75 °C und über verschiedene Einwirkdauern prozessiert. Ab einer Einwirkdauer von 30 min bei 45 °C stellt sich eine ausreichend zuverlässige Reinigungswirkung ein. Um das gelöste Material und die Lauge zu entfernen, werden die Bauteile zusätzlich nach dem Ätzprozess mit deionisiertem Wasser 3 min fließgespült und 20 min im Ultraschallbad in einer Lösung aus DI-Wasser und einem alkalischen Reinigungsmittel (Mucasol, Fa. Merz Hygiene GmbH, Frankfurt am Main) gereinigt. Die Geometrie der Probekörper beinhaltet hervorstehende Strukturen, aus deren Länge und der Einwirkdauer die Abtragsrate des Ätzprozesses ermittelt werden kann. Die Ergebnisse dieser Versuchreihe sind in Abb. 4.2 dargestellt. Konstruktiv ist die hervorstehende Struktur mit 4.5 mm ausgelegt, im Mittel wurde sie aufgrund der Toleranzen des DLP-Prozesses jedoch mit 4.51 mm gefertigt.

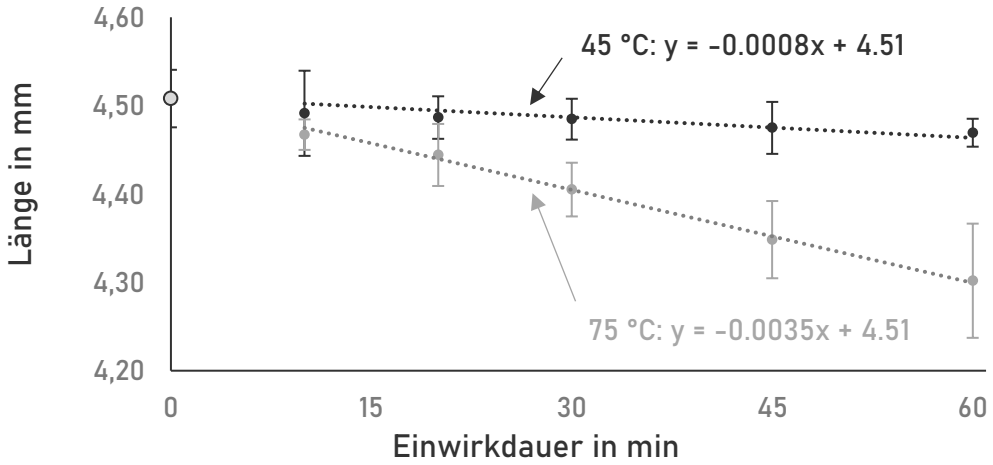
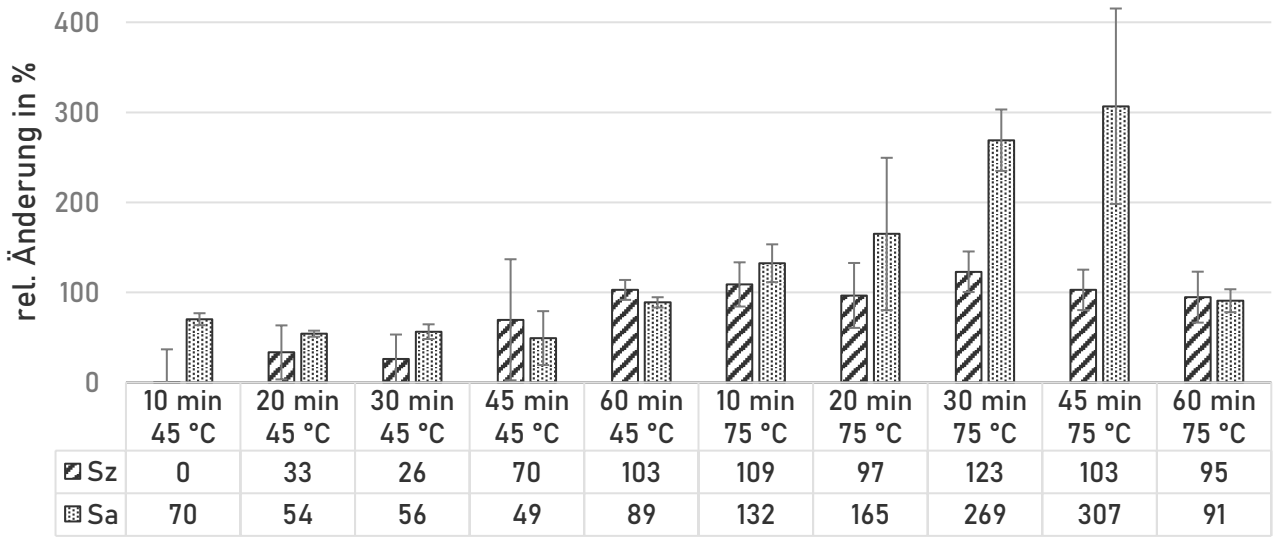


Abb. 4.2: Abtrag von Strukturen auf Probekörpern durch KOH-Ätzen bei 45 °C bzw. 75 °C Prozesstemperatur. Fehlerbalken entsprechen der Standardabweichung.

Die beiden Regressionsgeraden (bei Materialabtrag durch Ätzen kann von einem linearen Prozessfortschritt ausgegangen werden) erfassen lediglich die Messwerte der prozessierten Bauteile, haben als Randbedingung jedoch einen Ordinatenabschnitt von eben jenen 4.51 mm. Die Maße der Strukturen wurden durch Auflicht-Mikroskopieaufnahmen bestimmt (RH-2000, Hirox Japan Co Ltd., Tokio). Über die Steigung der Regressionsgeraden kann nun auf die Abtragsrate geschlossen werden. Im Falle von 45 °C Prozesstemperatur entspricht diese 0.8 µm/min. Erhöht man die Temperatur auf 75 °C, steigt die Abtragsrate auf 3.5 µm/min. Die Fehlerbalken geben die Standardabweichung der Messreihen (sechs gemessene Strukturen je Parametersatz) wieder. Die Werte streuen insbesondere bei 45 °C so gering, dass die Schwankungen geringer sind als die Fertigungstoleranz des DLP-Prozesses, die je nach Bauteilgeometrie bei ±200 µm liegen kann. Dies ermöglicht, falls nötig, ein konstruktives Vorhalten des abgetragenen Materials.

Da die Oberflächenbeschaffenheit eine Auswirkung auf die Haftfestigkeit der Metallschichten (positiv) und auf Folgeprozesse der Aufbau- und Verbindungstechnik (negativ) haben kann, wurden auf den Probekörpern auch Rauheitsmessungen durchgeführt. Je Probe wurden 5 Messstellen mit

einem Weißlichtinterferometer (Wyko NT9100, Veeco, USA) aufgenommen und die Flächenrauheitswerte S_a und S_z ausgewertet. Die Ergebnisse sind als prozentuale Änderung relativ zu den mittleren Werten der unbehandelten Oberfläche (S_z = 21.88 µm, S_a = 0.58 µm) in Abb. 4.3 dargestellt, Fehlerbalken entsprechen der Standardabweichung. Wie zuvor beschrieben, erfolgt eine ausreichend zuverlässige Reinigungswirkung nach einer Einwirkdauer von 30 min bei 45 °C. Dies stellt gleichzeitig auch den Parametersatz dar, der für eine gereinigte Oberfläche die geringsten Werte für S_z und S_a aufweist. Bei einer Prozesstemperatur von 75 °C stellt sich die Reinigungswirkung früher ein, allerdings steigen durch die hohe Aggressivität des Bades auch die Rauheitswerte sehr schnell an, was es erschwert, eine konstante Bauteilqualität nach dem Reinigen zu erlangen.



	10 min 45 °C	20 min 45 °C	30 min 45 °C	45 min 45 °C	60 min 45 °C	10 min 75 °C	20 min 75 °C	30 min 75 °C	45 min 75 °C	60 min 75 °C
Sz	0	33	26	70	103	109	97	123	103	95
Sa	70	54	56	49	89	132	165	269	307	91

Abb. 4.3: Relative Änderung gemittelter Flächenrauheitswerte S_z und S_a auf PLASTCure Rigid 10500-Bauteilen durch KOH-Ätzen bei verschiedenen Temperaturen und Einwirkdauern. Fehlerbalken entsprechen der Standardabweichung.

Um die Auswirkungen des Ätzprozesses auf das Material zu verdeutlichen, sind in Abb. 4.4 REM-Aufnahmen für die untersuchten Parametersätze abgebildet. Auf der unbehandelten (mit IPA gründlich vorgereinigten) Oberfläche erkennt man, dass die Füllstoffpartikel größtenteils von einer

Polymerschicht überzogen sind und eine einigermaßen geschlossene Struktur vorliegt.

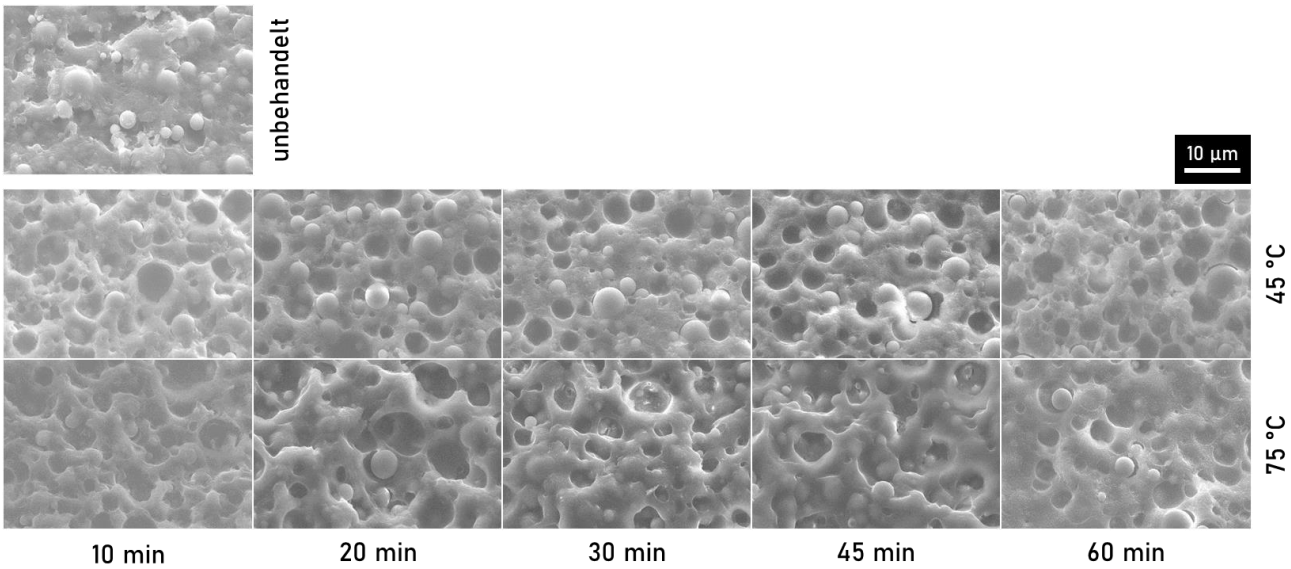


Abb. 4.4: REM-Aufnahmen der Oberflächen von unterschiedlich (ätz-) gereinigten Proben.

Mit Beginn des Ätzprozesses (45 °C) wird die Polymerschicht abgetragen und einzelne Füllstoffpartikel lösen sich aus der Matrix. Dadurch ergibt sich eine scharfkantige „Kraterlandschaft". Durch den fortschreitenden Ätzprozess treten wieder mehr Partikel an die Oberfläche und lösen sich aus der Matrix. Dabei wirken die Kanten zwar zunehmend verwaschen, die Oberfläche reproduziert sich jedoch im Großen und Ganzen stetig aufs Neue. Bei 60 min Einwirkdauer weist die Matrix selbst eine zunehmend zerklüftete Oberfläche auf, was beispielsweise durch die zusätzlich eintretende Beschädigung durch Quell-Vorgänge erklärbar ist. Diese Art Oberfläche tritt bei einer Prozesstemperatur von 75 °C bereits bei 10 min Einwirkdauer auf und entwickelt sich mit voranschreitender Zeit zu einer fast schwammartigen Struktur. Die beschriebenen Beobachtungen korrelieren mit den Messungen aus Abb. 4.3.

Da für die Folgeprozesse der Aufbau- und Verbindungstechnik, wie beispielsweise Drahtbonden, eine möglichst glatte und geschlossene

Ausgangsoberfläche vorteilhaft ist, wird das Post-Processing der additiven Fertigung für diese Arbeit wie folgt fixiert:

» Grobe Vorreinigung der Bauteile mit IPA und Pinsel, um die Verunreinigung des Ultraschallbeckens hinaus zu zögern.

» 5 min Reinigung mit IPA im Ultraschallbad.

» 30 min Reinigung in Kalilauge bei 45 °C, anschließend 3 min Fließspülen in DI-Wasser und Nachreinigen in Mucasol-Lösung im Ultraschallbad für 20 min.

» Nachvernetzung in UV-Kammer für 6 min.

4.2. Maskierung der Bauteiloberfläche

Um die Metallabscheidung auf unbearbeiteten Oberflächen zu unterdrücken, werden die AM-Bauteile mit einer Schutzmaske überzogen. Da die additive Fertigung die Herstellung komplexer Bauteile ermöglicht, muss der Beschichtungsprozess entsprechend geeignet sein, einen dünnen Materialfilm auch auf schwierig erreichbaren Oberflächen aufzubringen. Schleudern (spin coating) oder kontinuierliche Verfahren (Vorhanggießen, Rakeln, …) sind für 3D-Anwendungen schlecht geeignet. Sprühprozesse, die einen gleichmäßigen und kontrollierten Materialauftrag ermöglichen, werden bei komplexen Bauteilgeometrien schnell sehr aufwändig oder stoßen an ihre Grenzen. Hier sind Tauchprozesse aufgrund ihrer Einfachheit im Vorteil. Im Folgenden werden zwei Tauchprozesse mit unterschiedlichen Materialsystemen betrachtet, ein anorganisches System basierend auf dem Sol-Gel-Prozess und ein in der Mikrosystemtechnik verbreitetes organisches System in Form eines photostrukturierbaren Negativ-Lacks.

4.2.1. KOLLOIDALE NATRIUMSILIKATLÖSUNG

Sole sind langzeitstabile kolloidale Lösungen bzw. nanopartikuläre Dispersionen von Makromolekülen oder Partikeln, deren Feststoffgehalt 10 Vol.-% in der Regel nicht überschreitet [254]. Voraussetzung für derartig stabile Lösungen sind abstoßende Kräfte der Partikel untereinander. In Solen sind oxidische Nanopartikel aufgrund ihres großen Oberflächen/Volumenverhältnisses bestrebt, durch dreidimensionale Kondensation Gele zu bilden [255]. Gele sind durch ein weitmaschiges Netzwerk aus Makromolekülen gekennzeichnet (Feststoff), in dessen Poren sich eine zweite Phase in Form einer Flüssigkeit (Hydrogel) oder eines Gases (Xerogel) befindet. Das Gel kann dabei prinzipiell sowohl aus organischen Polymeren als auch einem anorganischen Netzwerk bestehen. Der Sol-Gel-Prozess beschreibt den Übergang eines Stoffes vom Sol zum Gel, bezieht sich jedoch in der Regel auf anorganische Sole [254]. In Bezug auf den Tauchprozess beschreibt er, wie auf der Sol-benetzten Oberfläche eines Körpers, der aus dem Medium herausgezogen wird, das Lösungsmittel verdunstet und durch diese Aufkonzentration der Partikel ein lösungsmittelhaltiges Gel (Lyogel) entsteht [255], da bei der erzwungenen Annäherung der Partikel die Abstoßung in eine Anziehung umkippt und die Solstruktur kollabiert [254]. Dieser Vorgang ist in Abb. 4.5 dargestellt. Durch das Austreiben des Lösungsmittels kann aus dem Lyogel eine Feststoffschicht mit einstellbarer Porosität erzeugt werden, die sich, im Falle anorganischer Stoffe, bei hohen Temperaturen zu kompakten Schichten verdichtet (Verkieselung). Durch die Einbettung von Zusätzen können die Eigenschaften der Schichten in großen Bereichen modifiziert werden. Die Sol-Gel-Technik bietet damit die Möglichkeit, über einen Tauchprozess bei Raumtemperatur aus einer Lösung ökologisch unbedenkliche Metalloxidschichten mit guter Haftung auf unterschiedlichen Substraten herzustellen [255].

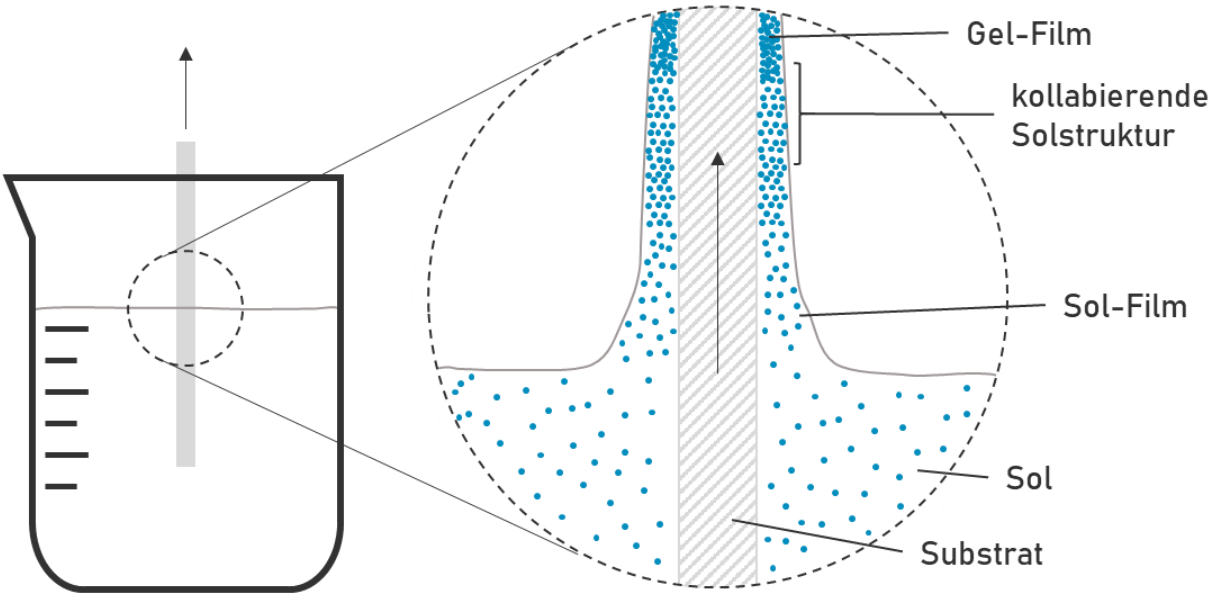


Abb. 4.5: Schichtbildung mittels eines Sol-Gel-Prozesses im Falle der Tauchbeschichtung (nach [254]).

Für das SANCHO-Verfahren werden Schichten aus Alkalisilikaten untersucht. Silikatgläser bilden hochtransparente amorphe Strukturen auf der Basis des SiO_4-Tetraeders [254]. Die Sole für die Erzeugung der Silikatgläser enthalten entsprechend SiO_2-Nanopartikel gelöst in Wasser und werden aufgrund ihrer Inhaltsstoffe mit dem Trivialbegriff „Wasserglas“ bezeichnet. Die Oberflächenenergie dieser Nanopartikel ist aufgrund der großen Oberfläche und der dortigen aus dem SiO_2-Gitter resultierenden hohen Anzahl unterkoordinierter Sauerstoffatome sehr hoch. Dadurch sind die Partikel stark hydrophil, was die Viskosität des Sols erhöht. Gleichzeitig neigen die Partikel durch das Bestreben, die Oberflächenenergie zu minimieren, zu Agglomeration, was die Stabilität des Sols verringert. Um diesen beiden Effekten entgegen zu wirken, wird das SiO_2 mit Alkalioxiden stabilisiert. Übliche Stabilisatoren sind Li_2O (Lithiumwasserglas), Na_2O (Natronwasserglas) und K_2O (Kaliwasserglas). SiO_2-Sole sind typischerweise alkalisch mit einen pH-Wert von etwa 10, und die Partikel sind an der Oberfläche negativ geladen. Die Stabilisierung basiert auf der kontrollierten Zugabe von positiv geladenen Alkali-Ionen als Gegenionen, die bei der Dissoziierung der Alkalioxide entstehen. Die

Zugabe wird so gesteuert, dass die verbleibende negative Ladung an der Oberfläche eine Balance zwischen zwei gegenläufigen Effekten ermöglicht, einerseits dem Drang, die hohe Oberflächenenergie aufgrund unterkoordinierter Sauerstoffatome durch Agglomeration zu verringern und andererseits den, aufgrund der negativen Oberflächenladung, abstoßenden Effekt der Teilchen untereinander aufrecht zu erhalten [256].

Alkalisilikate wurden historisch zum Haltbarmachen von Lebensmitteln (Eier) eingesetzt, indem über den Sol-Gel-Prozess die Poren der Eierschale verschlossen wurden. Heute finden sie vor allem im Baugewerbe Anwendung zum Feuchteschutz von Mörteln, Farben und Beton. Im Bergbau werden die Sole in Wände und Bohrlöcher gepresst, wo sie Risse verschließen und gegen das Grundwasser abdichten. Sie werden also in großen Volumina hergestellt und sind daher günstig zu beziehen. Natronwasserglas ist dabei weniger beständig gegen Wasser als Lithium- und Kaliwasserglas. Dieser Umstand ist für die temporäre Beschichtung im SANCHO-Verfahren positiv zu bewerten, da die Maskierung so besser wieder abgelöst werden kann, je nach Verkieselungsgrad mit Wasser oder mit gering konzentrierter Kalilauge. Gleichzeitig ist Natronwasserglas zwar alkalisch, aber darüber hinaus nicht umweltschädlich, da es nur aus Wasser als Lösungsmittel und den nicht reaktiven Na_2O:SiO_2-Partikeln besteht [257].

Das hier verwendete Natronwasserglas 38/40 °Bé (CAS#: 1344-09-8), mit einer Dichte von 1.37 g/cm³ und einem pH-Wert von 11.3, besteht aus etwa 8.2 m% Na_2O, 28.5 m% SiO_2 und 63.3 m% H_2O. Das entspricht einem Verhältnis von SiO_2 zu Na_2O von 3.5 (gravimetrisch) bzw. 3.6 (molar) [258][259]. Beim Tauchbeschichten von Bauteilen aus Solen sind nach Böttcher für die Schichtdicke d die Größen Viskosität η, Ziehgeschwindigkeit v und Soldichte ϱ ausschlaggebend und hängen nach folgender Formel zusammen (g: Gravitationskonstante) [255]:

$$d = const \cdot \sqrt{\eta \frac{v}{\rho \cdot g}}.$$

Formel 4.1: Schichtdicke beim Tauchbeschichten mit Solen (Schichtdicke d, Viskosität η, Ziehgeschwindigkeit v, Soldichte ρ, Gravitationskonstante g) [255].

Für den Prozess beeinflussbare Größen sind Viskosität und Soldichte über die Zugabe von Lösungsmittel (Wasser) sowie die Ziehgeschwindigkeit. Die Schichtqualität der anorganischen Schichten hängt stark von der Schichtdicke ab. Laut Böttcher eignen sich Schichtdicken im Bereich von 0.1 – 5 µm, da dickere Schichten aufgrund der geringen Flexibilität zu Rissen neigen, wenn beim Trocknen oder Tempern das Restlösungsmittel aus dem Schichtvolumen verdampft [255]. Dieses Verhalten zeigte sich auch in Versuchen, in denen die Schichtdicke durch mehrfaches Eintauchen variiert wurde. Exemplarisch werden drei Schliffbilder in Abb. 4.6 a-c dargestellt. Die in Teil a dargestellte Probe wurde einmal eingetaucht mit einer resultierenden Schichtdicke von etwa 6 µm. Die Geschwindigkeit beim Herausziehen lag bei diesen Versuchen bei 50 mm/s. Die in Teil b dargestellte Probe wurde nach dem ersten Eintauchen bei 80 °C in einem Ofen für 5 min zwischengetrocknet und dann ein zweites Mal getaucht, mit einer resultierenden Schichtdicke von etwa 12 µm. Die Probe in Teil c wurde mit demselben Vorgehen viermal eingetaucht, mit einer resultierenden Schichtdicke von etwa 24 µm. Die Schichtdicken auf den Proben schwanken unter anderem mit der Oberflächenwelligkeit. Im Sinne der Vergleichbarkeit sind hier die höchsten Werte dargestellt, die bei der Sichtung der Proben gemessen wurden.

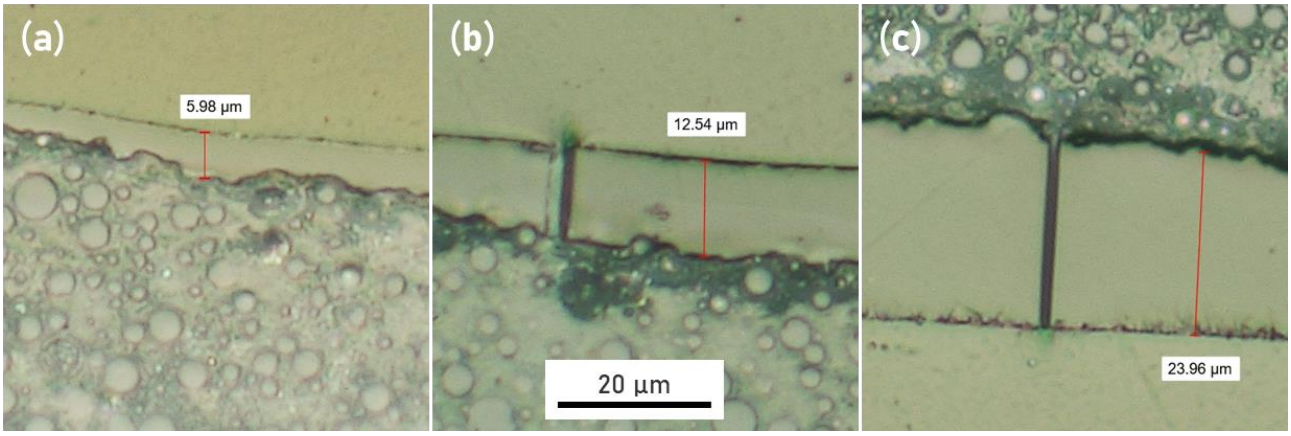


Abb. 4.6: Schliffbilder von Natriumsilikat-Schichten, abgeschieden aus einer 50 % verdünnten Lösung und Zwischentrocknung bei 80°C. (a) Einfach getaucht, (b) zweifach getaucht, (c) vierfach getaucht.

Es wurden unter den Versuchsbedingungen also bis zu 6 µm Natriumsilikat pro Tauchvorgang auf der Probe abgeschieden. In Abb. 4.6 b und c sind Risse zu erkennen, die die Schichten durchziehen. Die Probe aus Teil a ist frei von Rissen, dafür ist stellenweise nur eine sehr dünne Schicht auf der Probe abgeschieden. In den Rissen kann die Aktivatorlösung bis zur Bauteiloberfläche vordringen und Aktivatorpartikel anlagern, was zu ungewollter Metallabscheidung führt. Um dies zu demonstrieren, werden im Folgenden bereits Proben mit abgeschiedenem Metall gezeigt. Die entsprechenden Prozessschritte der Laserstrukturierung, Aktivierung und Metallabscheidung werden in den Kapiteln 4.3 und 4.4 erläutert. Aufgrund der Wasserlöslichkeit des ungetemperten Natriumsilikats kann es auch bei zu geringen Schichtdicken zu ungewollter Metallabscheidung kommen, wenn durch das Verweilen in der wässrigen Aktivatorlösung die Schicht lokal abgelöst wird und Aktivatoren auf die Bauteiloberfläche gelangen. Ein solches Fehlerbild zeigt sich in Abb. 4.7 a. Die dort zu erkennende Fremdabscheidung bildet sich auf den regelmäßigen Strukturen, die bei DLP-Bauteilen einerseits durch den Schichtaufbau und andererseits durch die pixelweise Belichtung entstehen, wenn Oberflächen nicht exakt parallel zu der x- bzw. y-Achse des Maschinenkoordinatensystems verlaufen. Abb. 4.7 b zeigt

Kupferstrukturen, die auf einer zweifach getauchten Probe unter den aufgrund zu hoher Schichtdicke entstandenen Rissen abgeschieden wurden. Die Risse verlaufen hier teils regelmäßig in den Oberflächenstrukturen des DLP-Bauteils, teils unregelmäßig in einem Netzwerk über die gesamte Fläche. Abb. 4.7 c zeigt Kupferstrukturen, die unter den Rissen einer einmal getauchten Probe abgeschieden wurden. Diese sind unabhängig von der Struktur des Bauteils auf der Oberfläche verteilt und vor allem nicht untereinander verbunden.

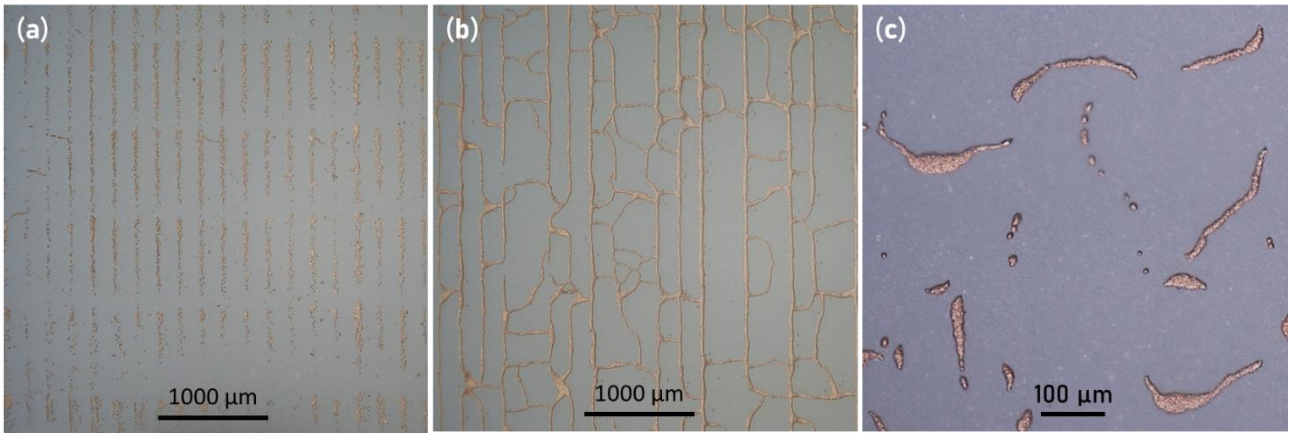


Abb. 4.7: Verschiedene Fehlerbilder der Natriumsilikat-Schicht, jeweils aus einer 50 Vol.-% verdünnten Lösung abgeschieden. (a) Metallabscheidung in unbedeckten Bereichen aufgrund zu dünner Ausgangsschicht, (b) Metallabscheidung in Rissen dicker Schichten, (c) Metallabscheidung in Rissen dünner Schichten.

Als weiteren Einflussfaktor auf die Schichtdicke wurde die Konzentration der Wasserglaslösung betrachtet. Lässt man die unverdünnte Lösung eine Weile an der Luft stehen, bildet sich durch das Verdunsten von Wasser eine Glasschicht auf der Oberfläche. Erhitzt man die Lösung, um die Gelbildung auf der Bauteiloberfläche beim Herausziehen zu beschleunigen, verstärkt sich dieser Effekt. Die Glasschicht kann unter Zugabe von deionisiertem Wasser aufgebrochen und wieder gelöst werden. Für technische Prozesse ist dieses Verhalten jedoch unvorteilhaft. Die Lösung sollte daher von vornherein verdünnt werden. Neben der zuvor betrachteten Lösung mit 50 Vol.-%, wurden Ansätze mit 25 Vol.-%, und 33 Vol.-% untersucht. Dazu wurden Proben mit 10 mm/s aus der Lösung gezogen und getrocknet.

Schichten, die aus 50-prozentiger Lösung entstanden, neigten, wie zuvor gezeigt, zur Bildung langer Risse, wohingegen Schichten aus 25 Vol.-%-Lösung zwar keine Risse ausbildeten, jedoch großflächige Metallabscheidung aufgrund vorzeitig abgelöster Maskierung aufwiesen (Abb. 4.8 a). Mittels 33 Vol.-%-Lösung erzeugte Schichten ermöglichten den Aufbau eines defektfreien, mechatronischen Bauteils (Abb. 4.8 b). Bei einer Übertragung des Verfahrens auf komplexere 3D-Bauteile als eine einfache Platte konnte jedoch keine defektfreie Struktur erzeugt werden.

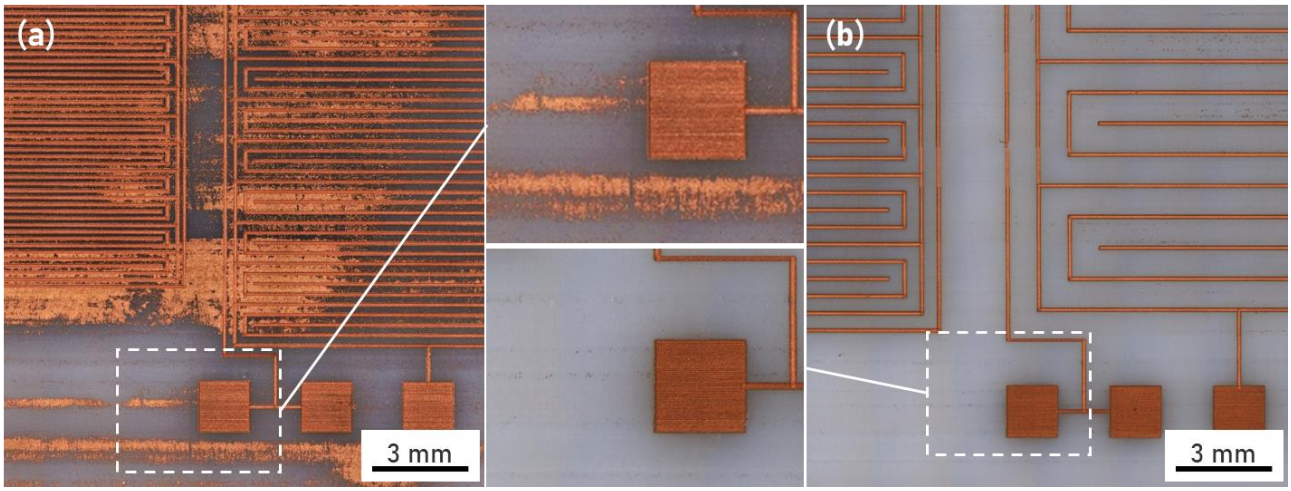


Abb. 4.8: Metallabscheidung auf Natriumsilikat-maskierten Bauteilen. (a) 25 Vol.-% Wasserglaslösung und Fremdabscheidung aufgrund zu dünner Schicht, (b) 33 Vol.-% Wasserglaslösung und technisch fehlerfreie Metallabscheidung.

Die Bauteile in Abb. 4.8 wurden laserbearbeitet mit dem Ziel, selektive Metallstrukturen zu erzeugen. Dieser Prozessschritt wird in Abschnitt 4.3 beschrieben und eine Erläuterung soll hier nicht vorweggenommen werden.

4.2.2. PHOTOSTRUKTURIERBARER NEGATIV-LACK

Die temporäre Beschichtung der additiv gefertigten Bauteile mit Natriumsilikat, zum Schutz vor einer ungewollten Bekeimung der Bauteiloberfläche, ist ein kostengünstiger, gut verfügbarer und nachhaltiger Ansatz. Auf großen Bauteilen (Wärmeausdehnung), komplexen 3D-Geometrien (gleichmäßige Beschichtung) und schwierigen

Oberflächen (Material oder pulverartige Struktur) ist die Problematik der Fremdabscheidung von Metall dennoch nicht zufriedenstellend gelöst. Für spezielle technische Anwendungen, die eine hohe Zuverlässigkeit oder eine hohe Dichte an elektrisch leitenden Strukturen erfordern, wird daher ein alternatives Maskierungsmaterial in Form eines Lackes untersucht. In der Mikrosystemtechnik kommt eine Vielzahl von Lacken zum Einsatz. Der weithin bekannteste ist wahrscheinlich der Lötstopplack, der Leiterplatten die typische grüne Farbe verleiht. Für eine temporäre Maskierung ist jedoch die spätere Löslichkeit des Lacks eine wichtige Eigenschaft. In der Silizium- und Leiterplattentechnik kommen photostrukturierbare Lackmasken in lithographischen Prozessen zum Einsatz. Sie sind so konzipiert, dass sie sich mittels Lösungsmitteln vollständig wieder ablösen lassen, um nachfolgende Prozesse nicht zu stören. Diese Lacke teilen sich in zwei Kategorien auf. Positivlacke sind Lösungen vernetzter Polymere, die sich durch die Bestrahlung mit UV-Licht zersetzen. Belichtete Bereiche sind so nach dem Prozessschritt des Ausheizens besonders unbeständig gegenüber dem Lösungsmittel im Entwicklerbad. Negativlacke bestehen aus gelösten Mono- und Oligomeren, die bei Lichteinstrahlung vernetzen. Mit UV-Licht bestrahlte Oberflächen sind daher nach dem Ausheizen besonders beständig gegenüber den Lösungsmitteln im Entwicklerbad (Abb. 4.9). Um die Handhabung der beschichteten Bauteile einfach zu halten, ist der Negativlack für das SANCHO-Verfahren besser geeignet, da der Kontakt mit Licht die Lackschicht nicht schwächt, sie aber gleichzeitig lösbar bleibt. Diese Lacke gibt es in der Regel in verschiedenen Varianten für den Auftrag mittels Schleudern (Spincoating) oder Sprühen, wobei die Sprühvariante einen erhöhten Lösungsmittelanteil aufweist, um die Viskosität zu senken. Der hier untersuchte Lack (AR-N 4400-10, Allresist GmbH, Strausberg) wurde als Dicklack zum Aufschleudern bezogen und mit dem

Lösungsmittel Propylenglycolmonomethyletheracetat (PGMEA) verdünnt, um eine für den Tauchprozess angepasste Viskosität zu erlangen.

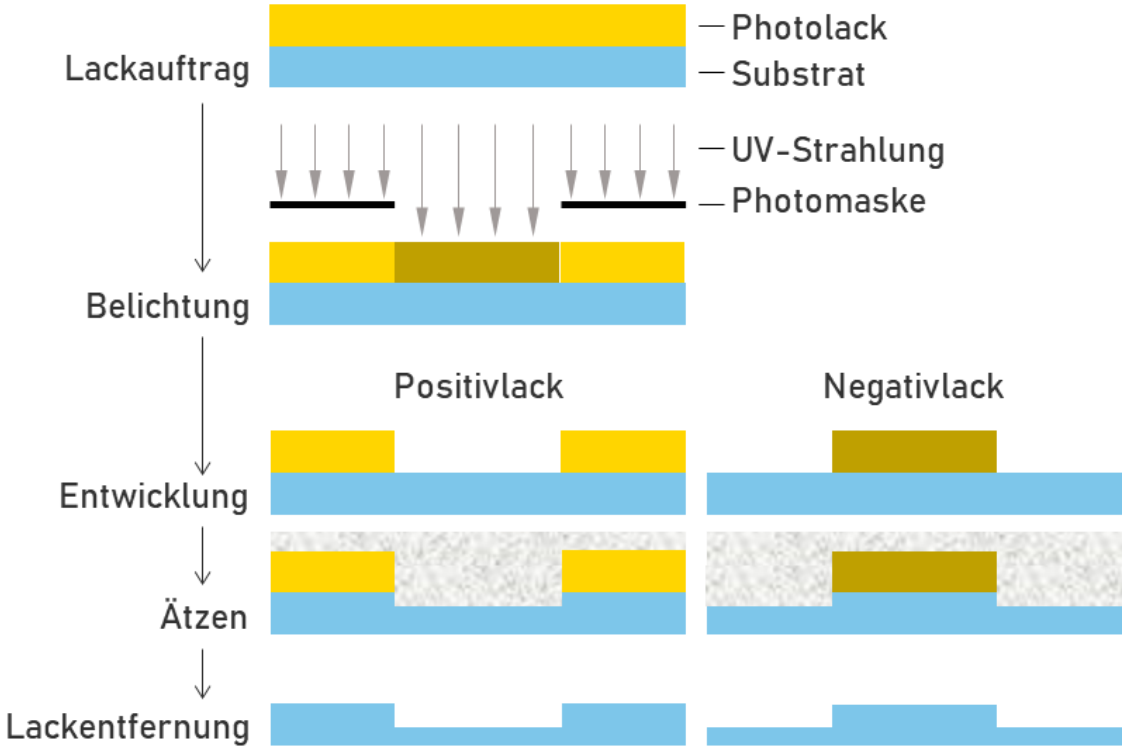


Abb. 4.9: Prinzip der Bearbeitung von Oberflächen mittels photostrukturierbarer Lackmasken.

Zur Untersuchung der Verdünnungsstufen, betrachtet wurden 50, 60, 70 und 80 Gewichtsprozent (m%) PGMEA, wurden zunächst DLP- und SLS-Bauteile zur Hälfte in Lack getaucht und 40 min bei 80 °C getrocknet. Neben den DLP-Bauteilen aus PLASTCure Rigid 10500, die vergleichsweise glatte Oberflächen aufweisen, wurden SLS-Bauteile aus PA12-Pulver aufgrund ihrer zerklüfteten und porösen Oberflächen gewählt. Danach wurden die Bauteile mit einer Aktivatorlösung behandelt, der Lack wieder abgelöst und Metall abgeschieden. Abb. 4.10 zeigt die Ergebnisse der Versuchsreihe. In der oberen Zeile erkennt man, dass auf DLP-Bauteilen auch mit der höchsten untersuchten Verdünnung noch eine dichte Lackschicht aufgebracht werden kann. Durch die raue und poröse Oberfläche der SLS-Bauteile ist hier eine Verdünnung nur bis maximal 60, besser 50 m% möglich, bevor der Lack als Maskierung unwirksam wird.

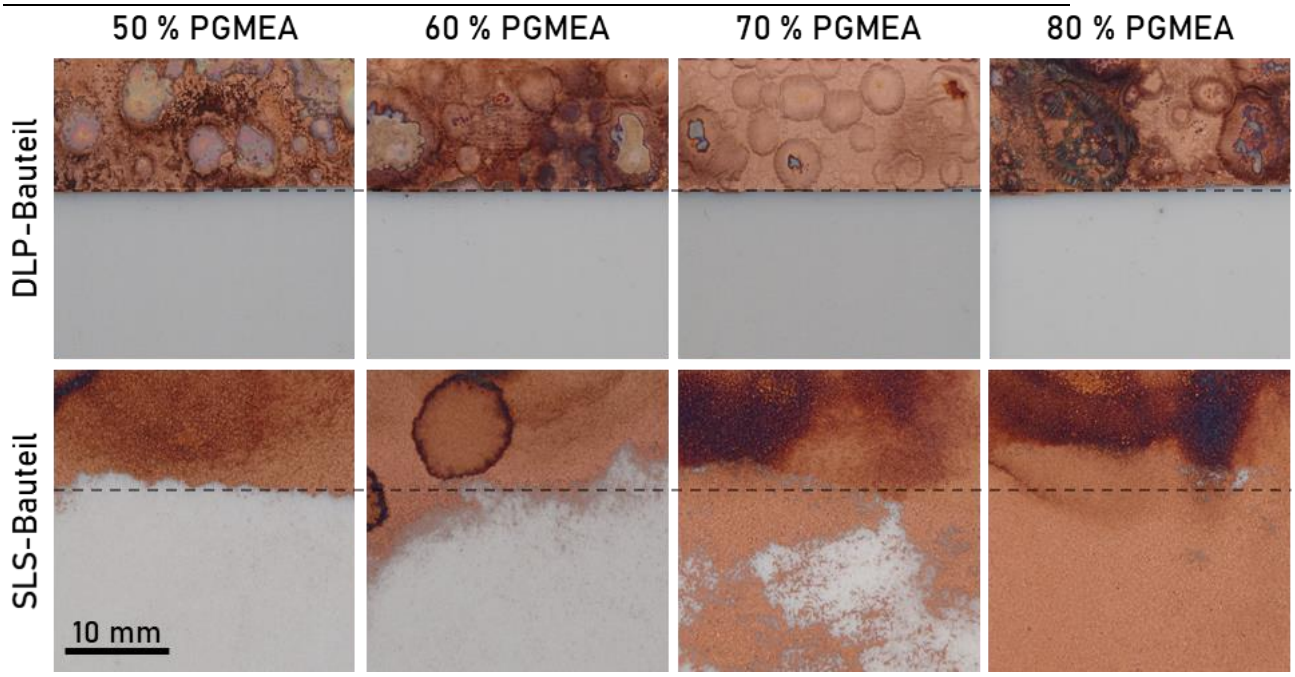


Abb. 4.10: Versuchsreihe zur Dichtheit verschiedener Verdünnungsstufen des Negativlacks mit PGMEA in Gewichtsprozent. Bauteile wurden halb in Lack getaucht, bekeimt, der Lack gelöst und Metall abgeschieden. Die gestrichelte Linie gibt die Eintauchtiefe an, unterhalb mit Lack geschützt, oberhalb ungeschützt.

Über die Beigabe des Lösungsmittels soll über den Tauchprozess eine dünne, gleichmäßige Schicht erzeugt werden. Bei komplexen 3D-Bauteilen neigt der unverdünnte Lack in Spalten und Ecken zur Bildung von Reservoirs und Nasen, die ab einer gewissen Dicke bei der Laserbearbeitung nicht mehr vollständig abgetragen werden. Um dieses Verhalten zu untersuchen, wurden DLP-Testbauteile mit einer komplexen 3D-Geometrie aufgebaut und tauchbeschichtet. Die Bauteilgeometrie ist in Abb. A.17 in Anhang C beschrieben. Abb. 4.11 zeigt vier Bauteile, die mit den zuvor beschriebenen Verdünnungsstufen beschichtet wurden. Insbesondere in den Topfstrukturen sammelt sich Lack bei jeder Verdünnungsstufe an. Dies ließe sich vermutlich nur durch ein Abschleudern des überschüssigen Lacks verhindern. Im Bereich der variierenden Öffnungswinkel und Kantenradien zeigt sich jedoch ein gleichmäßigerer Auftrag, je mehr Lösungsmittel im Lack enthalten ist, insbesondere im oberen Bereich (Öffnungswinkel 50°).

