

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 20653 N

Thema

Fertigungsbegleitende Oberflächencharakterisierung zur Qualitäts- und Effizienzsteigerung bei der Herstellung komplexer kunststoffbasierter mechatronischer Baugruppen (FOQus)

Berichtszeitraum

01.05.2019 – 30.04.2021

Forschungsvereinigung

Hahn-Schickard für angewandte Forschung e.V.

Forschungseinrichtung(en)

Hahn-Schickard, Stuttgart

Fraunhofer-Gesellschaft e.V., Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM)



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

1 Inhaltsverzeichnis

1. Kurzfassung des Berichts	1
2. Einleitung und Zielsetzung	2
3. Versuchsplan	4
4. Übersicht über die angewendeten Analyse- und Messmethoden	5
4.1. Zerstörende Methoden	5
4.2. Zerstörungsfreie Methoden	8
4.3. Inline-fähige Messmethoden	9
5. Substratmaterialien	15
6. Spritzguss	19
6.1. Prozess- und Analyseergebnisse	19
6.2. Inline-fähige Messungen	26
7. Laserstrukturierung und Reinigung	30
7.1. Prozess- und Analyseergebnisse	30
7.2. Inline-fähige Messungen	36
8. Außenstromlose Metallisierung	41
8.1. Prozess- und Analyseergebnisse	41
8.2. Inline-fähige Messungen	51
9. Empfehlungen zur Herstellung defektfreier MID und Möglichkeiten zur Analyse mit inline-fähiger Messtechnik	60
10. Verwendung der Zuwendung	64
11. Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der erzielten Ergebnisse ..	65
12. Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft	66
13. Danksagung	68
14. Literaturverzeichnis	68

1. Kurzfassung des Berichts

Das Ziel des Forschungsvorhabens FOQus war die Entwicklung einer Methodik zur fertigungsbegleitenden bzw. Inline-fähigen Oberflächencharakterisierung von komplexen kunststoffbasierten mechatronischen Baugruppen, sowie die Optimierung aller Prozessschritte bei deren Herstellung, um den Ausschuss möglichst zu minimieren.

Um diese Ziele zu erreichen, wurde ein umfassender Versuchsplan ausgearbeitet. Dieser beinhaltete die Wahl geeigneter Materialien (LCP Vectra E840i LDS und XANTAR LDS 3760), deren Formgebung mittels Spritzguss, sowie die Laserdirektstrukturierung (LDS), nass-chemische bzw. CO₂-Schneestrahl-Reinigung und außenstromlose Metallisierung mit Cu/Ni/Au der spritzgegossenen Bauteile. Damit wird, bis auf die Bestückung, die gesamte Prozesskette für spritzgegossene Schaltungsträger (MID – Molded Interconnect Device) abgedeckt. Durch Variation der einzelnen Herstellungsparameter wurden Bauteile unterschiedlicher Oberflächengüte erzeugt, welche eingehend charakterisiert wurden, um Analyseergebnisse mit Prozessergebnissen korrelieren zu können. Dabei kamen sowohl zerstörende Analysemethoden (z.B. Haftfestigkeitsmessungen, Mikrotomschnitte in Kombination mit elektronenmikroskopischer Charakterisierung), als auch zerstörungsfreie Analysemethoden (z.B. optische Mikroskopie, Rauheitsmessungen) zum Einsatz. Durch die detaillierten optischen und physikalisch-chemischen Analysen der verschieden hergestellten Proben konnten Einflussfaktoren identifiziert und die Prozessführung optimiert werden, sodass das Auftreten von Fehlerbildern, wie Defekten in der Metallisierung oder Schlieren auf der Oberfläche, minimiert werden konnte.

Parallel dazu wurden weitere zerstörungsfreie Methoden betrachtet, die sich zudem automatisieren lassen und sich somit für fertigungsbegleitende Messungen besonders eignen. Dazu zählen Rauheitsmessungen mittels Streulicht-Sensor, die Aerosol-Benetzungsprüfung (AWT), die Optisch Stimulierte Elektronenemission (OSEE), sowie Analysen mit Hyperpektralkameras. Je nach Art der Methode können damit spritzgegossene, strukturierte oder metallisierte Proben Inline vermessen und direkt analysiert werden, um gute von schlechten, also nicht konformen Bauteilen objektiv unterscheiden zu können. Diese Untersuchungen legen damit den Grundstein für die direkte Implementierung solcher Inline-fähigen Messmethoden zur Fertigungsbegleitung von kunststoffbasierten mechatronischen Baugruppen z.B. in Spritzgussanlagen oder der Metallisierungslinie.

Die Projektziele wurden erreicht.

2. Einleitung und Zielsetzung

MID bzw. spritzgegossene Schaltungsträger bieten vielfältige Möglichkeiten zum Aufbau von innovativen mechatronischen Systemen und Mikrosystemen. Dabei lässt sich deren Herstellung in vier wesentliche Prozessschritte unterteilen (Abbildung 1). Zu Beginn steht die Materialwahl, die sich nach dem späteren Anwendungsbereich des MID richtet. So sind z.B. Polycarbonat-basierte Materialien geeignet für Antennenanwendungen. Jedoch sind sie nicht hochtemperaturtauglich, sodass das Aufbringen von elektronischen Bauteilen beispielsweise mittels Reflow-Löten kaum möglich ist. Nach der Identifizierung eines für die Anwendung geeigneten Substratmaterials erfolgt die Formgebung, üblicherweise mittels Spritzguss. Hierbei müssen Temperatur und Spritzdruck auf Material und Kavität abgestimmt sein, um Bauteile hoher Oberflächengüte zu erreichen. Anschließend wird das gewünschte Leiterbahnlayout mittels Laserdirektstrukturierung (LDS, LPKF-LDS® Prozess [1]) auf das Bauteil aufgebracht und außenstromlos metallisiert. Typischerweise wird hierbei das etablierte Schichtsystem Cu/Ni/Au abgeschieden, wobei die edle Goldoberfläche für die Montage von elektronischen Bauteilen über verschiedene Aufbau- und Verbindungstechniken (AVT), wie z.B. Löten, universell einsetzbar ist. Die Bestückung bzw. AVT wurde in diesem Projekt jedoch nicht betrachtet.

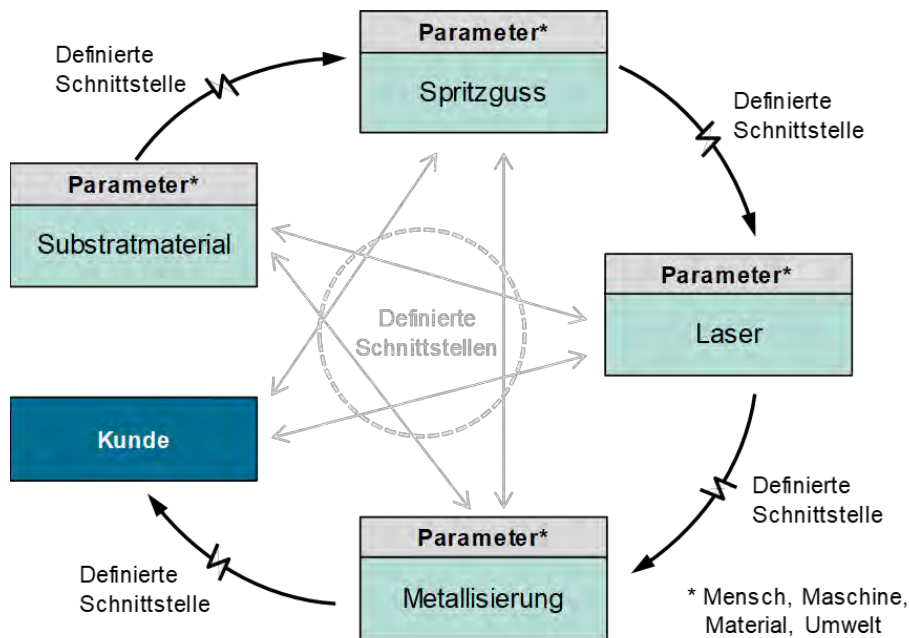


Abbildung 1: LPKF-LDS® Prozess und seine Schnittstellen [2].

In den folgenden Kapiteln wird auf die vier gezeigten Prozessschritte genauer eingegangen. Dabei lag der Fokus entsprechend der Forschungsziele auf der Optimierung der einzelnen Prozessschritte zur Reduktion von Ausschuss und der prozessbegleitenden Fehlererkennung.

Die im Projekt angestrebten Forschungsziele waren im Einzelnen:

- Grundlegende Erkenntnisse zur Spezifikation von Oberflächeneigenschaften spritzgegossener Bauteile für den LDS-Prozess.
- Erkenntnisse zu Wirkzusammenhängen von Oberflächeneigenschaften und LDS-Prozessierbarkeit von spritzgegossenen Bauteilen, v.a. bezüglich des Laserstrukturierungsprozesses für eine ausreichende Laseraktivierung und Metallisierung.
- Erarbeitung von prozessintegrierbaren Analysemethoden zur Prozess-spezifischen Beurteilung der Oberflächenqualität von spritzgegossenen Oberflächen für den LDS-Prozess und Ableiten von Optimierungsmaßnahmen vor allem für nachfolgende Prozessschritte.
- Erkenntnisse zu Einflussfaktoren auf die Oberflächenqualität von Leiterstrukturen auf LDS-Bauteilen.
- Erarbeitung von Analysemethoden zur Beurteilung der Oberflächenqualität von Leiterstrukturen, vor allem im Hinblick auf Nachfolgeprozesse der Aufbau- und Verbindungstechnik, und Ableiten von Optimierungsmaßnahmen.

Um diese Ziele zu erreichen, bündelten die beiden beteiligten Forschungseinrichtungen Hahn-Schickard und das Fraunhofer IFAM ihre Kompetenzen und schafften somit Synergien, wie in Abbildung 2 schematisch dargestellt.

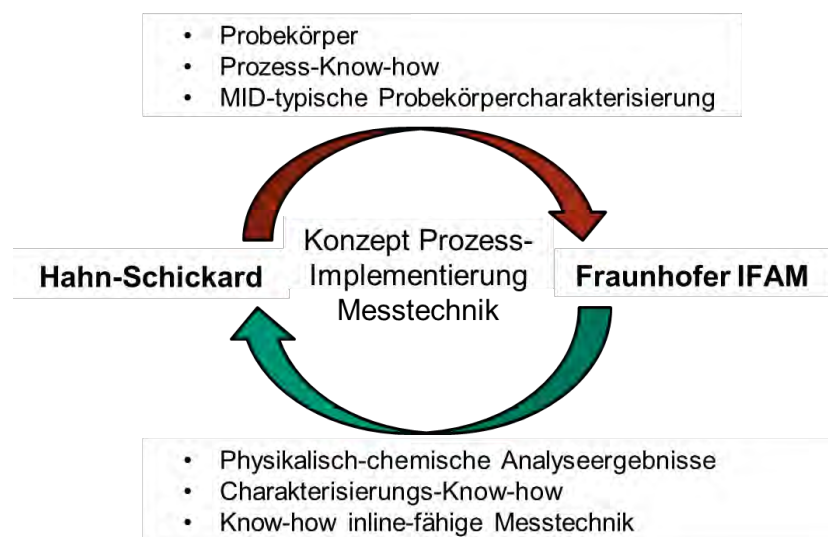


Abbildung 2: Zusammenspiel der Kompetenzen von Hahn-Schickard und dem Fraunhofer IFAM.

3. Versuchsplan

Für die einzelnen Prozessschritte wurden unterschiedliche Parameter variiert und die erhaltenen Bauteile eingehend analysiert, um Ursachen für Fehlerbilder auf MID identifizieren zu können. Dabei wurde zunächst Hauptaugenmerk auf Substratmaterial (LCP Vectra E840i LDS und XANTAR LDS 3760), Spritzguss und Lasern gelegt, wie aus Tabelle 1 ersichtlich. Dabei ist LCP Vectra E840i LDS ein gefüllter Flüssigkristallpolymer (LCP)- Werkstoff und XANTAR LDS 3760 ein Polycarbonat-basiertes Material.

Tabelle 1: Versuchsplan mit Variation der Herstellungsparameter.

V	Material	Spritzguss			Lasern		Metallisierung
		Granulat trocken	Granulat feucht	Spritzdruck nieder mittel hoch	Standard	Fein	Standard
1	LCP	x		x	x		x
2	LCP	x		x	x		x
3	LCP	x			x		x
4	LCP		x	x	x		x
5	LCP	x		x		x	x
6	LCP	x		x		x	x
7	LCP	x			x	x	x
8	LCP		x	x		x	x
9	XANTAR	x		x	x		x
10	XANTAR	x		x	x		x
11	XANTAR	x			x		x
12	XANTAR		x	x	x		x
13	XANTAR	x		x		x	x
14	XANTAR	x		x		x	x
15	XANTAR	x			x	x	x
16	XANTAR		x	x		x	x

Basierend auf diesem Versuchsplan wurden im weiteren Projektverlauf zusätzliche Proben prozessiert, wobei hier u.a. der Fokus auf der Reinigung der gelaserten Proben sowie auf dem Metallisierungs- und Trocknungsprozess lag. Zusätzlich wurden 3D-Bauteile aus den gleichen Granulaten spritzgegossen, prozessiert und ebenfalls charakterisiert.

Ergänzend wurden die Eigenschaften des gewählten Materials XANTAR LDS 3760 in Abhängigkeit von LDS-Additiv- und Talk-Gehalt untersucht. Dabei wurde vor allem das Anspringverhalten im Kupferbad betrachtet.

4. Übersicht über die angewendeten Analyse- und Messmethoden

4.1. Zerstörende Methoden

Zerstörende Methoden sind essentiell, um z.B. thermische oder strukturelle Eigenschaften oder die Zusammensetzung von Proben genauer betrachten zu können. Dabei wird die Probe allerdings in einem Maße zerstört bzw. verändert, dass sie nicht weiter prozessiert werden kann. Darunter fallen die folgenden, im Projekt verwendeten Methoden.

Feuchtemessung mittels Calciumhydrid-Verfahren

Die Granulatfeuchte wird üblicherweise vor dem Spritzguss gemessen, um sicherzustellen, dass das Granulat trocken genug ist. Hierfür wurde bei Hahn-Schickard ein AQUATRAC-Gerät der Firma Brabender Messtechnik verwendet, welches die Restfeuchte über das Calciumhydrid-Verfahren, eine normgerechte Messmethode nach DIN EN ISO 15512:2019, ermittelt. Bei dieser Messmethode wird etwas abgewogenes Granulat in die Messkammer gegeben, wo durch Unterdruck und erhöhte Temperaturen dem Granulat die Restfeuchte entzogen wird. Der freiwerdende Wasserdampf reagiert dann mit Calciumhydrid, welches sich direkt über der Probenkammer befindet. Durch die Reaktion wird Wasserstoff freigesetzt, sodass sich der Gasdruck ändert. Dabei ist der Gasdruck proportional zur freigewordenen Wassermenge. Bei Kenntnis der Probenmenge kann durch Messung dieses Druckes die Restfeuchte im Granulat berechnet werden. Typischerweise dauert eine Messung je nach Material und Restfeuchte bis zu 60 min.

Thermomechanische Analyse (TMA)

Mit der Netzsch TMA 202 kann bei Hahn-Schickard u.a. der thermische Ausdehnungskoeffizient (CTE – coefficient of thermal expansion) von Materialien bestimmt werden. Hierfür wurden Plättchen mit einer Größe von 10 mm x 10 mm einem materialabhängigen Temperaturprofil unterworfen und währenddessen die Dimensionsänderung erfasst. Wichtig ist hierbei, dass alle Plättchen die gleiche Orientierung in Bezug auf die Füllrichtung beim Spritzguss haben, da manche Materialien und Bauteile ein stark anisotropes Ausdehnungsverhalten aufweisen.

Hot-Pin-Pull-Test (HPPT)

Der HPPT ist ein bei Hahn-Schickard standardmäßig eingesetztes Verfahren, um die Haftfestigkeit von Metallschichten auf Substraten zu quantifizieren. Die Testgeometrie ist üblicherweise eine metallisierte Kreisfläche mit einem Durchmesser von 0,9 mm. Auf diese Kreisflächen wurde jeweils ein Kupfer-Pin aufgelötet und mit einem Dage4000 Festigkeits-

Prüfgerät kontrolliert abgezogen. Aus den erhaltenen Kraft-Weg-Profilen können die Haftfestigkeiten berechnet werden.

Mikrotomschnitte und Rasterelektronenmikroskopie (REM)

Mittels Rasterelektronenmikroskopie (REM) wurden im Projekt am Fraunhofer IFAM mehrere weniger als 1 mm breite Oberflächenregionen von Proben, die aus MID-Bauteilen herausgeschnitten worden waren, nach jedem der vier Prozessschritte mit hoher Ortsauflösung charakterisiert. Da die Tiefeninformation bei einer Untersuchung in Aufsicht-Geometrie zwischen einigen Nanometern im Sekundärelektronen (SE)-Modus und wenigen Mikrometern im Rückstreuielektronen (BSE)-Modus liegt, wurden zur Ermittlung der Füllstoffverteilung und -orientierung in den Proben Mikrotomschnitte senkrecht zur Probenoberfläche ausgeführt und mittels REM charakterisiert. Zur Ermittlung der lokalen Elementzusammensetzung mit einer Nachweisempfindlichkeit von etwa 0,1 Gew.-% wurde die Energie-dispersive Röntgenanalytik (EDX) eingesetzt. Dazu wurde ein mit einem Oxford X-Max80 Siliziumdriftdetektor (SDD) zum Röntgennachweis ausgestattetes Feldemissions-Rasterelektronenmikroskop (FESEM) der Marke FEI Helios 600 (DualBeam) verwendet, welches zudem den Einsatz der fokussierten Ionenstrahltechnik (FIB) erlaubt. Diese kann zur Abbildung der Probenoberfläche eingesetzt werden und wurde im Projekt zur Fertigung von weniger als 100 nm dünnen Lamellen an mit dem Elektronenstrahl genau spezifizierten Positionen verwendet, die dann mittels eines Mikromanipulators auf feine Gitter (Grids) abgelegt wurden.

Focused Ion Beam (FIB) und Transmissionselektronenmikroskopie (TEM)

Untersuchungen mittels Transmissionselektronenmikroskopie (TEM) wurden im Projekt an Probenausschnitten aus MID-Bauteilen durchgeführt, die mittels fokussierter Ionenstrahltechnik (FIB) hergestellt worden waren. Dazu wurde ein FEI Tecnai F20 ST Feldemissionsmikroskop eingesetzt, das mit einer CCD-Kamera, einem HAADF-STEM Detektor, einem EDAX s UTW EDX Detektor und einem Gatan GIF2001 Energiefilter für die Nanoanalytik ausgestattet ist. Dies ermöglichte die Charakterisierung von Grenzschichten mit einer Ortsauflösung im Nanometerbereich hinsichtlich ihrer Struktur und Zusammensetzung.

Laserinduzierte Plasmaspektroskopie (LIBS)

Die Laserinduzierte Plasmaspektroskopie (engl. Laser induced Breakdown Spectroscopy, LIBS) wird für Anwendungen in der Oberflächentechnik eingesetzt. Da die LIBS eine minimal invasive Technik ist, ist sie auch grundsätzlich als Inline-Methode geeignet und wird als solche eingesetzt. Für die im Projekt beobachteten Proben wurde jedoch eine Weiterverwendbarkeit der vermessenen Proben nicht untersucht, weswegen die Methode hier unter den zerstörenden Methoden gelistet wurde.

Beim LIBS-Messprozess wird ein Hochleistungslaserpuls auf die Probe fokussiert, wodurch ein kleiner Teil der Oberfläche (typischerweise 0,1 µg bis 1 mg) verdampft und zum Plasma

(Temperaturen von $>10.000\text{ K}$) angeregt wird. Die anschließende Abkühlung des Plasmas führt zur Lichtemission, die charakteristische Emissionslinien für chemische Elemente hat. Die optische Emission wird von einem Spektrometer analysiert und für eine qualitative und quantitative Analyse ausgewertet. Ein typischer LIBS-Aufbau besteht somit aus einem Laser und einem Spektrometer sowie einem PC, der zur Auswertung der Spektraldaten und zur Steuerung der Laserzündung und Datenerfassung dient (Abbildung 3).

Im Vergleich zu herkömmlichen Methoden der Oberflächenanalyse benötigt LIBS relativ kurze Messzeiten in der Größenordnung von wenigen Sekunden. Die Messungen können unter atmosphärischen Bedingungen durchgeführt werden, ohne dass eine Probenvorbereitung erforderlich ist. Darüber hinaus kann LIBS an Inline-Anwendungen angepasst werden.

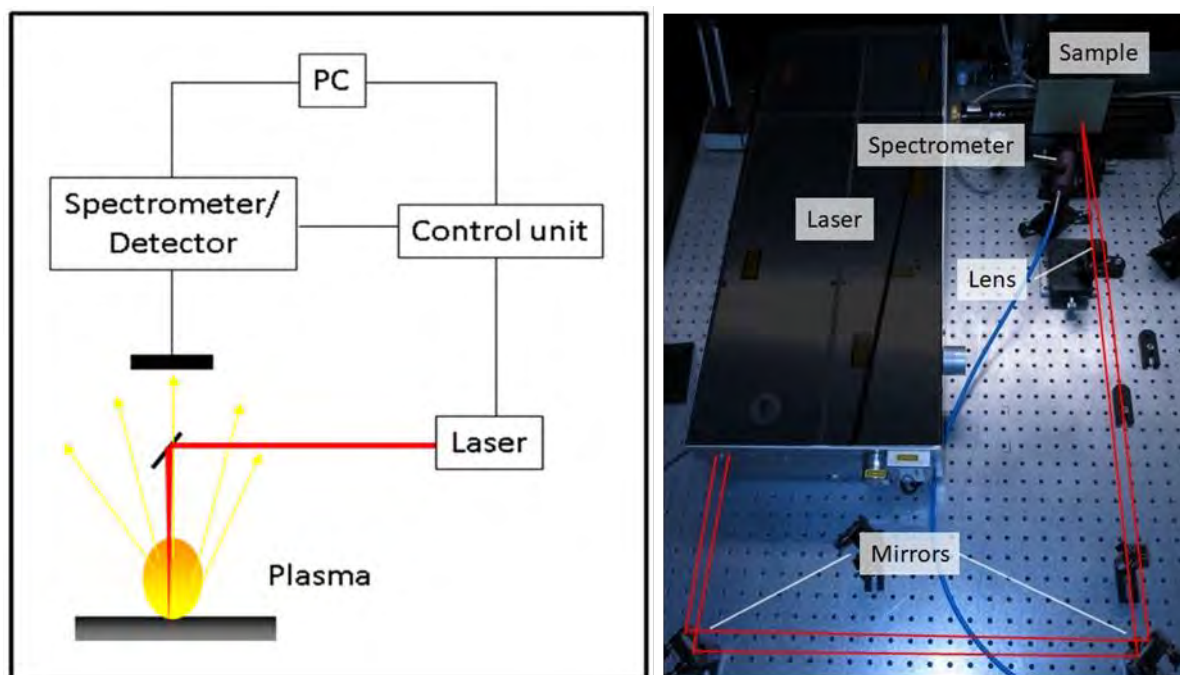


Abbildung 3: Links: Prinzipielle Darstellung der Komponenten eines LIBS-Aufbaus. Rechts: Experimenteller Messaufbau im Labor.