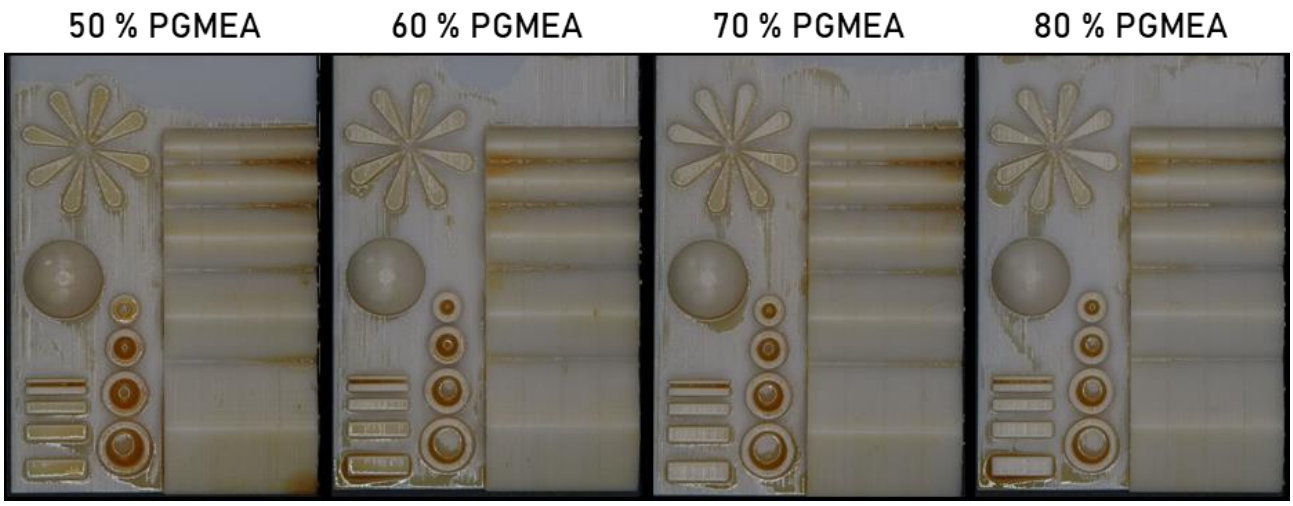


Abb. 4.11: Versuchsreihe zur Gleichmäßigkeit der über Tauchen aufgebrachten Lackmaske. DLP-Bauteile wurden in verschiedenen Verdünnungsstufen des Negativlacks mit PGMEA (in Gewichtsprozent) getaucht.

Wie beim Natriumsilikat sind auch hier die Parameter des Beschichtungsprozesses für jeden Grundwerkstoff und AM-Prozess neu zu betrachten. Teilweise kann eine Plasmavorbehandlung sinnvoll sein, um gegebenenfalls schlecht benetzbare Materialien für die Maskierung zugänglich zu machen. Aufgrund der höheren Duktilität wird der Negativlack im Vergleich zum Natriumsilikat für eine größere Bandbreite an Materialien geeignet sein, insbesondere im Hinblick auf hohe Wärmeausdehnungskoeffizienten, die im Falle des Natriumsilikats bei erhöhten Prozesstemperaturen zu Rissen führen können.

4.3. LASERBEARBEITUNG DER MASKIERUNG

Mittels Laserstrahlung soll einerseits die Maskierung selektiv abgetragen werden, um ein diskretes Schaltungslayout erzeugen zu können. Andererseits soll die Bauteiloberfläche durch den Energieeintrag eine raue und zerklüftete Struktur erhalten. Diese Oberflächenmodifikation ermöglicht zunächst ein besseres Einnisten der Aktivatorpartikel in der Oberflächenstruktur und damit ein geringeres Auswaschen der Partikel bei Spülvorgängen, was eine stärkere Metallabscheidung zur Folge hat. Zudem erhöht sich dadurch auch die Haftfestigkeit der Metallschicht auf dem

Bauteil, da das Metall Hinterschnitte im Polymer auffüllt und sich darin mechanisch verkrallt.

Für den selektiven Abtrag der Maskierung mittels Laserstrahlung stehen zwei Anlagen zur Verfügung, ein Nanosekunden-gepulster Infrarotlaser und ein Pikosekunden-gepulster Grün-Laser. Die Kenndaten der beiden Anlagen sind Tabelle 4.2 zu entnehmen.

Tabelle 4.2: Kenndaten der eingesetzten Laserquellen.

Bezeichnung	MicroLine 3D 160i	EdgeWave PX25II-A
Hersteller	LPKF Laser & Electronics SE	EdgeWave / Hahn-Schickard
Medium	Nd:YAG	$Nd:YVO_4$
Wellenlänge	1064 nm	532 nm
Fokusdurchmesser	60 µm	23 µm
Pulsdauer	23 ns	10 ps
Frequenz	20 - 200 kHz	200 - 20 000 kHz
Max. mittlere Leistung	17 W	11 W

In den Untersuchungen zur Laserbearbeitung der Maske wurden die Basisgrößen mittlere Laserleistung, Pulsfrequenz und Vorschubgeschwindigkeit variiert. Die mittlere Leistung eines gepulsten Lasers berechnet sich so, dass die Energie eines Einzelpulses (Produkt aus Pulsdauer und Pulsleistung) gleich dem Produkt aus dem zeitlichen Pulsabstand und der mittleren Leistung ist (vgl. Abb. 4.12).

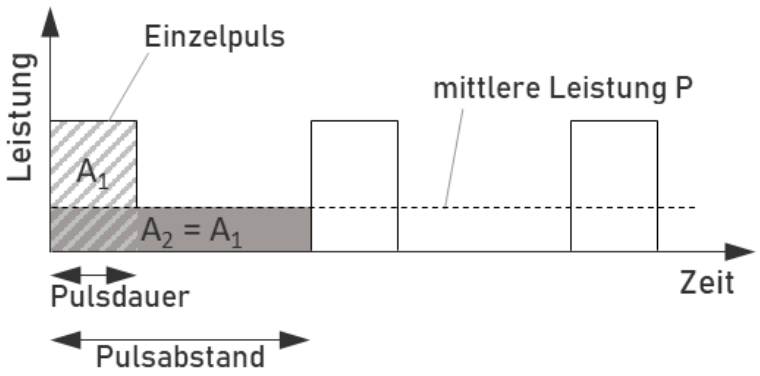


Abb. 4.12: Energiebetrachtung eines Lasers im gepulsten Betrieb. Fläche A_1 entspricht der Energie eines Einzelpulses. Fläche A_2 entspricht der mittleren emittierten Energie vom Beginn eines Pulses bis zum nächsten (Pulsabstand). Beide Flächen und Energieportionen sind gleich groß.

Aus diesen Basisgrößen ergibt sich die Energie eines Einzelpulses nach Formel 4.2 und der geometrische Abstand der Pulse in Vorschubrichtung

(Längspitch) nach Formel 4.3. Der Abstand der Pulse quer zur Vorschubrichtung (Querpitch) wird gleich dem Längspitch gesetzt (Abb. 4.13 a).

$$E_P = \frac{P}{f}$$

Formel 4.2: Pulsenergie E_P (mittlere Laserleistung P, Pulsfrequenz f).

$$s_L = \frac{v}{f}$$

Formel 4.3: Längspitch s_L (Vorschubgeschwindigkeit v, Pulsfrequenz f).

Zusätzlich werden die zusammengesetzten Größen relative Pulsüberdeckung $Ü_{P,r}$ und mittlere Einstrahlung H_m betrachtet. Die relative Pulsüberdeckung ist eine geometrische Größe und gibt bezogen auf den Strahldurchmesser prozentual die Länge auf dem Belichtungsvektor an, die von zwei aufeinanderfolgenden Pulsen doppelt belichtet wird (Formel 4.4).

$$Ü_{P,r} = \frac{Ü_P}{d_s} = \frac{d_s - s_L}{d_s} = 1 - \frac{s_L}{d_S}$$

Formel 4.4: relative Pulsüberdeckung $Ü_{P,r}$ (Pulsüberdeckung $Ü_P$, Längspitch s_L, Strahldurchmesser d_s).

Die mittlere Einstrahlung H_m beschreibt die mittlere Energiemenge, die durch Mehrfachbelichtung bei der Bearbeitung auf einer Flächeneinheit eingestrahlt wird. Sowohl in der Arbeit von Ratautas et al. [46] als auch in der Arbeit von Ninz [260] wurde herausgestellt, dass eine Größe wie die mittlere Einstrahlung zwar keinen analytisch prognostizierbaren Rückschluss auf die Qualitätsmerkmale der Metallisierung zulässt, dass jedoch eine qualitative Korrelation besteht. Die Mehrfachbelichtung erfolgt einerseits aufgrund der Pulsüberdeckung in Vorschubrichtung und andererseits aufgrund der Tatsache, dass der Querpitch in der Regel kleiner als der Strahldurchmesser ist (Abb. 4.13 a). Mathematisch wird sie hier beschrieben über die mittlere Leistung, die über die Vorschubgeschwindigkeit und den Strahldurchmesser auf einer definierten Fläche verteilt wird. Über das Verhältnis aus Strahldurchmesser zu Querpitch wird der Mehrfachbelichtung quer zur Vorschubrichtung Rechnung getragen (Formel 4.5).

$$H_m = \frac{P}{v \cdot d_s} \cdot \frac{d_s}{s_Q} = \frac{P}{v \cdot s_L}, mit\ s_Q = s_L$$

Formel 4.5: mittlere Einstrahlung H_m (mittlere Laserleistung P, Vorschubgeschwindigkeit v, Querpitch s_Q, Längspitch s_L).

Die mittlere Einstrahlung H_m beschreibt damit den Energieeintrag im Randbereich einer bearbeiteten Fläche nicht korrekt, was bei einer derartigen Größe jedoch immer der Fall ist. Dies wird in Abb. 4.13 b verdeutlicht, in der die Bearbeitung einer Fläche bei einem Querpitch von einem Viertel des Strahldurchmessers dargestellt ist.

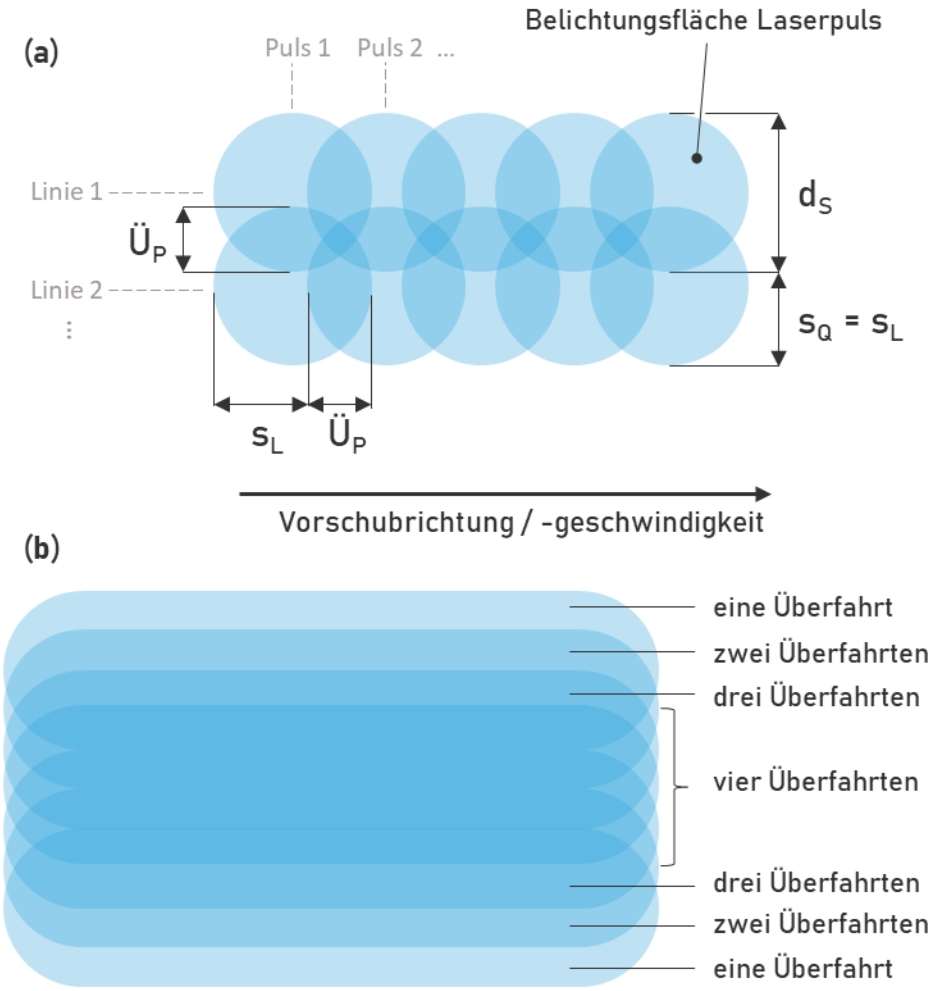


Abb. 4.13: Geometrische Betrachtung der Laserbearbeitung mit Pulsüberdeckung $Ü_P$, Längspitch s_L, Querpitch s_Q und Strahldurchmesser d_S. (a) Einzelpulse; (b) Energieeintrag auf einer Fläche über mittlere Leistung.

Zunächst wurden die Parameterwerte für den IR-Laser festgelegt. Die Laserleistung variiert dabei zwischen 2 und 10 W, die Pulsfrequenz zwischen 40 und 200 kHz und die Vorschubgeschwindigkeit zwischen 500

und 1500 mm/s. Die einzelnen Wertesätze können Tabelle A.1 in Anhang A entnommen werden. Die Parameterwerte für den Grün-Laser wurden daraus abgeleitet, sodass wenn möglich bei einer Satz-Nummer der flächenbezogene Energieeintrag und die Pulsüberdeckung gleich der aus der IR-Studie ist. Dies soll, im Rahmen des Möglichen, einen vergleichbaren Bearbeitungsmechanismus der beiden Strahlquellen gewährleisten. Aus der Anforderung, dass die Pulsüberdeckung gleich ist, folgt eine Änderung des Längspitch um das Verhältnis der Strahldurchmesser.

$$\ddot{U}_{P,r} = const. \;\Rightarrow\; s_{L,\text{grün}} = s_{L,IR} \cdot \frac{d_{S,\text{grün}}}{d_{S,IR}}$$

Formel 4.6: relative Pulsüberdeckung $\ddot{U}_P$, Längspitch s_L, Strahldurchmesser d_s.

Da der Längspitch damit feststeht, ergibt sich aus dessen Definition (Formel 4.3), dass die Frequenz und die Vorschubgeschwindigkeit um den gleichen Faktor erhöht oder verringert werden müssen. Die Vorschubgeschwindigkeit ist durch die Scaneinheit auf 3000 mm/s begrenzt. Da für die IR-Studie eine maximale Vorschubgeschwindigkeit von 1500 mm/s eingesetzt wurde, können Vorschubgeschwindigkeit und Frequenz maximal um den Faktor 2 erhöht werden. Der Pikosekundengepulste grün-Laser arbeitet mit deutlich höheren Pulsfrequenzen als der IR-Laser, daher wird diese Möglichkeit ausgeschöpft. Aus der Anforderung einer gleichen mittleren Einstrahlung ergibt sich aus Formel 4.5 und Formel 4.6, dass sich die Laserleistung ebenfalls mit dem festgelegten Faktor 2 und dem Verhältnis der Strahldurchmesser ändert (Formel 4.7).

$$H_m = const. \;\Rightarrow P_{grün} = P_{IR} \cdot \frac{v_{grün}}{v_{IR}} \cdot \frac{d_{S,\text{grün}}}{d_{S,IR}}$$

Formel 4.7: mittlere Einstrahlung H_m, mittlere Laserleistung P, Vorschubgeschwindigkeit v, Strahldurchmesser d_s.

Diese Zusammenhänge ergeben für den Grün-Laser größtenteils sinnvolle Parametersätze. Abweichungen sind nur für die Parameter mit den Nummern 16, 21, 26, 31, 36 und 41 nötig. Dort sinkt theoretisch die Pulsfrequenz unter die zulässige Grenze von 200 kHz. Durch das Anheben

der Frequenz auf über 200 kHz steigt bei gleichem flächenbezogenen Energieeintrag die Pulsüberdeckung. In diesen Fällen ist ein vergleichbarer Bearbeitungsmechanismus daher nicht unbedingt gegeben. Die einzelnen Wertepaare der Grün-Laser-Studie können Tabelle A.2 in Anhang A entnommen werden.

Mit den 45 Parametersätzen wurde zunächst jeweils eine Anordnung aus einer 2.5 mm × 3 mm großen Fläche, einer 100 µm breiten Leiterbahn und drei Einzellinien belichtet. Die Parametersätze sind auf den zu untersuchenden Bauteilen in Feldern von links nach rechts und von oben nach unten angeordnet. Der Parametersatz #1 ist jeweils oben links zu sehen, #5 oben rechts und #45 unten rechts. Diese Anordnung ist in Abb. 4.14 in zwei Tabellen für die Werte des Grün-Lasers grafisch dargestellt.

Mittlere Laserleistung (W)

Vorschubgeschwindigkeit (m/s)	1.53 W	3.07 W	4.6 W	6.13 W	7.67 W	mittlere Einstrahlung in J/mm²				
1 m/s	208.7 kHz	417.4 kHz	626.2 kHz	834.9 kHz	1044 kHz	0.32	1.279	3.067	5.125	8.533
2 m/s	208.7 kHz	417.4 kHz	626.2 kHz	834.9 kHz	1044 kHz	0.08	0.32	0.719	1.281	2.021
3 m/s	208.7 kHz	417.4 kHz	626.2 kHz	834.9 kHz	1044 kHz	0.036	0.14	0.326	0.569	1.024
1 m/s	202.7 kHz	313.1 kHz	469.6 kHz	626.2 kHz	782.7 kHz	0.313	0.959	2.19	3.844	5.908
2 m/s	202.7 kHz	313.1 kHz	469.6 kHz	626.2 kHz	782.7 kHz	0.078	0.24	0.535	0.961	1.477
3 m/s	202.7 kHz	313.1 kHz	469.6 kHz	626.2 kHz	782. kHz7	0.035	0.107	0.24	0.436	0.711
1 m/s	202.7 kHz	208.7 kHz	313.1 kHz	417.4 kHz	521.8 kHz	0.313	0.714	1.438	2.563	4.042
2 m/s	202.7 kHz	208.7 kHz	313.1 kHz	417.4 kHz	521.8 kHz	0.078	0.16	0.359	0.641	1.011
3 m/s	202.7 kHz	208.7 kHz	313.1 kHz	417.4 kHz	521.8 kHz	0.035	0.071	0.16	0.281	0.441

Pulsfrequenz (kHz)

Abb. 4.14: geometrisches Raster der Laserparameterstudien. Links: Grundparameter; rechts: mittlere Einstrahlung.

Im linken Bildteil sind die Grundparameter der Laserbearbeitung (Leistung, Vorschub und Frequenz) eingetragen, im rechten Bildteil die

mittlere Einstrahlung. Alle Parameter sind nach ihren Werten eingefärbt. Abb. 4.15 zeigt das Ergebnis der IR- und Grün-Laser-Studie auf PLASTCure Rigid 10500 DLP-Bauteilen. Die Bauteile wurden dazu mit Negativlack beschichtet, laserbearbeitet, bekeimt und metallisiert, um die Effektivität der einzelnen Parametersätze beurteilen zu können. Betrachtet man die IR-Laser-Studie (Abb. 4.15 a) im Vergleich mit der Grün-Laser-Studie (Abb. 4.15 b), kann man prinzipiell ein ähnliches Verhalten innerhalb der Parameterstudien erkennen. Es entstehen in beiden Fällen drei Regionen (#1-15, #16-30 und #31-45; durch strichlierte Linien abgegrenzt), in denen die Intensität der Bearbeitung jeweils von links nach rechts und von unten nach oben zunimmt. Dieses Verhalten korreliert mit der mittleren Einstrahlung. Im Falle der IR-Laser-Studie scheint jedoch die Einkopplung der Strahlung nicht ausreichend zu sein, da trotz gleicher mittlerer Einstrahlung im Vergleich zur grün-Laser-Studie ein deutlich geringerer Effekt im Sinne der Menge abgeschiedenen Kupfers erkennbar ist.

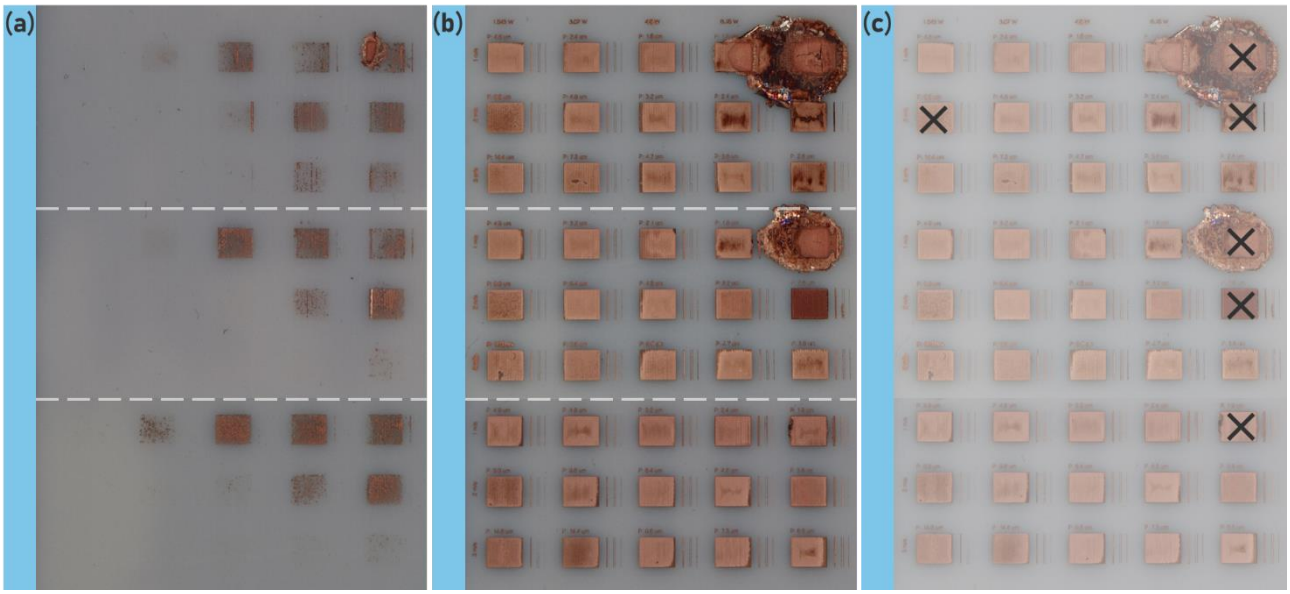


Abb. 4.15: Ergebnisse der Laserstudien auf Lack beschichteten DLP-Bauteilen aus PLASTCure Rigid 10500 nach der Kupferabscheidung. (a) Studie IR-Laser, (b) Studie grün-Laser, (c) aussortierte Parametersätze des grün-Lasers. Parameter der verschiedenen Studien siehe Anhang A.

Felder, die in diesem Versuch eine ungenügende Metallabscheidung aufweisen oder verbrannt wurden, insbesondere, wenn sie sich dabei auf

Nachbarfelder auswirken, können für die weiteren Untersuchungen ausgelassen werden. Dies betrifft alle Parametersätze der IR-Studie (Abb. 4.15 a), bei denen in keinem Feld eine zufriedenstellende Metallabscheidung stattgefunden hat, sowie die in Abb. 4.15 c markierten Parametersätze der Studie des Grün-Lasers. Die übrigen Parametersätze werden für Untersuchungen zu Kupferschichtdicke und Haftfestigkeit weiterverwendet.

4.4. Nasschemische Aktivierung, Lösen der Maske und Metallabscheidung

Nach der Laserbearbeitung folgen in der Prozesskette ausschließlich nasschemische Tauch- und Spülvorgänge (vgl. Abb. 4.16). Die Spülvorgänge laufen jeweils reproduzierbar mit einem maschinellen Programm ab und sollen ein Verschleppen von Chemikalien zwischen den einzelnen Bädern verhindern. In der Badabfolge wird das Bauteil zuerst in einen Aktivator getaucht, um die laserbearbeitete Oberfläche mit einem Katalysator zu bekeimen. Dabei legt sich der Aktivator auch auf der Oberfläche der Maske ab. Durch einen nachfolgenden Beschleunigungs- bzw. Reduktionsschritt wird die Oberfläche für die anschließende Metallabscheidung vorbereitet.

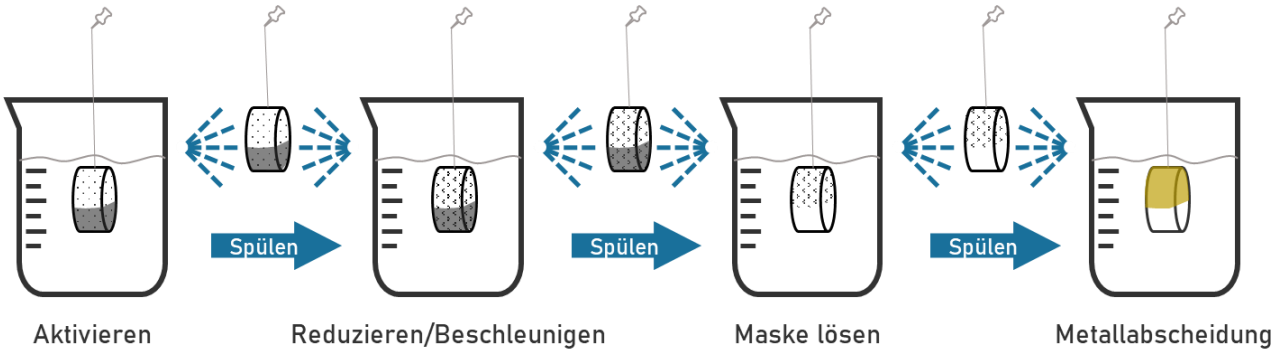


Abb. 4.16: Ablauf der nasschemischen Prozessschritte nach der Laserbearbeitung.

Danach kann die Maskierung durch das Eintauchen in eine alkalische Lösung abgelöst werden und die katalytisch wirksamen Palladiumkeime

sollten nun nur noch auf den laserbearbeiteten Oberflächen vorliegen. Anschließend wird das Bauteil nacheinander in Bäder zur außenstromlosen Abscheidung von Metallen, in der Regel Kupfer (Cu), Nickel (Ni) und Gold (Au), gegeben. Die einzelnen Prozessschritte werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

4.4.1. KATALYTISCHE AKTIVIERUNG

Edelmetalle sind besonders korrosionsbeständige Metalle und wurden daher seit dem Altertum zur Herstellung von Schmuck verwendet. In den letzten 4 Jahrhunderten wurde unter den Edelmetallen (Tabelle 4.3) die Untergruppe der Platinmetalle entdeckt, die eine ähnliche Korrosionsbeständigkeit wie Gold zeigen. Die Platinmetalle werden eingeteilt in die leichten Platinmetalle (Ruthenium, Rhodium, Palladium) und die schweren Platinmetalle (Osmium, Iridium, Platin).

Tabelle 4.3: Ausschnitt aus dem Periodensystem der Elemente. Edelmetalle gelb hinterlegt, Platinmetalle schwarz umrandet.

Gruppe	8	9	10	11	12
Periode					
5	44 Ru	45 Rh	**46 Pd**	47 Ag	48 Cd
6	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg

Unter den Edelmetallen ist Palladium (Pd) das chemisch aktivste Element und ein exzellenter Katalysator zur Beschleunigung von chemischen Reaktionen. Es wird daher zum Beispiel im Drei-Wege-Katalysator zur Abgasnachbehandlung in Kraftfahrzeugen verwendet. In der Leiterplattentechnik wird Palladium eingesetzt, um Durchkontaktierungen (en: Vertical Interconnect Access, VIA) in Mehrlagenleiterplatten für eine außenstromlos chemische Kupferabscheidung zu aktivieren. Auch in der Kunststoffmetallisierung spielt Palladium eine wesentliche Rolle bei der

Oberflächenvorbehandlung für die nasschemische Metallabscheidung [261].

Wird Palladium in Form von Metallkeimen auf der Bauteiloberfläche in einen chemischen Kupferelektrolyten eingebracht, wird an seiner Oberfläche das metastabile Redoxsystem gestört. Durch das Palladium wird die notwendige Aktivierungsenergie der Redoxreaktion des Kupferelektrolyten herabgesetzt, sodass gelöste Kupferverbindungen zu Kupfer reduziert und das im Elektrolyten ebenfalls vorhandene Reduktionsmittel oxidiert wird. Ist die Oberfläche des Palladiumkeims vollständig mit Kupfer bedeckt, ist die katalytische Wirkung des Palladiums zwar aufgehoben, aufgrund einer autokatalytischen Reaktion des Kupfers schreitet die Metallabscheidung jedoch fort.

Bei der Aktivierung mit Palladium unterscheidet man in den gängigen Verfahren zwischen ionogenen und kolloidalen Aktivatorsystemen. In ionogenen Aktivatoren liegt das Palladium in Form von Pd^{2+}-Ionen in einem ionendispersen System vor. Ein Vorteil des ionogenen Systems ist die hohe Standzeit, da das Metall in ionischer, gelöster Form vorliegt und nicht agglomeriert. Auf der Oberfläche des Bauteils bildet sich bei der Bekeimung in der wässrigen Lösung eine gut haftende Gelschicht, in die sich das Palladium einbettet [261]. Durch die nachfolgende Behandlung des bekeimten Bauteils in einem Reduktionsmittel wird das ionische Palladium zu metallischem Palladium umgesetzt ($Pd^{2+} \rightarrow Pd^{0}$). Kolloidale Aktivatorsysteme hingegen enthalten wenige Nanometer große Partikel aus metallischem Palladium-Zinn (Pd-Sn) umgeben von einer Zinn(II)-Chlorid-Hülle, die das Partikel stabilisieren und vor Oxidation schützen [262][263]. Das negativ geladene Chlorid-Ion bildet die Oberfläche. Es verhindert durch abstoßende Kräfte die Agglomeration der Partikel und hält sie unter der Wechselwirkung mit den Dipolen der Wassermoleküle in Lösung. Nach Adsorption der Kolloide auf der vorbehandelten

Bauteiloberfläche wird die schützende Zinn(II)-Chlorid-Hülle in einem Beschleunigerbad entfernt, sodass in der nachfolgenden Kupferabscheidung die Cu^{2+}-Ionen an der Palladiumoberfläche zu metallischem Kupfer reagieren können. Zusätzlich wird die Agglomeration kleiner Pd-Sn-Kolloide zu größeren Partikeln beschleunigt [264]. Die unterschiedlichen Wirkmechanismen der palladiumaktivierten Kupferabscheidung werden z.B. von Kanani ausführlich behandelt [265].
Für den Einsatz im SANCHO-Verfahren wurden drei Ansätze untersucht.

- Das kommerzielle Produkt MID Activator PC der Firma Atotech, Berlin wird als ionogener Aktivator für eine außenstromlose Kupferabscheidung auf MID vertrieben [266]. Der pH-Wert wird auf 11.5 eingestellt. Das dazugehörige Reduktionsmittel ist das Produkt MID Reducer, ebenfalls von Atotech, das mit einer Pufferlösung auf einen pH-Wert von 5 eingestellt wird [267].
- Das kommerzielle Produkt UDIQUE 879 W Activation der Firma MacDermid Enthone, Langenfeld ist ein kolloidaler Aktivator für „Plating on Plastics“ Prozesse [268]. Der dazugehörige Beschleuniger ist das Produkt UDIQUE 8810 Accelerator, ebenfalls von MacDermid Enthone [269]. Beide Produkte sind sauer.
- Die Palladium(II)-Acetat-Lösung, die von Jha et al. für die Metallabscheidung auf einer Aluminiumoxid-Schicht eingesetzt wurde [270]. Sie besteht aus 25 Vol.-% einer $8.9 \cdot 10^{-4}$ M Pd(II)-Acetat-Lösung gemischt mit 75 Vol.-% einer $2.9 \cdot 10^{-2}$ M Alizarinrot S-Lösung. Die Lösung ist sauer.

Die kommerziellen Produkte wurden jeweils nach Herstellerangaben an- und eingesetzt. Um für das SANCHO-Verfahren die Eignung der drei Aktivatoren einschätzen zu können, wurden SLS-Bauteile in die drei

Lösungen getaucht. Die Oberfläche der SLS-Bauteile bietet auch in unbearbeitetem Zustand eine ausreichend raue und poröse Struktur zur Adsorption des Aktivators, weswegen auf eine Maskierung und Laserbearbeitung verzichtet wurde. Durch die vollflächige Metallabscheidung lässt sich die Gleichmäßigkeit der Aktivierung besser beurteilen.

Wie zuvor beschrieben, ist der ionogene MID Activator stark alkalisch und löst damit potentiell sowohl die Alkalisilikat- als auch die Lack-Maske vom Bauteil ab. Daher ist hier nur eine sehr kurze Verweildauer im Aktivator möglich. Im Falle des Pd(II)-acetats wurde auf einen intensiven Spülprozess verzichtet und stattdessen das Bauteil nur kurz in deionisiertes Wasser getaucht, um das saure Medium abzuwaschen. Alle Bauteile wurden nach der Aktivierung in eine wässrige KOH-Lösung getaucht, um das Ablösen der Maskierung zu simulieren, und anschließend zur Metallabscheidung für 60 min in einen Kupferelektrolyten gegeben. Die Prozessparameter sind in Tabelle 4.4 aufgeführt.

Tabelle 4.4: Prozessablauf für die untersuchten Aktivatoren.

Prozessschritt	MID Activator PC	UDIQUE 879 W	Pd(II)-acetat
Aktivieren	5 s / 25 °C	180 s / 25 °C	300 s / 25 °C
Spülen	90 s	90 s	3 s
Reduzieren/Beschleunigen	300 s	180 s / 50 °C	-
Spülen	90 s	90 s	-
„Maske lösen“ (KOH 10 g/l)	15 min / 50 °C	15 min / 50 °C	15 min / 50 °C
Spülen	90 s	90 s	90 s
Metallabscheidung	60 min	60 min	60 min

Prinzipiell zeigt sich im Falle des ionogenen Aktivators MID Activator PC eine deutliche Metallabscheidung, die durch eine Parameteroptimierung wahrscheinlich zu einem zufriedenstellenden Ergebnis führen könnte. Durch die kurze Verweildauer zeigen sich diverse Flächen, auf denen die Aktivierung nicht ausreichend war (Abb. 4.17 a). Aufgrund der Alkalität wird jedoch von einer Steigerung der Verweildauer abgesehen. Im Falle der

Pd(II)-Acetat-Lösung ist trotz des kurzen Spülprozesses keine signifikante Metallabscheidung zu erkennen (Abb. 4.17 c). Eine gleichmäßige und vollständige Metallabscheidung zeigt sich im Falle des kolloidalen Aktivators UDIQUE 879 W Activation (Abb. 4.17 b). Dieser Aktivator wird daher in den folgenden Untersuchungen verwendet.

Abb. 4.17: Schnelltest der Eignung verschiedener Aktivatorlösungen auf SLS-Bauteilen; (a) MID Activator PC; (b) UDIQUE 879 W Activation; (c) Palladium(II)-Acetat

4.4.2. Lösen der Maske

Wie zu Beginn des Kapitels bereits angedeutet wurde, können sowohl die Natriumsilikatschicht als auch der photostrukturierbare Lack mittels alkalischer Lösungen von der Bauteiloberfläche entfernt werden. Eine solche alkalische Lösung ist z.B. wässrige Kaliumhydroxyd-Lösung (KOH). KOH wird unter anderem chemischen Rohrreinigern beigesetzt, da es sowohl Haare auflöst als auch im Abfluss vorhandene Fette verseift.

Die hier erzeugten Maskierungen lassen sich in einer Lösung von 56 g KOH pro Liter Wasser (≙ 1 mol/l, pH 14) bei 50 °C innerhalb von 3 Minuten lösen. Senkt man die Konzentration auf 10 g/l (≙ 0.18 mol/l, pH 13.25), sind die Schichten bei 50 °C nach etwa 15 Minuten gelöst. In beiden Fällen wurde in den laserbearbeiteten Bereichen keine Beeinträchtigung des Aktivators festgestellt.

4.4.3. Metallabscheidung

Wenn ein kolloidal aktiviertes Bauteil in einen Kupferelektrolyten gegeben wird, startet die Metallabscheidung, indem zunächst das Zinn in den Kolloiden durch Kupfer substituiert und eine PdCu-Legierung gebildet

wird. Dieser Vorgang ist innerhalb weniger Sekunden abgeschlossen [271]. Danach scheidet sich auf der Oberfläche der Kolloide, zunächst durch die katalytische Wirkung des Palladiums unterstützt, dann rein über die autokatalytische Wirkung des Kupfers, weiterhin Kupfer ab und die einzelnen Körner wachsen allmählich zu einer geschlossenen Schicht, bestehend aus kristallographisch unterschiedlich orientierten Bereichen, zusammen. Auf dieser geschlossenen Schicht wird in einer dritten Phase Kupfer epitaxisch aus der flüssigen Phase abgeschieden [271].

Alle gängigen kommerziellen Kupferelektrolyte sind alkalisch und enthalten Formaldehyd (HCHO) als Reduktionsmittel, sowie Stabilisatoren und Komplexbildner, die das Ausfällen von Kupferhydroxid verhindern. Im alkalischen Medium zerfällt das Formaldehyd und stellt dabei vereinfacht gesagt Elektronen (Formel 4.8) für die Reduktion des Kupfersalzes zur Verfügung [265].

$$2\,HCHO + 2\,OH^- \rightarrow 2HCO_2H + H_2 + 2e^-$$
$$Cu^{2+} + 2e^- \rightarrow Cu$$

Formel 4.8 Reaktion der Kupferabscheidung mit Formaldehyd als Elektronenspender

Kupfer bildet aufgrund seines niedrigen spezifischen Widerstandes den Hauptteil der stromleitenden Schicht. Es ist jedoch anfällig für eine Oxidation an feuchtebeladener Luft, wobei das entstehende Kupfer(I)-oxid und Kupfer(II)-oxid durch die schlechtere Leitfähigkeit und Lötbarkeit die Zuverlässigkeit des Gesamtsystems beeinträchtigt [272]. Eine dünne, edle Goldschicht kann das Kupfer initial zwar vor einer Oxidation schützen, bei der Erwärmung durch einen Fertigungsprozess oder Stromfluss ist das Kristallgitter des Goldes aufgrund der großen Atomdurchmesser jedoch durchlässig für die kleineren Kupferatome. Das Kupfer diffundiert durch die dünne Goldschicht hindurch und ist wieder der Atmosphäre ausgesetzt, woraufhin es oxidiert und den Oberflächenwiderstand erhöht, was eine stärkere Erwärmung nach sich zieht und die Diffusion

beschleunigt [273]. Dieser eskalierende Kreislauf schreitet fort bis zum Versagen des Systems. Daher wird zwischen Kupfer- und Goldschicht eine Nickelschicht abgeschieden, die aufgrund der kleinen Atomradien von Nickel effektiv als Diffusionssperre wirkt. Diese Schichtfolge, Cu/Ni/Au, ist sowohl in der Leiterplattentechnik als auch in der MID-Technik weit verbreitet, hinreichend erprobt und in diversen Quellen beschrieben [5][274][275].

Für die Kupferabscheidung wurde der kommerzielle Elektrolyt Circuposit 3350-1 (DuPont de Nemours Inc., Wilmington, USA) eingesetzt [276]. Die Prozessdauer für die aktivierten Bauteile betrug 90 min. Für die Nickelabscheidung wurde der kommerzielle Elektrolyt Durni-Coat (RIAG Oberflächentechnik AG, Wängi, Schweiz) eingesetzt [277]. Die Verweildauer im Bad lag bei 15 min mit einer resultierenden Schichtdicke von etwa 5 µm. Für den Sudgoldprozess wurde das kommerzielle Produkt Auroblex 20 (Blendl Gmbh, Metzingen) eingesetzt [278]. Die Verweildauer lag bei 10 min mit einer resultierenden Schichtdicke von etwa 0.1 µm. Alle Produkte wurden entsprechend der Herstellerangaben an- und eingesetzt.

5. CHARAKTERISIERUNG DES PROZESSES

Die zwei wichtigsten Forderungen an das SANCHO-Verfahren sind zum Ersten die Erzeugung funktionsfähiger und zuverlässig elektrisch leitender Strukturen auf der Bauteiloberfläche und zum Zweiten die Anwendbarkeit des Verfahrens auf einer möglichst großen Zahl unterschiedlicher AM-Verfahren und -Materialien. Diese beiden Anforderungen sollen im Folgenden betrachtet werden, indem zunächst am Modellprozess Digital Light Processing mit dem Modellwerkstoff PLASTCure Rigid 10500 die Eigenschaften der Funktionsstrukturen untersucht werden. Danach wird das Verfahren auf weitere AM-Verfahren und –Materialien angewendet und in verkürzter Form untersucht.

5.1. EIGENSCHAFTEN DER FUNKTIONSSTRUKTUREN

Für die Untersuchungen wurden auf verschiedenen Bauteilen Strukturen für die Messung relevanter Eigenschaften der Funktionsstrukturen erzeugt. Die Bauteile wurden durch Tauchen mit Lack beschichtet und mit den in Abschnitt 4.3 reduzierten Parametersätzen laserbearbeitet und metallisiert, um aufgrund der Schichtdicke, der Haftfestigkeit und der Rauheit auf der Metallschicht für den Prozess geeignete Anlageneinstellungen ableiten zu können. Nach der Auswahl zweier Parametersätze wurden mit diesen Parametern weitere Strukturen erstellt, um die Selektivität der Metallabscheidung beurteilen und die elektrische Leitfähigkeit messen zu können.

5.1.1. SCHICHTDICKE DER KUPFERSCHICHT

Zur Messung der Dicke von abgeschiedenen Metallschichten gibt es unterschiedliche Herangehensweisen. Gegenüber dem manuellen

Ausmessen mithilfe eines Auflichtmikroskops anhand eines Querschliffs oder der Differenzbildung aus zwei Konturmessungen vor und nach der Abscheidung hat sich die Röntgenfluoreszensanalyse (RFA) durchgesetzt. Der Vorteil der RFA ist, dass sie automatisiert auf einer großen Anzahl von Messstellen durchgeführt werden kann und anwenderunabhängige Messwerte ausgibt. Bei der RFA wird Primärstrahlung in Form energiereicher Röntgenstrahlung auf das Messobjekt gestrahlt. Durch die Primärstrahlung werden die Atome der Probe ionisiert, indem sie kernnahe Elektronen aus dem Atom entfernen. Dieser Zustand ist jedoch instabil, sodass die Lücke von einem Elektron aus einer höheren Schale aufgefüllt wird. Nach dem Bohr'schen Atommodell besitzen Elektronen entsprechend ihrer Position im Atom eine festgelegte Energie, die mit dem Abstand zum Atomkern ansteigt. Das nachrückende Elektron aus der äußeren Schale muss entsprechend Energie verlieren, wenn es auf eine kernnahe Schale wechselt. Diese Energie wird in Form von Fluoreszenzstrahlung (Sekundärstrahlung) abgegeben. Die Energie der Sekundärstrahlung ist charakteristisch für das jeweilige Element und wird von einem Detektor erfasst, dessen Signale zu einer Häufigkeitsverteilung (Häufigkeit über Energie) verarbeitet werden. Aufgrund von Häufigkeitsspitzen kann auf den Elementtyp (Lage) und die Menge (Höhe) geschlossen werden. Durch eine Kalibrierung der Messeinrichtung auf eine spezifische Schicht können so auch die Schichtdicken der einzelnen Bestandteile eines Schichtsystems in einem Messschritt ermittelt werden. Prinzipbedingt kann durch die Reflektion der Primär- und Sekundärstrahlung an Schichtübergängen und Oberflächen ein Messfehler verursacht werden, da der Anteil der vom Detektor nicht erfassbaren Sekundärstrahlung als dünnere Schicht interpretiert wird. Auf diesen Messfehler hat auch die Rauheit der Probe einen Einfluss, die tendenziell eher einen zu kleinen Messwert verursacht.

Absolut gesehen sind die Messwerte der RFA mit einer gewissen Vorsicht zu betrachten, da auch Schwankungen in der Schichtzusammensetzung den Messwert beeinflussen und außenstromlos abgeschiedene Schichtsysteme häufig von Charge zu Charge ebensolchen Schwankungen unterliegen. Die Messwerte geben jedoch einen guten Eindruck von den unterschiedlichen Abscheideraten auf derselben Probe bei unterschiedlichen Laserparametern. Dazu wurde hier die Kupferschichtdicke nach 90 min Abscheidedauer mittels Röntgenfluoreszenzanalyse (Fischerscope® XDV®-µ, Helmut Fischer GmbH, Sindelfingen) auf vier verschiedenen Strukturen je Parametersatz gemessen (Kreisflächen mit 0.9 mm Durchmesser) und gemittelt (Abb. 5.1 links). Die Standardabweichung liegt für die meisten Werte in einem vernachlässigbaren Bereich und wird aus Gründen einer übersichtlichen Darstellung nur in Abb. A.20 in Anhang D angegeben.

Kupferschichtdicke in µm				
5.16	7.35	9.24	8.57	
	5.02	5.47	6.06	
6.1	5.75	5.16	5.42	6.04
5.24	6.13	8.98	9.23	
6.29	5.21	5.16	5.58	
6.15	6.26	5.28	5.16	5.54
5.07	5.28	6.68	8.61	
6.56	5.06	4.98	5.19	5.55
5.73	5.89	5.65	5.2	5.50

Flächenrauheit S_a in µm vor Metallabscheidung				
2.09	2.11	2.31	2.36	2.71
2.10	1.95	2.10	2.09	2.16
2.01	2.13	2.02	2.30	2.17
2.07	2.22	2.60	2.69	2.73
2.43	2.23	2.52	2.49	2.39
2.24	2.44	2.13	2.31	2.35
2.21	2.38	2.54	2.99	2.95
2.07	2.28	2.43	2.72	2.69
2.62	2.33	2.24	2.36	2.52

Flächenrauheit S_a in µm nach Metallabscheidung				
1.12	1.35	3.8	3.51	
	0.96	1.12	1.4	
1.48	1.26	1.14	1.49	1.41
1.03	1.36	2.56	4.52	
1.03	1.18	1.33	1.2	
1.94	1.48	1.1	1.24	1.87
1.14	1.36	1.66	3.98	
1.81	1.28	1.32	1.89	1.7
1.07	1.88	1.65	1.15	1.59

Abb. 5.1: Schichtdicke der Kupfermetallisierung auf PLASTCure Rigid 10500 DLP-Bauteil für die grün-Laser-Studie. Werte der Kupferschichtdicke wurden mittels Röntgenfluoreszenzanalyse gemessen. Werte der Rauheit wurden mittels Weißlichtinterferometrie gemessen.

Wie zuvor beschrieben, repräsentieren die einzelnen Einträge die 45 Laserparametersätze, wobei Parameter #1 oben links eingetragen ist, #5

oben rechts und #45 unten rechts. Die weißen Felder wurden in Abschnitt 4.3 für weitere Versuche ausgeschlossen. In dieser und ähnlichen Abbildungen in den folgenden Abschnitten sind die Felder nach ihren Werten eingefärbt. Die Messwerte der Kupferschichtdicke auf dem untersuchten Bauteil schwanken zwischen etwa 5 und 10 µm deutlich genug, um zwischen den Parametersätzen differenzieren zu können. Mit geringen Abweichungen ist auch hier die qualitative Korrelation mit der mittleren Einstrahlung H_m zu erkennen, wobei eine höhere H_m mit einer stärkeren Kupferschicht einhergeht (vgl. Abb. 4.14 rechts). Die zusätzlich angegebene Flächenrauheit vor und nach der Metallisierung (Abb. 5.1 mittig und rechts) ermöglicht die qualitative Beurteilung der Messergebnisse. Die tendenziell stärker mit Kupfer bedeckten Flächen weisen sowohl vor als auch nach der Abscheidung eine rauere Oberfläche auf, was eine Reduktion des Messsignals provoziert. Es ist also davon auszugehen, dass hier tatsächlich eine größere Schichtdicke vorliegt.

Prinzipiell sind für einen geringen Widerstand und eine hohe Stromtragfähigkeit die Parameter mit einer höheren Schichtdicke vorzuziehen. Wie zuvor erwähnt, sind nicht die Absolutwerte der Messung aussagekräftig, sondern die Relation der einzelnen Messwerte zueinander. Daher sind hier die Parameter #3, #4, #18, #19 und #34 hervorzuheben (dunkelblaue Färbung). Diese Oberflächen wurden alle mit einer niedrigen Vorschubgeschwindigkeit und einer mittleren Einstrahlung von über 2 J/mm² laserbearbeitet.

5.1.2. Haftfestigkeit der Metallschicht

Die Haftfestigkeit wurde mittels des Hot-Bump-Pull-Tests (HBPT), auch bekannt unter der Bezeichnung Hot-Pin-Pull-Test, gemessen. Die Messmethode wurde von der Firma Nordson Dage, Aylesbury, UK entwickelt und hier mit dem Messsystem Nordson DAGE 4000Plus

durchgeführt. Bei dieser Methode wird in ein beheizbares Messmodul ein Kupferstift eingeführt und festgeklemmt. Der Kupferstift hat einen Durchmesser von 900 µm und ist an seiner Stirnseite halbsphärisch verrundet. Korrespondierend zu dem Stiftdurchmesser werden auf der Probenoberfläche Metallstrukturen mit einem Durchmesser von 900 µm (Mess-Pad) abgeschieden. Nach dem Aufbringen von Lotpaste auf das Mess-Pad wird der Kupferstift druckfrei aufgesetzt und das Messmodul erwärmt ihn nach einem auf das Lot und den Substratwerkstoff abgestimmten Temperatur-Zeit-Profil. Das Lot schmilzt dabei auf und erzeugt unter der Bildung eines Meniskus nach der Abkühlung eine mechanische Verbindung zwischen Kupferstift und Pad (Abb. 5.2). Das Messmodul zieht nun den Kupferstift nach oben weg und misst dabei mit einer Kraftmessdose die Zugkraft, die auf das Schichtsystem wirkt. Über die bekannte Fläche des Mess-Pads kann die Bruchkraft in eine mechanische Spannung überführt werden. Das Verfahren wurde ebenfalls von Goth et al. beschrieben [279].

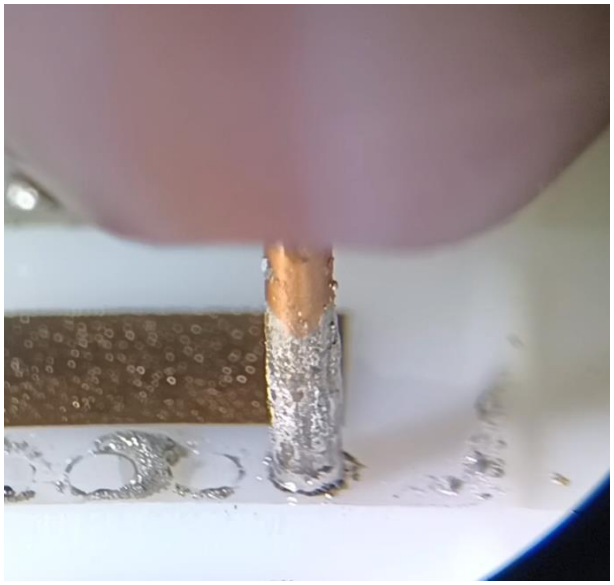


Abb. 5.2: Messung der Haftfestigkeit der abgeschiedenen Metallschicht mittels Hot-Bump-Pull-Test.

Aufgrund der unterschiedlichen Rauheit der Bauteiloberfläche nach der Laserbearbeitung ist bei den einzelnen Parametersets der Laserbearbeitung

eine unterschiedlich gute Haftfestigkeit zu erwarten. Daher wurden je Parameter vier Mess-Pads erzeugt, deren Haftfestigkeit gemessen und gemittelt (Abb. 5.3 links). Die Standardabweichung wird aus Gründen einer übersichtlichen Darstellung nur in Abb. A.21 in Anhang D angegeben. Die höchsten Haftfestigkeitswerte wurden in den Feldern #18 (19.55 N/mm²) und #19 (21.46 N/mm²) gemessen. In diesen Feldern wurde zuvor auch eine hohe Kupferschichtdicke gemessen. Der niedrigste Wert wurde auf Feld #42 (10.29 N/mm²) gemessen. Zusätzlich zu den Haftfestigkeitswerten sind in Abb. 5.3 die Flächenrauheitswerte S_a (mitte) und S_z (rechts) vor der Metallabscheidung angegeben. Diese Werte charakterisieren die Oberfläche, in der sich die Metallschicht verkrallt. Ein deutlicher Zusammenhang ist hier weder zwischen der Haftfestigkeit und dem S_a-Wert, noch zwischen der Haftfestigkeit und dem S_z-Wert zu erkennen. Andererseits ist jedoch auch hier eine, wenn auch nur schwache, Korrelation mit der mittleren Einstrahlung festzustellen (vgl. Abb. 4.14 rechts).

Haftfestigkeit in N/mm²					Flächenrauheit S_a in µm vor Metallabscheidung					Flächenrauheit S_z in µm vor Metallabscheidung				
13.98	15.26	16.86	14.88		2.09	2.11	2.31	2.36	2.71	124.9	162.7	168	160.7	161.5
	15.14	15.24	14.35		2.10	1.95	2.10	2.09	2.16	171.2	148.2	141.5	116.6	145.2
17.47	16.95	17.68	15.88	14.53	2.01	2.13	2.02	2.30	2.17	145.9	140.7	157.9	181.4	138.1
14.31	15.27	19.55	21.46		2.07	2.22	2.60	2.69	2.73	144.7	166.8	160.1	152.2	157.2
15.55	17.22	16.38	14.66		2.43	2.23	2.52	2.49	2.39	140.3	150.7	158.1	170.2	198.4
17.33	16.79	17.21	17.92	14.27	2.24	2.44	2.13	2.31	2.35	152.8	141.4	140.1	143.3	151.2
14.39	15.58	15.23	17.83		2.21	2.38	2.54	2.99	2.95	129.8	150.2	152.7	147.7	161.3
16.12	14.63	12.85	14.75	17.16	2.07	2.28	2.43	2.72	2.69	174.3	155.9	145.6	142.2	152.5
16.54	10.29	11.05	12.09	15.82	2.62	2.33	2.24	2.36	2.52	148.4	140.5	132.7	166.9	159.9

Abb. 5.3 Haftfestigkeit der Metallschicht auf PLASTCure Rigid 10500 DLP-Bauteil für die grün-Laser-Studie. Werte für die Haftfestigkeit wurden mittels Hot-Bump-Pull-Verfahren gemessen. Werte der Flächenrauheit wurden mittels Weißlichtinterferometrie vor der Metallabscheidung auf der Bauteiloberfläche gemessen.

Vergleicht man die Ergebnisse mit publizierten Haftfestigkeitswerten aus dem Bereich der MID- bzw. AM-MID-Technik (Tabelle 5.1), so sind die Werte vergleichbar mit LDS PEEK MID. Selbst im niedrigsten Fall liegen die Werte noch über dem von LDS LCP MID, einem gängigen Werkstoff für spritzgegossene Schaltungsträger, sowie durchgängig deutlich über den Werten des SSAIL-Verfahrens. Bei der Suche nach Literaturdaten wurde aus Gründen der Vergleichbarkeit darauf geachtet, dass in allen Quellen die Messmethode HBPT mit einem Stiftdurchmesser von 900 µm eingesetzt wurde.

Tabelle 5.1: Haftfestigkeitswerte von Kupfer auf Polymeren aus der Literatur und eigene Messung. Durchgängig gemessen mit dem Hot-Pin-Pull-Verfahren (900 µm Stiftdurchmesser). Herstellungsverfahren am Kunststoff vermerkt: [1] LDS MID, [2] SSAIL MID, [3] SSAIL AM-MID, [4] SIPA MID, [5] SANCHO AM-MID.

Kunststoff	Bezeichnung, Hersteller	Haftfestigkeit	Quelle
LCP[1]	TECACOMP® LCP LDS black 4107, Ensinger	8.63 N/mm²	[280]
PEEK[1]	TECACOMP® PEEK LDS black 3980, Ensinger	20.02 N/mm²	[280]
PPA[1]	Vestamid HTplus TGP 3586, Evonik	19 N/mm²	[279]
PPA[1]	Vestamid HTplus TGP 3586, Evonik	17.94 N/mm²	[281]
LCP[1]	Vectra LCP E840iLDS, Celanese	8.91 N/mm²	[281]
PA6[2]	Ultramid B2S, BASF	7.2 N/mm²	[46]
PPA[2]	HTNF8200 NC010, DUPONT	8 N/mm²	[46]
PC/ABS[2]	LNP™ THERMOCOMP™ Compound NX10302, SABIC	8.3 N/mm²	[46]
PMMA[2]	140 HF, SABIC	3.8 N/mm²	[46]
PEEK[2]	450FE20, VIKTREX	12 N/mm²	[46]
PET[2]	R120416A1 (Folie), IT4IP	2.1 N/mm²	[46]
PVC[2]	PVC, SKZ Institut	2 N/mm²	[46]
ABS[3]	PC/ABS Filament, Stratasys	5.4 N/mm²	[46]
Epoxid[4]	Epoxidur® EP 3581 T-1, Raschig	12.74 N/mm²	[22]
Epoxid[5]	PLASTCure Rigid 10500	21.46 N/mm²	-

5.1.3. Oberflächenrauheit auf der Metallschicht

Die Beschaffenheit der Oberfläche der abgeschiedenen Metallschicht ist insbesondere für Folgeprozesse der Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) relevant. Zur Charakterisierung der Oberflächenrauheit werden die Flächenrauheitsparameter S_a und S_z herangezogen. Der Parameter S_a (mittlere arithmetische Höhe) stellt die Erweiterung des Linienrauheitsparameters R_a in die Fläche dar. Es handelt sich um den

Mittelwert der Beträge des Höhenunterschieds eines jeden Messwerts im Vergleich zum arithmetischen Mittel der Oberfläche (Abb. 5.4). Einfacher ausgedrückt, wird der Quotient aus dem Volumen aller Berge und Täler bezogen auf die Fläche der mittleren Ebene gebildet. Dieser Parameter wird im Allgemeinen herangezogen, um die Oberflächenrauheit zu beurteilen. Der Parameter S_z (maximale Höhe) stellt die Summe aus dem Höhenwert der höchsten Spitze und dem Höhenwert der stärksten Vertiefung innerhalb der Messwerte dar (Abb. 5.4). Insbesondere S_z reagiert extrem sensibel auf Störungen wie z.B. Staubpartikel oder Löcher, da zwar die gesamte Messfläche ausgewertet wird, jedoch nur der höchste und tiefste Messpunkt in die Berechnung einfließen. Er ist damit besonders anfällig für Ausreißer und selten sinnvoll zur Definition technischer Anforderungen einsetzbar. Würde beispielsweise auf einem Lötpad ein einzelner Metall-„Stalagmit“ aus der Fläche herausragen, wirkt sich dies sofort auf den S_z-Wert aus. Bei einem späteren Lötprozess würde diese Struktur beim Aufsetzen des Bauteils jedoch einfach eingeebnet werden. Ähnlich verhält es sich bei einer einzelnen Vertiefung.

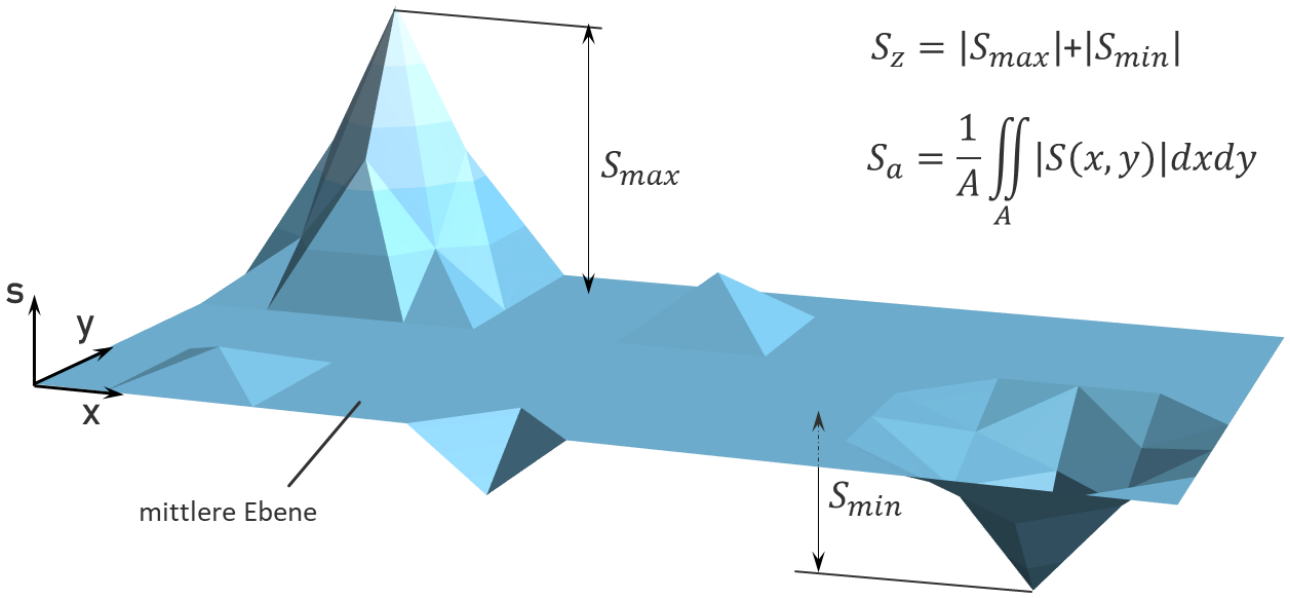


Abb. 5.4: Veranschaulichung der Flächenrauheitswerte S_a und S_z und deren Berechnung nach DIN EN ISO 25178-2.

Zur Ermittlung der Rauheitswerte wurde für jeden Laserparametersatz auf einer rechteckigen Fläche von 2.5 mm × 4.8 mm die Schichtfolge Cu/Ni/Au abgeschieden. Die Messungen erfolgten mit einem Weißlichtinterferometer (Wyko NT9100, Veeco, Plainview, New York, USA) an jeweils vier Stellen auf der rechteckigen Fläche. In Abb. 5.5 sind nebeneinander die Mittelwerte der Flächenrauheitswerte vor (S_a) und nach der Metallabscheidung (S_a und S_z) dargestellt. Die Standardabweichung wird aus Gründen einer übersichtlichen Darstellung nur in Abb. A.22 und Abb. A.23 in Anhang D angegeben. Die S_a-Werte liegen zwischen 0.96 µm und 4.52 µm. Die S_z-Werte bewegen sich zwischen 13.68 und 52.48 µm. Sie zeigen jedoch aus dem zuvor beschriebenen Grund keinen Zusammenhang mit den S_a-Werten oder den Laserparametern. So liegen die höchsten S_z-Werte auf Feldern mit niedrigen S_a-Werten. Im Gegensatz dazu korreliert S_a nach der Metallabscheidung qualitativ gut mit der mittleren Einstrahlung (vgl. Abb. 4.14 rechts).

Flächenrauheit S_a in µm vor Metallabscheidung					Flächenrauheit S_a in µm nach Metallabscheidung					Flächenrauheit S_z in µm nach Metallabscheidung				
2.09	2.11	2.31	2.36	2.71	1.12	1.35	3.8	3.51		43.17	32.51	34.68	43.27	
2.10	1.95	2.10	2.09	2.16		0.96	1.12	1.4			44.18	31.40	36.38	
2.01	2.13	2.02	2.30	2.17	1.48	1.26	1.14	1.49	1.41	32.97	34.95	30.90	36.94	33.90
2.07	2.22	2.60	2.69	2.73	1.03	1.36	2.56	4.52		52.48	34.91	26.69	33.19	
2.43	2.23	2.52	2.49	2.39	1.03	1.18	1.33	1.2		31.42	41.21	45.46	40.93	
2.24	2.44	2.13	2.31	2.35	1.94	1.48	1.1	1.24	1.87	49.68	34.65	37.27	34.88	38.56
2.21	2.38	2.54	2.99	2.95	1.14	1.36	1.66	3.98		51.93	44.06	42.88	34.77	
2.07	2.28	2.43	2.72	2.69	1.81	1.28	1.32	1.89	1.7	35.17	34.83	30.76	35.27	31.84
2.62	2.33	2.24	2.36	2.52	1.07	1.88	1.65	1.15	1.59	13.68	25.46	26.05	21.85	21.97

Abb. 5.5: Flächenrauheitswerte vor und nach der Metallabscheidung (Kupfer, Nickel und Gold).

Tendenziell zeigt sich an den S_a-Werten vor und nach der Metallabscheidung, dass die Oberfläche durch den Prozess eher eingeebnet

wird. Eine Ausnahme bilden die Felder mit einer mittleren Einstrahlung über 2.5 J/mm². Hier zeigt sich eine Erhöhung der Rauheitswerte nach der Metallabscheidung (Felder #3, #4, #19 und #34). Betrachtet man die zwei Felder mit der niedrigsten (#7) und höchsten (#19) Rauheit unter dem Mikroskop, erkennt man einen Unterschied in der Größe der abgeschiedenen Körner. Auf Feld #7 (Abb. 5.6 links) sind deutlich mehr und kleinere Körner vorhanden im Vergleich zu Feld #19 (Abb. 5.6 rechts), wo einzelne Körner deutlich größer gewachsen sind. Dieses Verhalten führt auf Feld #7 zu einer homogeneren, glatteren Oberfläche.

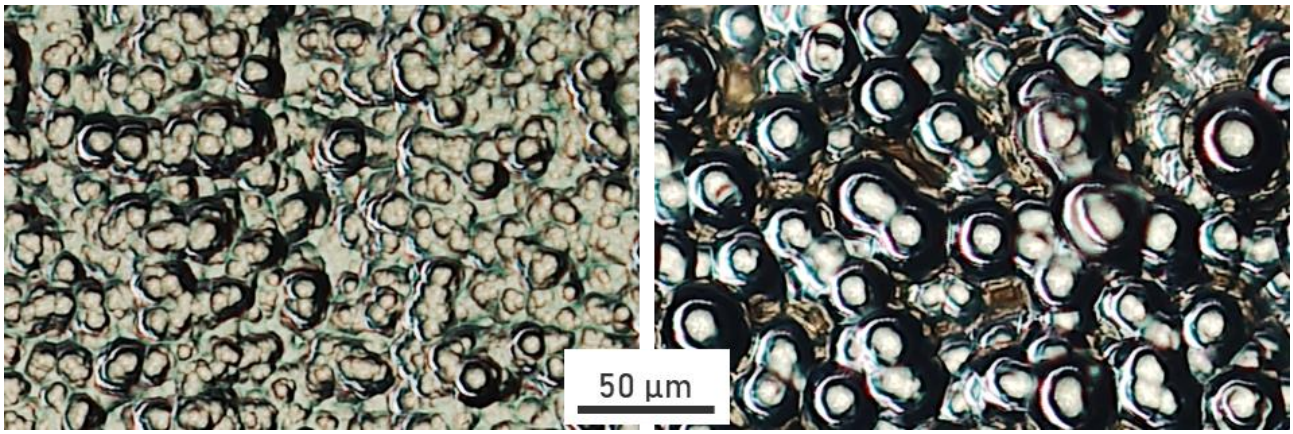


Abb. 5.6: Mikroskopaufnahmen der Metallisierungsschicht (Gold) auf PLASTCure Rigid 10500 DLP-Bauteil für die Grün-Laser-Studie. Links Parametersatz #7; rechts Parametersatz #19.

Zurückzuführen ist dies wahrscheinlich auf eine größere Anzahl von Pd-Keimen auf der Oberfläche vor der Kupferabscheidung. Diese wachsen aufgrund der geringen Abstände untereinander lateral schneller zusammen und breiten sich dann gleichmäßig in der Dickenrichtung aus. Generell geht eine höhere Flächenrauheit mit größeren Metallsphären einher. Einen Überblick über den beschriebenen Zusammenhang zwischen Rauheitswert und Korngröße geben die Mikroskopieaufnahmen in Abb. A.24 in Anhang D in Verbindung mit Abb. 5.5 (Mitte).

5.1.4. ZWISCHENFAZIT

Die bisherige Untersuchung der Metallisierungsschicht zeigt, dass durch eine Variation der Laserparameter die Schichteigenschaften in einem

gewissen Bereich beeinflusst werden können. Dies ermöglicht die Herstellung von Schichten, deren Eigenschaften auf die jeweilige Anwendung ausgerichtet sind. Ist beispielweise eine hohe Zuverlässigkeit gewünscht, kann ein Parametersatz gewählt werden, der zu haftfesten Schichten führt. Ist eine geringe Rauheit erforderlich, kann auch dafür ein entsprechender Parametersatz gewählt werden. Da außerdem die Laserparameter während der Bearbeitung eines Bauteils variiert werden können, ist es möglich und sinnvoll, bspw. Strukturen zur Signalübertragung und Lötpads mit unterschiedlichen Laserparametern zu erzeugen. Erstere benötigen für eine energiearme Übertragung möglichst geringe elektrische Widerstände, haben jedoch keine speziellen Anforderungen an die Oberfläche der Metallschicht. Lötpads hingegen benötigen ggf. eine glattere Oberfläche für Prozesse der Aufbau- und Verbindungstechnik, sind aufgrund ihrer Größe und durch die ganzflächige Bedeckung mit Lot jedoch nicht ausschlaggebend für den Widerstand der Verbindung zweier Komponenten.

Für die folgenden Untersuchungen wurden daher zwei Parametersätze ausgewählt und mit ihnen Teststrukturen hergestellt. Der erste Parametersatz ist #18, da er nach Parametersatz #19 die höchste Haftfestigkeit und Schichtdicke produziert, dabei jedoch etwas glattere Oberflächen gemessen wurden. Zudem sind mit diesem Parametersatz durchgängige Strukturen bei einer einzigen Laserüberfahrt (Single Line) erzeugbar. Der zweite Parametersatz ist #41, da er Strukturen mit einer guten Haftfestigkeit bei vergleichsweise sehr glatter Oberfläche produziert. Dafür ist die abgeschiedene Schichtdicke im Vergleich gering.

5.1.5. Selektivität der Metallabscheidung

Für das Design mechatronischer Systeme ist die Selektivität der außenstromlosen Metallabscheidung ein wichtiges Kriterium. So bestimmt

die Menge und die Geometrie von Metallstrukturen auf nicht laserbearbeiteten Flächen (Fremdabscheidung), in welchem Abstand Schaltungen verlaufen müssen, um das Risiko eines Kurzschlusses gering zu halten. Wenn trotz einer Laserbearbeitung der Oberfläche Lücken in der Metallschicht entstehen, beeinflusst die Größe und Ausprägung dieser Lücken die minimale Strukturgröße, mit der prozesssicher eine leitfähige Verbindung hergestellt werden kann. Beide Fehlerbilder wirken sich damit auf das Miniaturisierungspotential des Verfahrens aus.

Zur Betrachtung der Selektivität der Metallabscheidung wurden Strukturen nach dem Layout aus Abb. A.18 in Anhang C erzeugt. Dieses beinhaltet mäandrierende Bahnen, in die wechselseitig zwei Kämme eingreifen. Mit diesen Strukturen können, über das Anlegen eines elektrischen Potentials und die Messung des resultierenden Stroms (Multimeter), durch Fremdabscheidung erzeugte Kurzschlüsse detektiert werden. Es werden zwei verschiedene Mäander-Kamm-Strukturen (MKS) betrachtet, die sich im Abstand und der Länge der leitenden Strukturen unterscheiden. Die längere MKS ist 300 mm lang und hat einen Abstand von 400 µm. Die kürzere MKS ist 200 mm lang und hat einen Abstand von 800 µm. Die Breite der Strukturen beträgt immer 100 µm. Die quadratischen Mess- bzw. Lötpads haben eine Kantenlänge von 1.5 mm.

Für DLP-Bauteile, die mit Negativlack maskiert und mit Parametersatz #18 laserbearbeitet wurden, ist die kurze MKS ist in Abb. 5.7 dargestellt, die lange MKS in Abb. 5.8. Allgemein ist eine gute Selektivität der Metallabscheidung zu erkennen. Obwohl vereinzelt Fremdabscheidungen vorhanden sind, zeigt sich diese hauptsächlich in Form von dünnen Strängen. Bei Betrachtung unter einem Stereomikroskop erkennt man, dass sie sich meist an einem Ende von der Oberfläche abheben und wahrscheinlich von metallisierten Staubteilchen herrühren. Obwohl diese Fremdabscheidungen, insbesondere im Falle der kurzen MKS, sehr wohl

lang genug wären, um an einer ungünstigen Stelle einen Kurzschluss auszulösen, wurde bei den Messungen kein Fehlerstrom ausgegeben. Die vier untersuchten Strukturen waren jedoch alle durchgängig leitfähig, was aufgrund der geringen Breite von 100 µm für ein gutes Abscheidungsverhalten spricht.

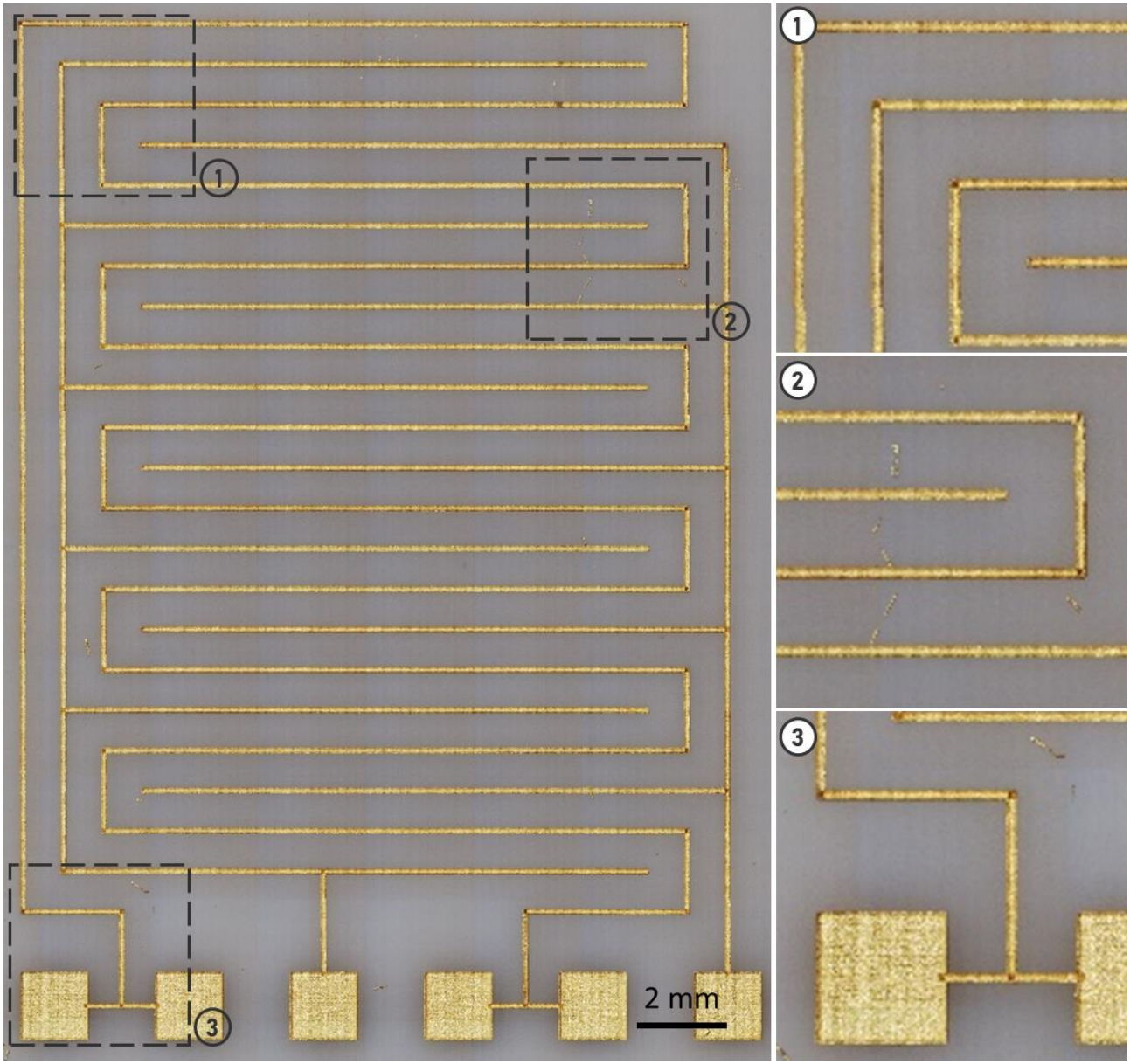


Abb. 5.7: Mäander-Kamm-Struktur auf DLP-Bauteil (Parametersatz #18). Strukturabstand 800 µm.

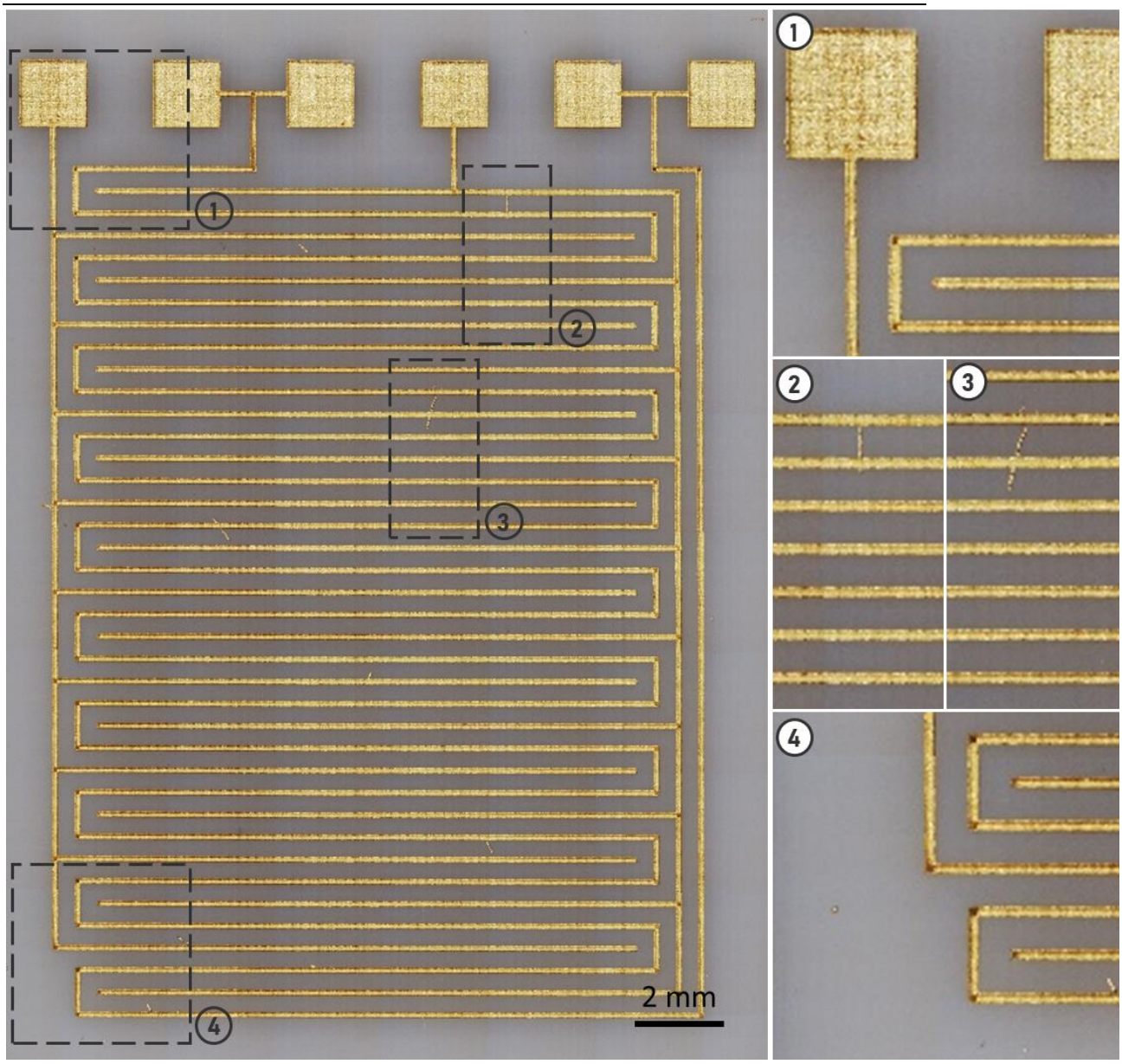


Abb. 5.8: Mäander-Kamm-Struktur auf DLP-Bauteil (Parametersatz #18). Strukturabstand 400 µm.

Um die Selektivität der Metallabscheidung auf 3D-Bauteilen untersuchen zu können, wurden DLP-Bauteile in Form von 4-seitigen Pyramidenstümpfen aufgebaut und das Layout aus Abb. A.19 in Anhang C darauf erzeugt. Dabei wurde Negativlack mit 70 m% PGMEA gemischt und zur Maskierung eingesetzt. Insgesamt ist auch hier eine selektive Metallabscheidung zu erkennen. Geometriebedingt kam es an einigen Stellen jedoch zu Fremdabscheidung. Die Bedeckung einiger konvexer Kanten mit Lack scheint nicht ausreichend gewesen zu sein, so dass dort der Aktivator auf die Bauteiloberfläche gelangen konnte (Abb. 5.9 a).

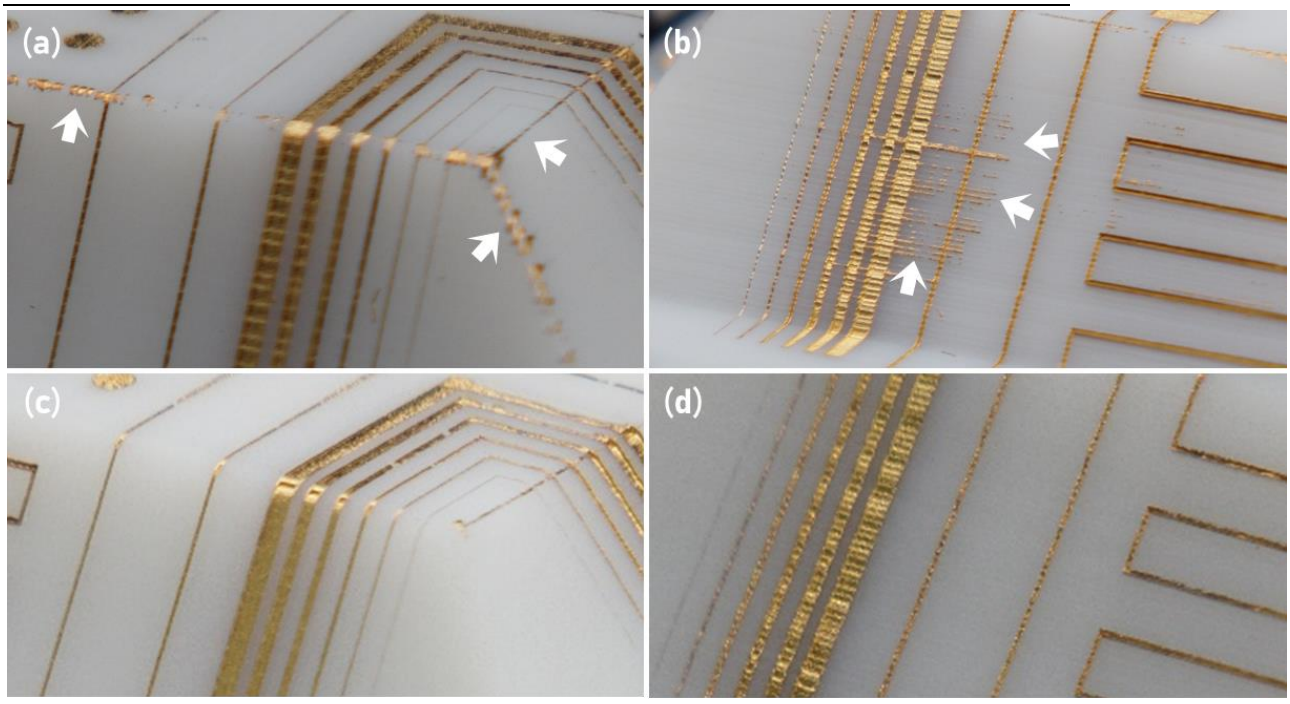


Abb. 5.9: Fremdabscheidung an Kanten (links) und auf Oberflächen mit Stufeneffekt (rechts). Parametersatz #18, Maskierung mit Negativlack verdünnt mit 70 m% (a, b) bzw. 50 m% (c, d) PGMEA.

Ebenso kam es an einigen Stellen auf den Flanken zu Fremdabscheidung. Additiv gefertigte Bauteile weisen aufgrund des schichtweisen Aufbauprozesses an geneigt aufgebauten Oberflächen den sogenannten Treppenstufeneffekt (en: Stair Stepping Effect) auf [282]. Dieser ist je nach Material, Verfahren und Schichtstärke mehr oder weniger ausgeprägt. An den Stufen bilden sich material- und verfahrensabhängig scharfe Kanten aus, die von dem verdünnten Lack nicht ausreichend bedeckt werden. Die Fremdabscheidung breitet sich entlang der horizontalen Riefen aus, die durch den Treppenstufeneffekt erzeugt wurden, wie in Abb. 5.9 b zu sehen. Die Fremdabscheidung auf den Pyramidenstümpfen ist eher gering und kann durch eine weniger stark verdünnte Lackmischung unterbunden werden. Abb. 5.9 c und d zeigen die gleichen Bauteiloberflächen wie zuvor auf einem Bauteil, das mit Negativlack verdünnt mit 50 m% PGMEA maskiert wurde. Hier ist wie erwartet eine deutlich reduzierte Fremdabscheidung zu erkennen.

Analog zum Negativlack soll hier zum Vergleich noch ein DLP-Bauteil gezeigt werden, das mit Natriumsilikat maskiert wurde. Es wurden die gleichen Strukturen auf 2D-Bauteilen erzeugt, wie zum Anfang dieses Abschnittes beschrieben. Die kurze MKS ist in Abb. 5.10 dargestellt, die lange MKS in Abb. 5.11. Auch hier ist prinzipiell eine sehr gute Selektivität der Metallabscheidung zu beobachten. Abgesehen von punktförmigen Strukturen (Detail 2), die für Kurzschlüsse unkritisch sind, gibt es nur wenig Fremdabscheidung durch Risse oder Staubpartikel.

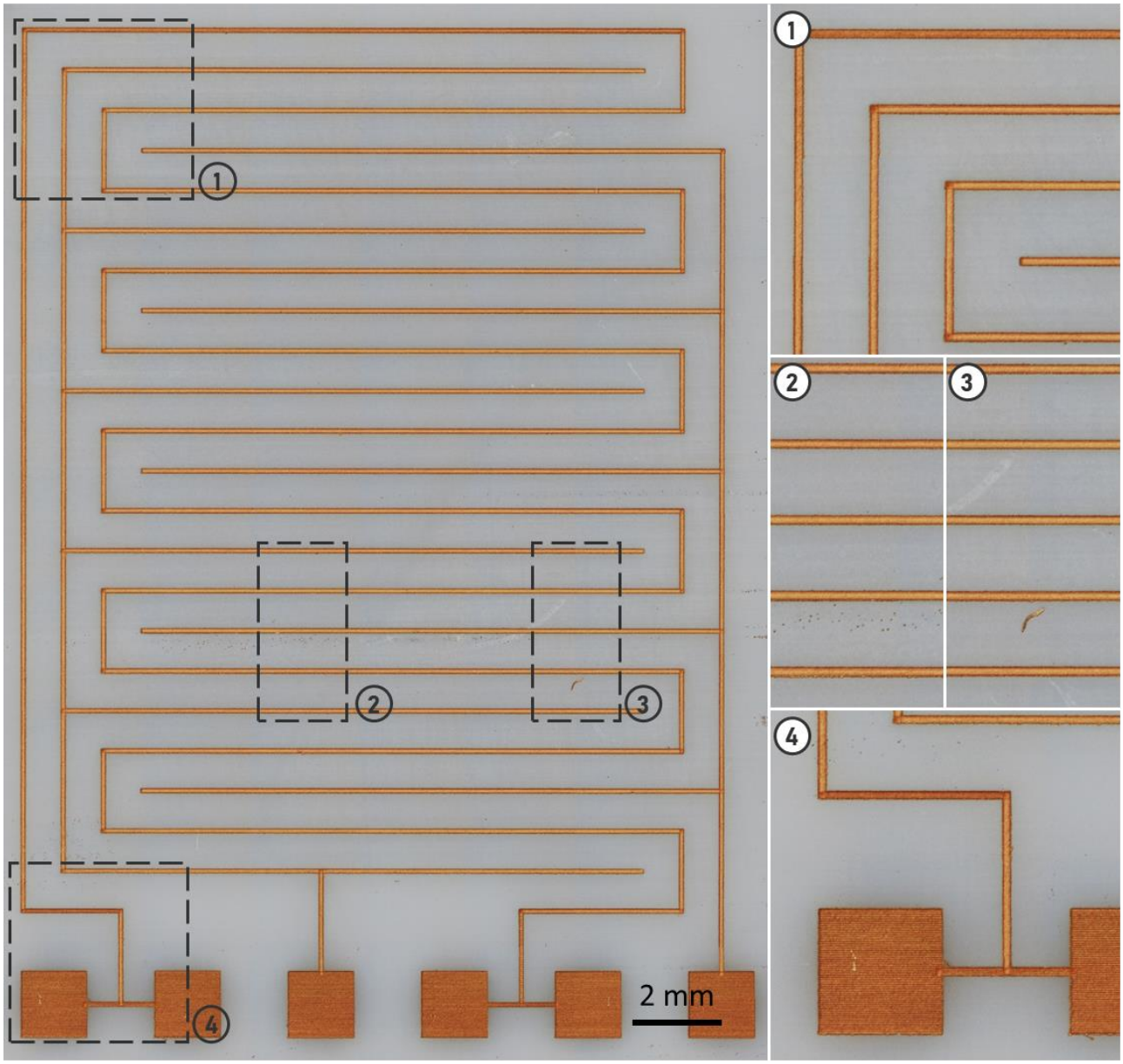


Abb. 5.10: Mäander-Kamm-Struktur auf DLP-Bauteil (Parametersatz #40). Selektivität wurde durch Natriumsilikat-Maske erzeugt. Strukturabstand 800 µm.

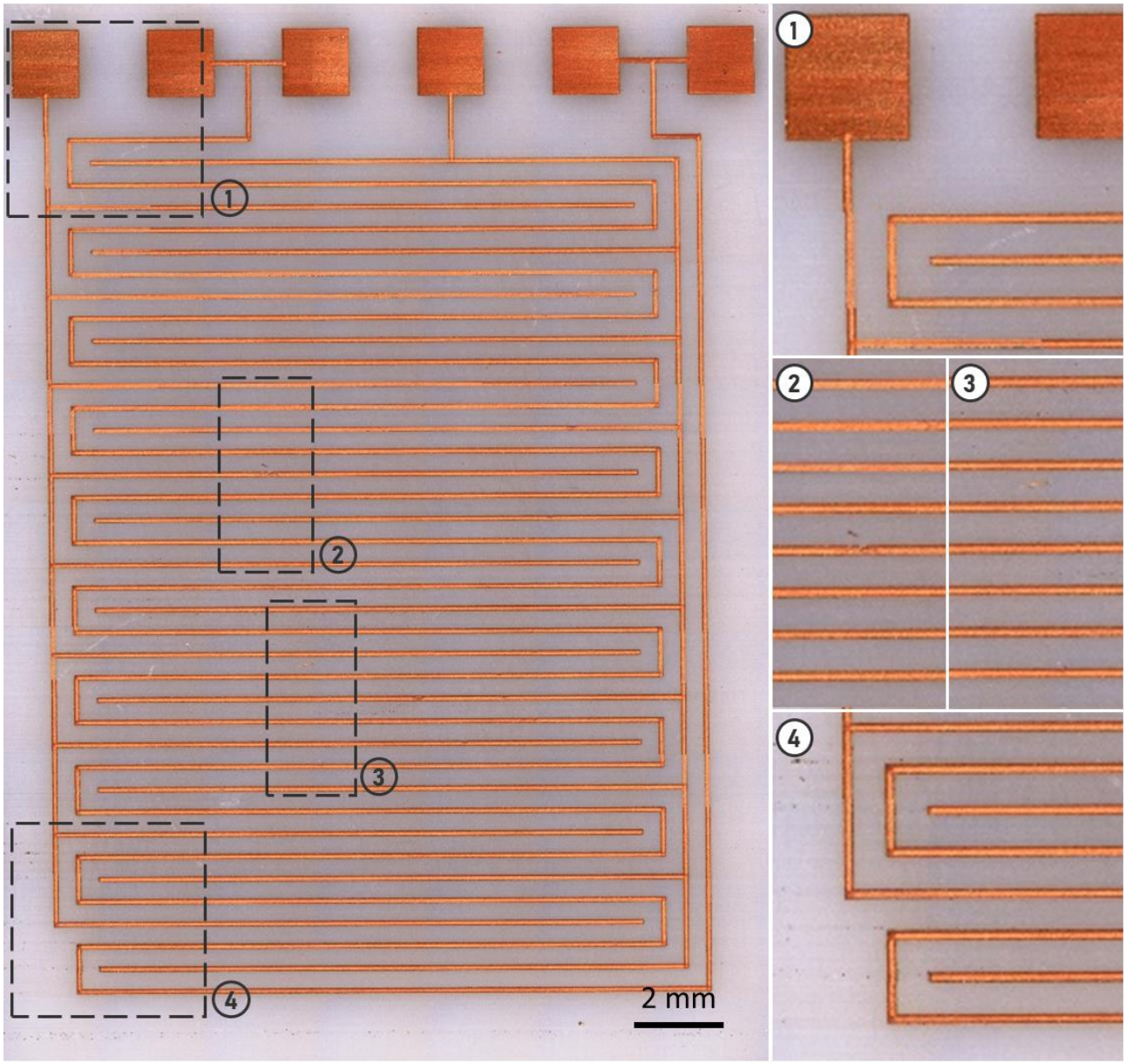


Abb. 5.11: Mäander-Kamm-Struktur auf DLP-Bauteil (Parametersatz #40). Selektivität wurde durch Natriumsilikat-Maske erzeugt. Strukturabstand 400 µm.