Im Rahmen dieses Projekts wurden LIBS-Messungen mit der Laser-Anregungswellenlänge von 266 nm durchgeführt. Die Wechselwirkung (z.B. Absorption) zwischen der Probe und dem Laserlicht hängt u.a. von der Wellenlänge der Laseranregung ab. In früheren Projekten konnte das Fraunhofer IFAM Erfahrungen mit der Verwendung eines UV-Lasers zur Anregung des Plasmaprozesses im Gegensatz zu der für die LIBS-Technik typischen Wellenlänge von 1064 nm sammeln. Insbesondere bei faserverstärkten Kunststoffen aber auch anderen Plastik-Substraten zeigte diese Wellenlänge eine geringere Kratertiefe der untersuchten Oberfläche, was zu einer geringeren Schädigung bei vergleichbaren Ergebnissen führte. Die Laserpulse wurden von einem gütegeschalteten Nd:YAG-Laser (SpitLight 600 der Firma Innolas Laser GmbH) mit einer Pulsbreite von 8 ns und einer Wiederholrate von 10 Hz erzeugt.

Die Spektren wurden mit einem Echelle-Spektrometer (LLA Instruments GmbH) analysiert, das eine gleichzeitige Detektion von Wellenlängen von 200 nm bis 780 nm mit einer spektralen Auflösung von einigen pm ermöglicht. Das Spektrometer ist mit einer ICCD-Kamera (1024 x 1024 Pixel) kombiniert. Der verwendete Aufbau ist rechts in Abbildung 3 dargestellt.

4.2. Zerstörungsfreie Methoden

Unter zerstörungsfreie Analysemethoden fallen in der Regel die meisten optischen, sowie einige spektroskopische und röntgenographische Methoden. Hiervon wurden die folgenden Methoden im Projekt verwendet.

Lichtmikroskopie

Die Lichtmikroskopie ist eine schnelle und einfache Methode, um sich einen ersten Überblick über die Probenoberfläche zu verschaffen. Bei Hahn-Schickard wurde hierfür ein HIROX RH-2000 Digitalmikroskop verwendet, welches es ermöglicht durch Überlagerung von Bildern mit unterschiedlichem z-Fokus ein Gesamtbild mit hoher Tiefenschärfe zu generieren. Zusätzlich konnte durch Variation der Licht-Polarisation unterschiedliche Merkmale der Proben hervorgehoben werden. Auch am Fraunhofer IFAM wurden alle Proben eingangs lichtmikroskopisch untersucht, um u.a. geeignete Stellen für die physikalisch-chemischen Analysen zu identifizieren. Hierfür wurde ein Digitalmikroskop der Modellreihe VHX-7000 (Firma Keyence Deutschland GmbH) verwendet, das mit einem vollintegrierten 4K-Kopf ausgestattet ist.

Optische Rauheitsmessung mittels Laserangeregter Konfokalmikroskopie (LSCM)

Mithilfe der laserangeregten Konfokalmikroskopie (engl. laser scanning confocal microscopy, LSCM) können Bereiche von mehreren hundert Mikrometern bis zu etwa einem Millimeter Größe untersucht werden. Dabei können Oberflächenstrukturen im Submikrometerbereich erfasst werden. Dazu wird die Oberfläche mit einem kurzwelligen Laserstrahl (408 nm) abgerastert und das von der Oberfläche zurückgestrahlte Licht mit Hilfe einer Optik gesammelt. Durch die Verschiebung der Sammeloptik relativ zur Probenoberfläche sowie der wiederholten Messung der Fokuspunkte für verschiedene Abstände wird eine Höheninformation im nm-Bereich erreicht.

Die Messungen wurden mit einem Laser Scanning Konfokal Mikroskop vom Typ VK 9700 des Herstellers Keyence durchgeführt. Es wurde der Rauheitsparameter S_a für Flächenrauheiten bestimmt, der das arithmetische Höhenmittel angibt. Die Referenzfläche ist hierbei definiert als eine Ebene in der durchschnittlichen Höhe der Daten. Die Flächenrauheit wird durch eine

Aneinanderreihung von Linienscans in X- und Y-Richtung der Messfläche realisiert. Zudem wurden Messungen durchgeführt, bei denen die mittlere Höhe auf zwei Bereichen ermittelt und verglichen wurde. Hiermit wurden Metallisierungsschichtdicken sowie Defekttiefen bestimmt.

Schichtdickenmessung mittels Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA)

Die Metallisierung der Proben mit Cu/Ni/Au erfolgte außenstromlos, wobei die Schichtdicke über die Verweildauer im Elektrolyt eingestellt wurde. Die resultierende Dicke der einzelnen Schichten wurde direkt im Anschluss mit einem FISCHERSCOPE X-RAY XDV- μ LD bestimmt. Dabei wurden immer mehrere Messpunkte angefahren und daraus der Mittelwert gebildet.

Röntgenphotoelektronenspektroskopie (XPS)

Im Projekt wurden am Fraunhofer IFAM mittels Röntgenphotoelektronenspektroskopie (XPS) mehrere weniger als 1 mm breite Oberflächenregionen von Proben, die aus MID-Bauteilen herausgeschnitten oder auf intakten MID-Bauteilen zielgerichtet ausgewählt worden waren, nach jedem der vier Prozessschritte mit hoher spektraler Auflösung charakterisiert. So wurde die chemische Zusammensetzung mit einer Informationstiefe von etwa 10 nm ermittelt und der Oxidationszustand metallischer und kunststoffpolymerer Probenbestandteile erfasst. Die Untersuchungen erfolgten mit einem Thermo Scientific™ K-Alpha™-System.

4.3. Inline-fähige Messmethoden

Neben der Zerstörungsfreiheit ist bei Inline-fähigen Messmethoden besonders wichtig, dass sie schnell und automatisierbar sind, sodass sie fertigungsbegleitend eingesetzt werden können. Dies ist bei den folgenden Methoden der Fall, welche allesamt am Fraunhofer IFAM erarbeitet und getestet wurden.

Rauheitsmessungen mittels Streulicht-Sensor

Die winkelaufgelöste Streulichtmessung ermöglicht es, Aussagen über die Struktur einer Oberfläche zu gewinnen. Dabei wird die Oberfläche des Messobjektes senkrecht mit Licht aus einer LED beleuchtet. Das rückgestrahlte Licht wird von einem Messobjektiv erfasst und auf ein Detektorarray gelenkt. Durch eine lineare Anordnung des Diodenarrays kann jeder Diode ein diskreter Streuwinkel und eine Lichtintensität zugeordnet werden. Mit diesen Informationen wird eine lineare Streulichtverteilung erhalten, die eine Aussage über die Struktur der Oberfläche liefert. Aus der Streulichtverteilung lassen sich statische Kennwerte wie die Streulichtkenngröße A_q (Varianz der Streuwinkelverteilung) sowie die Streulichthilfskenngröße I (Gesamtintensität) ermitteln. Die Streulichtkenngröße A_q gibt die Varianz der Streulichtverteilung wieder und ist ein Maß für die Mikrostruktur der Oberfläche. Das

eingesetzte Oberflächenmesssystem OS500 der Firma Optosurf arbeitet mit einem LED-Messfleck von 0,9 mm mit einer Wellenlänge von 670 nm, siehe Abbildung 4.

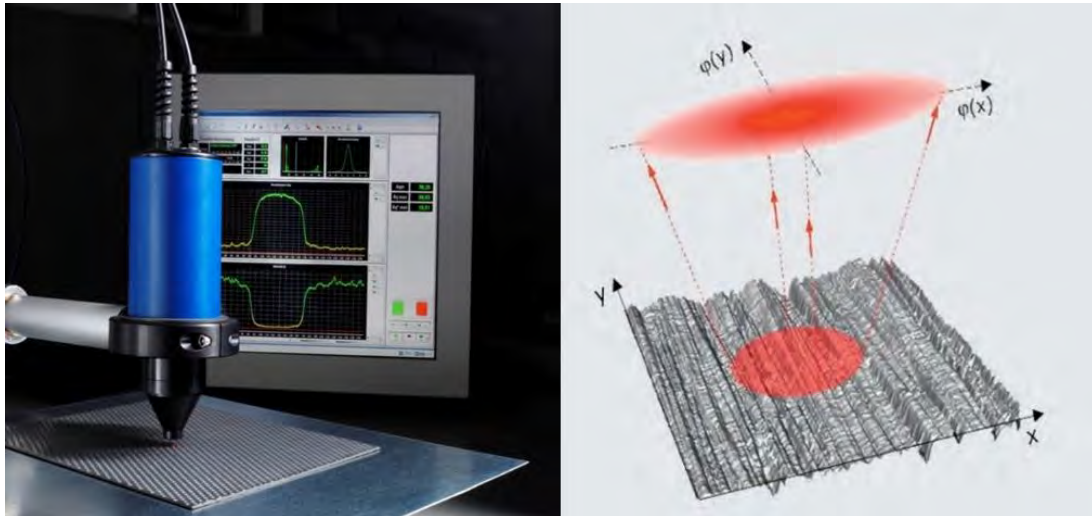


Abbildung 4: Links: Streulichtsensor OS-500 mit Messverlaufsbeispiel. Rechts: Prinzip Streulichtmesstechnik für eine Oberfläche mit Rillen mit schmalere Streulichtverteilung in Rillenrichtung.

Die Messungen in diesem Projekt wurden mithilfe eines xy-Positioniertisches durchgeführt, mit dem größere Bereiche der Proben untersucht werden können, wobei die Streulichtmesstechnik punktuell das von der Oberfläche zurückgestreute Licht erfasst und eine zwei-dimensionale Verteilung der Kenngrößen, ein sogenanntes Map, erhalten wird. Der erfasste Bereich sowie die Anzahl an Messpunkten kann eingestellt werden.

Die Streulichtmesstechnik erfasst und beschreibt die Oberfläche mithilfe sogenannter Streulichtkennwerte A_q und I , die ein Maß für die Rauheit der Oberfläche darstellen. Eine Erschwernis der Methode ist, dass diese Rauheitskennwerte zwar gemäß der VDA-Empfehlung „VDA 2009: Geometrische Produktspezifikation: Oberflächenbeschaffenheit - Winkelaufgelöste Streulichtmesstechnik, Definition, Kenngrößen und Anwendung“ standardisiert erhalten werden aber in der Industrie nicht weit verbreitet zum Einsatz kommen und mit den weitaus häufiger verwendeten Rauheitskenngrößen, wie zum Beispiel dem R_a - und R_z -Wert, experimentell oder unter Zugrundelegung eines Strukturmodells korreliert werden müssen. Ein Vorteil der Methode ist, dass sie sensibel auf geringe Änderungen der Oberflächenbeschaffenheit reagiert und es möglich ist, relativ schnell große Flächen zu erfassen.

Aerosol Wetting Test (AWT)

Die Aerosol-Benetzungsprüfung (AWT) ist ein automatisiertes, robotergeführtes Verfahren, um Tropfengrößenverteilungen auf Oberflächen zu erhalten und zu bestimmen. Im Falle eines definierten (konstanten) Flüssigkeitsvolumens hängt die Tropfengröße von Einzeltropfen auf

Oberflächen direkt vom Kontaktwinkel ab, sodass anhand der Tropfengrößenverteilung die Benetzungsfähigkeit der Oberfläche charakterisiert werden kann.

Für die Messung wird ein Wasseraerosol aus ultrasauberem Wasser mit einem konstanten Wasserstrom erzeugt und auf die Oberfläche der Probe gesprüht. Dazu wird komprimierte Luft als Trägergas verwendet. Bilden sich auf einer flachen Oberfläche Einzeltropfen, so ist deren Größe direkt von der Oberflächenenergie der zu prüfenden Oberfläche abhängig. Sind die zu prüfenden Proben rau und wird der Wasserstrom so hoch eingestellt, dass Einzeltropfen koaleszieren, so bildet sich an der Oberfläche ein spezifisches Tropfenmuster. Das Tropfenbild wird mit einem Kamerasystem automatisiert erfasst und durch eine Bildverarbeitungssoftware anhand von Kontrastunterschieden in eine Tropfengrößenverteilung überführt. Für die Bewertung des Benetzungsverhalten kann neben der Tropfengröße auch die Tropfenanzahl bzw. die benetzte Fläche verwendet werden. Anhand von Abweichungen von vorher festgelegten Prozessfenstern können über die Abweichung der Tropfengrößen Änderungen im Prozess sichtbar gemacht werden. Ein Beispiel ist hierfür in Abbildung 5 zu sehen.

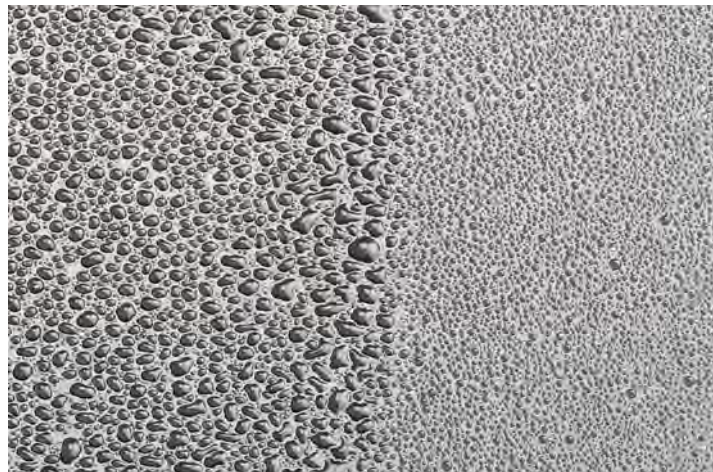


Abbildung 5: Tropfenverteilung auf einer Oberfläche mit unterschiedlichem Benetzungsverhalten.

Die Messungen wurden mit dem bonNDTinspect©-System der Fa. Automation W+R, München, das mit einem KUKA KR15/2 Roboter positioniert wurde, durchgeführt (Abbildung 6). Es wurde mit einer Ultraschalldüse vom Typ Impact der Firma Sonotec gearbeitet. Die Zerstäubfrequenz betrug 120 kHz bei einem Wasserdurchfluss von 2 mL/min. Als Trägergas wurde komprimierte Luft verwendet. Die Bilder wurden mit einer kalibrierten Zeilenkamera aufgenommen. Die Verfahrensgeschwindigkeit des Roboters beträgt 96 m/s. Der so aufgenommene Bildstreifen wird automatisch in Einzelbilder zerlegt, diese Einzelbilder sind ca. 30x30 mm² groß.



Abbildung 6: BonNDTinspect© System zur Bewertung des Benetzungsverhalten von Oberflächen.

Optisch Stimulierte Elektronenemission (OSEE)

Mittels OSEE (Optisch Stimulierte Elektronen Emission) können bei Feststoffoberflächen elektrisch leitfähige Bereiche identifiziert und darauf Belegungen mit wenige Nanometer dünnen Schichten, die Licht oder Elektronen absorbieren, ermittelt werden. Das Messprinzip der OSEE basiert auf dem photoelektrischen Effekt. Wird eine Oberfläche mit elektromagnetischer Strahlung ausreichend hoher Energie bestrahlt, so werden abhängig von der Austrittsarbeit der Oberfläche Elektronen emittiert. Kontaminationen oder Beschichtungen auf einer Oberfläche führen selbst in sehr geringen Konzentrationen zu einer Verstärkung oder Abschwächung der Elektronenemission im Vergleich zur sauberen Oberfläche. Nicht-emittierende Kontaminationen oder Beschichtungen wirken dabei wie ein Widerstand, der je nach Schichtdicke zu einer entsprechenden Verringerung der gemessenen Photoemission auf der Oberfläche führt. Bei einem schichtweisen Aufbau der Oberflächen können zudem Schichtdicken-abhängige Abschwächungen von Substrat-spezifischen Photoströmen erfasst oder die Ausbildung elektrisch leitfähiger Schichten, die einer elektrisch positiven Aufladung bestrahlter Probenbereiche entgegenwirken, festgestellt werden. Zur Anregung der Elektronenemission wird bei OSEE UV-Strahlung verwendet. Der emittierte Photoelektronenstrom wird mittels eines Elektronenkollektors und einem empfindlichen Amperemeter gemessen, so dass das Messsignal der Intensität emittierter Elektronen entspricht (Abbildung 7).

Zusammen mit einem Verfahrtschiff oder einem Roboteraufbau können Probenoberflächen unterschiedlicher Größen mit OSEE abgescannt werden. Der prinzipielle Messaufbau einer OSEE Messung mit einem Verfahrtschiff ist in Abbildung 8 dargestellt. Das Messsignal kann simultan zur Messung auf einem Bildschirm dargestellt, über einen analogen Ausgang verarbeitet und positionsabhängig in ein zweidimensionales Map übertragen werden.

Außerdem kann direkt am Messkopf über ein Ampelsystem zwischen dem Soll-Zustand und davon abweichenden Oberflächenzuständen unterschieden werden.

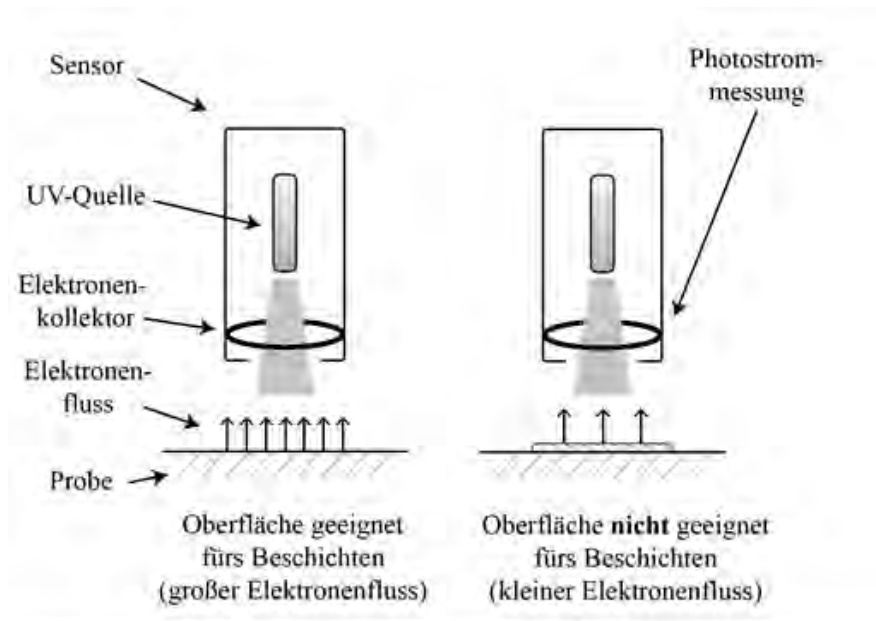


Abbildung 7: Schematische Darstellung eines Messsystems für Optisch Stimulierte Elektronenemission (OSEE).



Abbildung 8: OSEE Messkopf über dem Probenstisch.

Hyperspektralkamera

Mit einer Hyperspektralkamera werden Informationen über große Wellenlängenbereiche des elektromagnetischen Spektrums für jeden einzelnen Bildpunkt aufgenommen. Diese Art der Kamera unterscheidet sich daher stark von herkömmlichen digitalen Kameras, die lediglich die spektralen Bereiche des sichtbaren Lichtes differenziert nach Rot, Grün und Blau und aufzeichnen. Die Aufzeichnung bei Hyperspektralkameras erfolgt nach der sog. Push-broom Methode. Der zweidimensionale Flächensensor nutzt die Pixelreihen für die Verarbeitung der räumlichen Dimension, die Pixelspalten erfassen die spektrale Information. Sie sind mit jeweils

spektral-benachbarten Schmalbandfiltern beschichtet, so dass ein großer Wellenlängenbereich über die gesamte Pixelpalte abgedeckt werden kann. Die zweite räumliche Dimension ergibt sich dabei aus der relativen Bewegung der Kameraposition zum Objekt, welches meist in Form einer starr montierten Kamera und einem beweglich gelagerten Objekt erfolgt. Die Kamera FX10 der Firma Specim zeichnet spektrale Informationen im sichtbaren und nahen Infrarotbereich von 400 bis 1000 nm mit 224 maximal möglichen spektralen Banden auf. Es ergibt sich somit eine spektrale Auflösung von 2,7 nm pro Pixel. Zur räumlichen Auflösung stehen 1024 Pixel zur Verfügung. Im Projekt wurden hauptsächlich Messungen im sichtbaren Bereich gemacht. Bei beiden, in unterschiedlichen Spektralbereichen arbeitenden Kameras erfolgt die Beleuchtung mittels Halogenstrahler, die etwa im 45 Grad Winkel zum Objekt angeordnet sind. Nach Korrektur der räumlichen und spektralen Lichtintensität sowie des Hintergrundrauschens bei geschlossener Blende erfolgt die Messung. Der prinzipielle Aufbau aus Kamera, Beleuchtung und spektralem Unterschied ist in Abbildung 9 zu sehen.

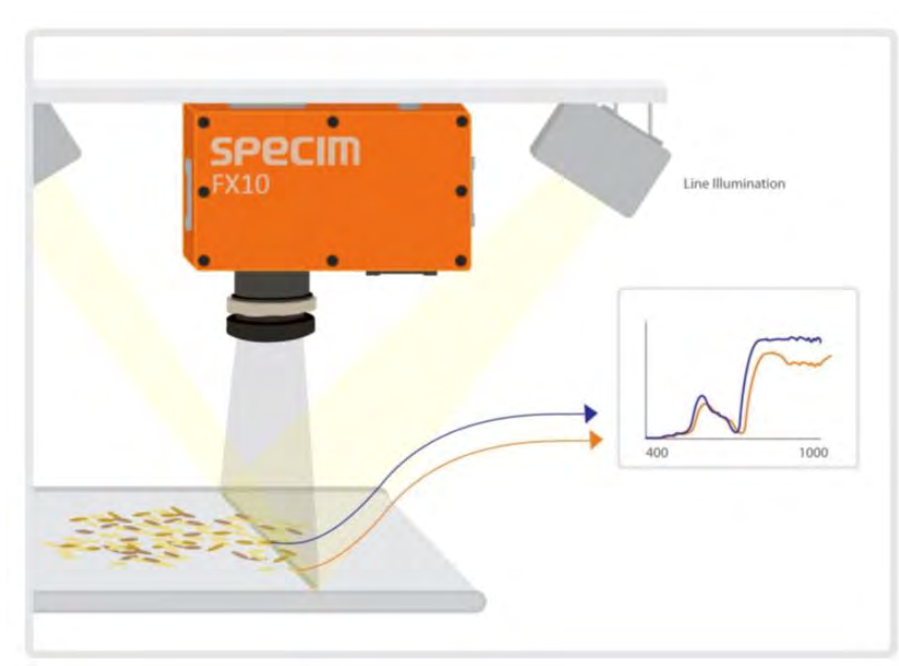


Abbildung 9: Funktionsweise der Hyperspektralkamera. Es werden zeilenweise die zu untersuchenden Proben vermessen. Am Ende erhält man neben der Bildinformation der Probe auch die spektrale Information an jedem Pixel und kann somit unterschiedliche Probenzustände unterscheiden. (Quelle: Specim, Spectral Imaging Oy Ltd.)