Alle Mäander sind leitfähig und frei von Kurzschlüssen. Auf komplexeren 3D-Bauteilen war eine derartige Selektivität der Metallschabeidung leider bislang nicht erfolgreich.

5.1.6. Elektrische Leitfähigkeit der Funktionsstrukturen

Der elektrische Widerstand R eines realen Leiters wird von geometrischen und materialspezifischen Größen bestimmt. Er setzt sich aus dem spezifischen Widerstand ϱ_{sp} sowie der Querschnittsfläche A und der Länge l des Leiters nach Formel 5.1 zusammen:

$$R = \rho_{sp} \cdot \frac{l}{A} = \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{l}{A}.$$

Formel 5.1: elektrischer Widerstand R (spezifischer Widerstand ρ_{sp}, Querschnittsfläche A, Länge l, elektrische Leitfähigkeit κ).

Der spezifische Widerstand (kurz für spezifischer elektrischer Widerstand oder auch Resistivität) ist eine temperaturabhängige Materialkonstante und der Kehrwert der elektrischen Leitfähigkeit κ. Verglichen bei Raumtemperatur besitzt Kupfer nach Graphen und Silber die drittgrößte elektrische Leitfähigkeit. Die spezifische Leitfähigkeit von chemisch abgeschiedenem Kupfer beträgt mit 37.7±19.4 m/Ωmm² nur etwa 60 % derer von Reinkupfer [283][5]. Die große Streuung der Leitfähigkeit ist der Rauheit des Substrats geschuldet und infolge dessen der Rauheit der Metallschicht, die statistisch zu Querschnittsverengungen führt. Die Schichtdicke der elektrisch leitenden Strukturen ist prozesstechnisch durch die chemische Abscheidung begrenzt und variiert aufgrund der Oberflächenstruktur. Der Widerstand der erzeugten Strukturen ist daher nur über deren Breite einstellbar und wird hier bezogen auf die Leiterbahnlänge für eine feste Leiterbahnbreite (100 µm) angegeben. Die Widerstände wurden mittels Vier-Leiter-Messung an den im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Mäanderstrukturen auf der Kupferschicht gemessen, also vor der Abscheidung von Nickel und Gold. Die Abscheidedauer im Kupferbad betrug 90 min. Die Werte der Widerstandsmessung und die daraus errechneten längenspezifischen Widerstände sind in Tabelle 5.2 aufgeführt.

Tabelle 5.2: Ergebnisse der Widerstandsmessung und errechneter längenspezifischer Widerstand.

Laserparametersatz	Mäanderlänge	Widerstand	Längenspezifischer Widerstand
#18	200 mm	4.7 Ω	0.024 Ω/mm
	300 mm	6.6 Ω	0.022 Ω/mm
#41	200 mm	14.2 Ω	0.071 Ω/mm
	300 mm	20.7 Ω	0.069 Ω/mm

Daraus resultiert für den Laserparametersatz #18 ein Widerstand von etwa 0.023 Ω pro Millimeter Leiterbahnlänge und für den Laserparametersatz

#41 ein Widerstand von etwa 0.07 Ω pro Millimeter Leiterbahnlänge. Die Leitfähigkeit liegt damit für Parameter #18 um etwa den Faktor drei höher. Da die S_a-Werte der Bauteiloberfläche mit 2.69 µm und 2.62 µm nahezu identisch sind, ist der Einfluss der Rauheit auf die Leiterbahnbreite hier in beiden Fällen in etwa gleich. Geht man also in beiden Fällen von einer Leiterbahnbreite von 100 µm und von einer spezifischen Leitfähigkeit von 37.7 m/Ωmm² aus, kann man über Formel 5.1 und den geometrischen Zusammenhang $A = b \cdot d$ auf eine idealisierte Kupferschichtdicke d_{Cu} zurückrechnen.

$$R = \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{l}{A} = \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{l}{b \cdot d_{Cu}}$$

$$\Leftrightarrow d_{Cu} = \frac{l}{\kappa \cdot b \cdot R}$$

Formel 5.2: idealisierte Kupferschichtdicke d_{Cu} (elektrischer Widerstand R, Querschnittsfläche A, Breite b, Länge l, elektrische Leitfähigkeit κ).

Mit den zuvor bestimmten R/l-Werten ergibt sich für die Parametersätze #18 und #41 eine idealisierte Schichtdicke von 11.5 µm respektive 3.8 µm. Die mittels RFA gemessenen Werte für diese Felder lagen bei 8.98 µm und 5.73 µm. Die Widerstandsmessung bestätigt damit die RFA als Methode, eine Tendenz der Schichtdicken relativ zueinander anzugeben.

Der für den Laserparameter #18 ermittelte längenspezifische Widerstand von 0.023 Ω/mm liegt bei einem Fünftel der Leiterbahnbreite in etwa so hoch wie das Ergebnis von Amend et al. [153], die auf SLA-Bauteilen über das ADDIMID-Verfahren Kupfer abgeschieden haben und bei einer 500 µm breiten und 15 mm langen Leiterbahn von einem Widerstand von einem Ohm berichten, also einem längenspezifischen Widerstand von 0.067 Ω/mm. Balzereit et al. [161] scheiden Kupfer auf SLS-Bauteilen ab und ermitteln den Widerstand auf einer Fläche zwischen zwei Messspitzen im Abstand von 2 mm. Die Leiterbahnbreite ist damit größer als die Länge und kann so als unendlich angenommen werden. Sie berichten von einem

Widerstand von 0.3 Ohm, was einem längenspezifischen Widerstand von 0.15 Ω/mm entspricht.

5.2. TRANSFERIERBARKEIT AUF ANDERE AM-VERFAHREN

Um die Anwendbarkeit des SANCHO-Verfahrens auf unterschiedliche AM-Verfahren und –Materialien nachzuweisen, wurden neben dem Digital Light Processing Untersuchungen an vier weiteren Verfahren durchgeführt. Diese sollen nur die prinzipielle Machbarkeit zeigen und stellen im Gegensatz zu den bisherigen Untersuchungen keine Prozessentwicklung dar. Bei den AM-Verfahren wurde der Fokus auf eine große Bandbreite unterschiedlicher Oberflächen gelegt. Auf der Materialseite kommen Duroplaste in Form von Photopolymeren und Thermoplaste in Form von Pulvern zum Einsatz. Es wurde dabei explizit nicht darauf geachtet, ob sich die Materialien aufgrund ihrer thermomechanischen Eigenschaften gut für den Aufbau mechatronischer Bauteile eignen, sondern eher ein gängiges Material für das jeweilige Verfahren gewählt. Die einzelnen Verfahren und Materialien werden in den folgenden Abschnitten erläutert. Abb. 5.12 gibt vorab mittels REM-Aufnahmen einen Einblick in die Oberflächenstruktur von Bauteilen für die untersuchten Verfahren. Bildteil a zeigt ein Stereolithographie-Bauteil, also ein duroplastisches Bauteil, das aus einer ruhenden Flüssigkeit entsteht. Bildteil b zeigt ein PolyJet-Bauteil, das tropfenweise ebenfalls aus einem Duroplast aufgebaut wird. In beiden Fällen ist eine glatte Oberfläche zu erkennen. Bildteil c zeigt ein Lasersinter-Bauteil, das aus einem Thermoplastpulver gesintert wurde. Bildteil d zeigt ein Multi Jet Fusion-Bauteil, das ebenfalls aus einem Thermoplastpulver gesintert wurde. Beide zeigen eine raue und zerklüftete Oberfläche, wobei im Bildteil d eine deutlich geschlossenere Oberfläche zu erkennen ist.

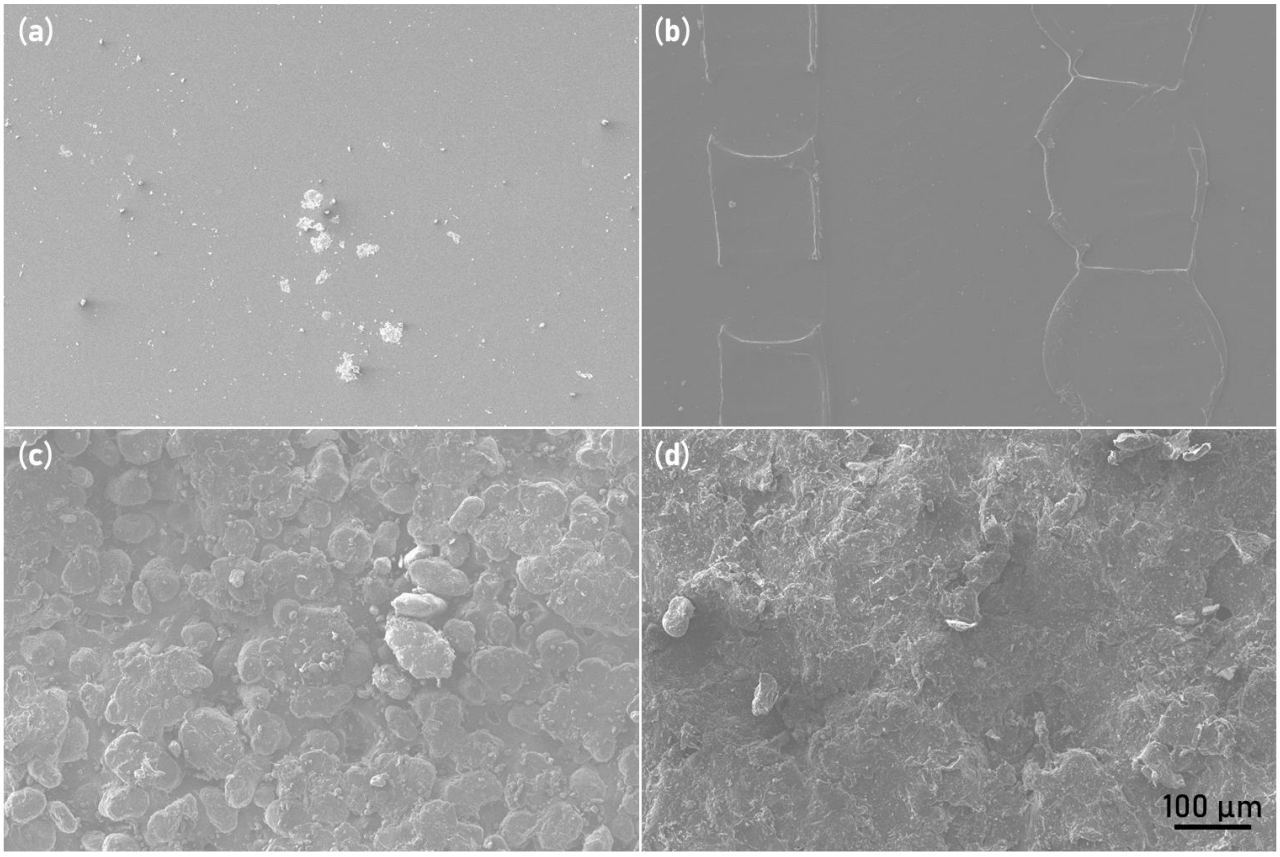
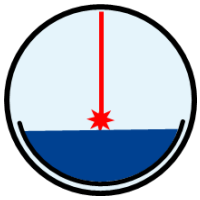


Abb. 5.12: REM-Aufnahmen von Bauteilen der hier untersuchten AM-Verfahren. (a) Stereolithographie; (b) PolyJet; (c) Selektives Lasersintern; (d) HP Multi Jet Fusion.

Um den Aufwand für die Untersuchungen einzugrenzen, wurden die Einzelprozesse im Vergleich zum Digital Light Processing weniger ausführlich betrachtet. Die Maskierung wurde je nach Oberfläche mit Negativlack in zwei unterschiedlichen Verdünnungsstufen (50 und 70 m% PGMEA) aufgetragen. Für jedes Material wurde eine Laserparameterstudie durchgeführt. Um alle Bauteile möglichst parallel bearbeiten zu können, wurde die Studie auf den Grün-Laser beschränkt. Es wurden über eine Sichtprüfung mittels Stereomikroskop zwei Parametersätze ausgewählt und 2D- sowie 3D-Bauteile analog zu den in Abschnitt 5.1 vorgestellten Bauteilen aufgebaut (vgl. auch Abb. A.18 und Abb. A.19 in Anhang C). Die nasschemischen Prozesse wurden mit den in Abschnitt 4.4.1 bis 4.4.3 vorgestellten Parametern durchgeführt. Anhand der MKS wurde die Selektivität der Metallabscheidung beurteilt und die längenspezifische Leitfähigkeit ermittelt. Zudem wurden jeweils acht

Haftfestigkeitsmessungen mittels HBPT durchgeführt. In den folgenden Abschnitten wird zunächst das jeweilige AM-Verfahren und Material kurz vorgestellt und die Ergebnisse der Haftfestigkeits- und Widerstandsmessungen aufgeführt. Zusätzlich geben Photographien der Bauteile einen Einblick in die Qualität der Metallabscheidung.

5.2.1. STEREOLITHOGRAPHIE – ACCURAXTREME



Die Stereolithographie (SLA) ist das älteste additive Fertigungsverfahren und wie das DLP ein Verfahren der AM-Klasse wannenbasierte Photopolymerisation. Entsprechend ist das eingesetzte Material Accura Xtreme (3D Systems, Rock Hill) duroplastisch, im Gegensatz zu PLASTCure Rigid 10500 jedoch ungefüllt. Der Energieeintrag zur Vernetzung des Materials findet mittels ultravioletter Laserstrahlung statt. Bauteile, die mittels Stereolithographie aufgebaut wurden, haben typischerweise eine vergleichsweise glatte Oberfläche. Eine Ausnahme bilden hier Oberflächen, die während des Aufbaus auf Stützstrukturen angewiesen sind. Diese haben eine narbige Struktur vom Ausbrechen der Stützen. Solche Oberflächen werden häufig durch einen Schleif- oder Strahlprozess eingeebnet und weisen dann eine entsprechende Oberfläche auf. Um ein homogenes Erscheinungsbild zu erreichen, führen Fertigungsdienstleister die Nachbearbeitung häufig direkt auf allen Oberflächen durch. Aufgrund der eher glatten Oberflächen wurden die SLA-Bauteile mit dem stärker verdünnten Negativlack (70 m% PGMEA) maskiert. Aus der Laserstudie (Abb. 5.13 a) wurden die Parametersätze #28 und #41 gewählt. Der Parametersatz #41 führte jedoch nicht zu durchgehend leitfähigen Strukturen, weswegen hier das Ergebnis des Parametersatzes #28 vorgestellt wird. Die Haftfestigkeitsmessungen ergeben mit durchschnittlich 4.74 N/mm² einen eher niedrigen Wert. Die abgeschiedenen Mäander-Kamm-Strukturen sind jedoch alle leitfähig und

frei von Kurzschlüssen bei einem längenspezifischen Widerstand von etwa 0.077 Ω/mm (Tabelle 5.3).

Tabelle 5.3: Haftfestigkeit und Widerstand auf SLA-Bauteilen.

Laserparametersatz	Haftfestigkeit	Widerstand	längenspez. Widerstand
#28	4.74 N/mm²	15.5 Ω (200 mm)	0.078 Ω/mm
		22.9 Ω (300 mm)	0.076 Ω/mm
#41	5.32 N/mm²	-	-
		-	-

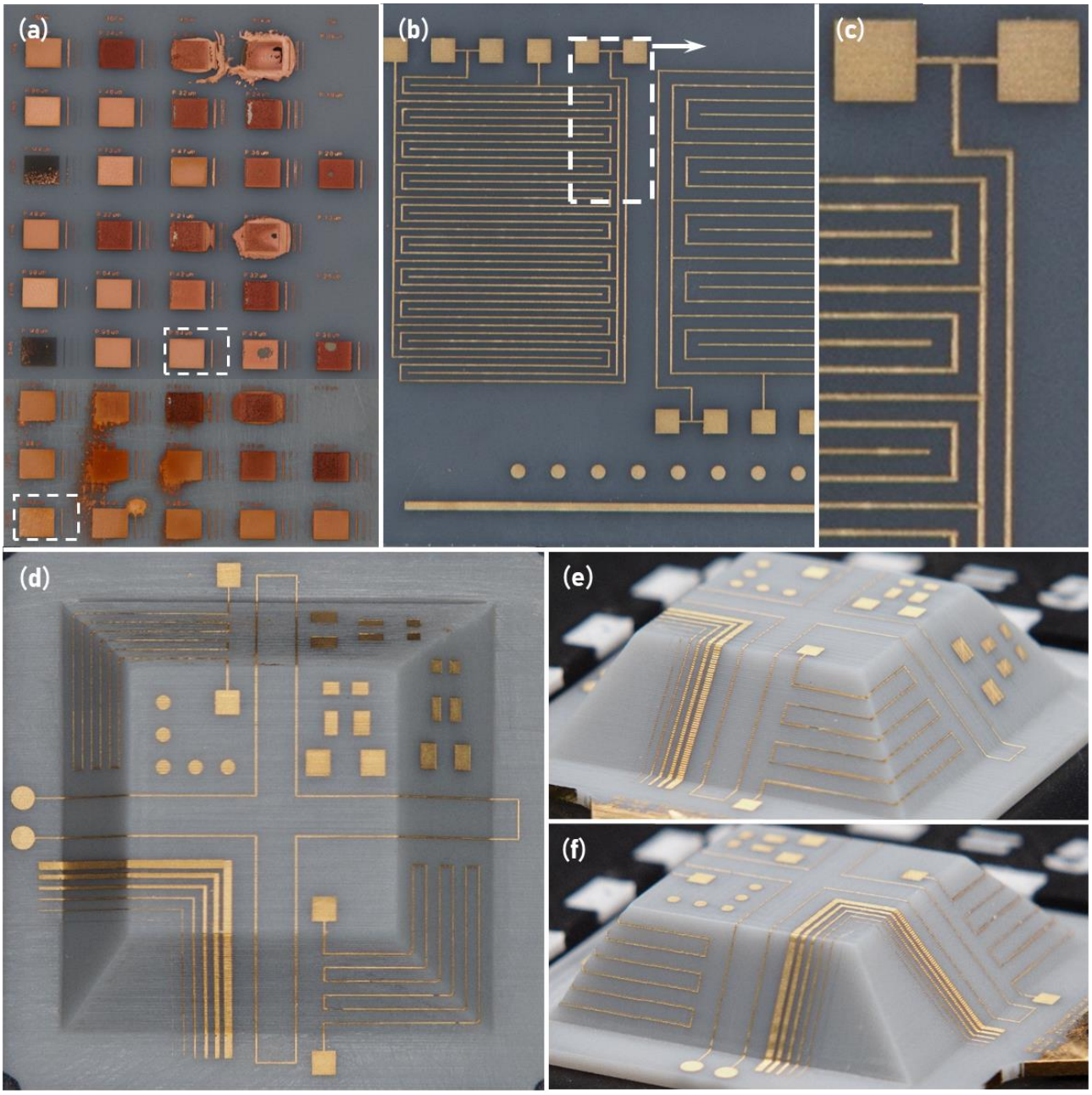


Abb. 5.13: SLA-Bauteile: (a) Laserstudie; (b & c) Platte; (d) Draufsicht der Pyramide; (e, f) Flanken der Pyramide. Laserparametersatz #28. Größe der quadratischen Lötpads: 1.5 mm.

Auf den Aufnahmen in Abb. 5.13 ist eine gute, selektive Metallabscheidung zu erkennen. Die Strukturen sind frei von Unterbrechungen und auf den Bauteilen befindet sich praktisch keine Fremdabscheidung.

5.2.2. PolyJet – Vero White Plus

Das PolyJet-Verfahren der Firma Stratasys zählt zu der AM-Klasse des Freistrahl-Materialauftrags. Mittels InkJet-Technologie wird dabei ein Photopolymer in Form sehr feiner Tropfen auf eine Bauplattform aufgebracht und von einer UV-Lampe vernetzt. Das eingesetzte Material Verowhite Plus (Stratasys Ltd., Rehovot) ist duroplastisch, weiß eingefärbt, dabei jedoch transluzent. Durch die geringen Volumina der Tropfen im Bereich einiger Pikoliter sind eine sehr hohe Auflösung und mitunter die glattesten Oberflächen im AM-Bereich erreichbar. Gleichzeitig verhindert dies jedoch auch den Einsatz von Füllstoffen, was die thermomechanischen Eigenschaften der Materialien begrenzt. Wie in Abschnitt 2.1.4 erwähnt, kann über einen zweiten Druckkopf Wachs als Stützmaterial verdruckt werden, was eine glatte und ganzflächige Unterstützung überhängender Flächen ermöglicht, sodass auch hier sehr gleichmäßige Oberflächen aufgebaut werden. Eine Nachbehandlung der Oberflächen ist nicht nötig, nachdem das Wachs thermisch von der Oberfläche gelöst wurde.

Aufgrund der glatten Oberflächen wurden die PolyJet-Bauteile mit dem stärker verdünnten Negativlack (70 m% PGMEA) maskiert. Auf den 3D-Bauteilen führte dies an den Flanken jedoch zu einer ganzflächigen Metallabscheidung, weswegen diese Bauteile erneut aufgebaut und zweifach mit dem weniger verdünnten Negativlack (50 m% PGMEA) maskiert wurden. Aus der Laserstudie (Abb. 5.14 a) wurden die Parametersätze #27 und #37 gewählt. Die Haftfestigkeitsmessungen ergeben für den Parametersatz #37 mit durchschnittlich 9.67 N/mm² einen akzeptablen Wert. Die abgeschiedenen Mäander-Kamm-Strukturen sind

alle leitfähig und frei von Kurzschlüssen bei einem längenspezifischen Widerstand von etwa 0.06 Ω/mm (Tabelle 5.4).

Tabelle 5.4: Haftfestigkeit und Widerstand auf PolyJet-Bauteilen.

Laserparametersatz	Haftfestigkeit	Widerstand	längenspez. Widerstand
#27	6.1 N/mm²	10.6 Ω (200 mm)	0.053 Ω/mm
		13.5 Ω (300 mm)	0.045 Ω/mm
#37	9.67 N/mm²	12.1 Ω (200 mm)	0.061 Ω/mm
		18.0 Ω (300 mm)	0.060 Ω/mm

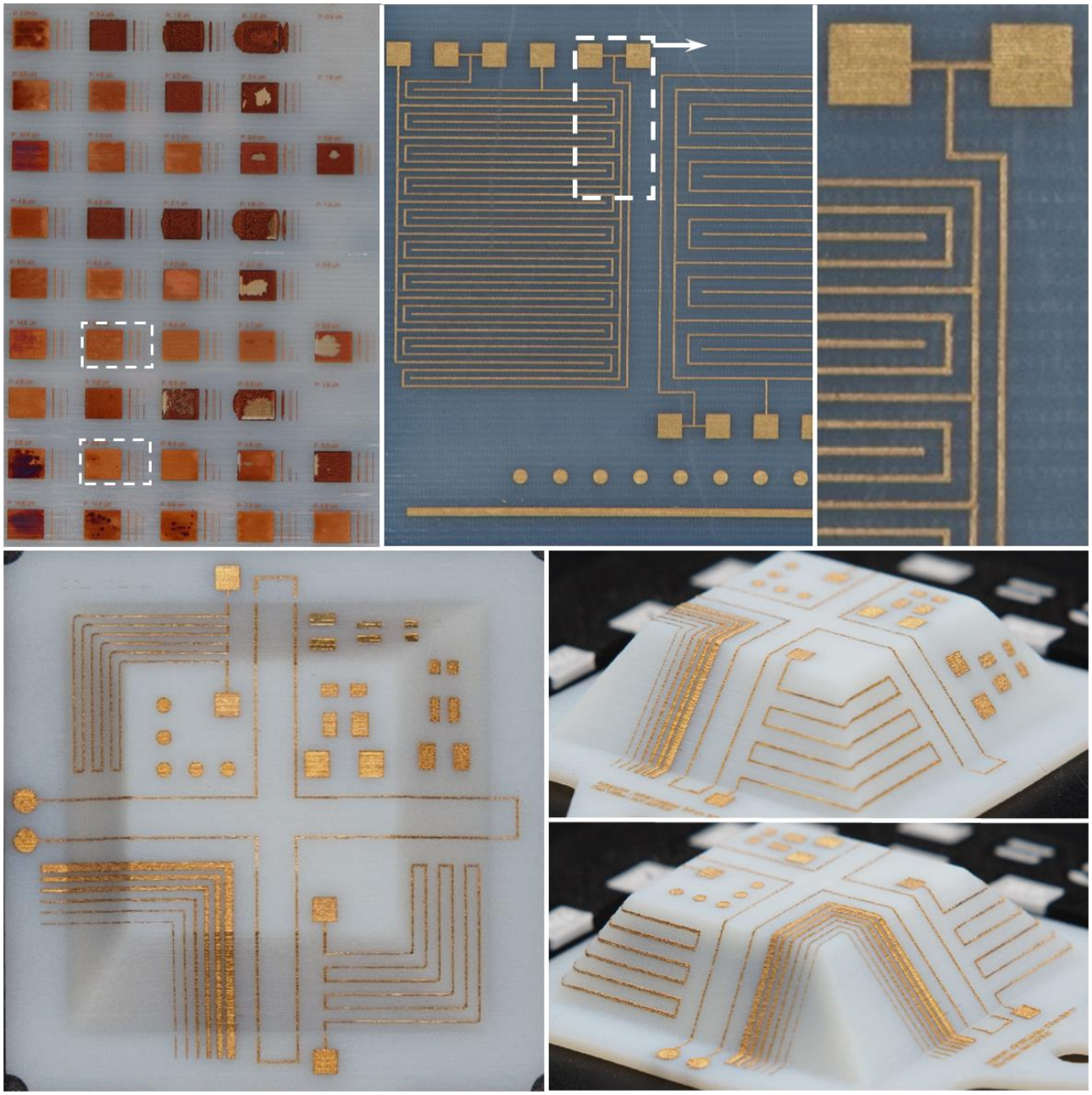
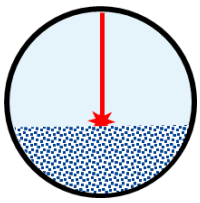


Abb. 5.14: PolyJet-Bauteile: (a) Laserstudie; (b & c) Platte; (d) Draufsicht der Pyramide; (e, f) Flanken der Pyramide. Laserparametersatz #37. Größe der quadratischen Lötpads: 1.5 mm.

Auf den Aufnahmen der Platten in Abb. 5.13 b und c ist eine gute, selektive Metallabscheidung zu erkennen. Die Strukturen sind frei von Unterbrechungen, und auf den Bauteilen befindet sich praktisch keine Fremdabscheidung.

5.2.3. SELEKTIVES LASERSINTERN – PA12 (WEIß)



Das selektive Lasersintern (SLS) ist ein Verfahren aus der AM-Klasse des pulverbettbasierten Schmelzens. Der Energieeintrag zum Sintern der Pulverpartikel erfolgt mittels Laserstrahlung. Das verwendete Pulver PA 2200 Performance 1.0 (EOS GmbH, Krailling) basiert auf dem Werkstoff Polyamid 12 und ist weiß. Das SLS-Verfahren ist im Polymerbereich ein von der Industrie gerne genutztes Verfahren. Da durch den Aufbau im Pulverbett die Bauteile automatisch durch das ungesinterte Pulver gestützt werden, können Bauteile frei im Bauraum platziert und so eine hohe Auslastung der Anlagen erreicht werden. Entsprechend entfällt auch der Schritt des Entstützens der Bauteile. Dennoch unterscheidet sich die Bauteiloberfläche, je nachdem, ob sie im Bauraum eher aufwärts (glatter) oder abwärts (unregelmäßig/rau) ausgerichtet war. Generell gilt jedoch für alle Oberflächen, dass sie durch angesinterte Pulverpartikel gebildet werden und entsprechend rau und offenporös sind. SLS-Bauteile werden häufig durch Gleitschleif-, Kugelstrahl- oder Sandstrahlprozesse nachbearbeitet, um die Oberfläche zu glätten bzw. zu verdichten.

Aufgrund der Oberflächenstruktur wurden die SLS-Bauteile mit dem geringer verdünnten Negativlack (50 m% PGMEA) maskiert. Aus der Laserstudie (Abb. 5.15 a) wurden die Parametersätze #21 und #27 gewählt. Beide Parametersätze führten jedoch nicht zu durchgehend leitfähigen Strukturen. Die Haftfestigkeitsmessungen ergeben für den Parametersatz #21 mit durchschnittlich 17.56 N/mm² einen guten Wert (Tabelle 5.5). Auf den Aufnahmen in Abb. 5.15 ist auf dem 2D-Bauteil (b und c) praktisch

keine Fremdabscheidung zu erkennen. Der Lack bedeckt also die Oberfläche trotz der offenporösen Struktur dicht genug.

Tabelle 5.5: Haftfestigkeit und Widerstand auf SLS-Bauteilen.

Laserparametersatz	Haftfestigkeit	Widerstand	längenspez. Widerstand
#21	17.56 N/mm²	-	-
		-	-
#27	13.64 N/mm²	-	-
		-	-

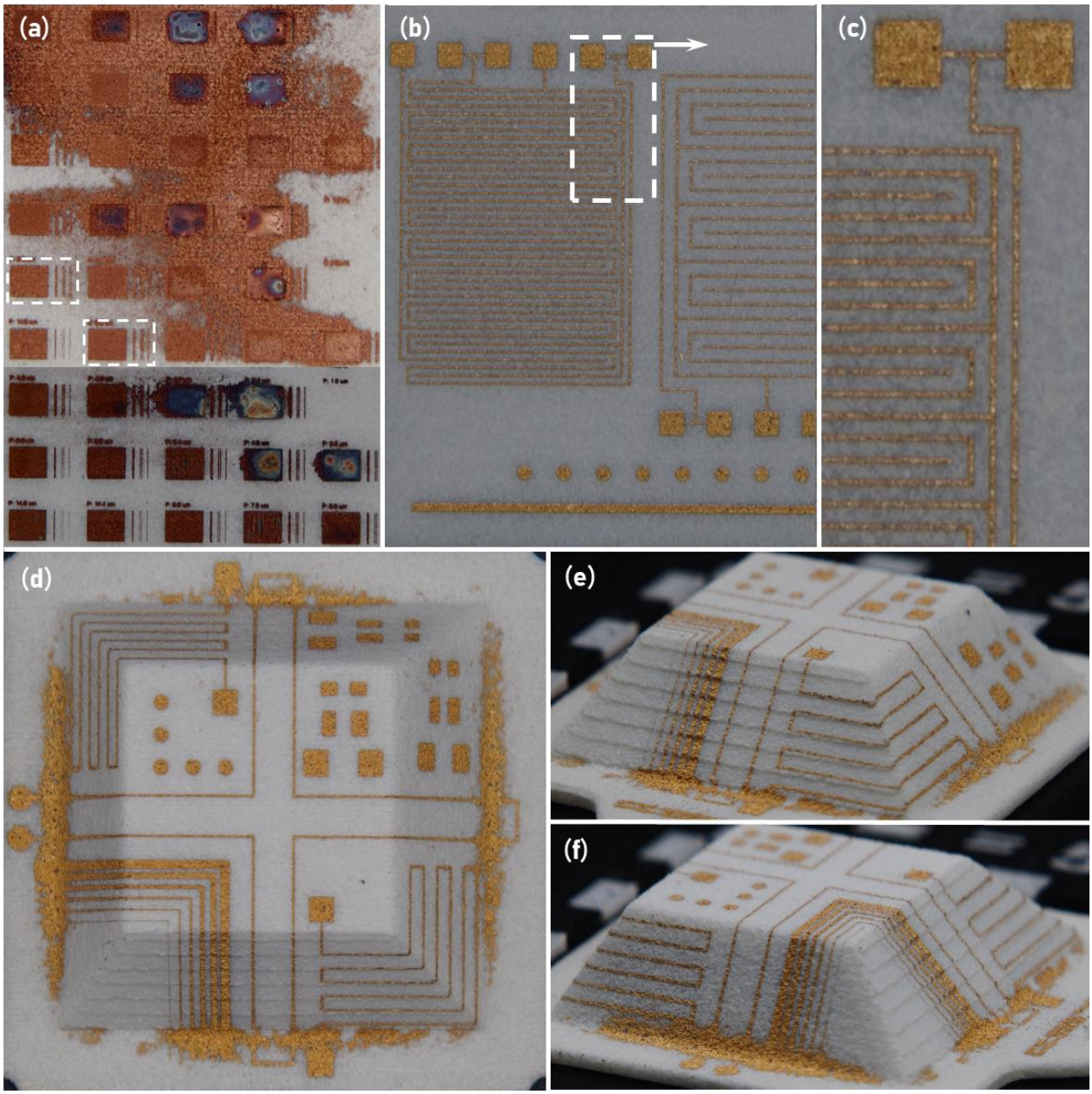


Abb. 5.15: SLS-Bauteile: (a) Laserstudie; (b & c) Platte; (d) Draufsicht der Pyramide; (e, f) Flanken der Pyramide. Laserparametersatz #21. Größe der quadratischen Lötpads: 1.5 mm.

Da die Strukturen nicht leitfähig sind, sind sie jedoch offensichtlich nicht frei von Unterbrechungen. Auf dem 3D-Bauteil (d-f) sieht man Fremdabscheidung in den konkaven Kanten am Fuß des Pyramidenstupfs. Die übrigen Oberflächen, auch die durch den Stufeneffekt eher unregelmäßigen Flanken, weisen jedoch keine Fremdabscheidung auf. Wie erwähnt wurde, werden Bauteile, die mit dem SLS-Verfahren hergestellt wurden, aufgrund ihrer Oberflächeneigenschaften und deren Haptik häufig gleitgeschliffen oder sandgestrahlt. Daher wurden zusätzlich gleitgeschliffene Bauteile untersucht. Diesen wurden ebenfalls mit dem geringer verdünnten Negativlack (50 m% PGMEA) maskiert. Bei der Laserbearbeitung wurden die gleichen Parametersätze verwendet, jedoch die Anzahl der Überfahrten auf drei Überfahrten im Falle des 2D-Bauteils, und neun Überfahrten im Falle des 3D-Bauteils erhöht. Dadurch ergab sich für Parametersatz #27 auf der kurzen MKS ein leitfähiger Pfad mit einem längenspezifischen Widerstand von etwa 0.018 Ω/mm. Zudem konnte die Selektivität der Metallabscheidung auf den 3D-Bauteilen deutlich erhöht werden (Abb. 5.16). Fehlstellen ergaben sich lediglich in den Bereichen, in denen sich zwei Layouts der Laserbearbeitung überlappen. Da dort in Summe 18 Überfahrten erreicht wurden kam es zu sehr tiefem Abtrag und an wenigen Stellen auch zu einer Beeinträchtigung des Lacks (Abb. 5.16 c). Wahrscheinlich könnte die Anzahl an Überfahrten jedoch auch deutlich reduziert werden, ohne ein schlechteres Ergebnis in Bezug auf die Leitfähigkeit zu erzielen.

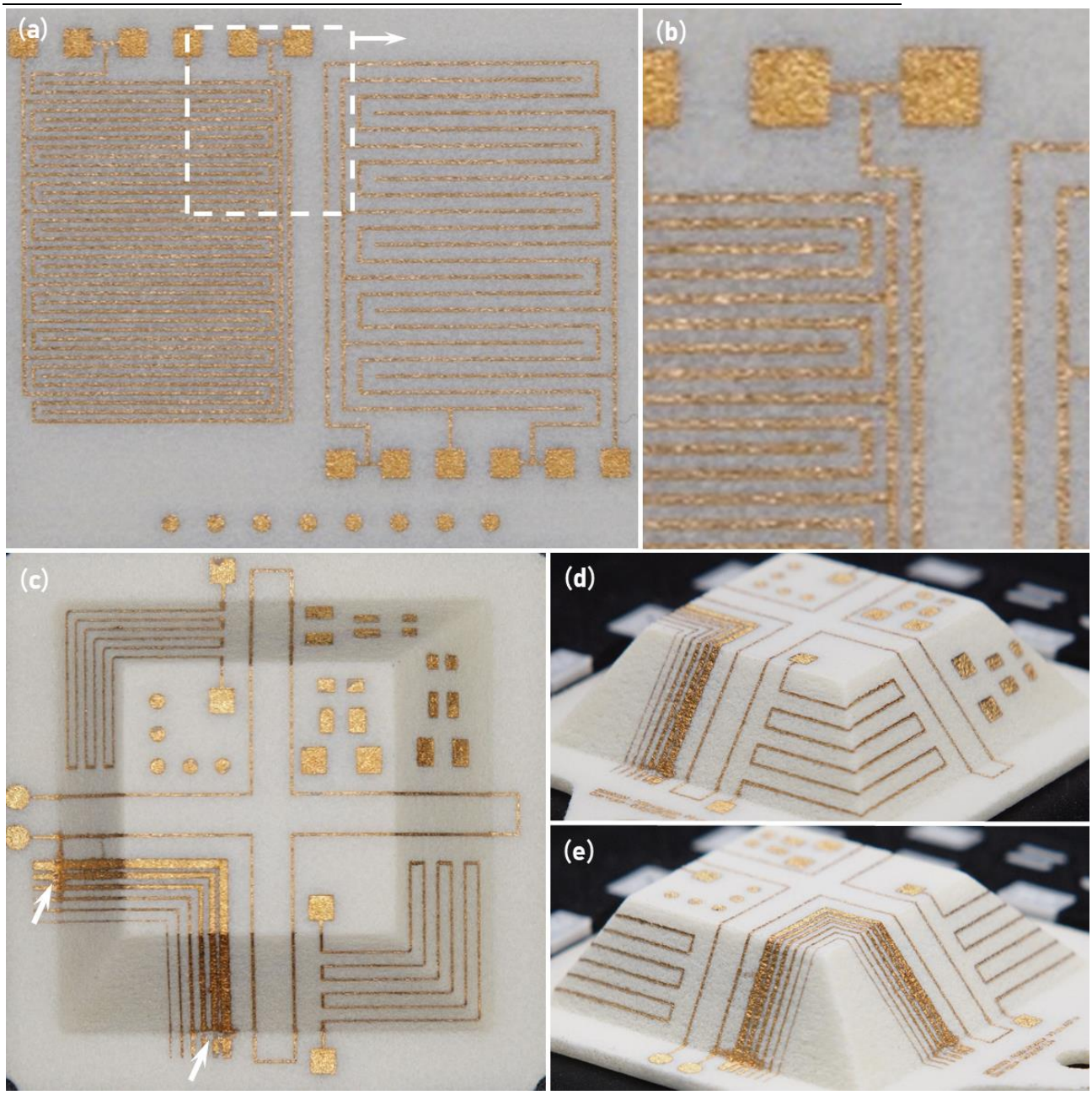
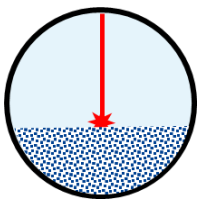


Abb. 5.16: gleitgeschliffene SLS-Bauteile: (a & b) Platte; (c) Draufsicht der Pyramide; (d, e) Flanken der Pyramide. Laserparametersatz #27. Größe der quadratischen Lötpads: 1.5 mm.

5.2.4. HP MUTI JET FUSION – PA12 (GRAU)



Das Multi Jet Fusion-Verfahren (MJF) der Firma HP ist wie das SLS ebenfalls ein Verfahren aus der AM-Klasse des pulverbettbasierten Schmelzens. Der Energieeintrag zum Sintern der Pulverpartikel geschieht hier jedoch flächig durch eine Heizlampe. Die Selektivität des Sinterns wird durch das Drucken zweier Tinten mittels InkJet realisiert. Die erste Tinte („Fusing Agent“) wird in die Bereiche gedruckt, die das spätere Bauteil

bilden. Sie nimmt die Wärmestrahlung der Lampe auf und reagiert mit dem Pulver, so dass die Partikel zusammensintern. Die zweite Tinte („Detailing Agent“) wird in die Bereiche des Pulverbetts gedruckt, die nicht sintern sollen. Diese Tinte dissipiert die auf sie eingestrahlte Energie. Durch die hohe Auflösung des InkJet-Verfahrens kann eine höhere Detailtreue erreicht werden, als bei SLS-Prozessen. Das verwendete Pulver HP 3D High Reusability PA 12 (HP) basiert auf dem Werkstoff Polyamid 12 und wirkt auf das Auge grau. Tatsächlich besteht es aus einem Gemisch aus weiß und schwarz eingefärbten Partikeln. Die Aussagen aus dem vorangegangen Abschnitt bezüglich Stützung der Bauteile durch das Pulverbett, die Oberflächen und die Nachbearbeitung treffen auch auf das MJF zu. Tendenziell sind die Oberflächen jedoch etwas dichter.

Aufgrund der Oberflächenstruktur wurden die MJF-Bauteile mit dem geringer verdünnten Negativlack (50 m% PGMEA) maskiert. Aus der Laserstudie (Abb. 5.17 a) wurden die Parametersätze #6 und #22 gewählt. Parametersatz #6 führte jedoch nicht zu durchgehend leitfähigen Strukturen, weswegen hier insbesondere Parametersatz #22 betrachtet wird. Die Haftfestigkeitsmessungen ergeben für den Parametersatz #22 mit durchschnittlich 12.84 N/mm² einen annehmbaren Wert. Die abgeschiedenen Mäander-Kamm-Strukturen sind alle leitfähig und frei von Kurzschlüssen, bei einem längenspezifischen Widerstand von etwa 0.03 Ω/mm (Tabelle 5.6).

Tabelle 5.6: Haftfestigkeit und Widerstand auf MJF-Bauteilen.

Laserparametersatz	Haftfestigkeit	Widerstand	längenspez. Widerstand
#6	14.55 N/mm²	-	-
		-	-
#22	12.84 N/mm²	5.8 Ω (200 mm)	0.029 Ω/mm
		9.1 Ω (300 mm)	0.030 Ω/mm

Auf den Aufnahmen in Abb. 5.17 ist weder auf dem 2D-Bauteil (b und c) noch auf dem 3D-Bauteil (d-f) Fremdabscheidung zu erkennen. Das war

auch für die mit dem Parametersatz #6 bearbeiteten Bauteile der Fall. Die Lackmaske scheint daher aufgrund der etwas dichteren Struktur gleichmäßiger aufzuziehen, als im Falle des selektiven Lasersinterns.

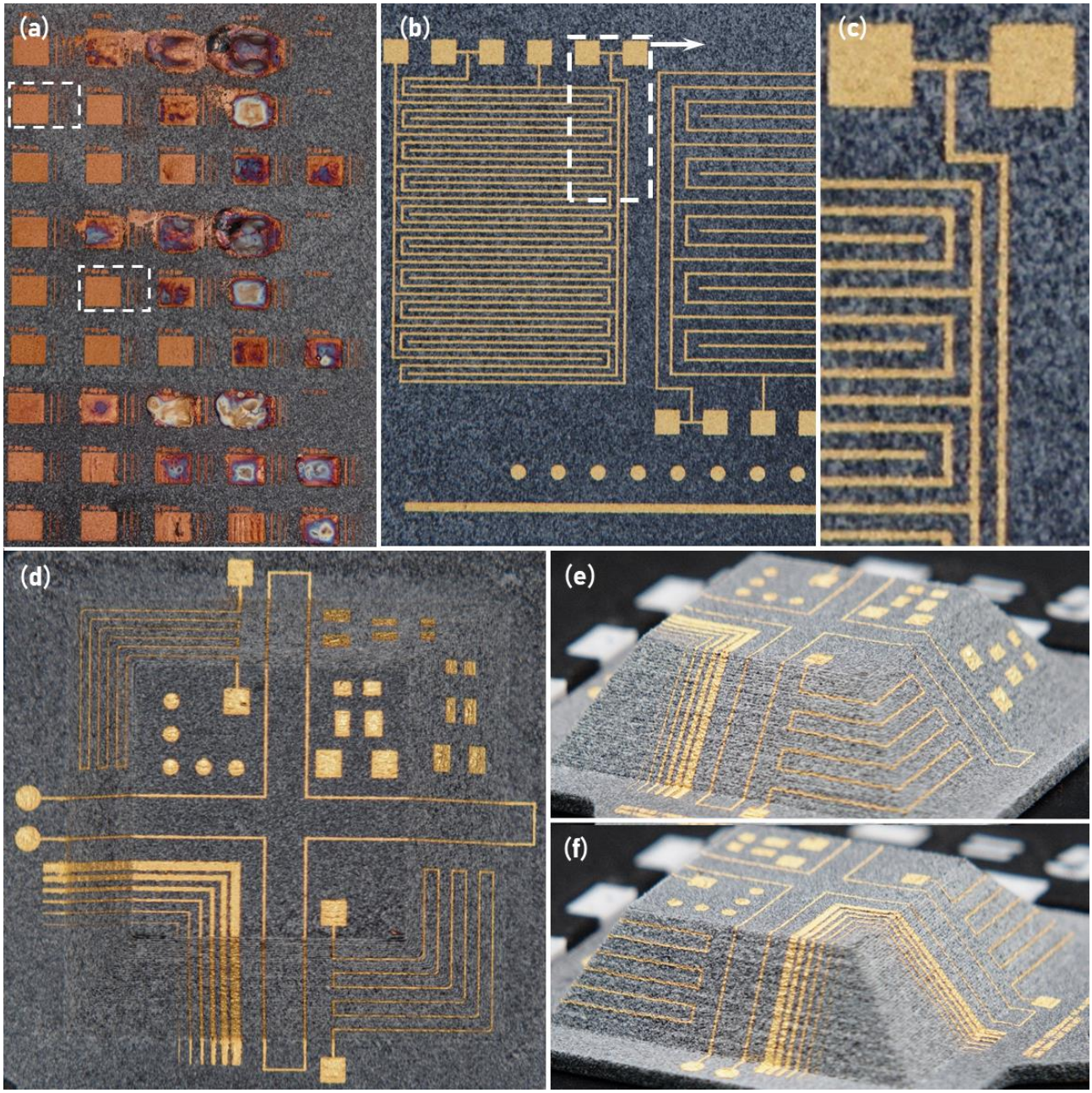


Abb. 5.17: MJF-Bauteile: (a) Laserstudie; (b & c) Platte; (d) Draufsicht der Pyramide; (e, f) Flanken der Pyramide. Laserparametersatz #22. Größe der quadratischen Lötpads: 1.5 mm.

6. DISKUSSION DER ERGEBNISSE

Das in dieser Arbeit vorgestellte SANCHO-Verfahren ist das erste Verfahren, das für eine mechatronische Funktionalisierung direkt auf AM-Bauteilen entwickelt und auf einer großen Bandbreite an Bauteiloberflächen validiert wurde. In Kapitel 4 und 5 wurde das Verfahren vorgestellt und charakterisiert. Die Ergebnisse zu den einzelnen Prozessschritten sollen in den folgenden Abschnitten noch einmal aufgegriffen und eingeordnet werden.