5. Substratmaterialien

Für das Forschungsvorhaben sollten gemeinsam mit dem Projektbegleitenden Ausschuss zwei Substratmaterialien ausgewählt werden, die sich in ihren Eigenschaften und Prozessierbarkeit grundlegend unterscheiden. Als erstes Material wurde LCP Vectra E840i LDS (kurz: LCP) gewählt, da dieses Material aufgrund seiner exzellenten Fließfähigkeit und Temperaturbeständigkeit für viele insbesondere miniaturisierte MID Baugruppen mit elektronischen Komponenten Verwendung findet. Bei LCP handelt es sich um ein sogenanntes Liquid Crystal Polymer, also um ein flüssigkristallines Polymer, das neben dem LDS-Additiv mit 40 % Mineral gefüllt ist. Daneben standen zwei weitere Materialien zur Auswahl. Diese waren zum einen Reny XHP 1002 (kurz: Reny), ein faserverstärkter Polyamid-Compound, welcher auch eine hohe Temperaturbeständigkeit hat, und zum anderen XANTAR LDS 3760 (kurz: XANTAR), ein ungefülltes Polycarbonat, beides von Mitsubishi Engineering-Plastics Corporation (MEP). LDS-fähige Polycarbonat-Compounds haben insbesondere für Antennenapplikationen eine große Bedeutung. An beiden Materialien wurde zunächst ein Laserparameterscreening durchgeführt. Es wurden 27 Felder mit unterschiedlichen Laserparametersätzen strukturiert, wobei Laserleistung, Pulsfrequenz, Pulsenergie, Verfahrensgeschwindigkeit und Pulsüberlapp sukzessive variiert wurden.

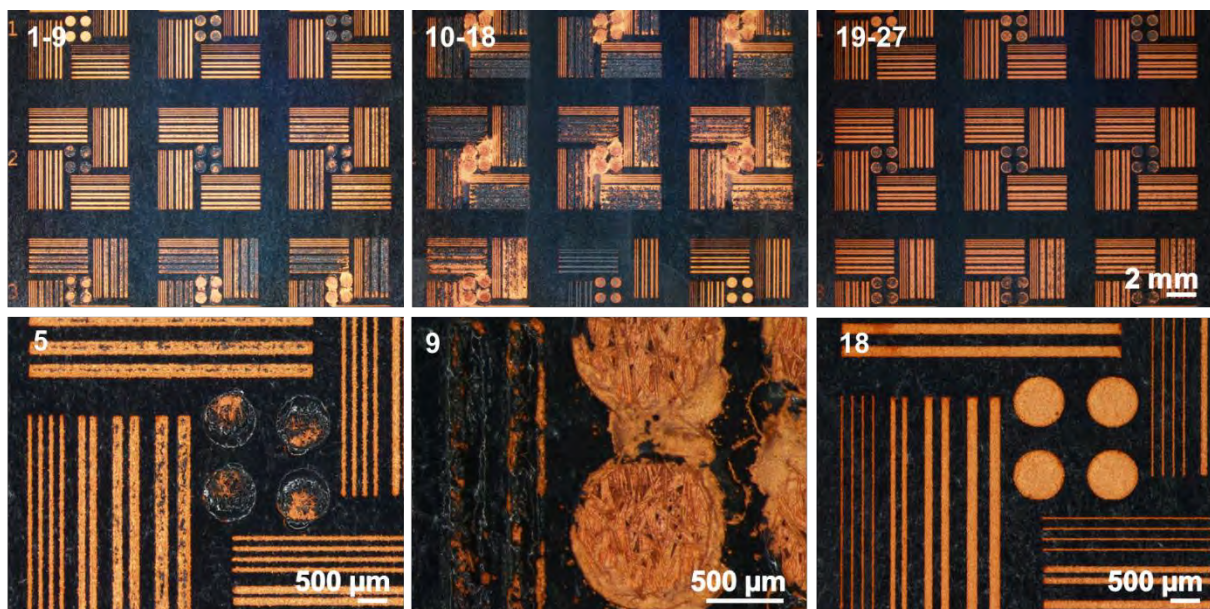


Abbildung 10: Laserparameterscreening an Reny.

Abbildung 10 zeigt oben eine Übersicht über die 27 Felder auf Reny nach der Metallisierung mit Kupfer. Dabei gab es je nach gewähltem Laserparametersatz gravierende Unterschiede in der Qualität der Metallisierung. Bei genauerer Betrachtung wurde festgestellt, dass in vielen Fällen durch den Laser das Material aufschmilzt und teilweise die faserartigen Füllstoffe

freigelegt werden, welche dann stark übermetallisieren, wie bei Laserparametersatz Nr. 9 zu sehen. Lediglich einer der 27 untersuchten Laserparametersätze (Nr. 18) zeigte sowohl bei den Linien als auch bei den Kreisflächen gute Metallisierungsergebnisse. Damit konnte für dieses Material nur ein sehr kleines Prozessfenster identifiziert werden.

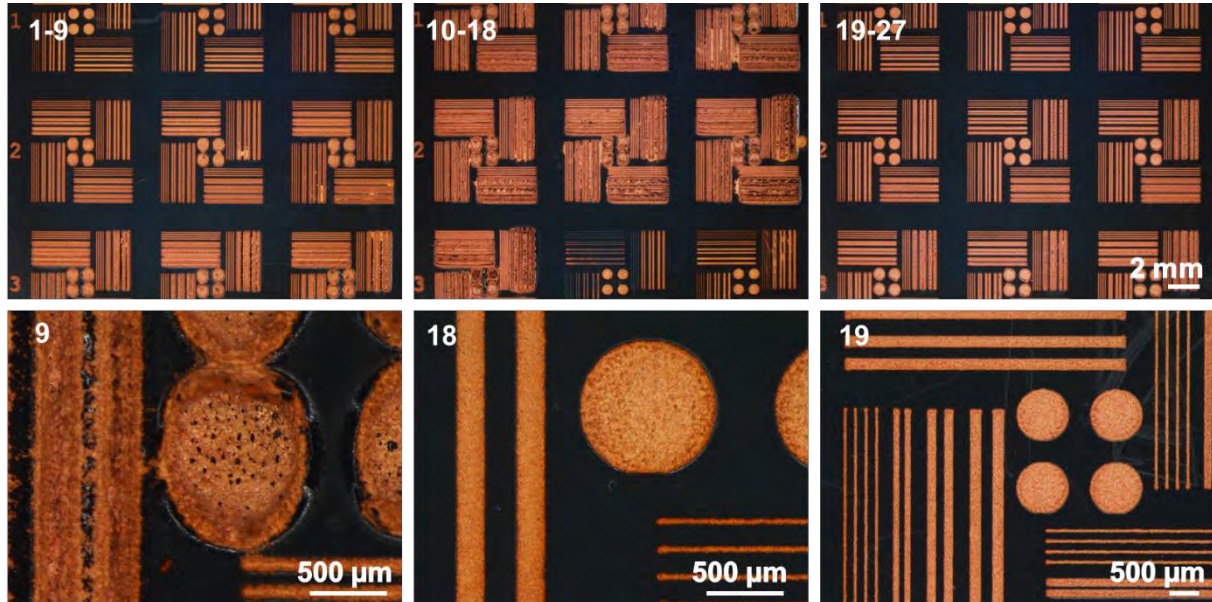


Abbildung 11: Laserparameterscreening an XANTAR.

Analog zu Reny wurde auch XANTAR prozessiert. Die dazugehörigen Ergebnisse sind in Abbildung 11 dargestellt. Generell machte hier die Kupfer-Metallisierung einen besseren Eindruck. Bei genauerer Betrachtung zeigten sich für manche Parametersätze, wie Nr. 9, ebenfalls ein Aufschmelzen des Materials, was zu einer ungenügenden Metallisierung führte. Jedoch waren im Vergleich zu Reny neben Nr. 18 auch noch weitere Laserparametersätze vielversprechend, sodass für dieses Material ein deutlich größeres Prozessfenster identifiziert werden konnte. Zudem führte die Abwesenheit von anisotropen Füllstoffen wie z.B. Glasfasern zu homogeneren Ergebnissen. Aus diesen Gründen wurde XANTAR als zweites zu untersuchendes Substratmaterial gewählt.

Wie bereits erwähnt, ist das kommerziell verfügbare XANTAR ein ungefülltes Polycarbonat mit einer definierten Menge LDS-Additiv (XANTAR, 100 % LDS, 0 % Talk). Um dem Einfluss von LDS-Additiv- und Talk-Gehalt auf Materialeigenschaften und Prozessierbarkeit zu untersuchen, wurden von MEP zusätzliche XANTAR-Varianten compounding und zur Untersuchung bereitgestellt. Diese waren:

- XANTAR, 50 % LDS, 0 % Talk
- XANTAR, 150 % LDS, 0 % Talk
- XANTAR, 100 % LDS, 3 % Talk
- XANTAR, 100 % LDS, 9 % Talk

Die spritzgegossenen Proben wurden mittels REM untersucht, um die Füllstoff-Verteilung zu überprüfen und zu visualisieren. Allgemein sind die LDS-Additive bei allen Proben mit unterschiedlichem LDS-Additiv-Gehalt (Abbildung 12) homogen in der Polymermatrix verteilt und die Zunahme an LDS-Additiv lässt sich auf sehr gut visualisieren.

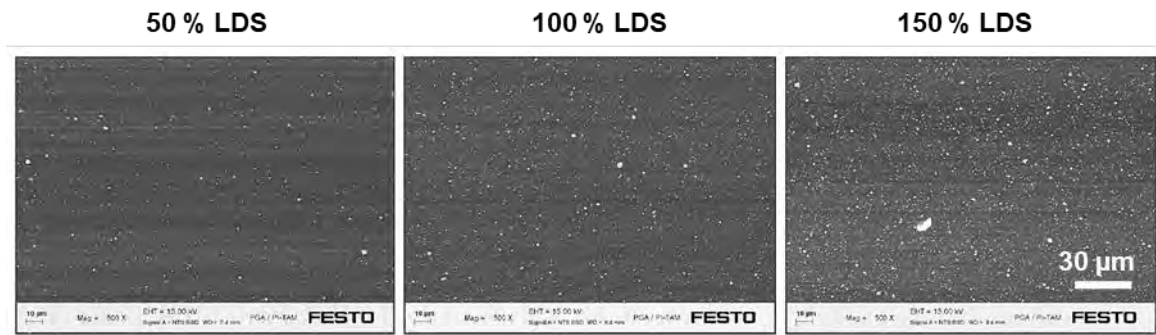


Abbildung 12: REM Aufnahmen von XANTAR mit unterschiedlichem LDS-Additiv-Gehalt (0 % Talk).