6.1. ADDITIVE FERTIGUNG

Den ersten Prozessschritt stellt die Fertigung des Bauteils dar. Zur Erarbeitung des Verfahrens wurden als Modellprozess der additiven Fertigung das Digital Light Processing und als Modellwerkstoff PLASTCure Rigid 10500 gewählt. Die Wahl fiel auf das Verfahren, da damit glasgefüllte Duroplaste verarbeitet werden können. Derartige Materialien weisen positive Eigenschaften in Bezug auf Wärmeausdehnungskoeffizient und Medienbeständigkeit auf und sind daher für den Einsatz im SANCHO-Verfahren gut geeignet. Bei der Reinigung der Oberfläche mit Kalilauge kann durch das Befreien der Glaskugeln aus der Matrix eine Oberflächenstruktur erzeugt werden, auf der die Metallschicht gut anhaftet. Dies führt zu einer hervorragenden Haftfestigkeit (vgl. Abschnitt 6.5).

Wie eingangs beschrieben, sind die Oberflächen additiv gefertigter Bauteile prozessbedingt häufig rau und weisen, je nach Orientierung im Bauraum, Merkmale des schichtweisen Aufbauprinzips auf. Insbesondere die an geneigten oder gekrümmten Oberflächen entstehenden „Treppenstufen“

können zu Fehlerbildern in der Metallabscheidung führen. Einerseits zeigte sich an einigen Bauteilen Fremdabscheidung entlang der Stufen. Die Maskierung ist durch Benetzungs- und Kapillareffekte bestrebt, sich von konvexen Kanten zu lösen und in konkaven Kanten zu sammeln (Abb. 6.1 a). Dadurch sind die konvexen Kanten nicht mehr vor der Anlagerung von Aktivatoren geschützt und eine Metallabscheidung kann ungewollt stattfinden. Andererseits kommt es durch die Stufen zu einer Abschattung des Laserstrahls, was Unterbrechungen in der Metallschicht zur Folge hat. Für das hier verwendete 3D-Bauteil wurde die Laserbearbeitung ausschließlich aus einer Richtung durchgeführt, und zwar senkrecht von oben. Bei starker Stufenbildung am Bauteil kann es jedoch schnell zu Unterbrechungen in den Metallstrukturen kommen, da der Laser die Oberfläche, aufgrund ihrer lokal stark schwankende Ausrichtung, nicht überall erreicht (Abb. 6.1 b). Bei LDS MID gilt die Daumenregel, dass eine Oberfläche nicht mehr als 60° geneigt sein sollte, damit der von oben einstrahlende Laser die Oberfläche zuverlässig strukturieren kann. Durch den schichtweisen Aufbau wird die Originalkontur jedoch durch waagrechte und senkrechte Anteile angenähert, sodass sich die Oberfläche teilweise selbst verschattet. Da genau dort, wo der Laserstrahl die Oberfläche schlecht erreicht, zusätzlich eine Anhäufung von Maskierungsmaterial vorliegen kann, liegt die Oberfläche nach der Laserbearbeitung hier nicht frei und eine Aktivierung kann nicht stattfinden.

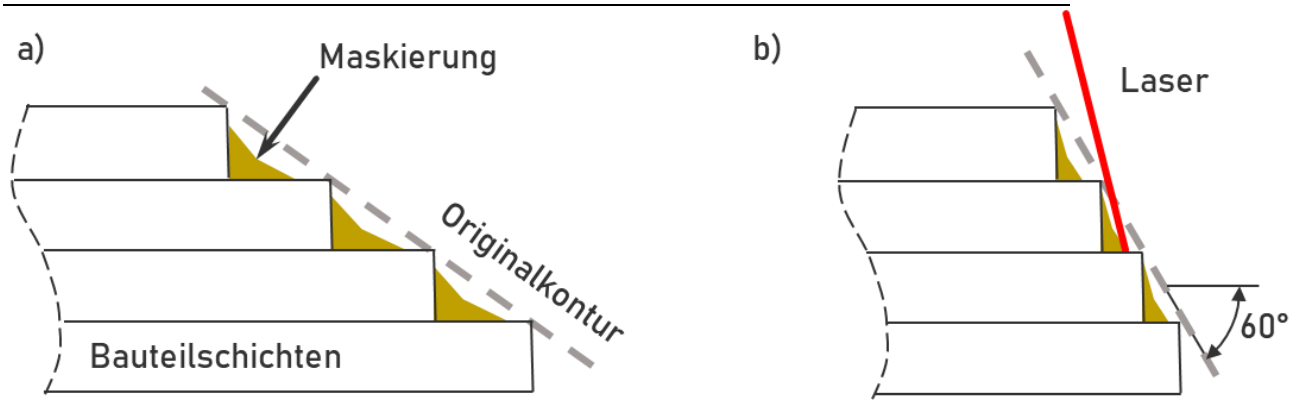


Abb. 6.1: Auswirkung des Stufeneffekts auf (a) die Maskierung und (b) die Laserbearbeitung.

Diesen Fehlerbildern kann jedoch auf verschiedene Arten entgegengewirkt werden. Gegebenenfalls kann bereits eine andere Orientierung des Bauteils im Bauraum der additiven Fertigungsanlage zu einer Verbesserung der kritischen Oberflächenbereiche führen. Zwangsläufig werden dadurch jedoch andere Bereiche des Bauteils eine schlechtere Oberfläche aufweisen. Ist dies nicht zulässig, können durch einen Nachbearbeitungsschritt, wie z.B. Gleitschleifen, die Kanten der Stufen gebrochen werden. Ist auch dies nicht zulässig, kann durch die Verwendung einer höherviskosen Lackmischung die Beweglichkeit des Lacks verringert werden, wodurch die Kantenentnetzung reduziert werden sollte. Die Selbstverschattung an den Stufen kann gleichzeitig durch eine andere Orientierung des Bauteils bei der Laserbearbeitung umgangen werden. Die vorgestellten Lösungswege können vermutlich einen Großteil der realen Bauteile abdecken.

6.2. MASKIERUNG

Erst vor Kurzem (Juni 2023) berichteten Wu et al., dass die Oberflächenqualität ihrer PEEK-Bauteile (FFF) zu einer starken Fremdabscheidung nach der Laserbearbeitung und Aktivierung in einer Palladiumchloridlösung (PdCl) führt [174]. Ihr Lösungsweg war, analog zum dem hier vorgestellten, das Bauteil mit einem Medium zu beschichten, das als Maske bei der Bekeimung fungieren soll. Sie tauchten dazu die

Bauteile in eine Silikonlösung, die eine hydrophobe Schicht auf der Oberfläche erzeugt. Durch deren selektiven Abtrag mittels Laserstrahlung ist die Bauteiloberfläche teilweise abweisend gegenüber der PdCl-Lösung, teilweise benetzt sie und ermöglicht die Anlagerung der Metallisationskeime. Bezogen auf das FFF-Verfahren ist ihr Lösungsweg damit analog zu dem in dieser Arbeit vorgestellten. Die Wahl des Maskenmaterials, einer Silikonlösung, ist jedoch kritisch zu betrachten. Das Ziel ist die Fertigung eines Schaltungsträgers. Unvollständig vernetzte Silikone sind in der Mikroelektronikfertigung jedoch äußerst ungern gesehen, da sie unbemerkt ganze Reinräume kontaminieren können und dort unter anderem Bond- und Klebeprozesse nachhaltig stören [284]. In Bezug auf das Maskierungsmaterial wurde hier daher von Beginn an ein anderer Lösungsweg verfolgt.

Es wurden zwei Varianten der Maskierung additiv gefertigter Bauteile untersucht, zunächst die Beschichtung mit Natriumsilikat über den Sol-Gel-Prozess, dann das Aufbringen eines Lacks. In beiden Fällen wurden die Bauteile in eine entsprechende Lösung getaucht, um die Maskierung aufzutragen.

Bei der Maskierung mittels Natriumsilikat über eine Wasserglaslösung gelang es lediglich, plattenförmige Bauteile effektiv zu maskieren. Die spröden Silikatschichten neigen bei einem zu dicken Auftrag zur Rissbildung. In diesen Rissen setzen sich Aktivatoren auf der Bauteiloberfläche ab und bedingen eine ungewollte Metallabscheidung. Die Risse überspannen häufig wie ein Netz die gesamte Bauteiloberfläche, sodass die Erzeugung eines diskreten Schaltungslayouts unmöglich ist. Da die Silikatschichten wasserlöslich sind, neigen sie bei einem zu dünnen Auftrag dazu, in der Aktivatorlösung bereits die Bauteiloberfläche wieder freizugeben, was zu großflächiger Fremdabscheidung führt. Durch eine Anpassung der Prozessparameter konnte die Schichtdicke auf einer Platte

derart eingestellt werden, dass eine dichte Schicht mit zunächst nur sehr kurzen Rissen und durch weitere Optimierung sogar eine rissfreie Schicht erzeugt werden konnte. Bereits die kurzen Risse waren unregelmäßig auf der Oberfläche verteilt und vor allem nicht untereinander verbunden. Durch die geringe Länge von wenigen hundert Mikrometern wären derartige Strukturen mit entsprechenden Design-Regeln ggf. tolerierbar, beispielsweise einem Mindestabstand von leitenden Strukturen von einem Millimeter. Letztendlich konnte die Erzeugung eines Schaltungslayouts gezeigt werden. Für einen robusten Prozess muss eine solche Schicht jedoch reproduzierbar erzeugt werden können. Gleichzeitig soll dies auf komplexen 3D-Körpern möglich sein. Dies stellte sich bei den Versuchen als schwierig heraus. Insbesondere der Transfer einer funktionierenden Maskierung von flachen Bauteilen auf eine 3D-Gemetrie ist in den Untersuchungen nicht gelungen, da die Viskosität des Sols nicht beliebig einstellbar ist und es vor der Gelbildung auf der Oberfläche verläuft. So entstehen zwangsläufig Bereiche mit zu dünner Schichtdicke und Bereiche mit zu dicker Schichtdicke, was die oben beschriebenen Fehlermechanismen zur Folge hat. Zudem sind die Beschichtungsparameter, die zu einer defektfreien Maskierung des Bauteils führen, von der Beschaffenheit der Oberfläche abhängig und damit auf das jeweilige AM-Verfahren und den Werkstoff abzustimmen. Prinzipiell wäre Natriumsilikat ein vergleichsweise ökologischer sowie günstiger und damit erstrebenswerter Lösungsweg. Am Fraunhofer ISC in Würzburg werden Silikatschichten als Diffusionsbarriere auf Folien aufgebracht. Da sie auf der dehnbaren Folie ebenfalls anfällig für Risse sind, werden dem Silikat zur Steigerung seiner Duktilität organische Zusatzstoffe beigefügt. Die daraus resultierenden anorganisch-organischen Hybridpolymere, sogenannte ORMOCERE®, sind teilweise sogar biologisch abbaubar [285]. Über eine derartige Modifikation, so sie denn lösbar bleibt, könnte auch die

Maskierung von 3D-Bauteilen ermöglicht werden. Zunächst verbleiben jedoch eher ästhetische Anwendungen wie das Aufbringen von Logos sowie Strich- bzw. QR-Codes, bei denen wenige fremdabgeschiedene Linien gegebenenfalls unkritisch sind.

Im Falle der Maskierung mittels Lack wurde ein kommerzieller Negativlack eingesetzt, der eigentlich für einen Lithographieprozess entwickelt wurde. Die Wahl wurde getroffen, da derartige Lacke gut lösbar sind und in der Elektronikproduktion bereits eingesetzt werden. Allerdings könnte auch hier ein Lack mit angepassten Eigenschaften neu entwickelt werden. Da beispielsweise die Photostrukturierbarkeit für das SANCHO-Verfahren nicht notwendig ist, könnten die entsprechende Bestandteile des Lacks weggelassen werden.

Der Lack wurde für den Tauchprozess mit dem Lösungsmittel PGMEA verdünnt. Die Selektivität der Metallabscheidung hängt auch hier von einer durchgehend dichten Maskierung ab. Insgesamt konnte auf einer großen Bandbreite unterschiedlicher Oberflächen eine gute Selektivität erreicht werden. Teilweise gelang dies jedoch nur durch eine weniger stark verdünnte Lackmischung (Reduktion des Anteils an PGMEA) oder mehrfachen Auftrag. Wie gezeigt wurde, geht eine höherviskose Lackmischung jedoch auch mit der Bildung von Nasen und Reservoirs auf der Bauteiloberfläche einher. Dies kann ab einer gewissen Schichtdickenschwankung zu einem unvollständigen Abtrag des Lacks durch die Laserstrahlung führen, wodurch Lücken in der Metallisierung entstehen würden. Da die Laserparameter typischerweise so gewählt werden, dass sie die Oberfläche nicht beschädigen, kann durch mehrfache Überfahrten mit dem Laser der Lack vollständig abgetragen werden. Durch den zusätzlichen Abtrag liegen die Metallstrukturen etwas tiefer im Bauteil, was jedoch keinen Nachteil darstellen muss. Schlecht bedeckten Oberflächen und Kanten sowie zu dick bedeckten Ecken und Spalten kann

zudem auch konstruktiv begegnet und entsprechende Designregeln aufgestellt werden. So sollten Bauteile beispielsweise gut verrundet sein, damit eine niedrigviskose Lackmischung gleichmäßig und ortstabil auf der Oberfläche trocknet. Zudem sind Features mit Kapillarwirkung im Bereich der mechatronischen Funktionalisierung zu vermeiden.

6.3. LASERSTRUKTURIERUNG

Für die Laserbearbeitung der Maskierung und der darunter liegenden Bauteiloberfläche standen zwei Laseranlagen zur Verfügung (vgl. Tabelle 4.2). Eingesetzt wurde für die Herstellung aller mechatronisch funktionalisierten Bauteile letztendlich nur der Grün-Laser, da er im Gegensatz zum IR-Laser in der Lage war, alle Materialien zu bearbeiten. Prinzipiell kann es im Hinblick auf Werkstoff, Farbe und Oberflächenstruktur für jedes einzelne Material sinnvoll sein, mit allen zur Verfügung stehenden Strahlquellen Studien durchzuführen. Es ist schwer vorhersagbar, wie genau ein Material auf verschiedene Wellenlängen und Pulsdauern reagiert. Die erzeugte Oberflächenstruktur hat jedoch einen großen Einfluss auf die erreichbare Haftfestigkeit der Metallschicht. Gegebenenfalls können einzelne Wellenlängen mit einer vorgeschalteten Aufnahme des Absorptionsspektrums ausgeschlossen werden.

Aus der gezeigten Parameterliste für den Grün-Laser konnte für jedes untersuchte Material ein geeigneter Satz gefunden werden. Dabei wurde jedoch nur für das DLP-Material PLASTCure Rigid 10500 eine Auswahl im Hinblick auf Größen wie die Haftfestigkeit oder die Rauheit getroffen. Für die übrigen Materialien wurde lediglich eine Machbarkeitsstudie durchgeführt. Es kann sinnvoll sein, mit mehreren Überfahrten zu arbeiten, um einen langsamen und gleichmäßigen Abtrag zu erreichen und exponierte Stellen, wie die Kanten von Stufen, mit abzutragen. Obwohl es in den hier untersuchten Fällen nicht nötig war, stehen damit diverse

Stellschrauben zur Verfügung, falls bei einem Material schlechte Ergebnisse auftreten sollten.

6.4. AKTIVIERUNG UND METALLABSCHEIDUNG

Für die nasschemischen Prozesse der Aktivierung, des Lösens der Maskierung und der Metallabscheidung durchlaufen die Bauteile eine Reihe von sauren sowie alkalischen Bädern bei unterschiedlichen Temperaturen. Die hier untersuchten Materialien zeigten chemisch keinerlei Beeinflussung durch die Badprozesse. Dies muss jedoch nicht immer gegeben sein, und eine chemische Unbeständigkeit in einem bestimmten Medium könnte die Eignung eines Materials für das Verfahren infrage stellen. Häufig kann jedoch auch der Prozess abgeändert werden, um dennoch zu einem positiven Ergebnis zu gelangen. So wurden bereits eine alkalische und eine saure Variante eines Aktivators in den Untersuchungen vorgestellt. Anstelle der KOH-Lösung kann der Negativlack auch mit Lösungsmitteln wie Beispielsweise Aceton entfernt werden. Das stark alkalische Kupferbad kann, falls die Anforderungen an die Leitfähigkeit dies zulassen, ausgelassen werden und stattdessen direkt im sauren Nickelbad eine leitfähige Startschicht erzeugt werden. Ähnlich verhält es sich mit der Temperatur. Additiv gefertigte Körper enthalten durch den schichtweisen Aufbau nach der Fertigung oft Eigenspannungen, die im Bauteil eingefroren sind. Erhöht man die Temperatur des Bauteils bis zum Glasübergangspunkt bzw. seiner HDT (Heat Deflection Temperature, ein Ausdruck der Wärmeformbeständigkeit), so können sich diese Eigenspannungen unter einer Verformung des Bauteils wieder abbauen. Da derartige Verformungen unerwünscht sind, ist eine Erwärmung auf die HDT zu vermeiden. Die nasschemischen Prozesse bis zur Abscheidung des Kupfers laufen bei maximal 50 °C ab und sind daher in der Regel unkritisch. Sowohl die Nickel- als auch die Goldabscheidung

laufen jedoch bei über 80 °C ab, was für einige AM-Materialien bereits über der HDT liegt. Hier kann das Kupfer stattdessen mit einer Schicht Chemisch-Silber, Zinn oder Palladium veredelt werden. Chemisch-Silber beispielsweise wird ebenfalls bei Temperaturen unter 50 °C abgeschieden.

6.5. CHARAKTERISIERUNG DER METALLISCHEN STRUKTUREN

Für die Laserbearbeitung auf dem DLP-Material PLASTCure Rigid 10500 wurde eine ausführliche Parameterstudie durchgeführt. Für die Parametersätze, die nicht zu einem Verbrennen der Bauteiloberfläche geführt haben, wurden die Schichtdicke und die Haftfestigkeit der abgeschiedenen Metallschicht ermittelt. So konnten Parametersätze gewählt werden, die im Vergleich eine bessere Haftfestigkeit und eine höhere Leitfähigkeit ermöglichen. Eine gute Haftfestigkeit ist eine Grundvoraussetzung für eine hohe Lebensdauer des Gesamtsystems, da sich unter thermischer oder mechanischer Wechselbelastung die Metallschicht vom Polymer lösen kann. Je höher die Grundhaftfestigkeit, desto länger kann derartigen Belastungen Stand gehalten werden. Im Vergleich zu spritzgegossenen LDS MID (etwa 8-20 N/mm²), die aufgrund ihrer industriellen Akzeptanz für das SANCHO-Verfahren einen Maßstab darstellen, konnten mit bis zu 21.46 N/mm² (Parametersatz #18) sehr hohe Werte erreicht werden (siehe auch Tabelle 5.1).

Die Leitfähigkeit der Metallschicht ist aus zwei Gründen relevant. Erstens haben die Leitungswiderstände einen Einfluss auf den Energieverbrauch des Gesamtsystems. Zweitens führen hohe Widerstände, bei entsprechenden Stromflüssen, zu einer lokal hohen Erwärmung, was wiederum zu einem Ausfall des Systems führen kann. Dies ist insbesondere der Fall, wenn der hohe Widerstand nicht durch eine insgesamt schlechte Leitfähigkeit der Schicht entsteht, sondern lokal hohe Widerstände auftreten, z.B. an Querschnittsverengungen durch eine schlechte

Metallabscheidung. Für den Parametersatz #18 wurden bei einer Leiterbahnbreite von 100 µm Widerstände von ca. 0.023 Ω/mm ermittelt. Dieser Wert soll wiederum mit spritzgegossenen LDS MID verglichen werden. Im öffentlich geförderten Projekt LDS-HF-Systeme wurden auf drei verschiedenen Materialien Leiterbahnen von einem Meter Länge und 100 µm Breite abgeschieden (Cu/Ni/Au) und deren Widerstände gemessen [286]. Es wurden längenspezifische Widerstände von 0.017 bis 0.026 Ω/mm erreicht. Die Werte werden nach Material aufgeschlüsselt ebenfalls in Tabelle 6.1 dargestellt.

Tabelle 6.1: Längenspezifische Leitfähigkeit auf spritzgegossenen LDS MID [286] und AM-MID.

Basispolymer (Material) Hersteller	Verfahren	Längenspez. Widerstand
PC (Xantar LDS 3760) MEP Europe GmbH	Spritzguss/LDS	0.022 Ω/mm
LCP (TECACOMP LCP LDS black 4107) Ensinger GmbH	Spritzguss /LDS	0.017 Ω/mm
PEEK (TECACOMP PEEK LDS black 1047045) Ensinger GmbH	Spritzguss /LDS	0.026 Ω/mm
Duroplast (PLASTCure Rigid 10500) Prodways Materials GmbH	DLP/SANCHO	0.023 Ω/mm

Zusammenfassend lassen sich mit dem SANCHO-Verfahren für den DLP-Modellwerkstoff PLASTCure Rigid 10500 sowohl in Bezug auf die Haftfestigkeit, als auch in Bezug auf die Leitfähigkeit, vergleichbare Werte mit industriell bereits etablierten Verfahren zum Aufbau von MID erreichen. Für eine höhere Stromtragfähigkeit könnte die Dicke der abgeschiedenen Kupferschicht durch eine Erhöhung der Verweildauer im Elektrolyten von 90 min auf z.B. 150 min jedoch noch gesteigert werden.

6.6. Transfer auf unterschiedliche AM-Prozesse

Das SANCHO-Verfahren wurde in dieser Arbeit anhand des AM-Modellverfahrens Digital Light Processing und des Modellwerkstoffs PLASTCure Rigid 10500 entwickelt. Es ist jedoch erdacht worden, um auf eine möglichst große Bandbreite unterschiedlicher AM-Verfahren

und -Materialien anwendbar zu sein. Um die Übertragbarkeit nachzuweisen, wurde es im Sinne einer Machbarkeitsanalyse auf die vier AM-Verfahren Stereolithographie, PolyJet, selektives Lasersintern und HP Multi Jet Fusion angewendet. Dabei wurden die verschiedenen Laserparametersätze nicht mehr im Detail charakterisiert, sondern lediglich durch eine Sichtprobe mittels Stereomikroskop aussichtsreiche Kandidaten ausgewählt. Entsprechend stellen die vorgestellten Haftfestigkeits- und Widerstandswerte für die vier Verfahren nur einen Anhaltspunkt und nicht den besten erreichbaren Fall dar. Eine ausführliche Parameterstudie unter Einbezug des IR-Lasers und eine anschließende Messung der relevanten Werte für alle Parametersätze dürfte hier durchaus noch ein Optimierungspotential aufzeigen. Die Verfahren sind lediglich aufgrund ihrer industriellen Relevanz und der stark unterschiedlichen Oberflächeneigenschaften ausgewählt worden. Die guten Ergebnisse in Bezug auf eine selektive Metallabscheidung lassen hier jedoch auf eine Übertragbarkeit auf weitere Verfahren schließen, wie z.B. die Fused Filament Fabrication oder das BinderJetting. Dabei kann und muss für den Einzelfall die Viskosität des Lacks und die Benetzbarkeit des AM-Materials betrachtet und gegebenenfalls optimiert werden. Zudem kann neben der Auswahl eines passenden Laserparametersatzes auch die Anzahl der Überfahrten erhöht werden, um ein besseres Ergebnis zu erreichen.

Die Oberfläche der abgeschiedenen Metallschicht wird stark durch die Oberfläche des AM-Bauteils beeinflusst. Insbesondere bei den Bauteilen des selektiven Lasersinterns hat diese eine sehr chaotische Struktur, die sich aus der Geometrie der aneinander gesinterten Pulverpartikel ergibt. Entsprechend sind Verbindungsprozesse wie das leitfähige Kleben oder das Löten an die Gegebenheiten anzupassen. Zumindest für den Fall des Lötens hat sich in den Hot-Bump-Pull-Tests, bei denen der Kupferstift ebenfalls auf die Metallschicht aufgelötet werden muss, gezeigt, dass bei

einer ausreichenden Lotmenge eine gute Verbindung entsteht. Eingesetzt wurde hierbei niedrigschmelzendes Zinn-Bismut-Lot (SnBi). Entsprechendes sollte auch für Klebeprozesse gelten.

Da die Oberfläche von AM-Bauteilen für eine selektive Metallabscheidung durchaus anspruchsvoll ist, sollte das SANCHO-Verfahren auch auf anders hergestellte Bauteile anwendbar sein. Da bei weitem nicht für alle Spritzgussgranulate oder Moldmassen eine LDS-Variante existiert, könnten so z.B. auch mit branchenspezifischen Spezialwerkstoffen MID aufgebaut werden. Auch gefräste oder extrudierte Polymerbauteile könnten weiterverarbeitet werden. Besonders interessant wäre allerdings die Funktionalisierung von Holzbauteilen. Holz kann als nachwachsender Rohstoff die Erzeugung nachhaltiger Elektronikprodukte ermöglichen. Dank seines oft niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten, Eiche beispielsweise hat einen Wert von 8 ppm/K, können diese Elektronikprodukte auch durchaus langlebig sein, sofern das Holz vor der Verarbeitung gut abgelagert wurde. So wären Produkte wie Möbel mit einfachen Smart-Home-Elementen, kapazitiven Schaltern oder Sensorik denkbar.

7. DESIGNREGELN

Wie zuvor an diversen Stellen angesprochen wurde, ist es für die zuverlässige Herstellung von AM-MID mit dem SANCHO-Verfahren, wie bei jedem anderen Verfahren auch, sinnvoll, zur Unterstützung des Konstruktionsprozesses Designregeln abzuleiten. Die Erfahrungswerte, die bei der Entwicklung des Verfahrens gesammelt wurden, sollen in den folgenden Abschnitten zusammengefasst werden.

7.1. ADDITIVE FERTIGUNG

In Bezug auf die additive Fertigung sind die Designregeln des entsprechenden additiven Fertigungsverfahrens zu beachten. Diese geben unter anderem Hinweise auf Wandstärken, Materialanhäufungen, kleinstmögliche Maße und Toleranzen sowie überhängende oder freistehende Oberflächen. Zusätzlich ist Folgendes zu beachten.

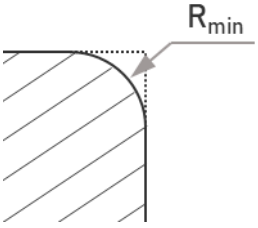
» Bei der Wahl der Fertigungsparameter sollte auf eine möglichst geringe Schichtdicke zurückgegriffen werden. Dies erleichtert den homogenen Auftrag der Maskierung und verhindert so Fremdabscheidung, bzw. ermöglicht eine stärkere Verdünnung des Lacks.

» Verfahren, die ohne Stützstrukturen arbeiten oder ganzflächige Stützen aus einem gut lösbaren Stützmaterial aufbauen, sind vorteilhaft. Die unregelmäßige Oberfläche null- oder eindimensional gestützter Oberflächen erschwert eine gleichmäßige Maskierung und kann zu Unterbrechungen in Leiterbahnen führen.

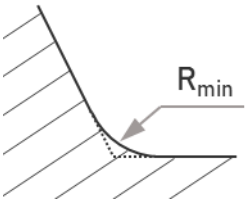
» Bei der Platzierung der Bauteile im Bauraum sollte darauf geachtet werden, dass Oberflächen, die funktionalisiert werden sollen, mit einer möglichst gleichmäßigen Oberfläche aufgebaut werden. Das bedeutet für

die meisten Verfahren eine Orientierung der Oberfläche parallel oder senkrecht zur Aufbaurichtung.

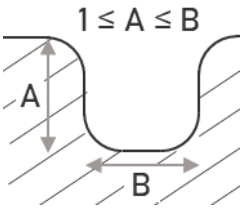
7.2. MASKIERUNG



» Um eine gute Benetzung der Oberflächen im Bereich konvexer Kanten zu erreichen, sollten diese gut verrundet werden. Die Rundung sollte mit einem Radius von mindestens 0.5 mm, besser 1 mm ausgeführt werden. Dort, wo die Rundung prozessbedingt durch Stufen angenähert wird, sollte die Rundung um mindestens den Faktor 5-10 größer sein als die Schichtstärke.



» Um das Sammeln von Maskierungsmaterial an konkaven Kanten zu verhindern, sollten auch diese gut verrundet werden. Hier sollten ebenfalls Radien von mindestens 0.5 bis 1 mm verwendet werden.



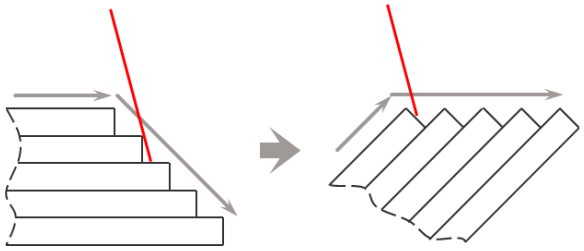
» Um das Sammeln von Material in Geometrien mit Kapillareffekt zu vermeiden, sollten Spalte und Löcher gut verrundet werden und eine Mindestbreite von 1 mm aufweisen sowie ein Aspektverhältnis (Breite : Tiefe) größer 1. Bei Konstruktionselementen ab einer Größe von etwa 5 mm ist das Aspektverhältnis nicht mehr ausschlaggebend.

» Lassen sich Oberflächen mit einem ausgeprägten Stufeneffekt nicht durch eine andere Orientierung im Bauraum vermeiden, kann es zur Ansammlung von Maskierungsmaterial in den Stufen kommen. Soll in diesen Bereichen eine Laserbearbeitung stattfinden, kann sie durch die Materialanhäufung lokal gestört werden. Deshalb ist in diesen Fällen gegebenenfalls auf eine Homogenisierung der Oberfläche durch Gleitschleifen oder chemische Prozesse zurückzugreifen.

7.3. LASERBEARBEITUNG

In Bezug auf die Laserbearbeitung sind die Designregeln des LPKF LDS-Prozesses zu beachten [287]. Diese geben Hinweise auf die Bauteilgeometrie und das Schaltungslayout im Hinblick auf die Einschränkungen durch die Laser-Anlage und Prozesse der AVT. Zusätzlich ist Folgendes zu beachten.

» Für die Laserstrukturierung gibt LPKF einen Einstrahlwinkel ortsbedingt von bis zu 70° vor. Bei additiv



gefertigten Bauteilen ist durch den schichtweisen Aufbau und den Stufeneffekt fast immer von einer Segmentierung der Oberfläche in horizontale und vertikale Anteile auszugehen. Daher werden die vorgegebenen Einstrahlwinkel des Lasers lokal sofort überschritten bzw. die Oberfläche schattet sich gegenüber dem Laser selbst ab. Oberflächen, die dem Stufeneffekt unterliegen, sollten daher möglichst so gedreht werden, dass der Laser größtenteils senkrecht auf sie einstrahlt. Dies kann zu einer höheren Anzahl an Umspannvorgängen bei der Laserbearbeitung führen, verhindert jedoch die Bildung von Lücken in der Metallschicht. Bei sehr geringen Schichtstärken und einem tiefen Materialabtrag durch den Laser kann gegebenenfalls hierauf verzichtet werden, da der Laser die Kanten der Stufen bei der Bearbeitung mit abträgt.

» Insbesondere bei porösen oder löchrigen Oberflächen kann es bei Leiterbahnen zu Unterbrechungen kommen, wenn die tatsächliche Oberfläche nicht mehr im Fokusbereich des Lasers liegt. Hier kann versucht werden, durch eine Erhöhung der Anzahl an Überfahrten die Oberfläche einzuglätten. Ist dies nicht zielführend, kann die Breite der

Leiterbahnen erhöht werden, bis statistisch die Größe der Lücken nicht mehr zu einer Unterbrechung bzw. einer kritischen Einschnürung des Leiterbahnquerschnitts führt.

7.4. NASSCHEMISCHE PROZESSE

» Bei der Auswahl des Materials sollte die Wärmeformbeständigkeit beachtet werden. Die Wärmeformbeständigkeit sollte über 50 °C liegen, da diese Temperatur in diversen Prozessschritten erforderlich ist. Andernfalls können sich im Bauteil befindliche Eigenspannungen unter Verformung des Bauteils abbauen. Einen Hinweis auf die Wärmeformbeständigkeit geben die Materialkennwerte Glasübergangstemperatur T_G oder Heat Deflection Temperature HDT. Manche Materialien lassen eine thermische Nachbehandlung zu, bei der sich die Wärmeformbeständigkeit noch etwas erhöht oder Eigenspannungen deformationsfrei abgebaut werden können. Dies ist jedoch nur bei wenigen Materialien möglich.

» Bei der Auswahl des Materials sollte die Medienbeständigkeit beachtet werden. Die Prozesschemikalien des SANCHO-Verfahrens beinhalten standardmäßig sowohl alkalische als auch saure Medien. Bei einer Unverträglichkeit mit einer bestimmten Chemikalie kann gegebenenfalls auf Alternativen zurückgegriffen werden.

» Um die Handhabung der Bauteile in den nasschemischen Prozessen, die häufig in Gestellen stattfinden, zu vereinfachen, sollte ein an das Gestell angepasster Befestigungspunkt vorgesehen werden. Häufig kann dies in Form eines Lochs umgesetzt werden, durch das ein Faden gezogen werden kann bzw. das zur Befestigung an einem Haken dient.

7.5. ZUVERLÄSSIGKEIT

» Bei der Auswahl des Materials sollte im Hinblick auf eine möglichst lange Lebensdauer des mechatronischen Bauteils der Wärmeausdehnungskoeffizient möglichst an den von Kupfer angepasst sein (16 ppm/K). Je stärker davon abgewichen wird, desto geringer ist potentiell die Lebensdauer oder desto eingeschränkter sind die möglichen Umweltbedingungen.

» Im Hinblick auf eine hohe Zuverlässigkeit des Systems sollte bei der Auswahl der Laserparameter auf eine hohe Haftfestigkeit zwischen Metallschicht und Bauteil hin optimiert werden. Dies zögert das Versagen aufgrund thermomechanischer Spannungen hinaus.

» Treten lokal begrenzte Fremdabscheidungen auf, können diese ggf. durch eine dickere Maskierung (bspw. durch eine Verringerung der Lösungsmittelkonzentration im Lack) unterbunden werden. Da dies zu Lasten der Konturtreue der Maskierung geht, kann stattdessen auch der Abstand der Leiterbahnen erhöht werden.

8. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Das in dieser Arbeit vorgestellte SANCHO-Verfahren dient dem Aufbau mechatronischer Baugruppen auf der Basis additiv gefertigter Bauteile. Es ist das erste Verfahren, das unmittelbar auf der Oberfläche eines, mit einem beliebigen additiven Fertigungsverfahren hergestellten, Bauteils leitfähige Strukturen appliziert.

Es wurde ein Überblick über den Stand der Technik gegeben und dabei die unterschiedlichen Arten additiver Fertigungsverfahren erläutert sowie die Verfahren vorgestellt, mit denen additiv gefertigte Bauteile zu mechatronischen Baugruppen veredelt werden können. Zudem wurde die thematisch relevante Literatur systematisch aufgearbeitet und dargestellt, in welcher Vielfalt das Thema additiv gefertigter Mechatronik weltweit bearbeitet wird. Durch Vorüberlegungen und Untersuchungen wurde eine Prozesskette aufgestellt, bestehend aus der Maskierung des Bauteils, dem selektiven Abtrag der Maskierung mittels Laserablation sowie einer Abfolge nasschemischer Badprozesse zum Aufbringen eines Katalysators, zum endgültigen Entfernen der Maskierung und zur Abscheidung einer Metallschicht. Die Prozessparameter wurden anhand des Digital Light Processings als Modellverfahren der additiven Fertigung und eines Modellmaterials in Form eines glasgefüllten Photopolymers erarbeitet. Die Eigenschaften der stromtragenden Strukturen wurden hinsichtlich Haftfestigkeit, Leitfähigkeit und Rauheit charakterisiert, und die Transferierbarkeit des Verfahrens auf vier andere additive Fertigungsprozesse und Materialien gezeigt. Es konnten Haftfestigkeiten und Leitfähigkeiten vergleichbar mit industrietypischen spritzgegossenen Schaltungsträgern nachgewiesen werden. Der Transfer des Verfahrens erfolgte auf die AM-Verfahren Stereolithographie, PolyJet, selektives

Lasersintern und HP Multi Jet Fusion. Die Verfahren wurden aufgrund ihrer stark unterschiedlichen Oberflächeneigenschaften ausgewählt und es konnte auf Bauteilen aller fünf AM-Verfahren eine Metallabscheidung mit guter Selektivität nachgewiesen werden. Zum Schluss wurden Designregeln für das Verfahren formuliert.

Zukünftig könnten zur Weiterentwicklung des SANCHO-Verfahrens:

- die Untersuchungen zu einem nachhaltigen Maskierungsmaterial aufgegriffen und vertieft werden. Die hier getesteten Silikatschichten waren in der aktuellen Form leider nicht geeignet. Durch das Beimischen einer organischen Komponente könnte ein anorganisch-organisches Hybridpolymer erzeugt werden, das eine günstige und nachhaltige Maskierung darstellen sollte. Eine Alternative dazu könnte auch ein Wachs sein.
- die Verfahrensparameter für weitere additive Fertigungsverfahren erarbeitet werden. Ausführlich wurde dies hier nur für den Modellprozess und den Modellwerkstoff durchgeführt. Weiterhin wäre der Transfer des Verfahrens auf Holz als nachhaltiges Basismaterial für Elektronik interessant.
- die Zuverlässigkeit mechatronischer Baugruppen auf unterschiedlichen Basismaterialen untersucht werden. Dadurch könnten Vorhersagen über die Lebensdauer getroffen werden, was für eine Akzeptanz des Verfahrens durch die Industrie über die Fertigung von Prototypen hinaus unabdingbar ist.

LITERATURVERZEICHNIS

[1] M. Xu, J.M. David, S.H. Kim, and others, "The fourth industrial revolution: Opportunities and challenges," *International journal of financial research*, vol. 9, 2018, pp. 90–95.

[2] G.E. Moore, "Cramming more components onto integrated circuits," *IEEE Solid-State Circuits Society Newsletter*, vol. 11, 2006, pp. 33–35.

[3] J.S. Nielsen, "Nielsen's Law of Internet Bandwidth," *https://www.nngroup.com/articles/law-of-bandwidth/ [abgerufen am 04.07.2022]*, 1998.

[4] V. Denner, "Annual Speech," *Robert Bosch GmbH, Gerlingen*, 2017.

[5] J. Franke, *Räumliche elektronische Baugruppen (3D-MID): Werkstoffe, Herstellung, Montage und Anwendungen für spritzgegossene Schaltungsträger*, München: Carl Hanser Verlag, 2013.

[6] A. Islam, H.N. Hansen, P.T. Tang, and J. Sun, "Process chains for the manufacturing of molded interconnect devices," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 42, 2009, pp. 831–841.

[7] Slimdup, *Selektive laserbasierte Metallisierung zur Direktkontaktierung von elektronischen Komponenten in duroplastischen 3D-Packages, AiF IGF Fördernummer 19758N*, Abschlussbericht, Hahn-Schickard Gesellschaft für angewandte Forschung e.V., Stuttgart, 2020.

[8] LasKer3D, *Verfahren zur wirtschaftlichen und praxisorientierten Herstellung, Laserstrukturierung, Metallisierung und Systemintegration von 3D-Keramiksubstraten, AiF IGF Fördernummer 18967N*, Abschlussbericht, Hahn-Schickard Gesellschaft für angewandte Forschung e.V., Stuttgart, 2018.

[9] P.D. Calvert, H.B. Denham, and T.A. Anderson, "Free-form fabrication of composites with embedded sensors," *Smart Structures and Materials 1999: Sensory Phenomena and Measurement Instrumentation for Smart Structures and Materials*, SPIE, 1999, pp. 128–133.

[10] Y. Yang, X. Song, X. Li, Z. Chen, C. Zhou, Q. Zhou, and Y. Chen, "Recent Progress in Biomimetic Additive Manufacturing Technology: From Materials to Functional Structures," *Advanced Materials*, vol. 30, 2018, p. 1706539.

[11] A. du Plessis, C. Broeckhoven, I. Yadroitsava, I. Yadroitsev, C.H. Hands, R. Kunju, and D. Bhate, "Beautiful and Functional: A Review of Biomimetic Design in Additive Manufacturing," *Additive Manufacturing*, vol. 27, 2019, pp. 408–427.

[12] L. Hao, D. Raymond, G. Strano, and S. Dadbakhsh, "Enhancing the sustainability of additive manufacturing," *5th International Conference on Responsive Manufacturing-Green Manufacturing (ICRM 2010)*, IET, 2010, pp. 390–395.

[13] F. Hemmelgarn, P. Ehlert, T. Mager, C. Jürgenhake, R. Dumitrescu, and A. Springer, "Evaluation of different additive manufacturing technologies for MIDs in the context of smart sensor systems for retrofit applications," *2021 14th International Congress Molded Interconnect Devices (MID)*, IEEE, 2021, pp. 1–8.

[14] D. Beiderbeck, H. Krüger, and T. Minshall, "The Future of Additive Manufacturing in Sports," *21st Century Sports: How Technologies Will Change Sports in the Digital Age*, S.L. Schmidt, ed., Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 111–132.

[15] L.-J. Wei, "The Fabrication of Integrated Strain Sensors for 'Smart' Implants using a Direct Write Additive Manufacturing Approach," De Montfort University, 2015.

[16] E.R. Ghomi, F. Khosravi, R.E. Neisiany, S. Singh, and S. Ramakrishna, "Future of additive manufacturing in healthcare," *Current Opinion in Biomedical Engineering*, vol. 17, 2021, p. 100255.

[17] J. Minguella, P. Challa, M. De Los Santos, J. Lobo, P. Morey, and J. Font, "Re-design of a component of a lower-limb robotic exoskeleton for integrating sensing capacity and enhancing multi-material direct additive manufacturing," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 2021, p. 012097.

[18] "Gesundheitsüberwachung mit 3D-gedruckten Sensoren," U.S. Patent 10.926.1136, 2022.

[19] G. Schiller, "Additive manufacturing for Aerospace," *2015 IEEE Aerospace Conference*, IEEE, 2015, pp. 1–8.

[20] L.J. Kumar and C.G. Krishnadas Nair, "Current Trends of Additive Manufacturing in the Aerospace Industry," *Advances in 3D Printing & Additive Manufacturing Technologies*, D.I. Wimpenny, P.M. Pandey, and L.J. Kumar, eds., Singapore: Springer Singapore, 2017, pp. 39–54.

[21] *Verfahren zur Herstellung einer elektrisch leitfähigen Struktur sowie ein mit diesem Verfahren hergestelltes Trägermaterial*, Deutsches Patent, DE102014114986A1, LPKF Laser and Electronics AG, 2016.

[22] T. Kordass, *Lasergestütztes Verfahren zur selektiven Metallisierung von epoxidharzbasierten Duromeren zur Steigerung der Integrationsdichte für dreidimensionale mechatronische Package-Baugruppen.*, Dissertation, Erlangen: FAU University Press, 2021.

[23] Y. Zhang, *Laser induced selective activation for subsequent autocatalytic electroless plating*, Dissertation, DTU Mechanical Engineering, 2010.

[24] Y. Zhang, H.N. Hansen, A. De Grave, P.T. Tang, and J.S. Nielsen, "Selective metallization of polymers using laser induced surface activation (LISA)—characterization and optimization of porous surface topography," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 55, 2011, pp. 573–580.

[25] J. Ren, D. Li, Y. Zhang, W. Yang, H. Nie, and Y. Liu, "Laser Direct Activation of Polyimide for Selective Electroless Plating of Flexible Conductive Patterns," *ACS Applied Electronic Materials*, vol. 4, 2022, pp. 2191–2202.

[26] *DIN 8580:2022-12, Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung*, Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2022.

[27] *DIN EN ISO/ASTM 52900:2021, Additive Fertigung – Grundlagen – Terminologie*, Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2021.

[28] *VDI Richtlinie 3405:2014-12, Additive Fertigungsverfahren - Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen*, Verein Deutscher Ingenieure e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2014.

[29] A. Linden and J. Fenn, "Understanding Gartner's Hype Cycles," *Whitepaper Gartner Research, abgerufen online am 15.05.2023 unter http://ask-force.org/web/Discourse/Linden-HypeCycle-2003.pdf*, 2003.

[30] O.T. via Wikipedia, "General hype cycle for technology," *abgerufen am 05.01.2022, Lizenz: CC BY-SA 3.0*.

[31] A. Gebhardt and J.-S. Hötter, *Additive manufacturing: 3D printing for prototyping and manufacturing*, Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2016.

[32] I. Gibson, D.W. Rosen, B. Stucker, M. Khorasani, D. Rosen, B. Stucker, and M. Khorasani, *Additive manufacturing technologies*, Springer, 2021.

[33] M. Ziaee and N.B. Crane, "Binder jetting: A review of process, materials, and methods," *Additive Manufacturing*, vol. 28, 2019, pp. 781–801.

[34] D.-G. Ahn, "Directed energy deposition (DED) process: State of the art," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, vol. 8, 2021, pp. 703–742.

[35] O. Gülcan, K. Günaydın, and A. Tamer, "The state of the art of material jetting—a critical review," *Polymers*, vol. 13, 2021, p. 2829.
[36] S. Sun, M. Brandt, and M. Easton, "Powder bed fusion processes: An overview," *Laser additive manufacturing*, 2017, pp. 55–77.
[37] A. Pilipovi, "Sheet lamination," *Polymers for 3D Printing*, Elsevier, 2022, pp. 127–136.
[38] F. LLC, "Onlineauftritt Fabrisonic LLC, abgerufen am 23.05.2023."
[39] M. Pagac, J. Hajnys, Q.-P. Ma, L. Jancar, J. Jansa, P. Stefek, and J. Mesicek, "A review of vat photopolymerization technology: Materials, applications, challenges, and future trends of 3d printing," *Polymers*, vol. 13, 2021, p. 598.
[40] B. Khatri, M. Frey, A. Raouf-Fahmy, M.-V. Scharla, and T. Hanemann, "Development of a multi-material stereolithography 3D printing device," *Micromachines*, vol. 11, 2020, p. 532.
[41] M. Schmitz, M. Khalilbeigi, M. Balwierz, R. Lissermann, M. Mühlhäuser, and J. Steimle, "Capricate: A fabrication pipeline to design and 3D print capacitive touch sensors for interactive objects," *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology*, ACM, 2015, pp. 253–258.
[42] Q. Mu, L. Wang, C.K. Dunn, X. Kuang, F. Duan, Z. Zhang, H.J. Qi, and T. Wang, "Digital light processing 3D printing of conductive complex structures," *Additive Manufacturing*, vol. 18, 2017, pp. 74–83.
[43] Mitsubishi Engineering-Plastics Corporation, Online, abgerufen am 30.01.2022 unter https://www.xantar.com/solutions/3d.php, .
[44] Ensinger GmbH, Online, abgerufen am 30.01.2022 unter https://filaments.ensingerplastics.com/products/peek-filament-tecafil-peek-lds-black-1-75-mm-500g, .
[45] M.A. Kirleis, D. Simonson, N.A. Charipar, H. Kim, K.M. Charipar, R.C.Y. Auyeung, S.A. Mathews, and A. Piqué, "Laser embedding electronics on 3D printed objects," *Laser 3D Manufacturing*, H. Helvajian, A. Piqué, M. Wegener, and B. Gu, eds., SPIE, 2014, pp. 16–22.
[46] K. Ratautas, A. Jagminien, I. Stankevicien, M. Sadauskas, E. Norkus, and G. Raciukaitis, "Evaluation and optimisation of the SSAIL method for laser-assisted selective electroless copper deposition on dielectrics," *Results in Physics*, vol. 16, 2020, p. 102943.
[47] E. Ermantraut, H. Müller, W. Eberhardt, P. Ninz, F. Kern, R. Gadow, and A. Zimmermann, "New process for selective additive metallization of alumina ceramic substrates," *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 9, 2018, pp. 138–145.
[48] I.J. Shin and M.S. Park, "Direct Conductive Patterning on 3D Printed Structure Using Laser," *physica status solidi (a)*, vol. 215, 2017, p. 1700597.
[49] E. Olsen and L. Overmeyer, "Laser sintering of copper conductive traces on primer pre-treated additive manufactured 3D surfaces," *Flexible and Printed Electronics*, vol. 6, 2021, p. 015006.
[50] K. Hon, L. Li, and I. Hutchings, "Direct writing technology—Advances and developments," *CIRP annals*, vol. 57, 2008, pp. 601–620.
[51] V. Beedasy and P.J. Smith, "Printed electronics as prepared by inkjet printing," *Materials*, vol. 13, 2020, p. 704.
[52] K.-S. Kwon, M.K. Rahman, T.H. Phung, S.D. Hoath, S. Jeong, and J.S. Kim, "Review of digital printing technologies for electronic materials," *Flexible and Printed Electronics*, vol. 5, 2020, p. 043003.
[53] N. Wilkinson, M. Smith, R. Kay, and R. Harris, "A review of aerosol jet printing—a non-traditional hybrid process for micro-manufacturing," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 105, 2019, pp. 4599–4619.