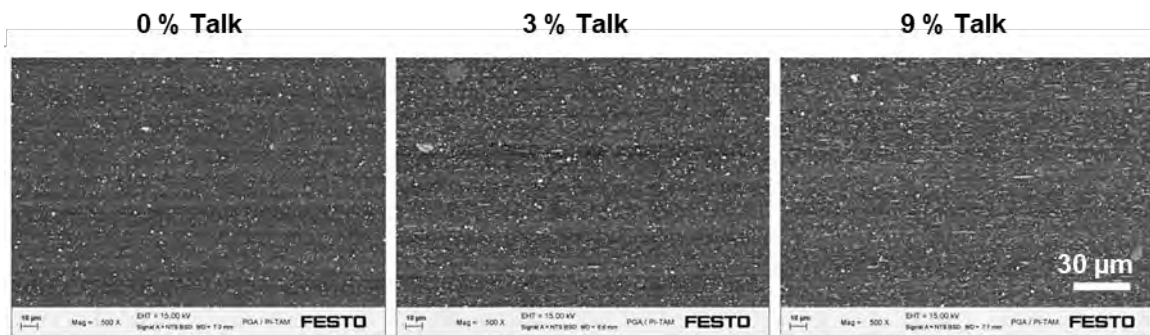


Abbildung 13: REM Aufnahmen von XANTAR mit unterschiedlichem Talk-Gehalt (100 % LDS).

Bei den XANTAR-Varianten mit Talk (Abbildung 13) lassen sich die LDS-Additive und die Talk-Partikel optisch insoweit unterscheiden, dass die LDS-Partikel ca. 1 µm im Durchmesser und überwiegend sphärisch sind, während die Talk-Partikel merklich größer und Plättchen-förmig sind. Die Plättchen sind bedingt durch den Spritzgussprozess zudem parallel zu einander angeordnet.

Schließlich wurde der Einfluss der unterschiedlichen Zusammensetzung auf die thermo-mechanischen Eigenschaften mittels TMA untersucht. Vergleichend wurde hier auch noch LCP hinzugenommen. Bei allen Proben wurde die thermische Dehnung senkrecht zur Spritzguss-Richtung gemessen. Diese Information ist vor allem für LCP und XANTAR mit Talk von Bedeutung, da sich die flüssigkristallinen Polymerphasen bzw. Talk-Partikel abhängig von der Spritzrichtung ausrichten und somit zu einem anisotropen Materialverhalten führen.

Abbildung 14 zeigt die Ergebnisse der TMA Messungen. Auffällig ist hier als erstes, dass LCP bis zu deutlich höheren Temperaturen charakterisiert wurde. Dies liegt daran, dass LCP mit 227 °C eine ca. doppelt so große Formbeständigkeitstemperatur (1,80 MPa) aufweist wie

XANTAR mit 103 °C. Darüber hinaus verläuft die Steigung der Kurve bei LCP deutlich flacher als bei XANTAR, was auf einen geringeren CTE-Wert schließen lässt. Im Fall von LCP liegt dieser bei 24 ppm/K (Tabelle 2). Die XANTAR Varianten mit unterschiedlichem LDS-Additiv-Gehalt zeigten alle die gleiche thermische Dehnung, sodass in Abbildung 14 repräsentativ dafür nur das kommerzielle Material gezeigt wird. Bei den Varianten mit Talk zeigte sich hingegen die Tendenz einer sich verringernenden Steigung mit zunehmendem Talk-Gehalt. Dies spiegelte sich auch in den dazugehörigen CTE-Werten wider. Durch 9 % Talk wurde der CTE-Wert um ca. 20 % verringert, was zuträglich ist, wenn man den CTE-Mismatch zwischen Substrat und Metallisierung so gering wie möglich halten will.

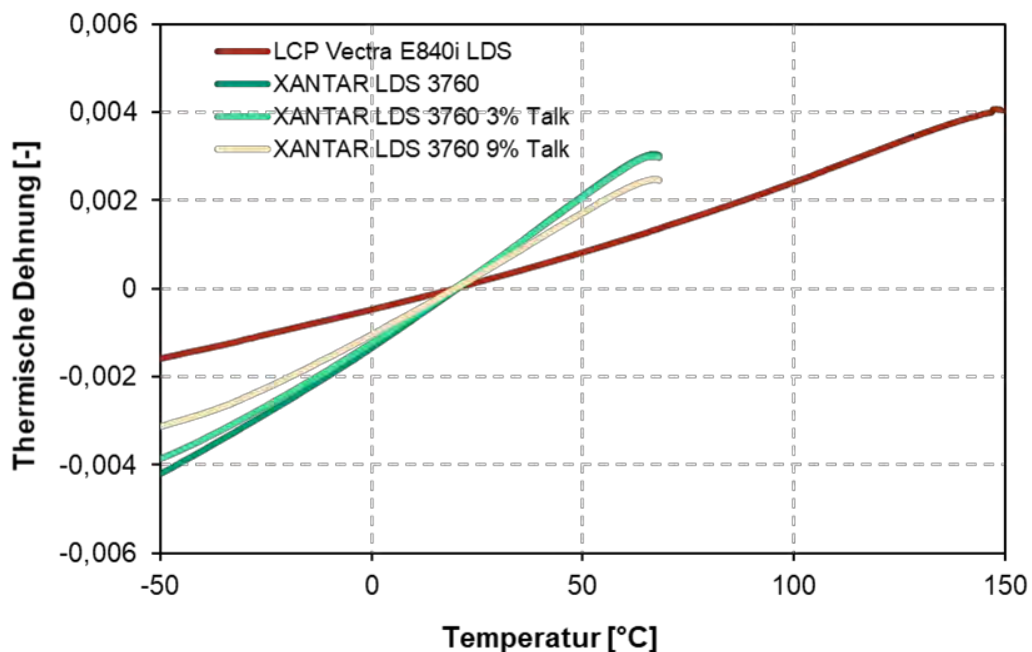


Abbildung 14: TMA Messung von LCP und XANTAR.

Tabelle 2: CTE-Werte der Substratmaterialien.

Substratmaterial	CTE [ppm/K] (\perp)
LCP Vectra E840i LDS	24
XANTAR LDS 3760 LDS	64
XANTAR LDS 3760 LDS 3% Talk	61
XANTAR LDS 3760 LDS 9% Talk	51

6. Spritzguss

6.1. Prozess- und Analyseergebnisse

Von den beiden ausgewählten Materialien wurde Granulat für den Spritzguss bei Hahn-Schickard bereitgestellt. Zunächst sollten Platten abgemustert und dabei die Spritzgussparameter nach Tabelle 1 variiert werden. Standardmäßig wird Granulat vor der Verarbeitung nach Herstellervorgabe getrocknet, was bei LCP zu einer Restfeuchte von 0,0651 % geführt hat. XANTAR, das den gleichen Trocknungsvorgang durchlaufen hatte, war mit 0,1138 % vergleichsweise doppelt so feucht.



Abbildung 15: Spritzguss-Füllstudie für XANTAR und genauere Betrachtung der erhaltenen Bauteile.

Während die Spritzgussparameter von LCP bereits zu Beginn des Projektes bekannt waren, musste für XANTAR erst eine Füllstudie durchgeführt werden. Diese ist in Abbildung 15 oben gezeigt. Man kann sehen, dass mit zunehmendem Spritzdruck die Kavität immer weiter aufgefüllt wird, bis sich das Bauteil schließlich vollständig ausgebildet hat. In diesem Stadium

besitzt das Bauteil eine spiegelglatte Oberfläche, welche für Polycarbonate wie XANTAR charakteristisch ist. Bei genauerer Betrachtung zeigten sich jedoch im Randbereich der Platte leichte Unebenheiten, auch auf der Rückseite bildete sich schwach ein „Rahmen“ ab und der Überlauf war nicht komplett ausgefüllt. Grund dafür war, dass die Kavität für LCP ausgelegt ist und das XANTAR bei deutlich tieferen Temperaturen verarbeitet werden muss. Dies führte dazu, dass die Schmelze am Übergang zum Überlauf zu früh erstarrte, was den Nachdruck unwirksam machte. Zusätzlich schwand das Bauteil leicht, sodass sich schließlich der „Rahmen“ ausbildete, der eine nicht ganz vollständige Füllung impliziert. Ungeachtet dessen war die Bauteilqualität sonst sehr gut. Es musste allerdings für den folgenden Prozessschritt Lasern darauf geachtet werden, dass keine Strukturen auf diesem Randbereich platziert sind. Das Laserlayout wurde angepasst bzw. unter dieser Vorgabe designt, worauf in Kapitel 7.1 noch genauer eingegangen wird.

Nach erfolgreicher Spritzgussparameterfindung beim XANTAR wurden beide getrockneten Granulate spritzgegossen, wobei drei verschiedene Spritzdrücke gewählt wurden: Einer am unteren Ende (niedrig), einer in der Mitte (mittel) und einer am oberen Ende (hoch) des für das Material und die Kavität möglichen Spritzdruck-Bereiches. Für einen ersten Eindruck der Bauteilqualität wurden die Oberflächen unter dem Lichtmikroskop genauer betrachtet. Generell zeigte sich, dass XANTAR eine deutlich glattere Oberfläche aufwies als LCP und diese blieb auch für alle eingestellten Spritzdrücke gleich. Bei LCP hingegen machten sich abhängig vom Spritzdruck leichte Unterschiede in der Topographie bemerkbar, wie aus Abbildung 16 ersichtlich. Dies wird in Kapitel 6.2 mittels eines Inline-fähigen Streulicht-Sensors noch genauer beleuchtet.

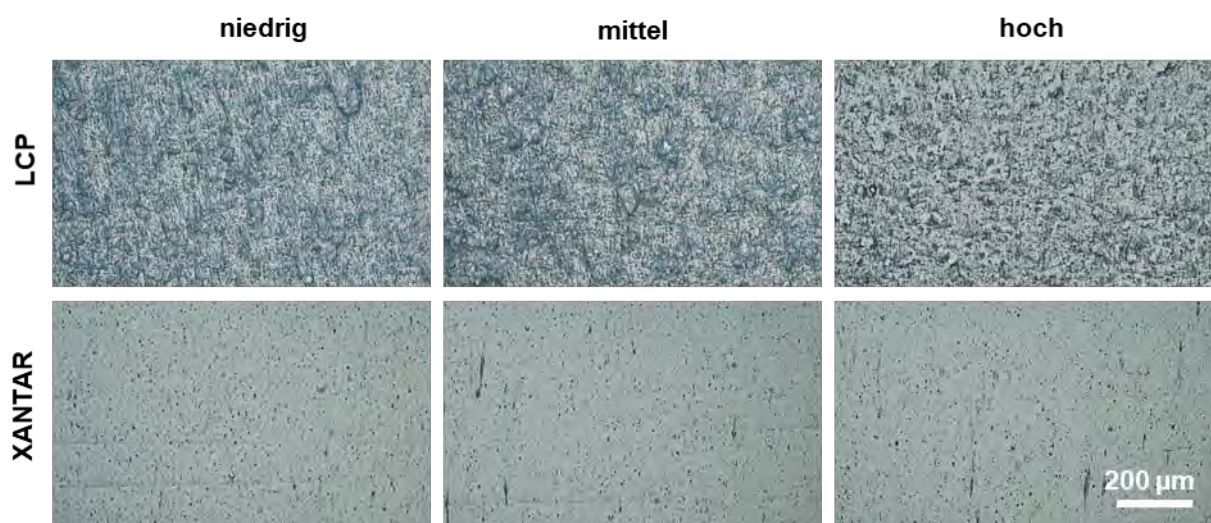


Abbildung 16: Lichtmikroskopische Aufnahmen von LCP- und XANTAR-Oberflächen in Abhängigkeit des Spritzdrucks. Durch Polarisierung konnte die Oberflächenstruktur besonders visualisiert werden.

Um weitere Oberflächengüten zu generieren, sollten neben den getrockneten Granulaten auch gezielt feuchte Granulate verarbeitet werden. Hierzu wurden jeweils 5 kg Granulat für eine Woche in einem Klimaschrank bei 80 °C und 90 % relative Luftfeuchtigkeit gelagert. Analog zu den trockenen Granulaten, wurde die Restfeuchte direkt vor der Verarbeitung gemessen. Diese betrug bei feuchtem LCP 0,1791 %, was knapp dreimal so hoch ist wie bei trockenem LCP. Feuchtes XANTAR beinhaltete mit 0,2278 % ca. doppelt so viel Wasser wie sein trockenes Pendant.

Der Spritzguss gestaltete sich mit feuchtem Granulat erwartungsgemäß deutlich schwieriger. Obwohl LCP eine geringere Wasseraufnahme aufwies, gab es hierbei die meisten Probleme. Deutlich wurde dies vor allem beim Spritzguss von kleineren, filigraneren Bauteilen mit 3D-Strukturen, wie sie in Abbildung 17 gezeigt wird. Die dazugehörige Kavität musste mehrfach ausgebaut werden, da sich das feuchte Granulat darin festgesetzt hatte und die Auswerferpins blockiert wurden. Obwohl das LCP schwieriger zu verarbeiten war, wiesen die hergestellten Bauteile eine bessere Oberfläche auf als es beim XANTAR der Fall war (Abbildung 18). Lichtmikroskopische Untersuchungen zeigten, dass feuchtes Granulat bei LCP zu einer merklichen Aufrauhung der Oberfläche führt, während sich bei XANTAR inhomogen verteilte tiefe Furchen ausbilden. Auch dies wird in Kapitel 6.2 noch genauer beleuchtet.

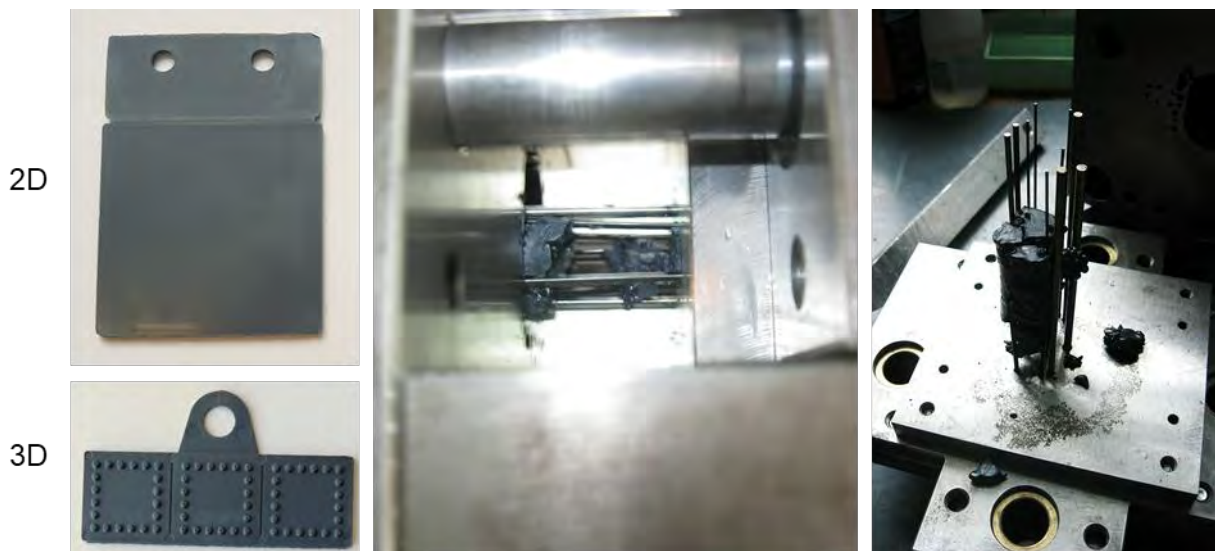


Abbildung 17: Fotografien von spritzgegossenen LCP-Bauteilen und der Kavität der 3D Bauteile beim Spritzguss mit feuchtem Granulat.

Die bisherigen Ergebnisse zeigen deutlich, wie sensitiv der Spritzguss auf die Restfeuchte im Granulat reagiert und dass ein zu hoher Wasser-Gehalt einen negativen Einfluss auf die Bauteilqualität hat. Standardmäßig wird die Restfeuchte mittels AQUATRAC ermittelt. Jedoch dauert die Messung in der Regel bis zu 60 min. Eine deutlich schnellere und dennoch genaue Messmethode wurde am Fraunhofer IFAM erarbeitet.

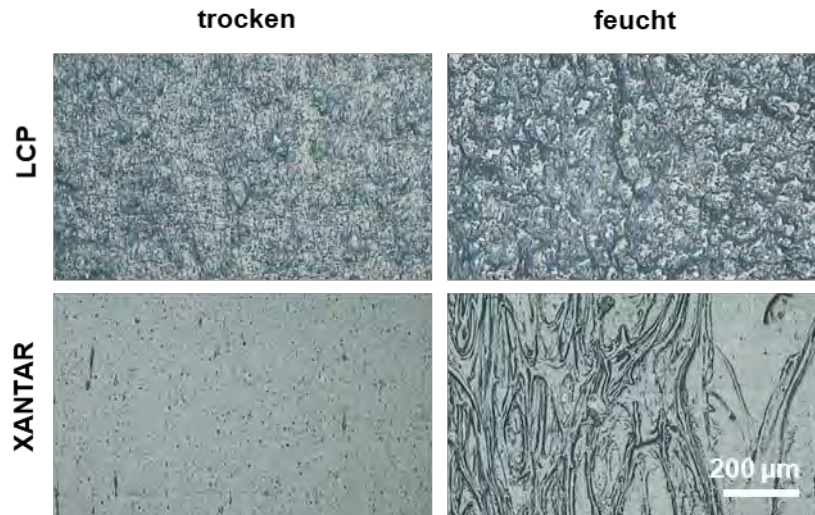


Abbildung 18: Lichtmikroskopische Aufnahmen von LCP- und XANTAR-Oberflächen hergestellt aus trockenem und feuchtem Granulat bei gleichem Spritzdruck. Durch Polarisation konnte die Oberflächenstruktur besonders visualisiert werden.

Dazu wurde ein Mikrowellengerät der Firma TEWS Elektronik GmbH & Co. KG aus Hamburg, die auch Mitglied des projektbegleitenden Ausschusses des FOQus-Projektes ist, verwendet. In diesem Fall handelt es sich um das am Fraunhofer IFAM verfügbare Microwave Moisture Measuring System MW4310 mit dem planaren, offenen MW-Sensor SLC-043-UiS.

Beim Mikrowellenresonanzverfahren zur Feuchtemessung von TEWS wird vom Sensor ein schwaches Mikrowellenfeld erzeugt. Dieses Feld weist eine für den Sensor charakteristische Resonanz auf, deren Parameter sich messen lassen. Durch Befüllen oder Bedecken des Sensors mit einem Produkt (Plattenmaterial, Pulver, Granulat) werden die Lage und die Ausprägung der Resonanz beeinflusst. Diese Änderungen sind vor allem stark abhängig vom Wasseranteil im Produkt. Mit dem Ausmessen der Resonanzen lassen sich so Werte ermitteln, die proportional zur Feuchte im Material sind.

Damit das Messgerät allerdings den Feuchtegehalt in Prozent einer Probe direkt anzeigen kann, muss es erst für das jeweilige Material kalibriert werden. Dazu sind mehrere Produktproben mit unterschiedlichem Feuchtegehalt nötig, die den typischen Bereich der auftretenden Feuchten abdecken. Der Feuchtegehalt dieser Referenzproben muss dann unter den gleichen Bedingungen sowohl mit dem Mikrowellenresonanzverfahren als auch mit einer anderen Methode wie z.B. über den Gewichtsverlust beim Trocknen oder die Gewichtszunahme bei Auslagerung bei einer festen Luftfeuchtigkeit gemessen werden. Daraus lässt sich eine materialspezifische Kalibrierkurve bestimmen. Nach dieser einmaligen Kalibrierung kann dann das Mikrowellengerät zur direkten Bestimmung des Feuchtegehalts eingesetzt werden.

Entsprechend der beschriebenen Vorgehensweise wurden zunächst beide Granulate im Exsikkator im Ofen bei 50 °C unter Gewichtskontrolle mittels Wägung bis zur Gewichtskonstanz getrocknet (Abbildung 19).



Abbildung 19: Trocknung der Granulate im Exsikkator im Ofen bei 50 °C.

Anschließend wurden beide Granulate im Ofen bei 50 °C luftdicht in mehreren Boxen ausgelagert wurden, wobei in jeder der Boxen über entsprechende gesättigte Salzlösungen jeweils eine andere, definierte Luftfeuchte eingestellt wurde (Abbildung 20).



Abbildung 20: Auslagerung der Granulate bei eingestellten relativen Luftfeuchten.

Nach Erreichen der Sättigung erfolgte die Bestimmung der Feuchteaufnahme der Granulate in Gewichtsprozent mittels Wägung. Die daraus resultierenden Feuchtegehalte der Granulate in Gewichtsprozent sind in Tabelle 1 dargestellt. Zum Vergleich ergaben sich bei den Messungen von Hahn-Schickard mit dem AQUATRAC-Gerät folgende Werte: „Trockenes Granulat“ 0,07 % (Vectra/LCP) bzw. 0,11 % (XANTAR) und „Feuchtes Granulat“ 0,18 % (Vectra/ LCP) bzw. 0,23 % (XANTAR).

Tabelle 3: Mit Salzen eingestellte relative Luftfeuchten und resultierende Feuchtegehalte.

Projekt	Granulat	Salz	Feuchtigkeit [%rF]	Feuchtegehalt Granulat [wt%]
A419410_FOQus	Vectra E840i	LiCl	12	0,01
A419410_FOQus	Xantar LDS 3760	LiCl	12	0,03
A419410_FOQus	Vectra E840i	MgCl ₂	32	0,04
A419410_FOQus	Xantar LDS 3760	MgCl ₂	32	0,08
A419410_FOQus	Vectra E840i	NaBr	53	0,07
A419410_FOQus	Xantar LDS 3760	NaBr	53	0,17
A419410_FOQus	Vectra E840i	NaCl	78	0,11
A419410_FOQus	Xantar LDS 3760	NaCl	78	0,21
A419410_FOQus	Vectra E840i	K ₂ SO ₄	100	0,15
A419410_FOQus	Xantar LDS 3760	K ₂ SO ₄	100	0,31
A419410_FOQus	Vectra E840i	KI	100	0,17
A419410_FOQus	Xantar LDS 3760	KI	100	0,37

Da es sich bei dem am Fraunhofer IFAM verfügbaren MW-Sensor SLC-043-UiS um einen planaren, offenen Sensor handelt, der vorrangig zur Messung der Feuchte in Plattenmaterial vorgesehen ist, musste für die Messung der Granulate eine Modifikation vorgenommen werden. Für die Messungen an den Granulaten wurde auf den MW-Sensor ein entsprechender Messbecher aufgebracht (Abbildung 21), so dass die Granulate direkt auf den offenen Sensor geschüttet werden konnten.