[54] K. Wegner, P. Piseri, H.V. Tafreshi, and P. Milani, "Cluster beam deposition: a tool for nanoscale science and technology," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 39, 2006, p. R439.

[55] B. Le Borgne, O. De Sagazan, S. Crand, E. Jacques, and M. Harnois, "Conformal electronics wrapped around daily life objects using an original method: water transfer printing," *ACS applied materials & interfaces*, vol. 9, 2017, pp. 29424–29429.

[56] P. Serra and A. Piqué, "Laser-induced forward transfer: fundamentals and applications," *Advanced Materials Technologies*, vol. 4, 2019, p. 1800099.

[57] R. Schramm and J. Franke, "Electrical functionalization of thermoplastic materials by cold active atmospheric plasma technology," *2013 IEEE 15th Electronics Packaging Technology Conference*, Singapur: 2013, pp. 108–113.

[58] D. Espalin, D.W. Muse, E. MacDonald, and R.B. Wicker, "3D Printing multifunctionality: structures with electronics," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 72, 2014, pp. 963–978.

[59] H. Ota, S. Emaminejad, Y. Gao, A. Zhao, E. Wu, S. Challa, K. Chen, H.M. Fahad, A.K. Jha, D. Kiriya, and others, "Application of 3D printing for smart objects with embedded electronic sensors and systems," *Advanced Materials Technologies*, vol. 1, 2016, p. 1600013.

[60] F. Ting, I. Gibson, and W. Cheung, "Study on selective laser sintering components with electrically conductive channels," *Proceedings of the 12th Solid Freeform Fabrication Symposium*, 2001, pp. 1–10.

[61] J.A. Palmer, P. Yang, D.W. Davis, B.D. Chavez, P.L. Gallegos, R.B. Wicker, and F.R. Medina, "Rapid Prototyping of High Density Circuitry," *Rapid Prototyping & Manufacturing 2004 Conference Proceedings, May 10-13*, Rapid Prototyping Association of the Society of Manufacturing Engineers, 2004.

[62] M. Schmitz, A. Leister, N. Dezfuli, J. Riemann, F. Müller, and M. Mühlhäuser, "Liquido: Embedding Liquids into 3D Printed Objects to Sense Tilting and Motion," *Proceedings of the 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, ACM, 2016, pp. 2688–2696.

[63] S.J. Leigh, R.J. Bradley, C.P. Purssell, D.R. Billson, and D.A. Hutchins, "A Simple, Low-Cost Conductive Composite Material for 3D Printing of Electronic Sensors," *PLOS ONE*, vol. 7, 2012, pp. 1–6.

[64] J.A. Cardenas, H. Tsang, H. Tong, H. Abuzaid, K. Price, M.A. Cruz, B.J. Wiley, A.D. Franklin, and N. Lazarus, "Flash ablation metallization of conductive thermoplastics," *Additive Manufacturing*, vol. 36, 2020, p. 101409.

[65] T. Moritz, U. Scheithauer, S. Weingarten, J. Abel, R. Johne, and A. Michaelis, "Hybridization of Materials and Processes by Additive Manufacturing," *Proc. Of the 3rd Intl. Conf. on Progress in Additive Manufacturing*, 2018.

[66] B. Hampel, S. Monshausen, and M. Schilling, "Properties and applications of electrically conductive thermoplastics for additive manufacturing of sensors," *tm-Technisches Messen*, vol. 84, 2017, pp. 593–599.

[67] P.F. Flowers, C. Reyes, S. Ye, M.J. Kim, and B.J. Wiley, "3D printing electronic components and circuits with conductive thermoplastic filament," *Additive Manufacturing*, vol. 18, 2017, pp. 156–163.

[68] S.W. Kwok, K.H.H. Goh, Z.D. Tan, S.T.M. Tan, W.W. Tjiu, J.Y. Soh, Z.J.G. Ng, Y.Z. Chan, H.K. Hui, and K.E.J. Goh, "Electrically conductive filament for 3D-printed circuits and sensors," *Applied Materials Today*, vol. 9, 2017, pp. 167–175.

[69] G. Stano, A. Di Nisio, A. Lanzolla, and G. Percoco, "Additive manufacturing and characterization of a load cell with embedded strain gauges," *Precision Engineering*, vol. 62, 2020, pp. 113–120.

[70] H. Watschke, K. Hilbig, and T. Vietor, "Design and characterization of electrically conductive structures additively manufactured by material extrusion," *Applied Sciences*, vol. 9, 2019, p. 779.

[71] S. Swaminathan, K.B. Ozutemiz, C. Majidi, and S.E. Hudson, "Fiberwire: Embedding electronic function into 3d printed mechanically strong, lightweight carbon fiber composite objects," *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2019, pp. 1–11.

[72] T. Barši Palmi, J. Slavic, and M. Boltežar, "Process parameters for FFF 3D-printed conductors for applications in sensors," *Sensors*, vol. 20, 2020, p. 4542.

[73] J. Tan and H. Low, "Embedded electrical tracks in 3D printed objects by fused filament fabrication of highly conductive composites," *Additive Manufacturing*, vol. 23, 2018, pp. 294–302.

[74] K. Gnanasekaran, T. Heijmans, S. Van Bennekom, H. Woldhuis, S. Wijnia, G. De With, and H. Friedrich, "3D printing of CNT-and graphene-based conductive polymer nanocomposites by fused deposition modeling," *Applied materials today*, vol. 9, 2017, pp. 21–28.

[75] N.P. Kim, "3D-printed conductive carbon-infused thermoplastic polyurethane," *Polymers*, vol. 12, 2020, p. 1224.

[76] D.J. Roach, C.M. Hamel, C.K. Dunn, M.V. Johnson, X. Kuang, and H.J. Qi, "The m4 3D printer: A multi-material multi-method additive manufacturing platform for future 3D printed structures," *Additive Manufacturing*, vol. 29, 2019, p. 100819.

[77] J. Zhan, T. Tamura, X. Li, Z. Ma, M. Sone, M. Yoshino, S. Umezu, and H. Sato, "Metal-plastic hybrid 3D printing using catalyst-loaded filament and electroless plating," *Additive Manufacturing*, vol. 36, 2020, p. 101556.

[78] N. Lazarus, S.S. Bedair, S.H. Hawasli, M.J. Kim, B.J. Wiley, and G.L. Smith, "Selective Electroplating for 3D-Printed Electronics," *Advanced Materials Technologies*, vol. 4, 2019, p. 1900126.

[79] K. Angel, H.H. Tsang, S.S. Bedair, G.L. Smith, and N. Lazarus, "Selective electroplating of 3D printed parts," *Additive Manufacturing*, vol. 20, 2018, pp. 164–172.

[80] J. Li, Y. Wang, G. Xiang, H. Liu, and J. He, "Hybrid additive manufacturing method for selective plating of freeform circuitry on 3D printed plastic structure," *Advanced Materials Technologies*, vol. 4, 2019, p. 1800529.

[81] M.J. Kim, M.A. Cruz, S. Ye, A.L. Gray, G.L. Smith, N. Lazarus, C.J. Walker, H.H. Sigmarsson, and B.J. Wiley, "One-step electrodeposition of copper on conductive 3D printed objects," *Additive Manufacturing*, vol. 27, 2019, pp. 318–326.

[82] S. Kim, I. Lee, and H. Kim, "Fabrication of Parts with Integrated Circuits by Selective Electroless Plating of Additively Manufactured Plastic Substrates," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2020, pp. 1–9.

[83] J. Li, Y. Wang, P. Wang, J. He, H. Liu, and G. Xiang, "Rapid production of customized 3D electronics via hybrid additive manufacturing technology," *2019 IEEE 69th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, IEEE, 2019, pp. 135–140.

[84] G. Liu, C. Wang, Z. Jia, and K. Wang, "An Integrative 3D printing method for rapid additive manufacturing of a capacitive force sensor," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 31, 2021, p. 065005.

[85] D. Jiang, H.A. Al Shraida, and F. Ning, "Non-planar polymer-based flexible electronics fabricated by a four-axis additive manufacturing process," *Materials Letters*, vol. 294, 2021, p. 129748.

[86] N. Lazarus, J.B. Tyler, J.A. Cardenas, B. Hanrahan, H. Tsang, and S.S. Bedair, "Direct Electroless Plating of Conductive Thermoplastics for Selective Metallization of 3D Printed Parts," *Additive Manufacturing*, 2022, p. 102793.

[87] J. Mireles, D. Espalin, D. Roberson, B. Zinniel, F. Medina, and R. Wicker, "Fused deposition modeling of metals," *2012 International Solid Freeform Fabrication Symposium*, University of Texas at Austin, 2012.

[88] A. Endrikat, L. Eggert, A. Di Maglie, K. Attenberger, T. Neumann, M. Quoß, D. Bouhrouch, and A. Bund, "Innovative Fertigung von Leiterplatten durch FDM-Druck und selektive Kunststoffmetallisierung," *WOTECH Werkstoffe*, vol. 4, 2023.

[89] C. Zhao, J. Wang, T. Liu, J. Guo, and W. Wu, "Additive manufacturing of Cu/Ni by selective electrochemical deposition on local conductive substrate," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, pp. 1–7.

[90] D. Periard, E. Malone, and H. Lipson, "Printing embedded circuits," *2007 International Solid Freeform Fabrication Symposium*, 2007.

[91] E. Malone and H. Lipson, "Multi-material freeform fabrication of active systems," *Proceedings of the 9th Biennial ASME Conference on Engineering Systems Design and Analysis*, 2008, pp. 345–353.

[92] G.L. Goh, S. Agarwala, G.D. Goh, H.K.J. Tan, L. Zhao, T.K. Chuah, and W.Y. Yeong, "Additively manufactured multi-material free-form structure with printed electronics," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 94, 2018, pp. 1309–1316.

[93] K.H. Church, N.B. Crane, P.I. Deffenbaugh, T.P. Ketterl, C.G. Neff, P.B. Nesbitt, J.T. Nussbaum, C. Perkowski, H. Tsang, J. Castro, and others, "Multimaterial and multilayer direct digital manufacturing of 3-D structural microwave electronics," *Proceedings of the IEEE*, vol. 105, 2017, pp. 688–701.

[94] U. Robles, A. Kudzal, and R.C. Rumpf, "Automated Hybrid 3-D Printing of 3-D Meandering Interconnects," *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 9, 2019, pp. 1184–1189.

[95] F. Wasserfall, "Embedding of SMD populated circuits into FDM printed objects," *Proceedings of the 26th International Solid Freeform Fabrication Symposium*, 2015, pp. 180–189.

[96] R. van Dommelen, O. Chandran, S. Lani, and D. Briand, "In-Situ Laser Processing for 3D Printed Mechanical Transducers," *2019 20th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems & Eurosensors XXXIII (TRANSDUCERS & EUROSENSORS XXXIII)*, IEEE, 2019, pp. 2444–2447.

[97] B. Niese, P. Amend, T. Frick, S. Roth, and M. Schmidt, "Fast and flexible production of mechatronic integrated devices by means of additive manufacturing," *2016 12th International Congress Molded Interconnect Devices (MID)*, IEEE, 2016, pp. 1–6.

[98] G.T. Carranza, U. Robles, C.L. Valle, J.J. Gutierrez, and R.C. Rumpf, "Design and hybrid additive manufacturing of 3-D/volumetric electrical circuits," *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 9, 2019, pp. 1176–1183.

[99] R. Kronberger, S. Grünwald, V. Wienstroer, and V. Tsatsos, "New Low-Cost FDM Technology for Printing Antennas," *2020 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*, IEEE, 2021, pp. 571–572.

[100] S. Bijadi, T. Zalusky, J. O'Neill, and T. Kowalewski, "Feasibility of Additive Manufacturing Method for Developing Stretchable Electronics for Bio-integrated Devices."

[101] K. Schmidt and A. Zimmermann, "Evaluation of process and anisotropy of thermosetting adhesives with ultraviolet-assisted 3D dispensing," *Additive Manufacturing*, vol. 34, 2020, p. 101262.

[102] K. Schmidt, B. Polzinger, M. Metry, S. Koppe, and A. Zimmermann, "Hybrid Additive Manufacturing by Embedded Electrical Circuits Using 3-D Dispensing," *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 11, 2021, pp. 510–521.

[103] B.B. Patel, Y. Chang, S.K. Park, S. Wang, J. Rosheck, K. Patel, D. Walsh, D. Guironnet, and Y. Diao, "PolyChemPrint: A hardware and software framework for benchtop additive manufacturing of functional polymeric materials," *Journal of Polymer Science*, vol. 59, 2021, pp. 2468–2478.

[104] B. Luo, Y. Zhong, H. Chen, Z. Zhu, and Y. Wang, "Manufacturing a soft actuator/sensor integrated structure via multi-material direct writing processes technology," *Polymer Testing*, vol. 104, 2021, p. 107382.

[105] P. Wang, J. Li, G. Wang, L. He, Y. Yu, and B. Xu, "Multimaterial Additive Manufacturing of LTCC Matrix and Silver Conductors for 3D Ceramic Electronics," *Advanced Materials Technologies*, vol. 7, 2022, p. 2101462.

[106] K. Schmidt, B. Polzinger, M. Runtze, and A. Zimmermann, "Embedding and Contacting of Electrical Components for Hybrid Additive Manufacturing," *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 12, 2022, pp. 1401–1409.

[107] M.R. Binelli, R. van Dommelen, Y. Nagel, J. Kim, R.I. Haque, F.B. Coulter, G. Siqueira, A.R. Studart, and D. Briand, "Digital manufacturing of personalised footwear with embedded sensors," *Scientific Reports*, vol. 13, 2023, p. 1962.

[108] A. Lopes, M. Navarrete, F. Medina, J. Palmer, E. MacDonald, and R. Wicker, "Expanding rapid prototyping for electronic systems integration of arbitrary form," *2006 International Solid Freeform Fabrication Symposium*, 2006.

[109] E. Macdonald, R. Salas, D. Espalin, M. Perez, E. Aguilera, D. Muse, and R.B. Wicker, "3D Printing for the Rapid Prototyping of Structural Electronics," *IEEE Access*, vol. 2, Dec. 2014, pp. 234–242.

[110] B. Niese, T. Stichel, P. Amend, U. Urmoneit, S. Roth, and M. Schmidt, "Manufacturing of conductive circuits for embedding Stereolithography by means of conductive adhesive and laser sintering," *Physics Procedia*, vol. 56, 2014, pp. 336–344.

[111] B. Niese, U. Urmoneit, T. Frick, S. Roth, and M. Schmidt, "Untersuchung des Auftrags von Silberpartikeltinte zur Erzeugung von leitfähigen Strukturen für die Einbettende Stereolithographie," *RTejournal-Forum für Rapid Technologie*, 2015.

[112] S.H. Jang, S.T. Oh, I.H. Lee, H.-C. Kim, and H.Y. Cho, "3-dimensional circuit device fabrication process using stereolithography and direct writing," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 16, 2015, pp. 1361–1367.

[113] Y. Lu, M. Vatani, and J.-W. Choi, "Direct-write/cure conductive polymer nanocomposites for 3D structural electronics," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 27, 2013, pp. 2929–2934.

[114] A.J. Lopes, E. MacDonald, and R.B. Wicker, "Integrating stereolithography and direct print technologies for 3D structural electronics fabrication," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 18, 2012, pp. 129–143.

[115] J. Raynaud, V. Pateloup, M. Bernard, D. Gourdonnaud, D. Passerieux, D. Cros, V. Madrangeas, and T. Chartier, "Hybridization of additive manufacturing processes to build ceramic/metal parts: Example of LTCC," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 40, 2020, pp. 759–767.

[116] J. Raynaud, V. Pateloup, M. Bernard, D. Gourdonnaud, D. Passerieux, D. Cros, V. Madrangeas, P. Michaud, and T. Chartier, "Hybridization of additive manufacturing processes to build ceramic/metal parts: Example of HTCC," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 41, 2021, pp. 2023–2033.

[117] J.A. Palmer, J.L. Summers, D.W. Davis, P.L. Gallegos, B.D. Chavez, P. Yang, F. Medina, and R.B. Wicker, "Realizing 3-D interconnected direct write electronics within smart stereolithography structures," *ASME international mechanical engineering congress and exposition*, 2005, pp. 287–293.

[118] A.J. Lopes, I.H. Lee, E. MacDonald, R. Quintana, and R. Wicker, "Laser curing of silver-based conductive inks for in situ 3D structural electronics fabrication in stereolithography," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 214, 2014, pp. 1935–1945.

[119] F. Medina, A. Lopes, A. Inamdar, R. Hennessey, J. Palmer, B. Chavez, D. Davis, P. Gallegos, and R. Wicker, "Hybrid manufacturing: integrating direct write and stereolithography," *2005 International Solid Freeform Fabrication Symposium*, 2005.

[120] J. Li, T. Wasley, D. Ta, J. Shephard, J. Stringer, P.J. Smith, E. Esenturk, C. Connaughton, R. Harris, and R. Kay, "Micro electronic systems via multifunctional additive manufacturing," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 24, 2018, pp. 752–763.

[121] X. Peng, X. Kuang, D.J. Roach, Y. Wang, C.M. Hamel, C. Lu, and H.J. Qi, "Integrating digital light processing with direct ink writing for hybrid 3D printing of functional structures and devices," *Additive Manufacturing*, vol. 40, 2021, p. 101911.

[122] J. Ledesma Fernandez, "Jetting of multiple functional materials by additive manufacturing," University of Nottingham, 2018.

[123] K.B. Perez and C.B. Williams, "Design considerations for hybridizing additive manufacturing and direct write technologies," *ASME 2014 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2014.

[124] Y. Jo, H.J. Park, Y.-B. Kim, S.S. Lee, S.Y. Lee, S.-K. Kim, Y. Choi, and S. Jeong, "Form-Factor Free 3D Copper Circuits by Surface-Conformal Direct Printing and Laser Writing," *Advanced Functional Materials*, vol. 30, 2020, p. 2004659.

[125] K.B. Perez and C.B. Williams, "Characterization of in-situ conductive paste extrusion on polyjet substrates," *2014 International Solid Freeform Fabrication Symposium*, University of Texas at Austin, 2014.

[126] Y.-H. Chueh, X. Zhang, J.C.-R. Ke, Q. Li, C. Wei, and L. Li, "Additive manufacturing of hybrid metal/polymer objects via multiple-material laser powder bed fusion," *Additive Manufacturing*, vol. 36, 2020, p. 101465.

[127] J. Glasschroeder, E. Prager, and M.F. Zaeh, "Powder-bed-based 3D-printing of function integrated parts," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 21, 2015, pp. 207–215.

[128] J. Hoerber, J. Glasschroeder, M. Pfeffer, J. Schilp, M. Zaeh, and J. Franke, "Approaches for additive manufacturing of 3D electronic applications," *Procedia CIRP*, vol. 17, 2014, pp. 806–811.

[129] A. Bournias-Varotsis, S. Wang, D. Hutt, and D.S. Engstrøm, "The effect of ultrasonic additive manufacturing on integrated printed electronic conductors," *Electronic Materials Letters*, vol. 14, 2018, pp. 413–425.

[130] A. Bournias-Varotsis, X. Han, R.A. Harris, and D.S. Engstrøm, "Ultrasonic additive manufacturing using feedstock with build-in circuitry for 3D metal embedded electronics," *Additive Manufacturing*, vol. 29, 2019, p. 100799.

[131] A. Bournias-Varotsis, R.J. Friel, R.A. Harris, and D.S. Engstrom, "Selectively anodised aluminium foils as an insulating layer for embeddingelectronic circuitry in a metal matrix via ultrasonic additive manufacturing," *27th Annual International Solid Freeform Fabrication (SFF) Symposium–An Additive Manufacturing Conference, Austin, Texas, USA, Aug 8-10th, 2016*, 2016, pp. 2260–2270.

[132] R. Hensleigh, H. Cui, Z. Xu, J. Massman, D. Yao, J. Berrigan, and X. Zheng, "Charge-programmed three-dimensional printing for multi-material electronic devices," *Nature Electronics*, vol. 3, 2020, pp. 216–224.

[133] K. Song, Y. Cui, T. Tao, X. Meng, M. Sone, M. Yoshino, S. Umezu, and H. Sato, "New metal-plastic hybrid additive manufacturing strategy: Fabrication of arbitrary metal-patterns on external and even internal surfaces of 3D plastic structures," *arXiv preprint arXiv:2112.11661*, 2021.

[134] C. Credi, R. Bernasconi, M. Levi, and L. Magagnin, "Self-activating metal-polymer composites for the straightforward selective metallization of 3D printed parts by stereolithography," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 22, 2023, pp. 1855–1867.

[135] A. Ryspayeva, A. Zhakeyev, M.P. Desmulliez, and J. Marques-Hueso, "Multimaterial 3D Printing Technique for Electronic Circuitry Using Photopolymer and Selective Metallization," *Advanced Engineering Materials*, 2022, p. 2201243.

[136] M.V. Morais, R. Reidel, P. Weiss, S. Baumann, C. Hübner, and F. Henning, "Integration of electronic components in the thermoplastic processing chain: Possibilities through additive manufacturing using conductive materials," *2018 13th International Congress Molded Interconnect Devices (MID)*, IEEE, 2018, pp. 1–4.

[137] A. Panesar, D. Brackett, I. Ashcroft, R. Wildman, and R. Hague, "Design framework for multifunctional additive manufacturing: Placement and routing of three-dimensional printed circuit volumes," *Journal of Mechanical Design*, vol. 137, 2015.

[138] A. Panesar, I. Ashcroft, D. Brackett, R. Wildman, and R. Hague, "Design framework for multifunctional additive manufacturing: coupled optimization strategy for structures with embedded functional systems," *Additive Manufacturing*, vol. 16, 2017, pp. 98–106.

[139] T. Tilford, S. Stoyanov, J. Braun, J.C. Janhsen, M. Burgard, R. Birch, and C. Bailey, "Design, manufacture and test for reliable 3D printed electronics packaging," *Microelectronics Reliability*, vol. 85, 2018, pp. 109–117.

[140] T. Tilford, S. Stoyanov, J. Braun, J.C. Janhsen, M.K. Patel, and C. Bailey, "Comparative reliability of inkjet-printed electronics packaging," *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 11, 2021, pp. 351–362.

[141] E. Saleh, F. Zhang, Y. He, J. Vaithilingam, J.L. Fernandez, R. Wildman, I. Ashcroft, R. Hague, P. Dickens, and C. Tuck, "3D inkjet printing of electronics using UV conversion," *Advanced Materials Technologies*, vol. 2, 2017, p. 1700134.

[142] M.S. Mansouri, B.H. An, H. Al Shibli, H. Al Yassi, T.S. Alkindi, J.S. Lee, Y.K. Kim, J.E. Ryu, and D.S. Choi, "Fabrication of three-dimensional electrical patterns by swollen-off process: An evolution of the lift-off process," *Current Applied Physics*, vol. 18, 2018, pp. 1235–1239.

[143] T. Hirao and S. Hamada, "Novel multi-material 3-dimensional low-temperature co-fired ceramic base," *IEEE Access*, vol. 7, 2019, pp. 12959–12963.

[144] S. Sundaram, D.S. Kim, M.A. Baldo, R.C. Hayward, and W. Matusik, "3D-printed self-folding electronics," *ACS applied materials & interfaces*, vol. 9, 2017, pp. 32290–32298.

[145] J.A. Wittkopf, K. Erickson, P. Olumbummo, A. Hartman, H. Tom, and L. Zhao, "3D printed electronics with multi jet fusion," *NIP & Digital Fabrication Conference*, Society for Imaging Science and Technology, 2019, pp. 29–33.

[146] Y.-H. Chueh, C. Wei, X. Zhang, and L. Li, "Integrated laser-based powder bed fusion and fused filament fabrication for three-dimensional printing of hybrid metal/polymer objects," *Additive Manufacturing*, vol. 31, 2019, p. 100928.

[147] S. Czink, V. Lubkowitz, S. Dietrich, and V. Schulze, "Process development for the hybrid additive manufacturing of metallic structures on polymer substrates," *Additive Manufacturing Letters*, vol. 6, 2023, p. 100132.

[148] S. Hou, S. Qi, D.A. Hutt, J.R. Tyrer, M. Mu, and Z. Zhou, "Three dimensional printed electronic devices realised by selective laser melting of copper/high-density-polyethylene powder mixtures," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 254, 2018, pp. 310–324.

[149] J.H. Glasschröder, "Additiv gefertigte Werkstücke mit integrierten elektrischen Schaltungen unter Nutzung des 3D-Druckprozesses," Technische Universität München, 2018.

[150] A. Wild, "Integration of Functional Circuits into FDM Parts," *11th International Congress Molded Interconnect Devices – Scientific Proceedings*, Trans Tech Publications, 2014, pp. 29–33.

[151] R. Freitas, L. Rietter, C. Goncalves, J. Silva, F. Carneiro, C. Furtado, S. Gomes, and R. Lobo, "Study for improvement of selective metallization on 3D printed components using LDS technology," LOPEC, München, 2022.

[152] P. Wang, J. Li, G. Wang, Y. Hai, L. He, Y. Yu, X. Wang, M. Chen, and B. Xu, "Selectively Metalizable Low-Temperature Cofired Ceramic for Three-Dimensional Electronics via Hybrid Additive Manufacturing," *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022.

[153] P. Amend, C. Goth, J. Franke, T. Frick, and M. Schmidt, "ADDIMID Technology and Aerosol Jet Printing for Functional MID Prototypes by the Use of Stereolithography," *Proceedings of the 10th International Congress Molded Interconnect Devices*.

[154] J. Li, Y. Zhang, P. Wang, G. Wang, Y. Liu, Y. Liu, and Q. Li, "Selectively Metalizable Stereolithography Resin for Three-Dimensional DC and High-Frequency Electronics via Hybrid Additive Manufacturing," *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021.

[155] D. Lee, B.-Y. Kim, C.H. Park, G. Jeong, S.-D. Park, M.J. Yoo, H. Yang, and W.S. Lee, "Photocurable Three-Dimensional Printing Resin to Enable Laser-Assisted Selective Electroless Metallization for Customized Electronics," *ACS Applied Polymer Materials*, vol. 3, 2021, pp. 4735–4745.

[156] S. Choi and M. Park, "Fabrication of Conductive Patterns on 3D Printed Structure Using Photo-Polymerization Technology," *physica status solidi (a)*, vol. 216, 2019, p. 1801017.

[157] F. Liu, D. Xie, C. Jiao, D. Bai, H. Wu, L. Shen, Z. Tian, and J. Zhao, "Selective metallization on additive manufactured polymer for fabrication of integrated device," *Journal of Materials Science*, 2022, pp. 1–10.

[158] P. Amend, O. Hentschel, C. Scheitler, M. Baum, J. Heberle, S. Roth, and M. Schmidt, "Fast and flexible generation of conductive circuits," *Journal of Laser Micro Nanoengineering*, vol. 8, 2013, p. 276.

[159] P. Wang, J. Li, G. Wang, L. He, J. Yang, C. Zhang, Z. Han, and Y. Yan, "Hybrid additive manufacturing based on vat photopolymerization and laser-activated selective metallization for three-dimensional conformal electronics," *Additive Manufacturing*, vol. 63, 2023, p. 103388.

[160] P. Amend, C. Pscherer, T. Rechtenwald, T. Frick, and M. Schmidt, "A fast and flexible method for manufacturing 3D molded interconnect devices by the use of a rapid prototyping technology," *Physics Procedia*, vol. 5, 2010, pp. 561–572.

[161] S. Balzereit, F. Proes, V. Altstädt, and C. Emmelmann, "Properties of copper modified polyamide 12-powders and their potential for the use as laser direct structurable electronic circuit carriers," *Additive Manufacturing*, vol. 23, 2018, pp. 347–354.

[162] C. Gath and D. Drummer, "Circuit board application to additive manufactured components by laser-direct-structuring," *2016 12th International Congress Molded Interconnect Devices (MID)*, IEEE, 2016, pp. 1–6.

[163] Y. Sun and T. Niino, "Laser sintering of LDS material," *2016 12th International Congress Molded Interconnect Devices (MID)*, IEEE, 2016, pp. 1–5.

[164] T. Niino, T. Watanabe, and M. Mori, "Development of LS-LDS combined process and material enabling simultaneous activation during additive manufacturing process," *2018 13th International Congress Molded Interconnect Devices (MID)*, IEEE, 2018, pp. 1–4.

[165] F.W. Proes, "Additive Manufacturing of Mechatronic Integrated Devices," Technische Universität Hamburg, 2022.

[166] C. Goth and L. Tröger, "Prototyping für MID," 2019.

[167] T. Mager, C. Jürgenhake, and R. Dumitrescu, "Functionalization of additive manufactures components with laser direct structurable lacquer," *2018 13th International Congress Molded Interconnect Devices (MID)*, IEEE, 2018, pp. 1–9.

[168] H. Müller, S. Weser, Y. Liu, T. Vieten, T. Günther, W. Eberhardt, and A. Zimmermann, "Generative Processes for Rapid Prototyping of MID: Methods and Potentials," *12th International Congress Molded Interconnect Devices*, Research Association Molded Interconnect Devices, 2016, pp. 93–104.

[169] S. Brinkhues, A. Kanthamneni, A. Brose, S. Majcherek, and B. Schmidt, "Investigation of adhesion strength of metallization on thermoplastic and ceramic substrates," *2016 12th International Congress Molded Interconnect Devices (MID)*, IEEE, 2016, pp. 1–6.

[170] I. Shin and M. Park, "3D printed conductive patterns based on laser irradiation," *physica status solidi (a)*, vol. 214, 2017, p. 1600943.

[171] M.P. Shuttleworth, M.N. Esfahani, J. Marques-Hueso, T.D. Jones, A. Ryspayeva, M.P.Y. Desmulliez, R. Harris, and R.W. Kay, "A New digitally driven process for the fabrication of integrated flex-rigid electronics," *Proc. 29th Annu. Int. Solid Free. Fabr. Symp*, 2018.

[172] R.N. Esfahani, M.P. Shuttleworth, V. Doychinov, N.J. Wilkinson, J. Hinton, T.D. Jones, A. Ryspayeva, I.D. Robertson, J. Marques-Hueso, M.P. Desmulliez, and others, "Light based synthesis of metallic nanoparticles on surface-modified 3D printed substrates for high performance electronic systems," *Additive Manufacturing*, vol. 34, 2020, p. 101367.

[173] R. Rafael and P.K. Chan, "Copper Composites and Laser Sintering: Novel Hybridization Method for 3D Printed Electronics," *Advanced Materials Technologies*, 2023, p. 2201900.

[174] L. Wu, L. Meng, Y. Wang, M. Lv, T. Ouyang, Y. Wang, and X. Zeng, "Fabrication of polyetheretherketone (PEEK)-based 3D electronics with fine resolution by a hydrophobic treatment assisted hybrid additive manufacturing method," *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2023.

[175] W.K. Yung, B. Sun, J. Huang, Y. Jin, Z. Meng, H.S. Choy, Z. Cai, G. Li, C.L. Ho, J. Yang, and others, "Photochemical copper coating on 3D printed thermoplastics," *Scientific reports*, vol. 6, 2016, pp. 1–7.

[176] F. Zhao, C. Jiao, D. Xie, B. Lu, M. Qiu, X. Yi, J. Liu, C. Wang, L. Shen, and Z. Tian, "Research on laser-assisted selective metallization of a 3D printed ceramic surface," *RSC Advances*, vol. 10, 2020, pp. 44015–44024.

[177] E. Olsen and L. Overmeyer, "Additive manufacturing of conductive copper traces on 3D geometries by laser-sintering," *Lasers in Manufacturing Conference (LiM) 2021*, 2021.

[178] W. Zhou, F.A. List, C.E. Duty, and S.S. Babu, "Fabrication of conductive paths on a fused deposition modeling substrate using inkjet deposition," *Rapid Prototyping Journal*, 2016.

[179] B. Urasinska-Wojcik, N. Chilton, P. Todd, C. Elsworthy, M. Bates, G. Roberts, and G.J. Gibbons, "Integrated manufacture of polymer and conductive tracks for real-world applications," *Additive Manufacturing*, vol. 29, 2019, p. 100777.

[180] D. Utsch, N. Piechulek, and J. Franke, "Additive Manufacturing of 3D Circuit Carriers with Improved Thermal Conductivity," *2022 45th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*, IEEE, 2022, pp. 1–6.

[181] A. Muguruza, J.B. Bo, A. Gómez, J. Minguella-Canela, J. Fernandes, F. Ramos, E. Xuriguera, A. Varea, and A. Cirera, "Development of a multi-material additive manufacturing process for electronic devices," *Procedia Manufacturing*, vol. 13, 2017, pp. 746–753.

[182] Y. Farraj, M. Layani, A. Yaverboim, and S. Magdassi, "Binuclear Copper Complex Ink as a Seed for Electroless Copper Plating Yielding> 70% Bulk Conductivity on 3D Printed Polymers," *Advanced Materials Interfaces*, 2018.

[183] S.A. Nauroze, J. Kimionis, J. Bito, W. Su, J.G. Hester, K. Nate, B. Tehrani, and M.M. Tentzeris, "Additive manufacturing technologies for near-and far-field energy harvesting applications," *Radio and Wireless Symposium (RWS), 2016 IEEE*, IEEE, 2016, pp. 159–161.

[184] M. Krivec, A. Roshanghias, A. Abram, and A. Binder, "Exploiting the combination of 3D polymer printing and inkjet Ag-nanoparticle printing for advanced packaging," *Microelectronic Engineering*, vol. 176, 2017, pp. 1–5.

[185] A. Roshanghias, M. Krivec, and M. Baumgart, "Sintering strategies for inkjet printed metallic traces in 3D printed electronics," *Flexible and Printed Electronics*, vol. 2, 2017, p. 045002.

[186] J. Vaithilingam, E. Saleh, C. Tuck, R. Wildman, I. Ashcroft, R. Hague, and P. Dickens, "3D-inkjet printing of flexible and stretchable electronics," *Proceedings of the 26th Solid Freeform Fabrication Symposium*, 2015, pp. 10–12.

[187] P. Johander, S. Haasl, K. Persson, and U. Harrysson, "Layer manufacturing as a generic tool for microsystem integration," *Proceedings of the Third International Conference on Multi-Material Micro Manufacture, Borovets, Bulgaria*, Citeseer, 2007, pp. 3–5.

[188] Z. Huang, Y. Tang, H. Guo, X. Feng, T. Zhang, P. Li, B. Qian, and Y. Xie, "3D printing of ceramics and graphene circuits-on-ceramics by thermal bubble inkjet technology and high temperature sintering," *Ceramics International*, vol. 46, 2020, pp. 10096–10104.

[189] O. Chandran, S. Lani, D. Briand, B. Dunan, and G. Voirin, "Additive Manufacturing on 3D Surfaces," *Industrializing Additive Manufacturing - Proceedings of Additive Manufacturing in Products and Applications - AMPA2017*, M. Meboldt and C. Klahn, eds., Cham: Springer International Publishing, 2018, pp. 137–144.

[190] D. Gräf, S. Neermann, L. Stuber, M. Scheetz, and J. Franke, "Pushing the Boundaries of 3D-MID: Pulse-Width Modulated Light Technology for Enhancing Surface Properties and Enabling Printed Electronics on FFF-Printed Structures," *2018 13th International Congress Molded Interconnect Devices (MID)*, IEEE, 2018, pp. 1–5.

[191] M.N. Jahangir, J. Cleeman, C. Pan, C.-H. Chang, and R. Malhotra, "Flash light assisted additive manufacturing of 3D structural electronics (FLAME)," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 82, 2022, pp. 319–335.

[192] M.N. Jahangir, J. Cleeman, H.-J. Hwang, and R. Malhotra, "Towards out-of-chamber damage-free fabrication of highly conductive nanoparticle-based circuits inside 3D printed thermally sensitive polymers," *Additive Manufacturing*, vol. 30, 2019, p. 100886.

[193] E. Enakerakpo, M. Alhendi, G.S. Khinda, B. Garakani, K.U.S. Somarathna, M. Poliks, S. Gonya, and V. Basava, "Fully Additive Manufacturing of Passive Circuit Elements using Aerosol Jet Printing," *2021 IEEE 71st Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, IEEE, 2021, pp. 1138–1143.

[194] C. Goth, S. Putzo, and J. Franke, "Aerosol Jet printing on rapid prototyping materials for fine pitch electronic applications," *Electronic Components and Technology Conference (ECTC), 2011 IEEE 61st*, IEEE, 2011, pp. 1211–1216.

[195] G.A. Andreatta, N.R. Hendricks, A. Grivel, and M. Billod, "Grafted-to Polymeric Layers Enabling Highly Adhesive Copper Films Deposited by Electroless Plating on Ultra-Smooth Three-Dimensional-Printed Surfaces," *ACS Applied Electronic Materials*, vol. 4, 2022, pp. 1864–1874.

[196] Y.-H. Chang, K. Wang, C. Wu, Y. Chen, C. Zhang, and B. Wang, "A facile method for integrating direct-write devices into three-dimensional printed parts," *Smart Materials and Structures*, vol. 24, 2015, p. 065008.

[197] C.E. Folgar, L.N. Folgar, and D. Cormier, "Multifunctional material direct printing for laser sintering systems," *2013 International Solid Freeform Fabrication Symposium*, University of Texas at Austin, 2013.

[198] G.L. Goh, V. Dikshit, R. Koneru, Z.K. Peh, W. Lu, G.D. Goh, and W.Y. Yeong, "Fabrication of design-optimized multifunctional safety cage with conformal circuits for drone using hybrid 3D printing technology," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 120, 2022, pp. 2573–2586.

[199] B. Walpuski and M. Sloma, "Additive Manufacturing of Electronics from Silver Nanopowders Sintered on 3D Printed Low-Temperature Substrates.," *Advanced Engineering Materials*, 2021, p. 2001085.

[200] S. Lee, M. Wajahat, J.H. Kim, J. Pyo, W.S. Chang, S.H. Cho, J.T. Kim, and S.K. Seol, "Electroless deposition-assisted 3D printing of micro circuitries for structural electronics," *ACS applied materials & interfaces*, vol. 11, 2019, pp. 7123–7130.

[201] T. Wasley, J. Li, D. Ta, J. Shephard, J. Stringer, P. Smith, E. Esenturk, C. Connaughton, and R. Kay, "Additive Manufacturing of High Resolution Embedded Electronic Systems," *Proceedings of the 27th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium–An Additive Manufacturing Conference*, University of Texas at Austin, 2016, pp. 1838–1855.

[202] J. Li, T. Wasley, T.T. Nguyen, V.D. Ta, J.D. Shephard, J. Stringer, P. Smith, E. Esenturk, C. Connaughton, and R. Kay, "Hybrid additive manufacturing of 3D electronic systems," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 26, 2016, p. 105005.

[203] M. Navarrete, A. Lopes, J. Acuna, R. Estrada, E. MacDonald, J. Palmer, and R. Wicker, *Integrated layered manufacturing of a novel wireless motion sensor system with GPS*, Texas Univ at El Paso Wm Keck Center For 3D Innovation, 2007.

[204] H.H. Maalderink, F.B. Bruning, M.M. de Schipper, J.J. van der Werff, W.W. Germs, J.J. Remmers, and E.R. Meinders, "3D Printed structural electronics: embedding and connecting electronic components into freeform electronic devices," *Plastics, Rubber and Composites*, vol. 47, 2018, pp. 35–41.

[205] S. Castillo, D. Muse, F. Medina, E. MacDonald, and R. Wicker, "Electronics integration in conformal substrates fabricated with additive layered manufacturing," *Proceedings of the 20th annual solid freeform fabrication symposium*, 2009, pp. 730–737.

[206] Y. Jo, J.Y. Kim, S. Jung, B.Y. Ahn, J.A. Lewis, Y. Choi, and S. Jeong, "3D polymer objects with electronic components interconnected via conformally printed electrodes," *Nanoscale*, vol. 9, 2017, pp. 14798–14803.

[207] C.J. Robinson, B. Stucker, A.J. Lopes, R. Wicker, and J.A. Palmer, "Integration of direct-write (DW) and ultrasonic consolidation (UC) technologies to create advanced structures with embedded electrical circuitry," *2006 International Solid Freeform Fabrication Symposium*, 2006.

[208] A. Bellacicca, T. Santaniello, and P. Milani, "Embedding electronics in 3D printed structures by combining fused filament fabrication and supersonic cluster beam deposition," *Additive Manufacturing*, vol. 24, 2018, pp. 60–66.

[209] T. Santaniello and P. Milani, "Additive nano-manufacturing of 3D printed electronics using supersonic cluster beam deposition," *Frontiers of Nanoscience*, Elsevier, 2020, pp. 313–333.

[210] G. Saada, M. Layani, A. Chernevousky, and S. Magdassi, "Hydroprinting conductive patterns onto 3D structures," *Advanced Materials Technologies*, vol. 2, 2017, p. 1600289.

[211] A. Levy, G. Bernstein Toker, S. Winter, S.S. Cohen, O. Ermak, I. Peled, Z. Kotler, and Y. Gelbstein, "Hybrid structural electronics printing by novel dry film stereolithography and laser induced forward transfer," *Nano Select*, vol. 2, 2021, pp. 979–991.

[212] E. Aguilera, J. Ramos, D. Espalin, F. Cedillos, D. Muse, R. Wicker, and E. MacDonald, "3D printing of electro mechanical systems," *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, 2013, pp. 950–961.

[213] B. Cox, M. Saari, B. Xia, E. Richer, P.S. Krueger, and A.L. Cohen, "Fiber encapsulation additive manufacturing: technology and applications update," *3D Printing and Additive Manufacturing*, vol. 4, 2017, pp. 116–119.

[214] M. Saari, B. Cox, E. Richer, P.S. Krueger, and A.L. Cohen, "Fiber encapsulation additive manufacturing: An enabling technology for 3D printing of electromechanical devices and robotic components," *3D Printing and Additive Manufacturing*, vol. 2, 2015, pp. 32–39.

[215] B. Xia, M. Saari, B. Cox, E. Richer, P. Krueger, and A. Cohen, "Fiber encapsulation additive manufacturing: Materials for electrical junction fabrication," *Proceedings of the 26th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, 2016, p. 1358.

[216] M. Liang, C. Shemelya, E. MacDonald, R. Wicker, and H. Xin, "3-D printed microwave patch antenna via fused deposition method and ultrasonic wire mesh embedding technique," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 14, 2015, pp. 1346–1349.

[217] K.M.M. Billah, J.L. Coronel, M.C. Halbig, R.B. Wicker, and D. Espalin, "Electrical and thermal characterization of 3D printed thermoplastic parts with embedded wires for high current-carrying applications," *IEEE Access*, vol. 7, 2019, pp. 18799–18810.

[218] C. Shemelya, F. Cedillos, E. Aguilera, D. Espalin, D. Muse, R. Wicker, and E. MacDonald, "Encapsulated copper wire and copper mesh capacitive sensing for 3-D printing applications," *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, 2014, pp. 1280–1286.

[219] C. Shemelya, F. Cedillos, E. Aguilera, E. Maestas, J. Ramos, D. Espalin, D. Muse, R. Wicker, and E. MacDonald, "3D printed capacitive sensors," *SENSORS, 2013 IEEE*, IEEE, 2013, pp. 1–4.

[220] J.L. Coronel Jr, K.H. Fehr, D.D. Kelly, D. Espalin, and R.B. Wicker, "Increasing component functionality via multi-process additive manufacturing," *Micro-and Nanotechnology Sensors, Systems, and Applications IX*, SPIE, 2017, pp. 250–257.

[221] E. Armendariz, D.A. Sepulveda, D. Espalin, J.I. Rome, A.J. Hall, and D. Veksler, "Automated laser soldering techniques for ultrasonically B761embedded wires in a hybrid additive manufacturing nvironment for electric multifunctionality," *Proceedings of SPIE LASE, 2022, San Francisco, California, United States*, 2022.

[222] J.P. Swensen, L.U. Odhner, B. Araki, and A.M. Dollar, "Printing three-dimensional electrical traces in additive manufactured parts for injection of low melting temperature metals," *Journal of Mechanisms and Robotics*, vol. 7, 2015, p. 021004.

[223] Y.-Z. Yu, J.-R. Lu, and J. Liu, "3D printing for functional electronics by injection and package of liquid metals into channels of mechanical structures," *Materials & Design*, vol. 122, 2017, pp. 80–89.

[224] E. Sells and A. Bowyer, "Directly incorporating electronics into conventional rapid prototypes," *Proceedings of the 7th National Conference on Rapid Design, Prototyping and Manufacturing*, Centre for Rapid Design and Manufacture High Wycombe, 2006.

[225] J. Jiang, X. Zhai, K. Zhang, L. Jin, Q. Lu, Z. Shen, and W.-H. Liao, "Low-melting-point alloys integrated extrusion additive manufacturing," *Additive Manufacturing*, vol. 72, 2023, p. 103633.

[226] D.A. Roberson, R.B. Wicker, and E. MacDonald, "Ohmic curing of three-dimensional printed silver interconnects for structural electronics," *Journal of Electronic Packaging*, vol. 137, 2015, p. 031004.

[227] F. Ansorge, D. Ifland, C. Baar, K. Heumann, T. Stigler, and K.-D. Lang, "Produktion im Mikro- und Nanobereich auf Basis von generativen Herstelltechnologien," *productronic*, vol. 30, 2010, pp. 52–55.

[228] E. DeNava, M. Navarrete, A. Lopes, M. Alawneh, M. Contreras, D. Muse, S. Castillo, E. MacDonald, and R. Wicker, "Three-dimensional off-axis component placement and routing for electronics integration using solid freeform fabrication," *2008 International Solid Freeform Fabrication Symposium*, 2008.

[229] S.-Y. Wu, C. Yang, W. Hsu, and L. Lin, "3D-printed microelectronics for integrated circuitry and passive wireless sensors," *Microsystems & Nanoengineering*, vol. 1, 2015, pp. 1–9.

[230] A. Konda, A. Rau, M.A. Stoller, J.M. Taylor, A. Salam, G.A. Pribil, C. Argyropoulos, and S.A. Morin, "Soft microreactors for the deposition of conductive metallic traces on planar, embossed, and curved surfaces," *Advanced Functional Materials*, vol. 28, 2018, p. 1803020.

[231] J. Sarik, A. Butler, J. Scott, S. Hodges, and N. Villar, "Combining 3D printing and printable electronics," *Proc. of TEI '12 Works in Progress*, 2012.

[232] A. Salas-Barenys, N. Vidal, J. Sieiro, J.M. López-Villegas, B. Medina-Rodriguez, and F. Ramos, "Fabrication of full-3d printed electronics rf passive components and circuits," *2018 14th Conference on Ph. D. Research in Microelectronics and Electronics (PRIME)*, IEEE, 2018, pp. 265–268.

[233] A. Salas-Barenys, N. Vidal, J. Sieiro, J. Lopez-Villegas, B. Medina-Rodriguez, and F. Ramos, "Full-3D printed electronics process using stereolitography and electroless plating," *2017 32nd Conference on Design of Circuits and Integrated Systems (DCIS)*, IEEE, 2017, pp. 1–4.

[234] E. Olsen, K. Pflieger, A. Evertz, and L. Overmeyer, "Additive Manufacturing of 3D Multilayer Devices," *Innovative Product Development by Additive Manufacturing 2021*, Springer, 2022, pp. 229–242.

[235] S. Hou and J. Tyrer, "3D printing of structures with embedded circuit boards using novel holographic optics," *2013 IEEE 63rd Electronic Components and Technology Conference*, IEEE, 2013, pp. 455–460.

[236] J. Li, T. Monaghan, T. Nguyen, R. Kay, R. Friel, and R. Harris, "Multifunctional metal matrix composites with embedded printed electrical materials fabricated by ultrasonic additive manufacturing," *Composites Part B: Engineering*, vol. 113, 2017, pp. 342–354.

[237] A. Ryspayeva, T.D.A. Jones, S.R. Khan, M.N. Esfahani, M.P. Shuttleworth, R.A. Harris, R.W. Kay, M.P. Desmulliez, and J. Marques-Hueso, "Selective Metallization of 3D Printable Thermoplastic Polyurethanes," *IEEE Access*, vol. 7, 2019, pp. 104947–104955.

[238] J. Marques-Hueso, T.D. Jones, D.E. Watson, A. Ryspayeva, M.N. Esfahani, M.P. Shuttleworth, R.A. Harris, R.W. Kay, and M.P. Desmulliez, "A rapid photopatterning method for selective plating of 2D and 3D microcircuitry on polyetherimide," *Advanced Functional Materials*, vol. 28, 2018, p. 1704451.

[239] P. Regenfuss, A. Streek, L. Hartwig, S. Klötzer, T. Brabant, M. Horn, R. Ebert, and H. Exner, "Principles of laser micro sintering," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 13, 2007, pp. 204–212.

[240] K. Sertoglu, *Nano Dimension and Fraunhofer IPA partner to develop new electronics 3D printing process*, online, abfgerufen am 21.04.2022 unter https://3dprintingindustry.com/news/nano-dimension-and-fraunhofer-ipa-partner-to-develop-new-electronics-3d-printing-processes-196150/, 2021.

[241] *Technology Guide NeuroStone*, Murata Manufacturing Co., Ltd., Online, abgerufen am 17.05.2023 unter https://www.murata.com/en-eu/campaigns/neurostone, .

[242] neotech AMT, online abgerufen am 15.06.2023 unter https://www.neotech-amt.com/, .

[243] D. Borghino, *Voxel8 paves the way for 3D-printed electronics*, online, abgerufen am 21.04.2022 unter https://newatlas.com/voxel8-3d-electronics-printer/35489/, 2015.

[244] R. Zoch, *Kornit Digital Acquires Voxel8*, Kornit Digital, online, abfgerufen am 21.04.2022 unter https://www.kornit.com/blog/kornit-digital-acquires-voxel8-expanding-additive-manufacturing-technology-portfolio-for-next-generation-of-sustainable-on-demand-textile-production/, 2021.

[245] W. John, "New Possibilities for MID Engineers based on LPKF-LDS™ ProtoPainting," *Proceedings of 9th International Congress Molded Interconnect Devices MID 2010*.

[246] H. Müller, T. Meißner, T. Grözinger, T. Vieten, M. Soltani, W. Eberhardt, and A. Zimmermann, "Rapid Prototyping von Molded Interconnect Devices (MID)," *10. Innovationsforum Smarte Technologien & Systeme, Donaueschingen, 15. März 2018*, 2018.

[247] Y. Zhang, H.N. Hansen, P.T. Tang, and J.S. Nielsen, "Verification of a characterization method of the laser-induced selective activation based on industrial lasers," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 68, 2013, pp. 1775–1783.

[248] R.I. Campbell, M. Martorelli, and H.S. Lee, "Surface roughness visualisation for rapid prototyping models," *Computer-Aided Design*, vol. 34, 2002, pp. 717–725.

[249] N.N. Kumbhar and A. Mulay, "Post processing methods used to improve surface finish of products which are manufactured by additive manufacturing technologies: a review," *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, vol. 99, 2018, pp. 481–487.

[250] M. Van Crüchten, "Vergleich der Generativen Fertigungsverfahren Stereolithographie und selektives Lasersintern am Beispiel der Modellierung eines Baggerarms, Diplomarbeit," Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 1995.

[251] S. Weser and B. Freisinger, *Werkzeuglose Fertigung von funktionalisierten 3D-Kunststoffbauteilen durch die Kombination von generativen Verfahren und laserbasierter selektiver Metallisierung (LasMet3D), AiF IGF Fördernummer 19555N*, https://www.hahn-schickard.de/projekt-detail/lasmet3d: Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e.V., 2020.

[252] Prodways, "Datasheet PLASTCure Material Range accessed at https://www.prodways.com/fr/wp-content/uploads/sites/3/2017/10/MOVINGLight-Materials-PLASTCure-Range-EN-V16.10.17.pdf," 2018.

[253] Z. Bozkurt, "Untersuchung der mechanischen Eigenschaften eines Photopolymers für die additive Fertigung von Mikrosystemen," Institut für Mikrointegration an der Universität Stuttgart, 2017.

[254] H.K. Schmidt, "Das Sol-Gel-Verfahren: Anorganische Synthesemethoden," *Chemie in unserer Zeit*, vol. 35, 2001, pp. 176–184.

[255] H. Böttcher, "Funktionelle Beschichtungen auf Basis anorganischer Nanosole," *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik: Materials Science and Engineering Technology*, vol. 32, 2001, pp. 759–766.

[256] C. Sögaard, J. Funehag, and Z. Abbas, "Silica sol as grouting material: a physio-chemical analysis," *Nano convergence*, vol. 5, 2018, pp. 1–15.
[257] *Carl Roth GmbH + Co. KG, Sicherheitsdatenblatt Natronwasserglas 38/40 °Bé, reinst, 07-Juni-2022, https://www.carlroth.com/downloads/sdb/de/7/SDB_7561_DE_DE.pdf*.
[258] *Carl Roth GmbH + Co. KG, Produktspezifikation Natronwasserglas 38/40 °Bé, reinst, Artikelnummer 7561, CAS-Nummer: 1344-09-8, 02-Jan-2023*.
[259] H.-J. Engelhardt and L.E. von Borstel, "The behaviour of sodium silicate solutions (water glass) in the saline environment and their use in salt mining," *Z. Dtsch. Ges. Grundwasser*, vol. 165, 2014, pp. 115–122.
[260] P. Ninz, "Dotierte Aluminiumoxid Substrate und deren Herstellungsprozessketten für die selektive laserinduzierte Metallisierung," Dissertation an der Universität Stuttgart, Shaker Verlag, Düren, 2021.
[261] R. Suchentrunk, *Kunststoff-Metallisierung (Schriftenreihe Galvanotechnik und Oberflächenbehandlung)*, 3. Auflage, Leuze Verlag, Bad Saulgau, 2000.
[262] M. Pourbaix, *Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions*, Pergamon Verlag, Oxford, New York, 1966.
[263] R.L. Cohen and K.W. West, "Generative and stabilizing processes in Tin-palladium Sols and palladium sol sensitizers," *Journal of Electrochemistry Society: Electrochemical Science and Technology*, vol. 120, 1973, p. 502.
[264] E.J. Fadgen and E.B. Saubestre, "Activator solutions, their preparation and use in electroless plating of surfaces," *U.S. Patent 3767583*, 1973.
[265] N. Kanani, "Kupferschichten: Abscheidung, Eigenschaften, Anwendungen," *Leuze Verlag, Bad Saulgau*, vol. ISBN 3874801632, 2000.
[266] *Produktdatenblatt MID Activator PC*, Atotech Deutschland GmbH & Co. KG, Berlin, 2012.
[267] *Produktdatenblatt MID Reducer*, Atotech Deutschland GmbH & Co. KG, Berlin, 2012.
[268] *Produktdatenblatt Udique 879 W Activation*, MacDermid Enthone GmbH, Langenfeld, 2016.
[269] *Produktdatenblatt Udique 8810 Accelerator*, MacDermid Enthone GmbH, Langenfeld, 2016.
[270] H. Jha, T. Kikuchi, M. Sakairi, and H. Takahashi, "Area-selective microscale metallization on porous anodic oxide film of aluminium," *Electrochemistry Communications*, vol. 9, 2007, pp. 1596–1601.
[271] J. Kim, S.H. Wen, D.Y. Jung, and R.W. Johnson, "Microstructure Evolution During Electroless Copper Deposition," *#j-IBM-JRD#*, vol. 28, 1984, pp. 697–710.
[272] E. Salahinejad, R. Eslami-Farsani, and L. Tayebi, "Corrosion failure analysis of printed circuit boards exposed to H2S-containing humid environments," *Engineering Failure Analysis*, vol. 79, 2017, pp. 538–546.
[273] LBH, "Diffusion barriers for gold plated copper: The influence of atomic radius," *Gold Bulletin*, vol. 8, 1975, pp. 52–52.
[274] J. Heber and H. Großmann, "Galvanisch hergestellte Kontaktwerkstoffe," *Elektrische Kontakte, Werkstoffe und Anwendungen: Grundlagen, Technologien, Prüfverfahren*, E. Vinaricky, ed., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016, pp. 343–359.
[275] W. Eberhardt, H. Kück, and S. Weser, "Von der Deko in die Industrie," *Elektronik Sonderausgabe Räumliche elektronische Baugruppen*, 2011, pp. 24–27.
[276] DuPont de Nemours Inc., *Produktdatenblatt CIRCUPOSIT 3350-1 Electroless Copper*, 2013.
[277] *Gebrauchsanleitung DURNI-COAT® Außenstromlos abscheidendes-Nickelbad auf Hypophosphit-Basis*, AMI Doduko GmbH, Pforzheim, 2008.
[278] *Technisches Datenblatt AUROBLEX 20 Außenstromloses Goldbad*, Blendl GmbH Plating Products, Metzingen, 2017.

[279] C. Goth, T. Kuhn, G. Gion, and J. Franke, "Hot Pin Pull Method – New Test Procedure for the Adhesion Measurement for 3D-MID," *11th International Congress Molded Interconnect Devices – Scientific Proceedings*, Trans Tech Publications Ltd, 2014, pp. 115–120.

[280] E. Hirt and K. Ruzicka, "3D-MID for Space," *2018 7th Electronic System-Integration Technology Conference (ESTC)*, 2018, pp. 1–8.

[281] IGF-Vorhaben, *Charakterisierung und praxisnahe Methoden zur Prüfung von Leiterbahnen auf LDS-MID als Metall/Kunststoff-Verbundsysteme (LDS-MIDCHAMP)*, AiF, Erlangen, 2015.

[282] E. Yasa, O. Poyraz, E.U. Solakoglu, G. Akbulut, and S. Oren, "A study on the stair stepping effect in direct metal laser sintering of a nickel-based superalloy," *Procedia Cirp*, vol. 45, 2016, pp. 175–178.

[283] J. Friedrich, "Untersuchungen zur Strombelastbarkeit von Leiterbahnen auf metallisierten Thermoplasten," Fürth, 2006.

[284] J. Meyer, C.A. Smith, and F. Palm Bay, "Effect of silicone contamination on assembly processes," *Ipc Apex Expo*, vol. 2012, 2012, pp. 1622–1642.

[285] *ORMOCER® und bioORMOCER® – Neue multifunktionale und nachhaltige Werkstoffe*, Fraunhofer ISC, Würzburg, online abgerufen am 05.08.2023 unter https://www.isc.fraunhofer.de/de/arbeitsgebiete/materialien/ormocer.html, .

[286] *Integration von zukünftigen Millimeterwellenfunksystemen unter Verwendung der LDS-MIDTechnologie (LDS-HF-Systeme), AiF IGF Fördernummer 20668N*, https://www.hahn-schickard.de/projekt-detail/integration-von-zukuenftigen-millimeterwellenfunksystemen-unter-verwendung-der-lds-mid-technologie-lds-hf-systeme: Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e.V., 2022.

[287] *LDS MID Design Rules*, LPKF Laser & Electronics AG, Garbsen, abgerufen am 06.08.2023 unter https://www.lpkf.com/fileadmin/mediafiles/user_upload/products/pdf/EQ/3D-MID-LDS/lds_mid_designrules_en.pdf, 2010.

ANHANG

A LASERPARAMETER

Tabelle A.1: Werte für die Parameterstudie des ns-gepulsten Infrarot-Lasers (1064 nm).

#	Geschw. in mm/s	Frequenz in kHz	Längspitch in µm	Leistung in W	E_A in J/mm²	Pulsenergie in µJ	Pulsüber-deckung
1	500	40	12,5	2	0.320	50,0	79,2%
2	500	80	6,3	4	1.280	50,0	89,6%
3	500	120	4,2	6	2.880	50,0	93,1%
4	500	160	3,1	8	5.120	50,0	94,8%
5	500	200	2,5	10	8.000	50,0	95,8%
6	1000	40	25,0	2	0.080	50,0	58,3%
7	1000	80	12,5	4	0.320	50,0	79,2%
8	1000	120	8,3	6	0.720	50,0	86,1%
9	1000	160	6,3	8	1.280	50,0	89,6%
10	1000	200	5,0	10	2.000	50,0	91,7%
11	1500	40	37,5	2	0.036	50,0	37,5%
12	1500	80	18,8	4	0.142	50,0	68,8%
13	1500	120	12,5	6	0.320	50,0	79,2%
14	1500	160	9,4	8	0.569	50,0	84,4%
15	1500	200	7,5	10	0.889	50,0	87,5%
16	500	30	16,7	2	0.240	66,7	72,2%
17	500	60	8,3	4	0.960	66,7	86,1%
18	500	90	5,6	6	2.160	66,7	90,7%
19	500	120	4,2	8	3.840	66,7	93,1%
20	500	150	3,3	10	6.000	66,7	94,4%
21	1000	30	33,3	2	0.060	66,7	44,4%
22	1000	60	16,7	4	0.240	66,7	72,2%
23	1000	90	11,1	6	0.540	66,7	81,5%
24	1000	120	8,3	8	0.960	66,7	86,1%
25	1000	150	6,7	10	1.500	66,7	88,9%
26	1500	30	50,0	2	0.027	66,7	16,7%
27	1500	60	25,0	4	0.107	66,7	58,3%
28	1500	90	16,7	6	0.240	66,7	72,2%
29	1500	120	12,5	8	0.427	66,7	79,2%
30	1500	150	10,0	10	0.667	66,7	83,3%
31	500	20	25,0	2	0.160	100,0	58,3%
32	500	40	12,5	4	0.640	100,0	79,2%
33	500	60	8,3	6	1.440	100,0	86,1%
34	500	80	6,3	8	2.560	100,0	89,6%
35	500	100	5,0	10	4.000	100,0	91,7%
36	1000	20	50,0	2	0.040	100,0	16,7%
37	1000	40	25,0	4	0.160	100,0	58,3%
38	1000	60	16,7	6	0.360	100,0	72,2%
39	1000	80	12,5	8	0.640	100,0	79,2%
40	1000	100	10,0	10	1.000	100,0	83,3%
41	1500	20	75,0	2	0.018	100,0	-25,0%
42	1500	40	37,5	4	0.071	100,0	37,5%
43	1500	60	25,0	6	0.160	100,0	58,3%
44	1500	80	18,8	8	0.284	100,0	68,8%
45	1500	100	15,0	10	0.444	100,0	75,0%

Tabelle A.2: Werte für die Parameterstudie des ps-gepulsten Grün-Lasers (532 nm).

#	Geschw. in mm/s	Frequenz in kHz	Längspitch in µm	Leistung in W	E_A in J/mm²	Pulsenergie in µJ	Pulsüber-deckung
1	1000	208,7	4,8	1,53	0.320	7,3	79,2%
2	1000	417,4	2,4	3,07	1.280	7,3	89,6%
3	1000	626,2	1,6	4,60	2.880	7,3	93,1%
4	1000	834,9	1,2	6,13	5.120	7,3	94,8%
5	1000	1043,6	1,0	7,67	8.000	7,3	95,8%
6	2000	208,7	9,6	1,53	0.080	7,3	58,3%
7	2000	417,4	4,8	3,07	0.320	7,3	79,2%
8	2000	626,2	3,2	4,60	0.720	7,3	86,1%
9	2000	834,9	2,4	6,13	1.280	7,3	89,6%
10	2000	1043,6	1,9	7,67	2.000	7,3	91,7%
11	3000	208,7	14,4	1,53	0.036	7,3	37,5%
12	3000	417,4	7,2	3,07	0.142	7,3	68,8%
13	3000	626,2	4,8	4,60	0.320	7,3	79,2%
14	3000	834,9	3,6	6,13	0.569	7,3	84,4%
15	3000	1043,6	2,9	7,67	0.889	7,3	87,5%
16	1000	202,7	4,9	1,53	0.311	7,6	78,6%
17	1000	313,1	3,2	3,07	0.960	9,8	86,1%
18	1000	469,6	2,1	4,60	2.160	9,8	90,7%
19	1000	626,2	1,6	6,13	3.840	9,8	93,1%
20	1000	782,7	1,3	7,67	6.000	9,8	94,4%
21	2000	202,7	9,9	1,53	0.078	7,6	57,1%
22	2000	313,1	6,4	3,07	0.240	9,8	72,2%
23	2000	469,6	4,3	4,60	0.540	9,8	81,5%
24	2000	626,2	3,2	6,13	0.960	9,8	86,1%
25	2000	782,7	2,6	7,67	1.500	9,8	88,9%
26	3000	202,7	14,8	1,53	0.035	7,6	35,7%
27	3000	313,1	9,6	3,07	0.107	9,8	58,3%
28	3000	469,6	6,4	4,60	0.240	9,8	72,2%
29	3000	626,2	4,8	6,13	0.427	9,8	79,2%
30	3000	782,7	3,8	7,67	0.667	9,8	83,3%
31	1000	202,7	4,9	1,53	0.311	7,6	78,6%
32	1000	208,7	4,8	3,07	0.640	14,7	79,2%
33	1000	313,1	3,2	4,60	1.440	14,7	86,1%
34	1000	417,4	2,4	6,13	2.560	14,7	89,6%
35	1000	521,8	1,9	7,67	4.000	14,7	91,7%
36	2000	202,7	9,9	1,53	0.078	7,6	57,1%
37	2000	208,7	9,6	3,07	0.160	14,7	58,3%
38	2000	313,1	6,4	4,60	0.360	14,7	72,2%
39	2000	417,4	4,8	6,13	0.640	14,7	79,2%
40	2000	521,8	3,8	7,67	1.000	14,7	83,3%
41	3000	202,7	14,8	1,53	0.035	7,6	35,7%
42	3000	208,7	14,4	3,07	0.071	14,7	37,5%
43	3000	313,1	9,6	4,60	0.160	14,7	58,3%
44	3000	417,4	7,2	6,13	0.284	14,7	68,8%
45	3000	521,8	5,7	7,67	0.444	14,7	75,0%

B OBERFLÄCHENAUFRAUUNG DURCH LASERSTRAHLUNG

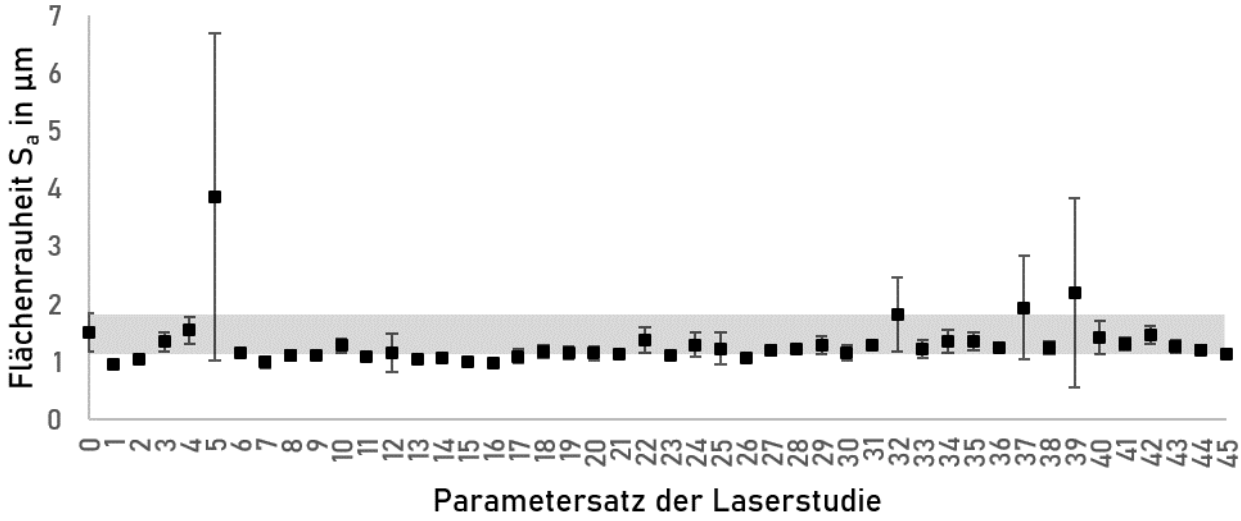


Abb. A.1: Rauheitswerte (S_a) auf laserbearbeiteten Oberflächen. Liegend aufgebautes DLP-Bauteil aus dem Werkstoff PLASTCure Rigid 10500 (glattere Originaloberfläche). Laserstudie Infrarotlaser (siehe Anhang A), eine Überfahrt. Wert X = 0 entspricht Originaloberfläche.

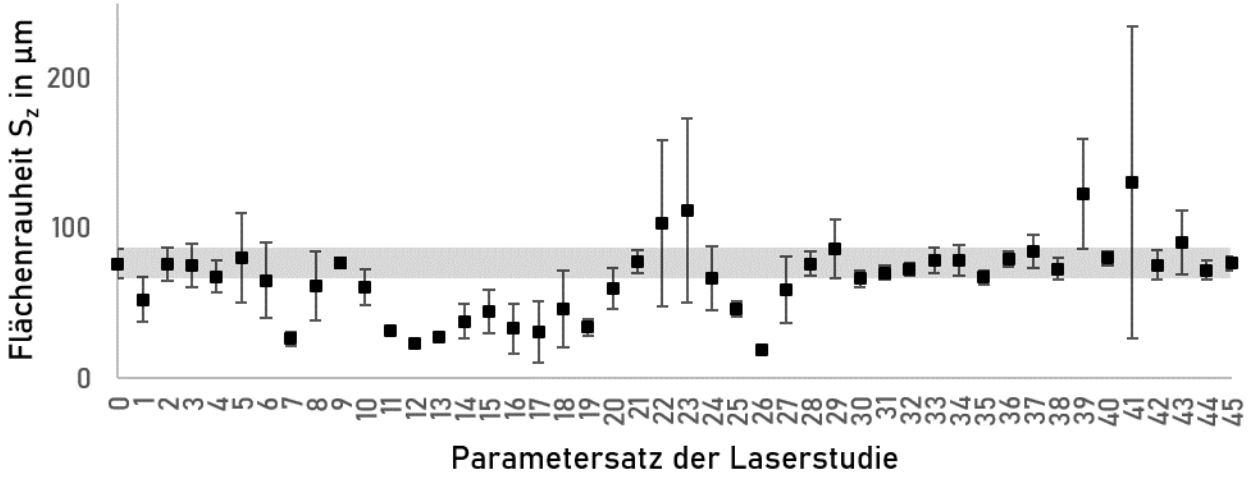


Abb. A.2: Rauheitswerte (S_z) auf laserbearbeiteten Oberflächen. Liegend aufgebautes DLP-Bauteil aus dem Werkstoff PLASTCure Rigid 10500 (glattere Originaloberfläche). Laserstudie Infrarotlaser (siehe Anhang A), eine Überfahrt. Wert X = 0 entspricht Originaloberfläche.

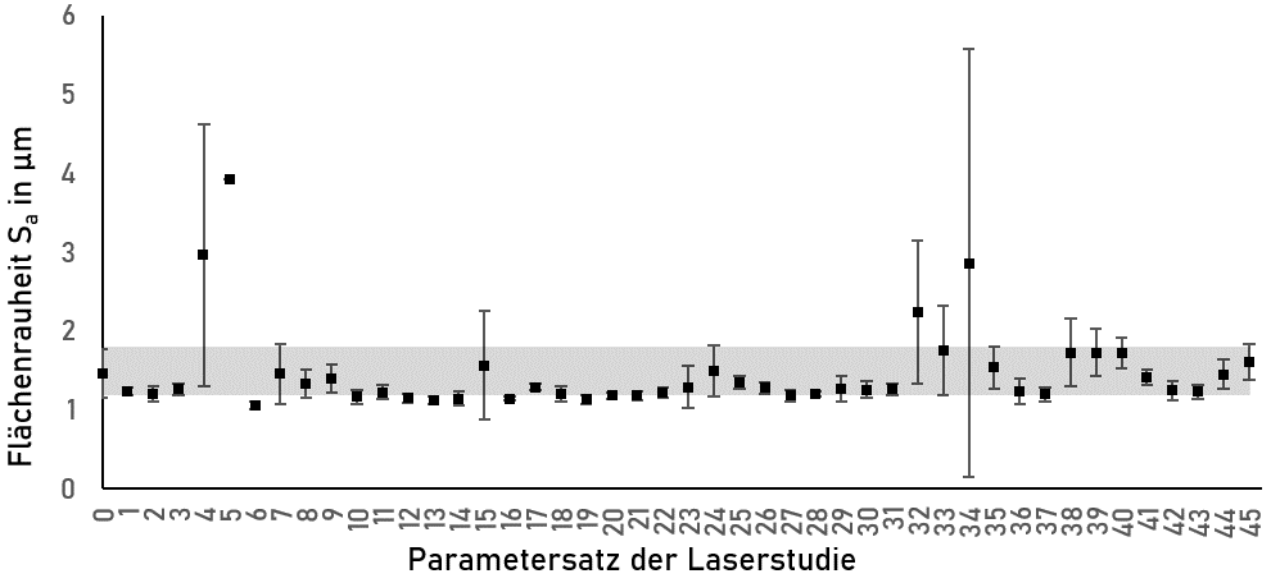


Abb. A.3: Rauheitswerte (S_a) auf laserbearbeiteten Oberflächen. Liegend aufgebautes DLP-Bauteil aus dem Werkstoff PLASTCure Rigid 10500 (glattere Originaloberfläche). Laserstudie Infrarotlaser (siehe Anhang A), drei Überfahrten. Wert X = 0 entspricht Originaloberfläche.

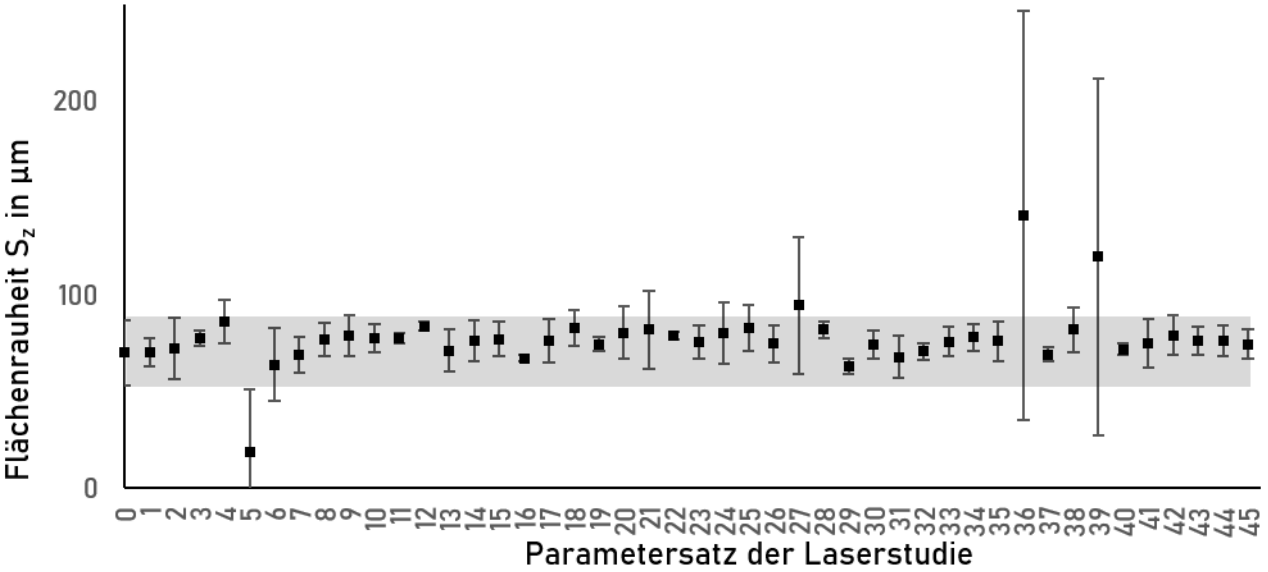


Abb. A.4: Rauheitswerte (S_z) auf laserbearbeiteten Oberflächen. Liegend aufgebautes DLP-Bauteil aus dem Werkstoff PLASTCure Rigid 10500 (glattere Originaloberfläche). Laserstudie Infrarotlaser (siehe Anhang A), drei Überfahrten. Wert X = 0 entspricht Originaloberfläche.

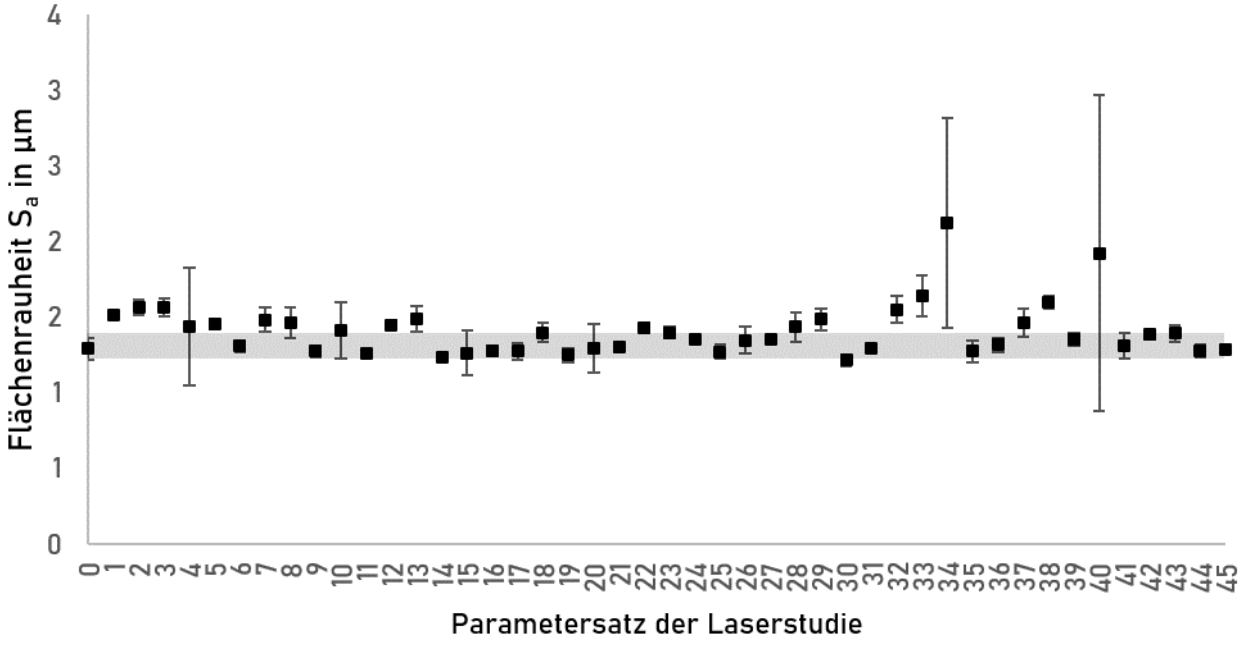


Abb. A.5: Rauheitswerte (S_a) auf laserbearbeiteten Oberflächen. Stehend aufgebautes DLP-Bauteil aus dem Werkstoff PLASTCure Rigid 10500 (rauere Originaloberfläche). Laserstudie Infrarotlaser (siehe Anhang A), eine Überfahrt. Wert X = 0 entspricht Originaloberfläche.

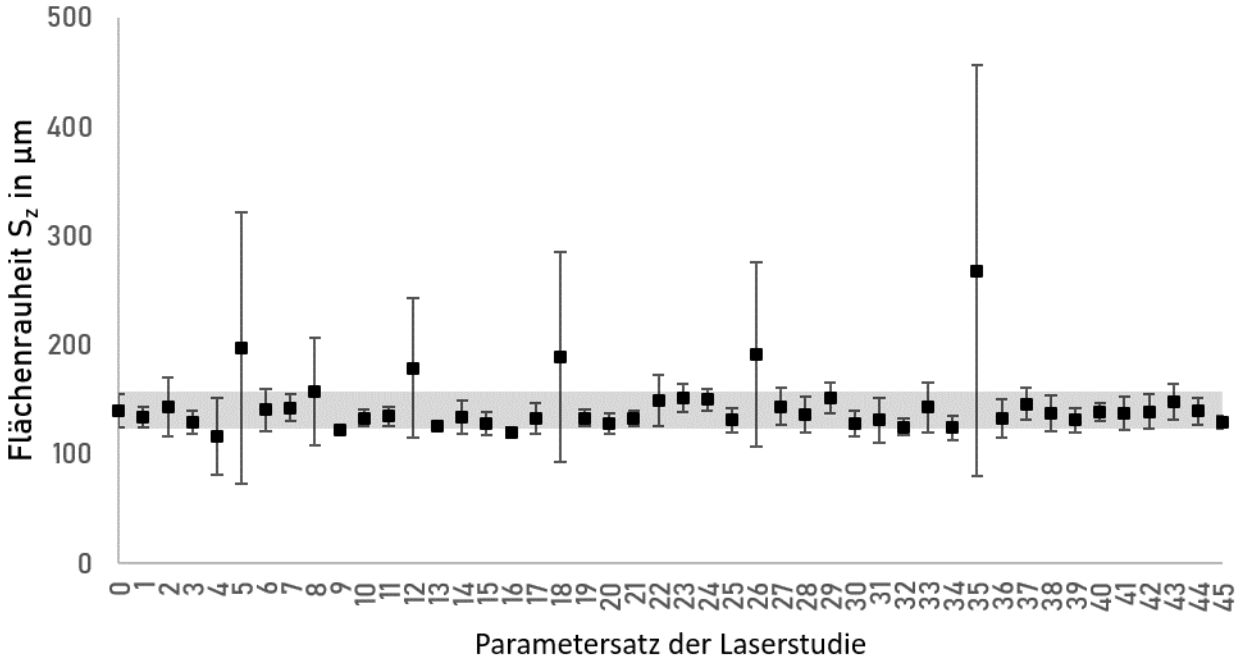


Abb. A.6: Rauheitswerte (S_z) auf laserbearbeiteten Oberflächen. Stehend aufgebautes DLP-Bauteil aus dem Werkstoff PLASTCure Rigid 10500 (rauere Originaloberfläche). Laserstudie Infrarotlaser (siehe Anhang A), eine Überfahrt. Wert X = 0 entspricht Originaloberfläche.

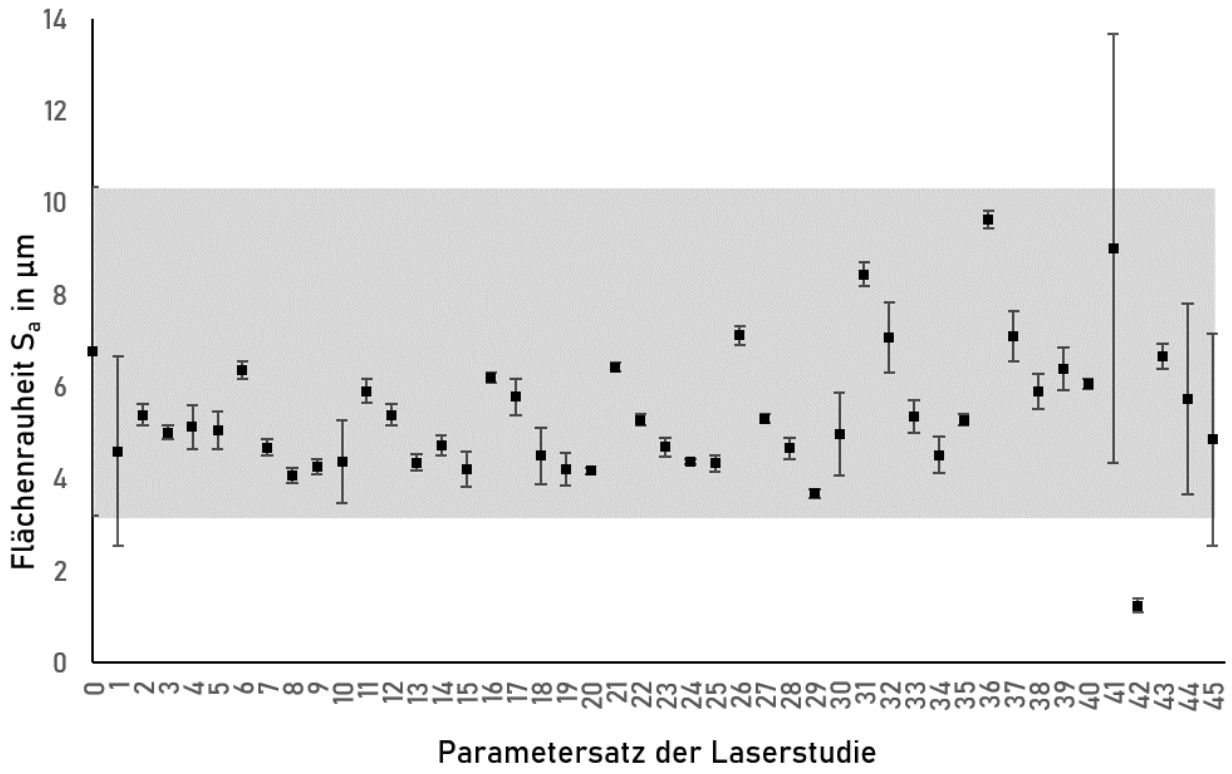


Abb. A.7: Rauheitswerte (S_a) auf laserbearbeiteten Oberflächen. Stehend aufgebautes DLP-Bauteil aus dem Werkstoff PLASTCure Rigid 10500 (rauere Originaloberfläche). Laserstudie Infrarotlaser (siehe Anhang A), drei Überfahrten. Wert X = 0 entspricht Originaloberfläche.

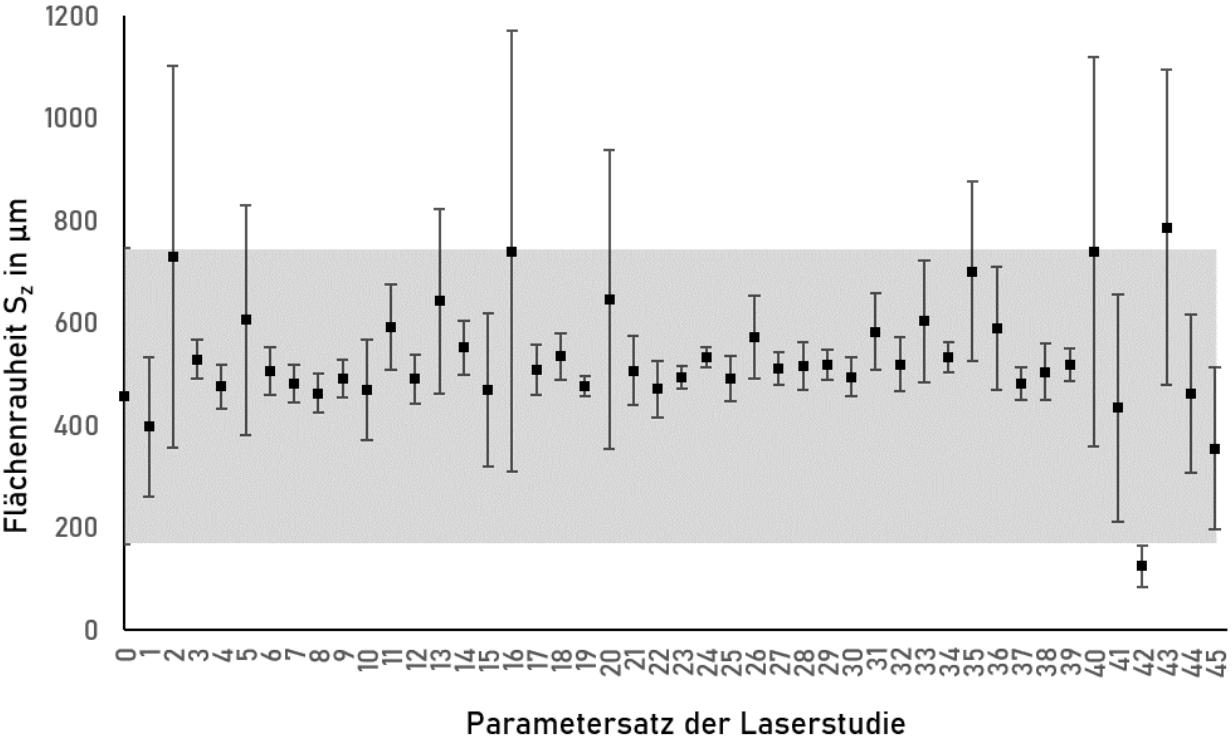


Abb. A.8: Rauheitswerte (S_z) auf laserbearbeiteten Oberflächen. Stehend aufgebautes DLP-Bauteil aus dem Werkstoff PLASTCure Rigid 10500 (rauere Originaloberfläche). Laserstudie Infrarotlaser (siehe Anhang A), drei Überfahrten. Wert X = 0 entspricht Originaloberfläche.

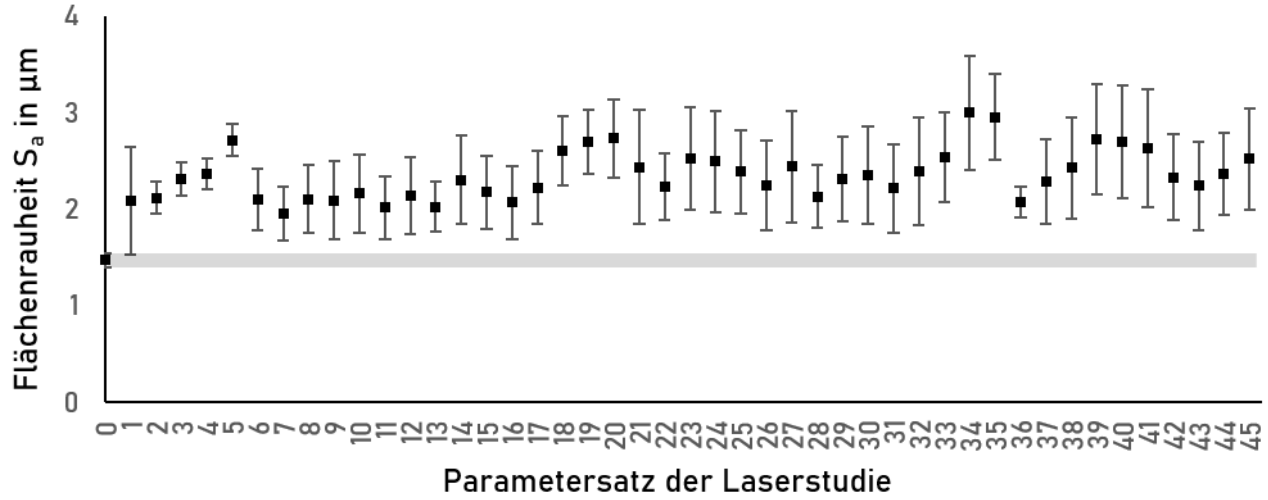


Abb. A.9: Rauheitswerte (S_a) auf laserbearbeiteten Oberflächen. Liegend aufgebautes DLP-Bauteil aus dem Werkstoff PLASTCure Rigid 10500 (glattere Originaloberfläche). Laserstudie Grün-Laser (siehe Anhang A), eine Überfahrt. Wert X = 0 entspricht Originaloberfläche.

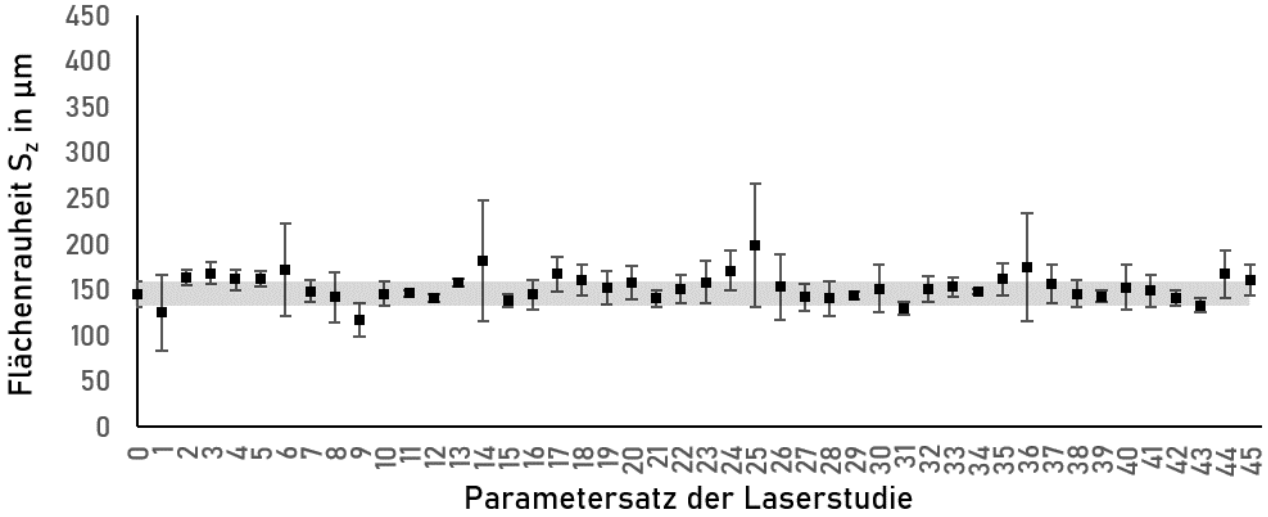


Abb. A.10: Rauheitswerte (S_z) auf laserbearbeiteten Oberflächen. Liegend aufgebautes DLP-Bauteil aus dem Werkstoff PLASTCure Rigid 10500 (glattere Originaloberfläche). Laserstudie Grün-Laser (siehe Anhang A), eine Überfahrt. Wert X = 0 entspricht Originaloberfläche.

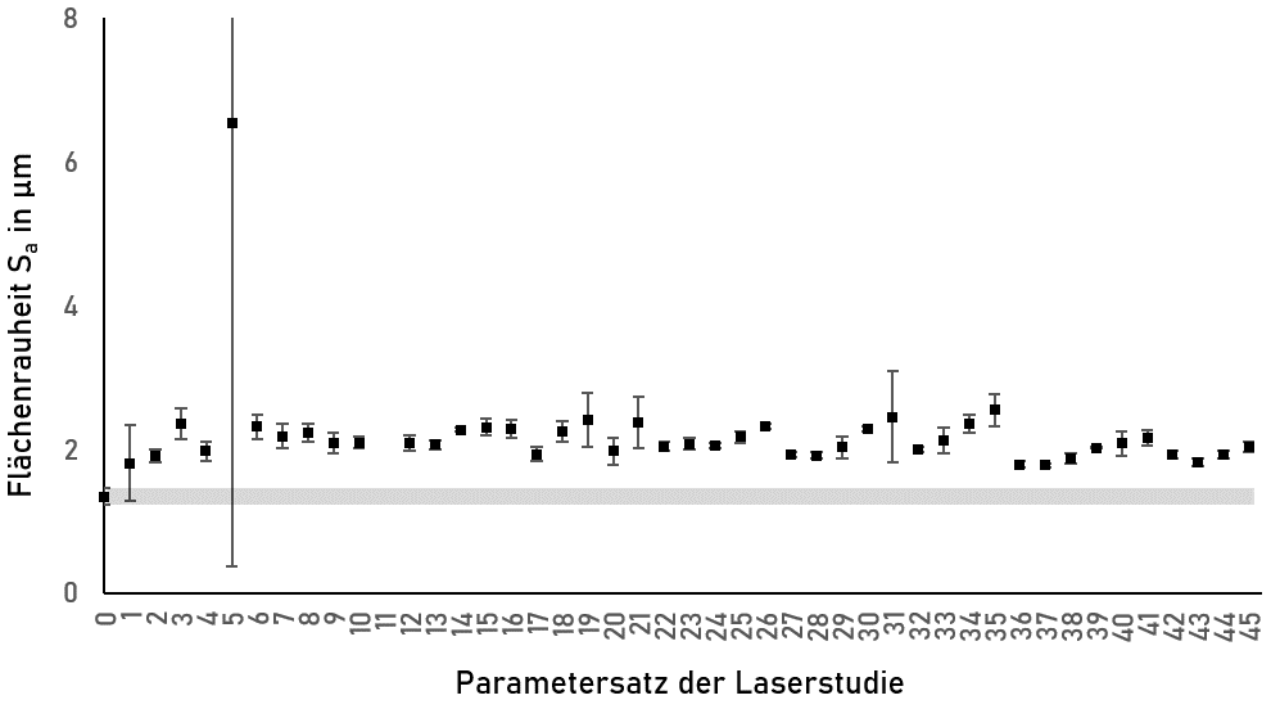


Abb. A.11: Rauheitswerte (S_a) auf laserbearbeiteten Oberflächen. Liegend aufgebautes DLP-Bauteil aus dem Werkstoff PLASTCure Rigid 10500 (glattere Originaloberfläche). Laserstudie Grün-Laser (siehe Anhang A), drei Überfahrten. Wert X = 0 entspricht Originaloberfläche.

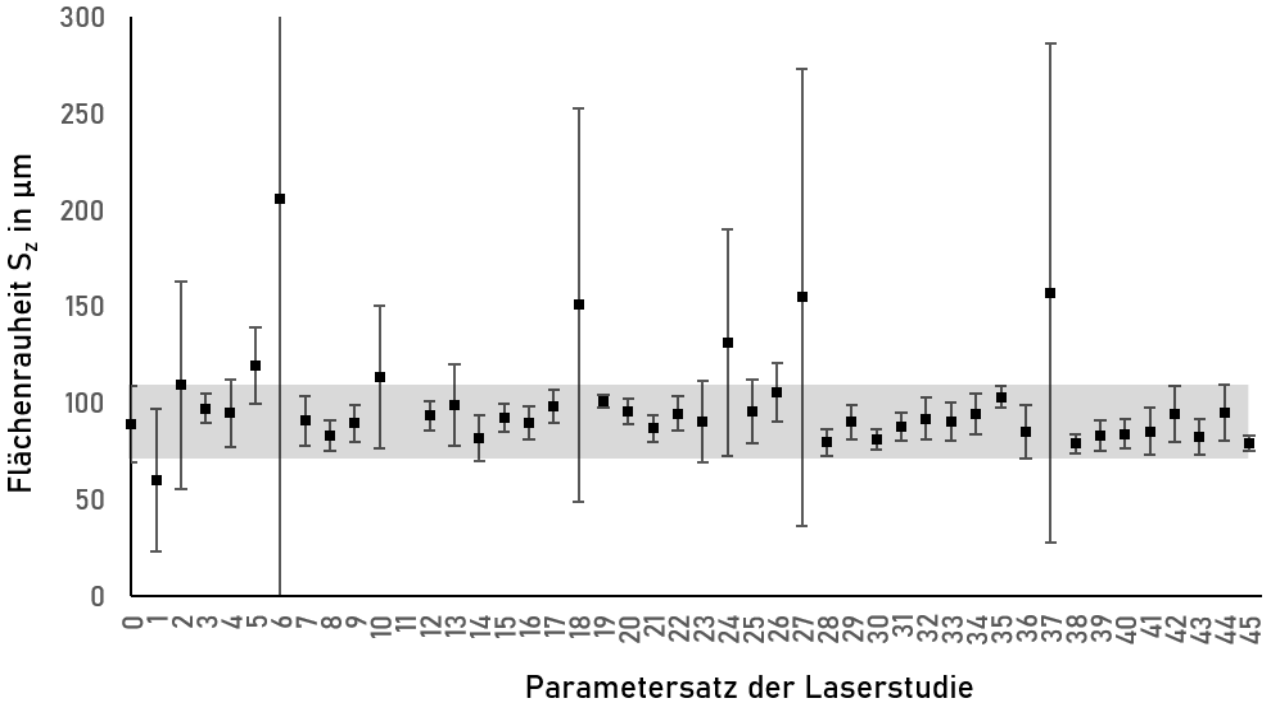


Abb. A.12: Rauheitswerte (S_z) auf laserbearbeiteten Oberflächen. Liegend aufgebautes DLP-Bauteil aus dem Werkstoff PLASTCure Rigid 10500 (glattere Originaloberfläche). Laserstudie Grün-Laser (siehe Anhang A), drei Überfahrten. Wert X = 0 entspricht Originaloberfläche.

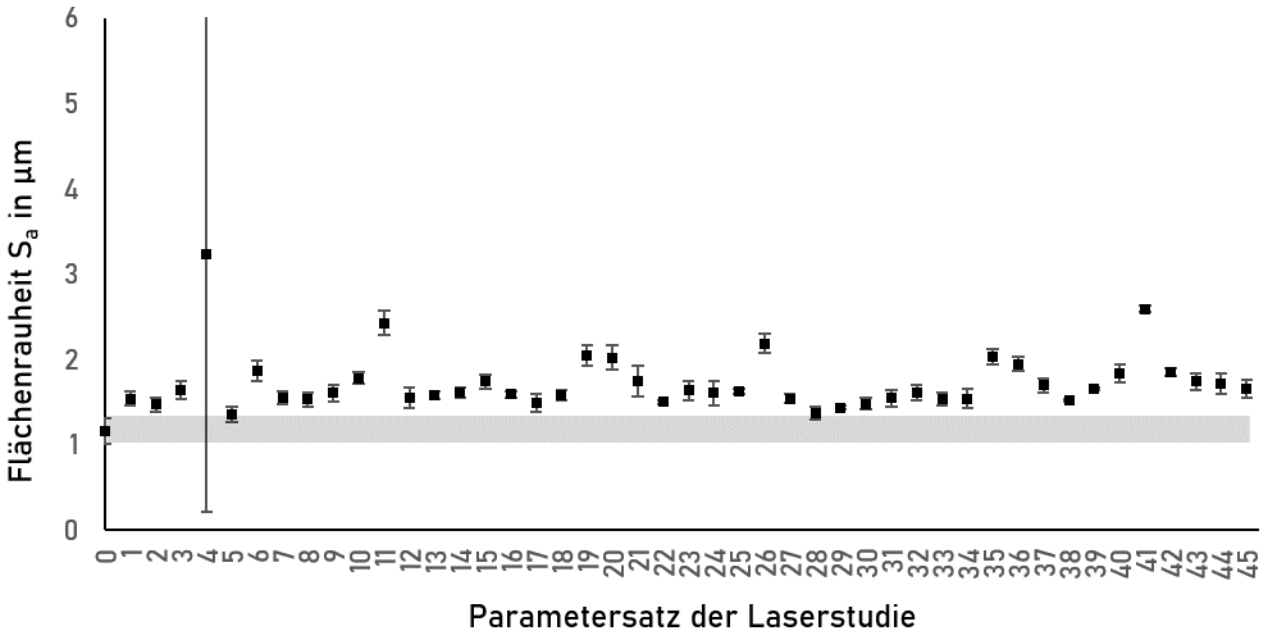


Abb. A.13: Rauheitswerte (Sa) auf laserbearbeiteten Oberflächen. Stehend aufgebautes DLP-Bauteil aus dem Werkstoff PLASTCure Rigid 10500 (rauere Originaloberfläche). Laserstudie Grün-Laser (siehe Anhang A), eine Überfahrt. Wert X = 0 entspricht Originaloberfläche.

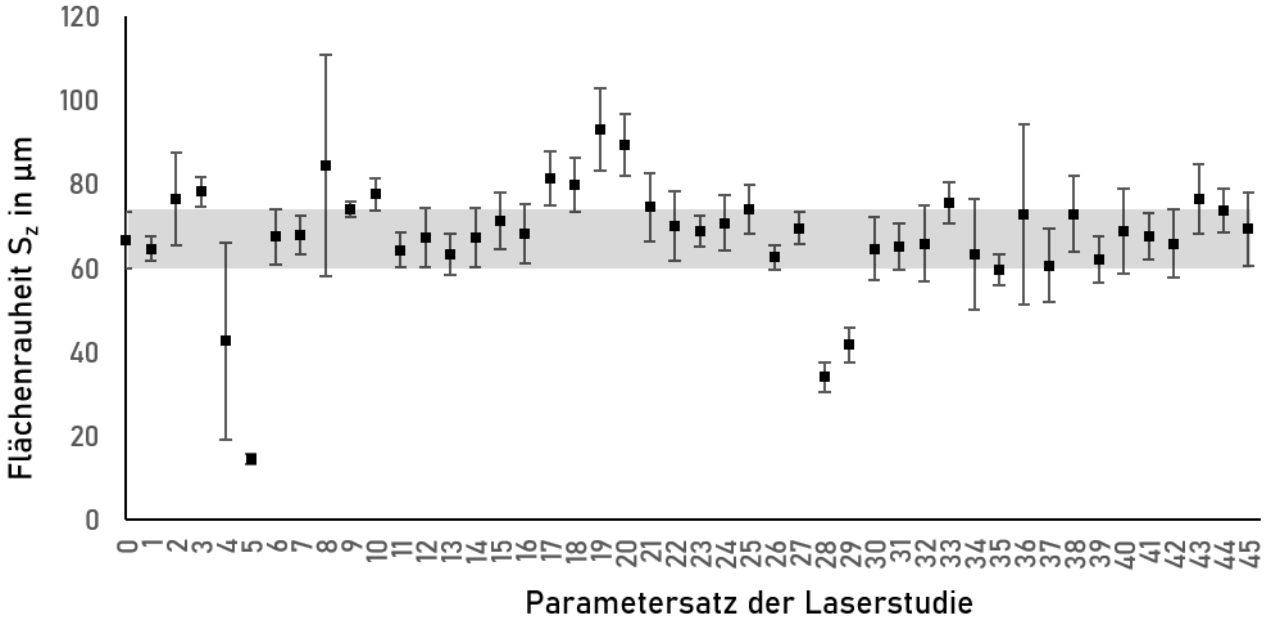


Abb. A.14: Rauheitswerte (S_z) auf laserbearbeiteten Oberflächen. Stehend aufgebautes DLP-Bauteil aus dem Werkstoff PLASTCure Rigid 10500 (rauere Originaloberfläche). Laserstudie Grün-Laser (siehe Anhang A), eine Überfahrt. Wert X = 0 entspricht Originaloberfläche.

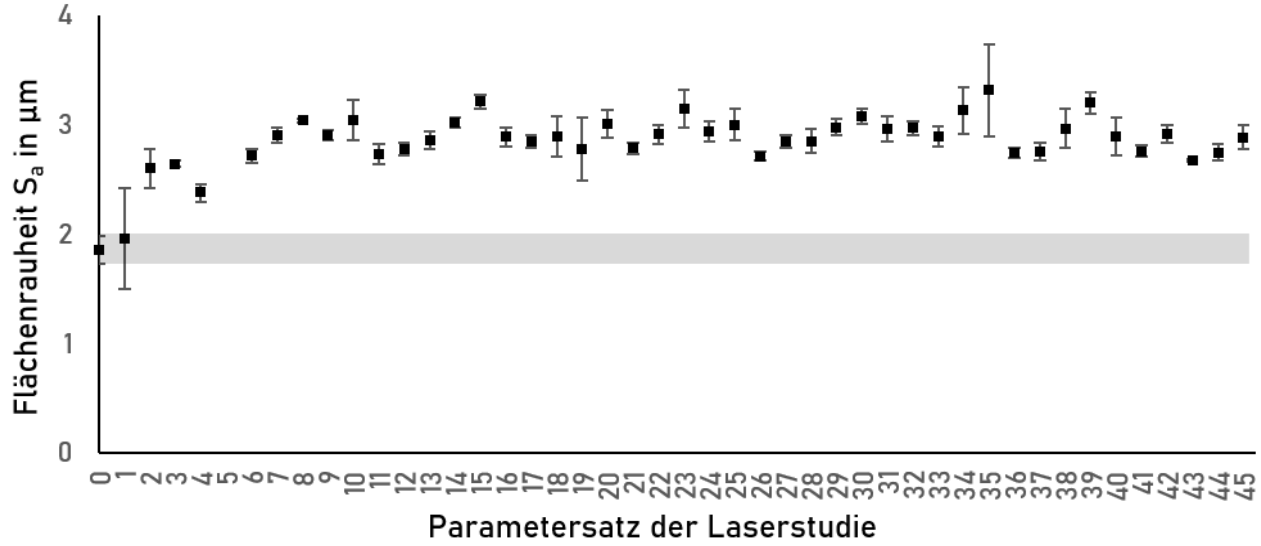


Abb. A.15: Rauheitswerte (S_a) auf laserbearbeiteten Oberflächen. Stehend aufgebautes DLP-Bauteil aus dem Werkstoff PLASTCure Rigid 10500 (rauere Originaloberfläche). Laserstudie Grün-Laser (siehe Anhang A), drei Überfahrten. Wert X = 0 entspricht Originaloberfläche.

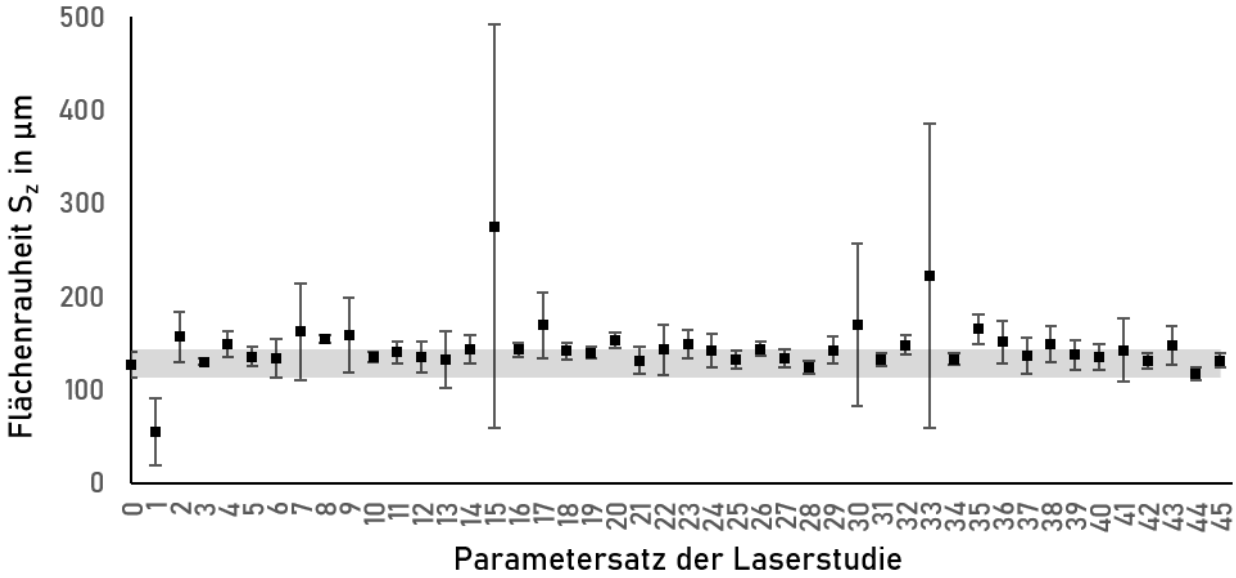


Abb. A.16: Rauheitswerte (S_z) auf laserbearbeiteten Oberflächen. Stehend aufgebautes DLP-Bauteil aus dem Werkstoff PLASTCure Rigid 10500 (rauere Originaloberfläche). Laserstudie Grün-Laser (siehe Anhang A), drei Überfahrten. Wert X = 0 entspricht Originaloberfläche.

C BAUTEILGEOMETRIEN

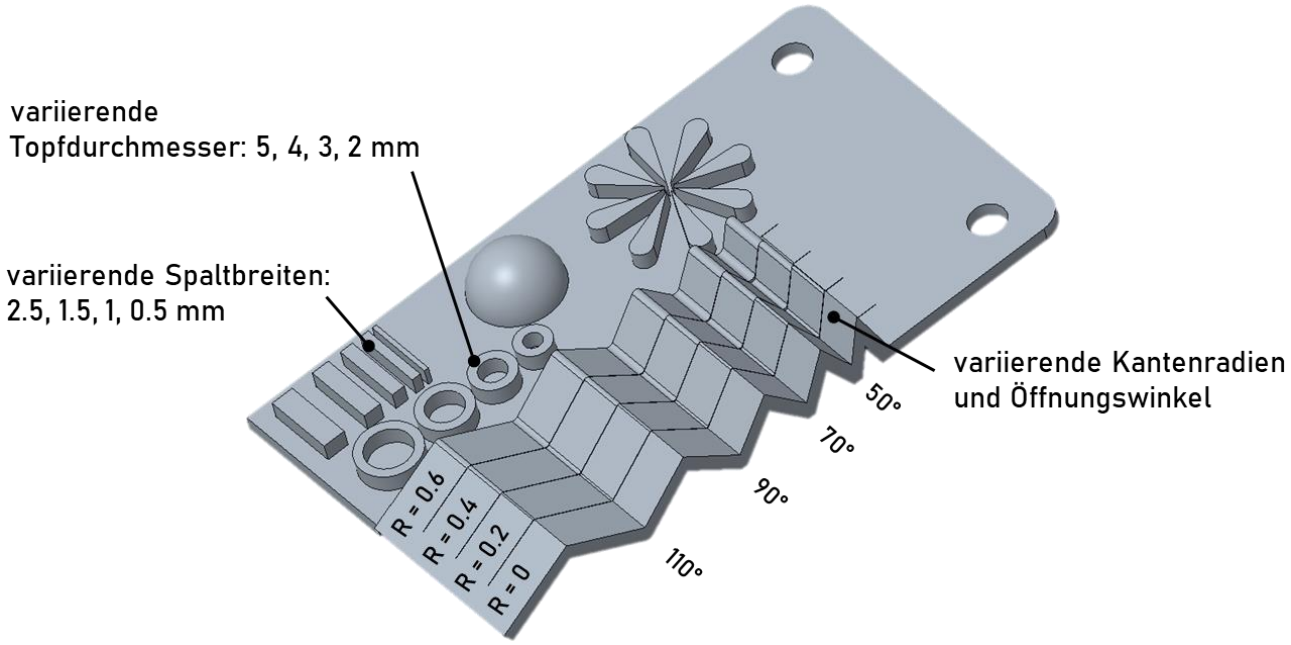


Abb. A.17: Geometrie des Testbauteils für gleichmäßigen Auftrag der Maskierung.

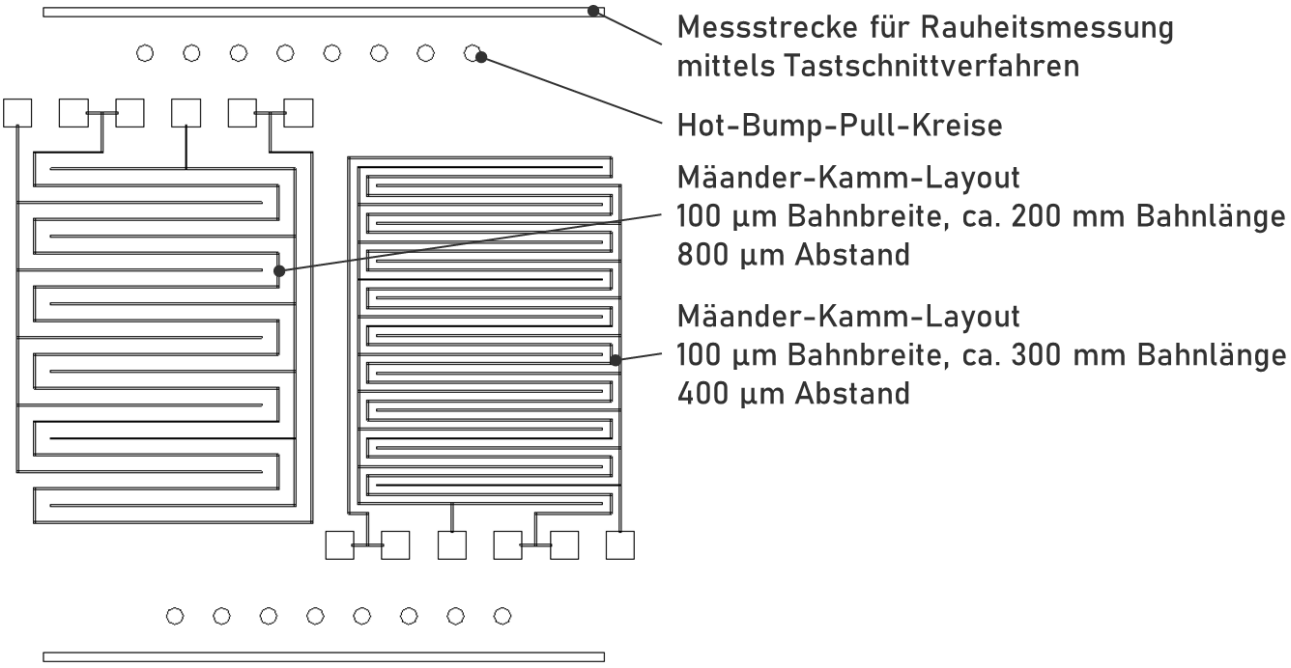


Abb. A.18: Layout für Funktionsnachweis 2D.

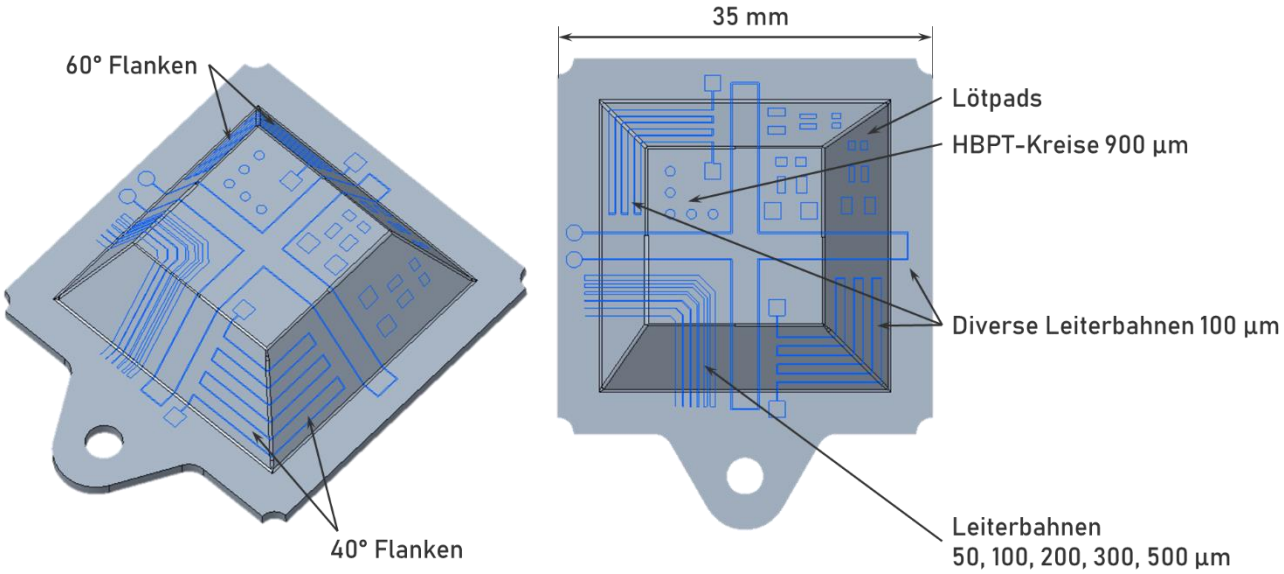


Abb. A.19: Layout für Funktionsnachweis 3D.

D PROZESSCHARAKTERISIERUNG

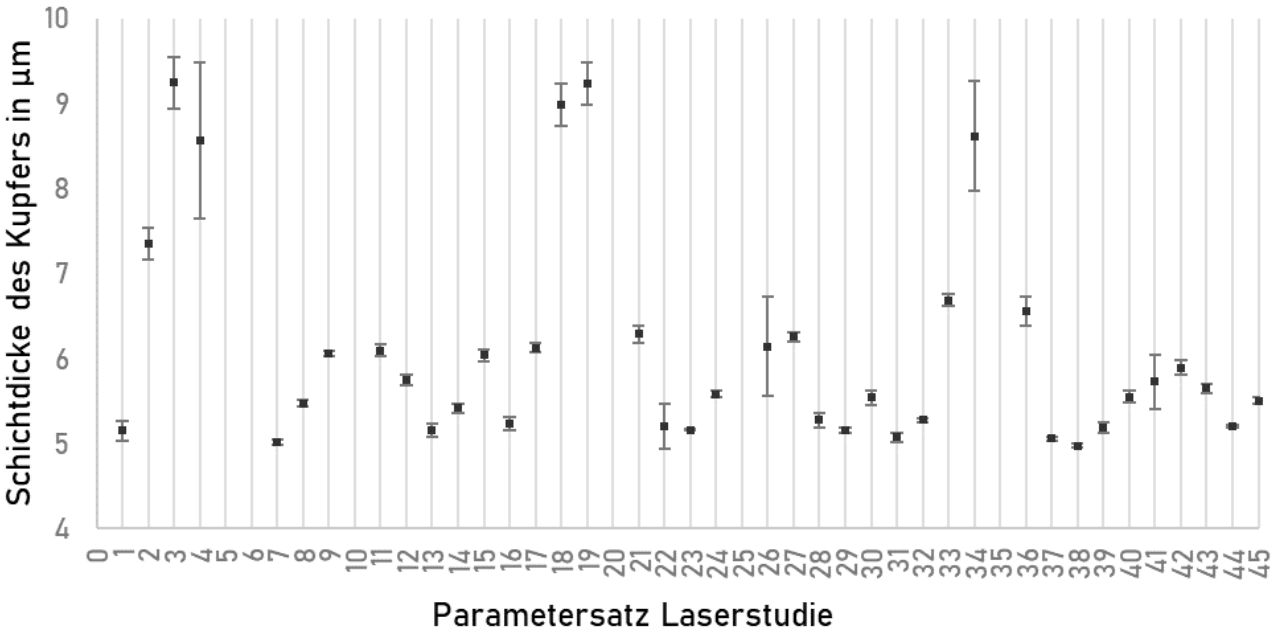


Abb. A.20: Schichtdicke der Kupfermetallisierung auf PLASTCure Rigid 10500 DLP-Bauteil für die grün-Laser-Studie. Werte wurden mittels Röntgenfluoreszenzanalyse gemessen. Fehlerbalken geben Standardabweichung an (vier Messungen).

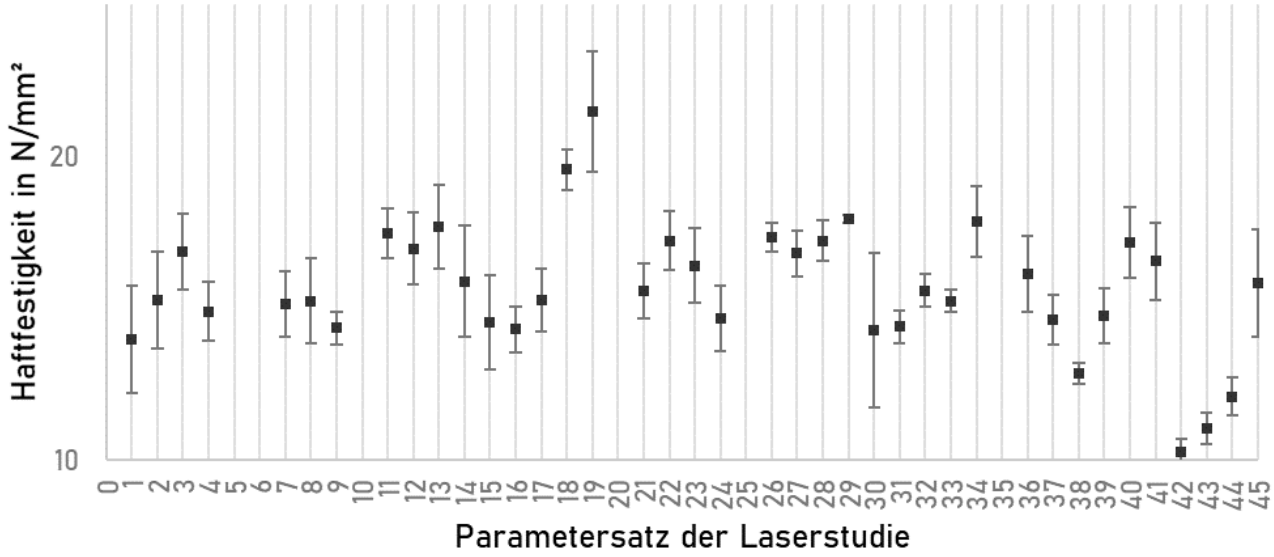


Abb. A.21: Haftfestigkeitswerte der Metallisierungsschicht auf PLASTCure Rigid 10500 DLP-Bauteil für die grün-Laser-Studie. Werte wurden mittels Hot-Bump-Pull-Test gemessen. Fehlerbalken geben Standardabweichung an (vier Messungen).

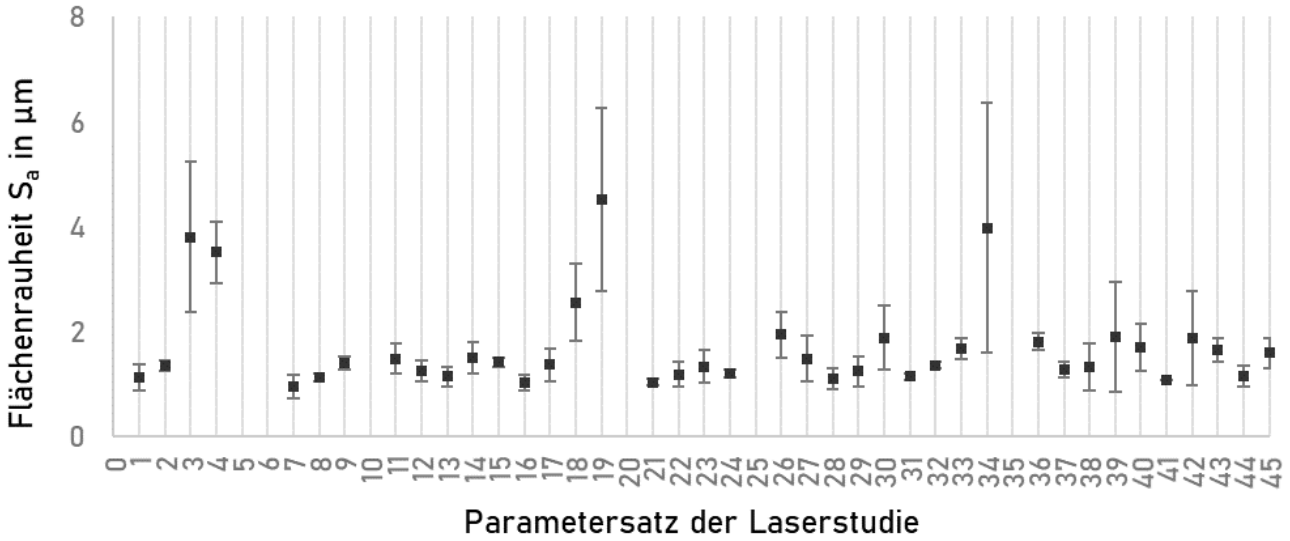


Abb. A.22: Flächenrauheit S_a auf der Metallisierungsschicht (Gold) auf PLASTCure Rigid 10500 DLP-Bauteil für die grün-Laser-Studie. Werte wurden mittels Weißlichtinterferometer gemessen. Fehlerbalken geben Standardabweichung an (vier Messungen).

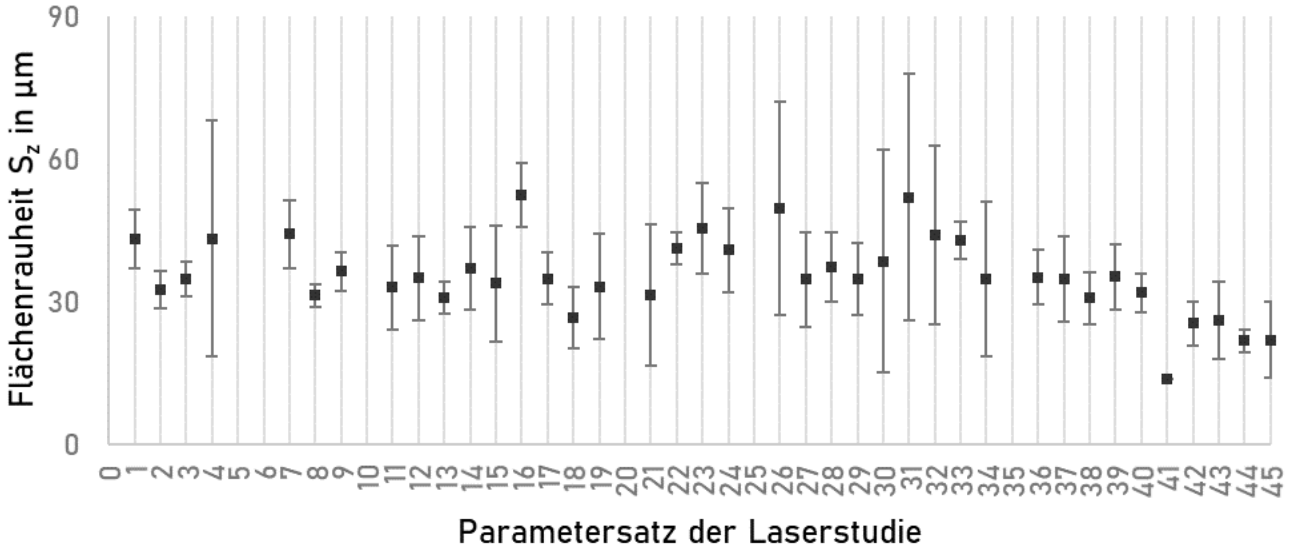


Abb. A.23: Flächenrauheit S_z auf der Metallisierungsschicht (Gold) auf PLASTCure Rigid 10500 DLP-Bauteil für die grün-Laser-Studie. Werte wurden mittels Weißlichtinterferometer gemessen. Fehlerbalken geben Standardabweichung an (vier Messungen).

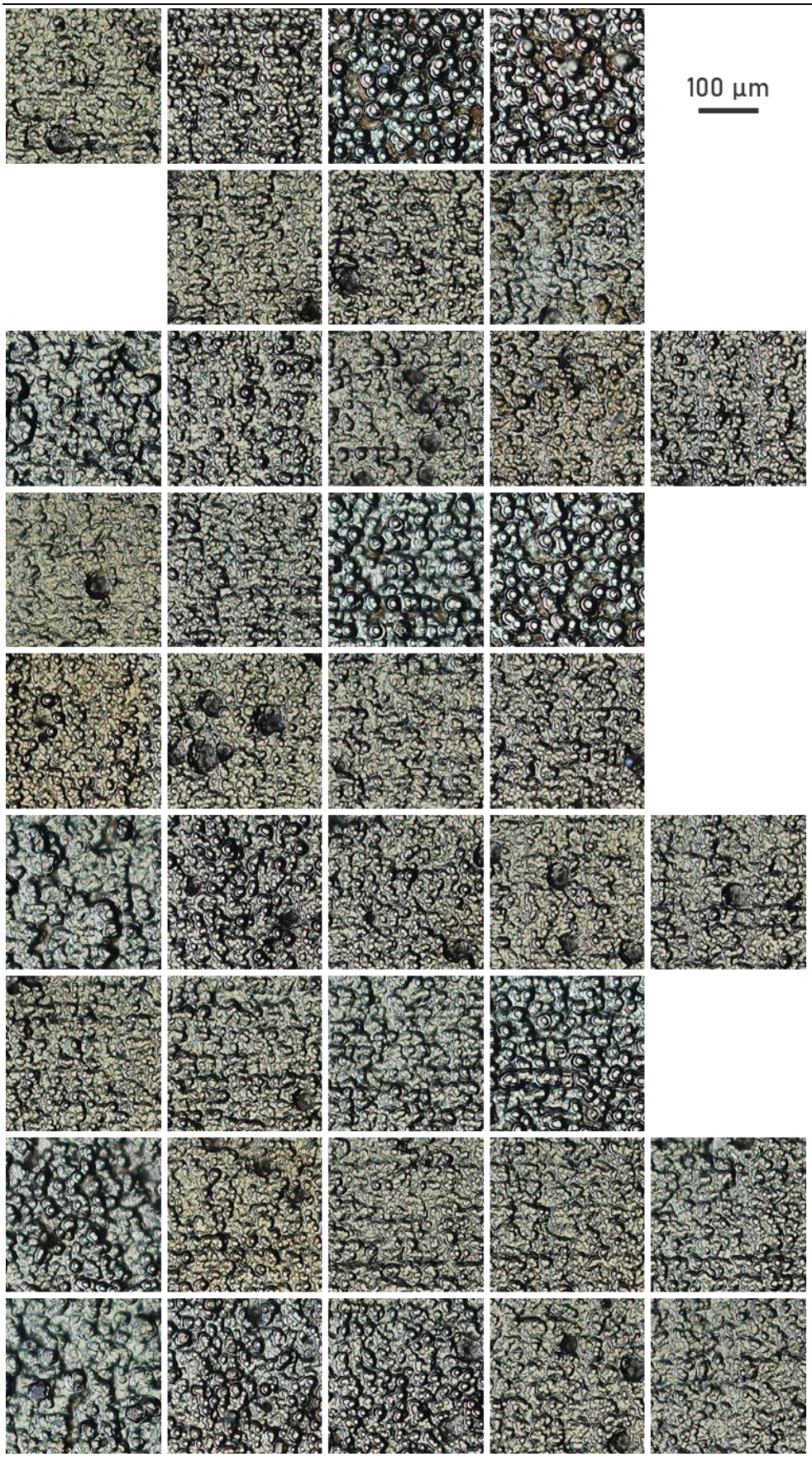


Abb. A.24: Mikroskopaufnahmen der Metallisierungsschicht (Gold) auf PLASTCure Rigid 10500 DLP-Bauteil für die grün-Laser-Studie. Abbildungen sind nach dem gleichen Schema angeordnet wie die Parameterstudie.

ÜBER DEN AUTOR

EIGENE PUBLIKATIONEN

T. Vieten, S. Weser, A. Schilling, K. Gläser, and A. Zimmermann, "Integration of Mechatronic Functions on Additively Manufactured Components via Laser-Assisted Selective Metal Deposition", Advanced Functional Materials 2024, 34, 2312833, doi: 10.1002/adfm.202312833.

T. Vieten, D. Stahl, P. Schilling, F. Civelek und A. Zimmermann, „Feasibility Study of Soft Tooling Inserts for Injection Molding with Integrated Automated Slides", Micromachines, Bd. 12, Nr. 7, Art. Nr. 7, 2021, doi: 10.3390/mi12070730.

T. Vieten, D. Zanin, A. Knöller, T. Litwin, W. Eberhardt und A. Zimmermann, „Soft Tooling-Friendly Inductive Mold Heating—A Novel Concept", Micromachines, Bd. 12, Nr. 4, Art. Nr. 4, 2021, doi: 10.3390/mi12040454.

Florian Janek, Ernst Mueller, Maximilian Barth, Tobias Vieten, Sascha Weser, Wolfgang Eberhardt und André Zimmermann, „Aushärteprozess für Klebeverbindungen mit dünnen und homogenen Klebespalten bei ultradünnen Chips auf Foliensubstraten", gehalten auf der microTEC Südwest Clusterkonferenz 2019, 2019.

Florian Janek, Sascha Weser, André Buelau, Tobias Vieten, Wolfgang Eberhardt und André Zimmermann, „Highly customizable process for fast manufacturing of thin flexible polyimide based circuited carriers and its applcation for a flow sensor using low-cost passive components", gehalten auf der Semicon Flex Europe 2018, Nov. 2018.

Hagen Mueller, Thomas Meißner, Tobias Groezinger, Tobias Vieten, Mahdi Soltani, Wolfgang Eberhardt und André Zimmermann, „Rapid Prototyping von Molded Interconnect Devices (MID)", gehalten auf der 10. Innovationsforum Smarte Technologien & Systeme, 2018.

Thomas Meißner, Ebru Saller, Tobias Groezinger, Tobias Vieten, Hagen Mueller, Wolfgang Eberhardt und André Zimmermann, „Bestückung additiv gefertigter Mechatronic Interconnect Devices (MID) mittels Laserlöten", in MikroSystemTechnik Kongress 2017, in MikroSystemTechnik Kongress 2017. VDE Verlag GmbH, Okt. 2017, S. 360–362. [Online]. Verfügbar unter: https://www.vde-verlag.de

Thomas Guenther, Tobias Vieten, Hagen Mueller, Bernhard Polzinger und André Zimmermann, „Additive Fertigung von Formeinsätzen für den Spritzguss von Hochtemperaturkunststoffen", gehalten auf der Kunststoff-Forum 2016 - Generative Fertigungsverfahren im praktischen Einsatz, März 2016.

BETREUTE STUDENTISCHE ARBEITEN

Z. Bozkurt, „Untersuchung der mechanischen Eigenschaften eines Photopolymers für die additive Fertigung von Mikrosystemen“, Studienarbeit, Universität Stuttgart, 2017

K. Burzlaff, “Konstruktion und Aufbau einer Prototypenanlage für die additive Fertigung”, Studienarbeit, Universität Stuttgart, 2018

L. Keckeisen, “Auslegung und Umsetzung der Steuerung einer Prototypenanlage für die Additive Fertigung (3D)”, Bachelorarbeit, Universität Stuttgart, 2018

C. Mettel, “Optimierung mittels DLP gefertigter Spritzgusseinsätze”, Studienarbeit, Universität Stuttgart, 2018

D. Qi, “Untersuchung der Prozessparameter einer LCD-basierten additiven Fertigungsanlage”, Masterarbeit, Universität Stuttgart, 2019

M. Singer, “Recherche zum Stand der Technik additiv gefertigter Bauteile mit integrierter Sensorik/Aktorik”, Studienarbeit, Universität Stuttgart, 2019

R. Stehle, “Verbesserung der Oberfläche von additiv gefertigten Spritzgusseinsätzen”, Studienarbeit, Universität Stuttgart, 2019

T. Klingels, “Untersuchungen zur Füllbarkeit von Photopolymeren mit Aluminiumoxid”, Studienarbeit, Universität Stuttgart, 2019

M. Maimone, “Untersuchungen zum Aufbau von elektrisch funktionalisierten Bauteilen mittels Fused Deposition Modeling”, Studienarbeit, Universität Stuttgart, 2020

L. Müller, “Fertigungsgerechte Konstruktion eines spritzgegossenen 3D-Schaltungsträgers”, Studienarbeit, Universität Stuttgart, 2023

L. Keckeisen, “Untersuchung von Laserablation im Rahmen des Aufbaus nachhaltiger Elektronik über Schichtlaminierung und Direct-Write-Verfahren”, Masterarbeit, Universität Stuttgart, 2023

LEBENSLAUF

Persönliche Angaben

Tobias Vieten
Geboren am 26.10.1984 in Lahnstein, Rheinland-Pfalz

Ausbildung

10/2016 – 09/2023	Promotionsstudium an der Universität Stuttgart, Institut für Mikrointegration Thesis: Mechatronische Funktionsintegration auf additiv gefertigten Bauteilen aus Standardmaterialien mittels laserbasierter Oberflächenbearbeitung und selektiver Metallabscheidung über nasschemische Prozesse
10/2005 – 10/2012	Maschinenbaustudium (Diplom) an der RWTH Aachen mit Vertiefungsrichtung Luft- und Raumfahrttechnik Diplomarbeit: Untersuchungen zur Verbesserung der SLM Oberflächen mikroskaliger 3D-Strukturen mit gepulster Laserstrahlung

Berufserfahrung

Ab 10/2023	Gruppenleitung Drucktechniken bei der Hahn-Schickard Gesellschaft für angewandte Forschung e.V. in Stuttgart
02/2016 – 09/2023	Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität Stuttgart, Institut für Mikrointegration
09/2013 – 01/2016	Konstruktionsingenieur bei Öhmichen & Bürger Industrieplanung GmbH in Düsseldorf