**Abbildung 21:** Microwave Moisture Measuring System MW4310 mit dem planaren, modifizierten MW-Sensor SLC-043-UiS.

Dieselben, bei den eingestellten relativen Luftfeuchten ausgelagerten Granulate wurden dann unter denselben Bedingungen mit dem Mikrowellengerät gemessen. So konnte einer Referenzfeuchte aus der Wägung eine sogenannte „MW-Feuchte“ aus der MW-Messung zugeordnet werden. Der lineare Fit der Messwerte ergab schließlich die gewünschte Kalibrierkurve für die beiden Granulate mit einer guten Korrelation (siehe Abbildung 22 und Abbildung 23). Ein nichtlinearer Fit mit 1 bzw. 2 Segmenten ergab keine wesentliche Verbesserung des Korrelationskoeffizienten, was darauf hinweist, dass der lineare Fit die Korrelation zwischen MW-Feuchte und Referenzfeuchte bereits ausreichend gut abbildet.

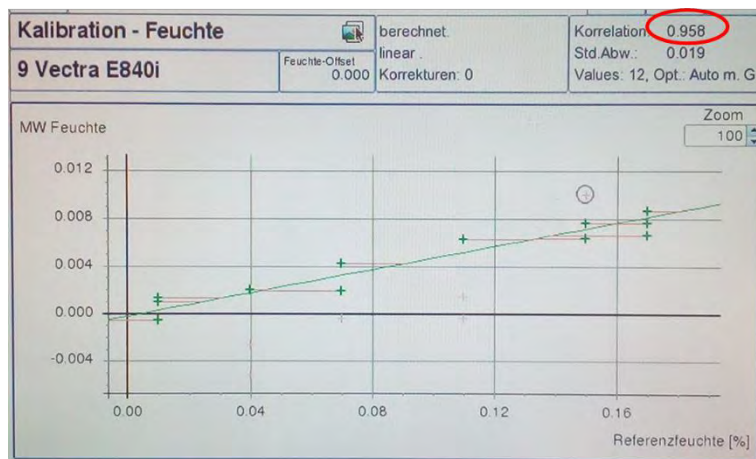


Abbildung 22: Kalibrierung des MW-Sensor für LCP Vectra E840i LDS (linearer Fit).

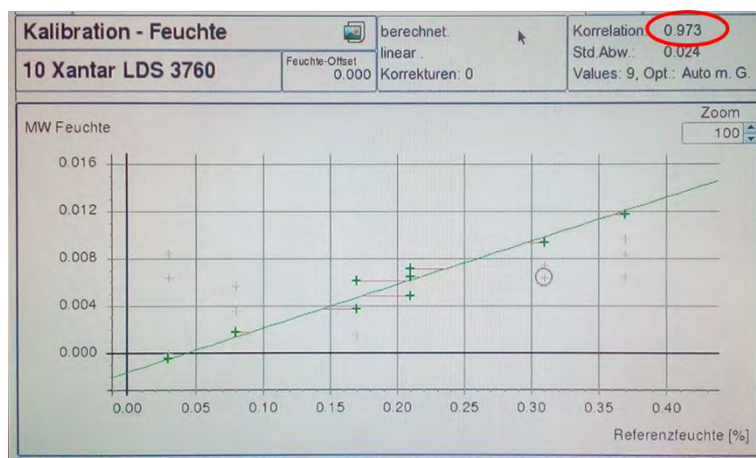


Abbildung 23: Kalibrierung des MW-Sensor für PC-Material XANTAR LDS 3760 (linearer Fit).

Die beschriebene Kalibrierung ist nur einmal pro Material durchzuführen und wurde somit für die beiden Granulate LCP Vectra E840i LDS und XANTAR LDS 3760 final abgeschlossen. Damit kann das Mikrowellengerät nun zur direkten Bestimmung des Feuchtegehalts des entsprechenden Granulatmaterials eingesetzt werden und die Granulatfeuchten lassen sich innerhalb weniger Sekunden sehr genau ermitteln. Dies bedeutet eine deutliche Verkürzung der Messzeit im Vergleich zu den Messungen der Granulatfeuchte durch Taupunktmessung oder dem Calciumhydrid-Verfahren mittels des AQUATRAC-Gerätes und macht das Mikrowellengerät auch für den online-Einsatz geeignet.

6.2. Inline-fähige Messungen

Die spritzgegossenen Proben der unterschiedlichen Herstellungsparameter und Substratmaterialien wurden allesamt mit dem Streulichtsensor untersucht. Zunächst wurden die Rauheitsparameter, allen voran die Flächenrauheit S_a für alle Proben mittels LSCM ermittelt, wobei je fünf Positionen je Probe vermessen und anschließend Mittelwert und Standardabweichung bestimmt wurde. Die Ergebnisse sind in Abbildung 24 zu sehen. Hier sieht man, dass die Rauheiten von spritzgegossenem LCP und XANTAR sich nicht signifikant unterscheiden. Innerhalb des LCP sind jedoch Unterschiede zu erkennen. Zum einen ist ein leicht erhöhter R_a -Wert für die Proben bei niedrigem Spritzdruck zu sehen (V02&V06) und zum anderen fällt der starke Unterschied zwischen den beiden feucht spritzgegossenen Proben auf (V04&V08).

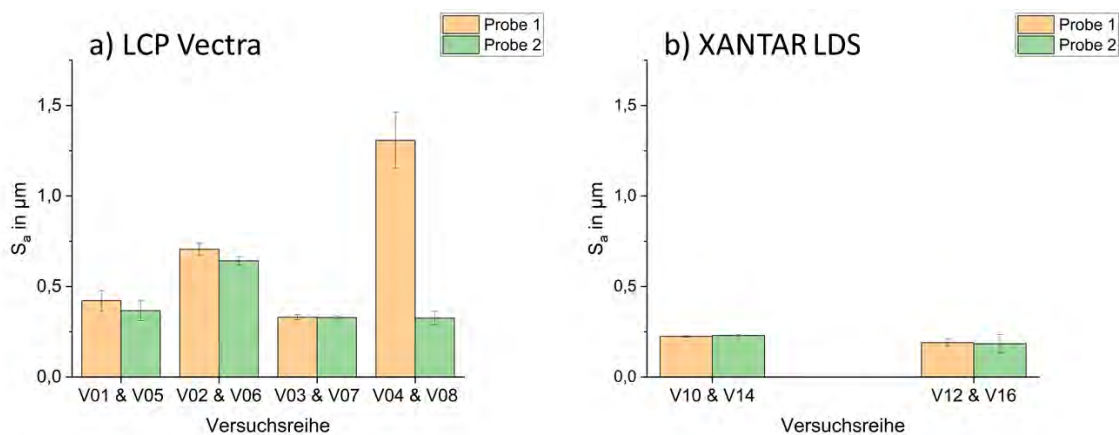


Abbildung 24: Ergebnisse der Flächenrauheit S_a auf allen gemessenen Spritzguss-Proben für LCP (links) und XANTAR (rechts).

Die Streulichtmessung liefert Informationen über den A_q -Wert, der mit S_a (oder R_a) korreliert werden kann. Dabei ist dieser jedoch der Befund eines ein bildgebenden Verfahrens, das die gesamte Probenoberfläche innerhalb einer Messung anhand einer zweidimensionalen Map erfasst. Für LCP sind in Abbildung 25 beispielhaft drei Ergebnisse für trockenes Granulat bei unterschiedlichem Spritzdruck dargestellt. Man erkennt lokal starke Inhomogenitäten auf der Oberfläche, vor allem für niedrigen und mittleren Spritzdruck. Diese können mögliche Abweichungen zwischen den Messungen mit dem LSCM erklären, da die Oberflächenrauheit nach diesen Ergebnissen stark von der Messposition beeinflusst ist.

Des Weiteren fällt auf, dass für alle Messungen die Rauheit auf der rechten Probenseite erhöht ist. Dies ist in geringerem Maße auch der Fall für die insgesamt homogenere Probenoberfläche, die bei hohem Spritzdruck erhalten wurde. Da dieser Effekt bei allen diesen LCP-Proben aufgetreten ist, könnten mögliche Erklärungen dafür die Füllung der Spritzgussform,

das Erstarrungsverhalten der Schmelze oder das Entformungsverhalten sein. Die regionalen Schwankungsbreiten der A_q -Werte sind in Tabelle 4 übersichtgebend für alle Proben aufgelistet. Die Positionen stimmen mit denen aus Abbildung 25 überein.

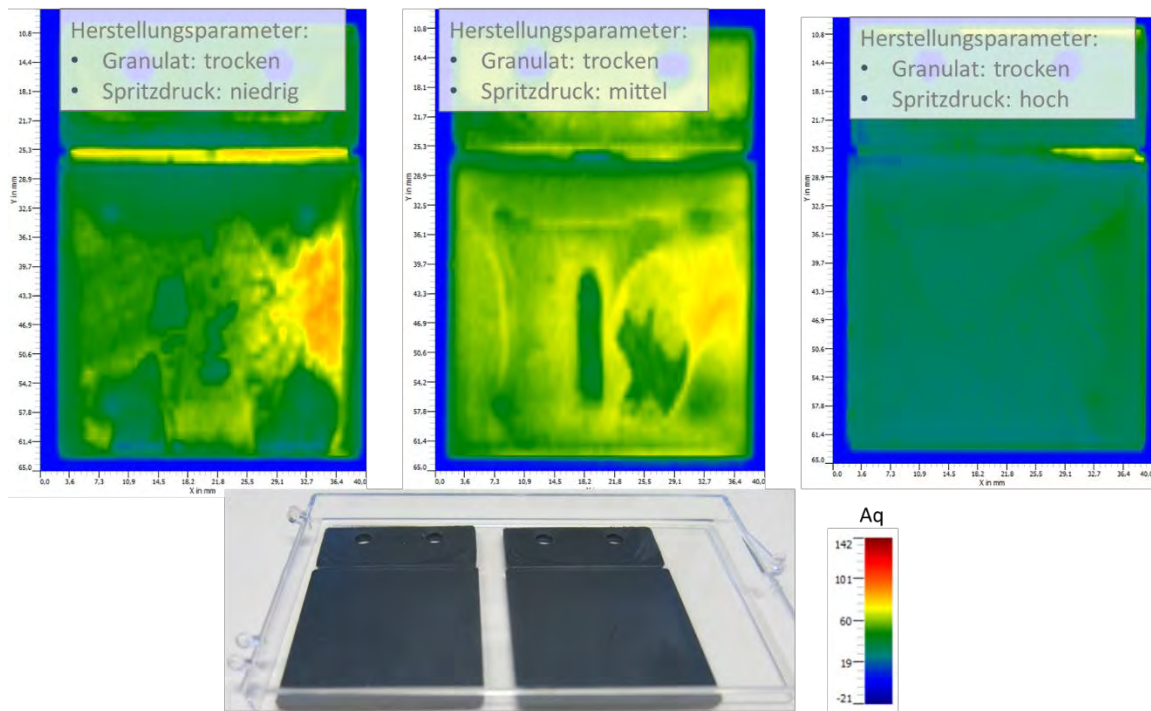


Abbildung 25: Ergebnisse der Streulicht-Messung auf LCP-Proben. Dargestellt sind beispielhafte Messungen mit trockenem Granulat bei unterschiedlichem Spritzdruck.

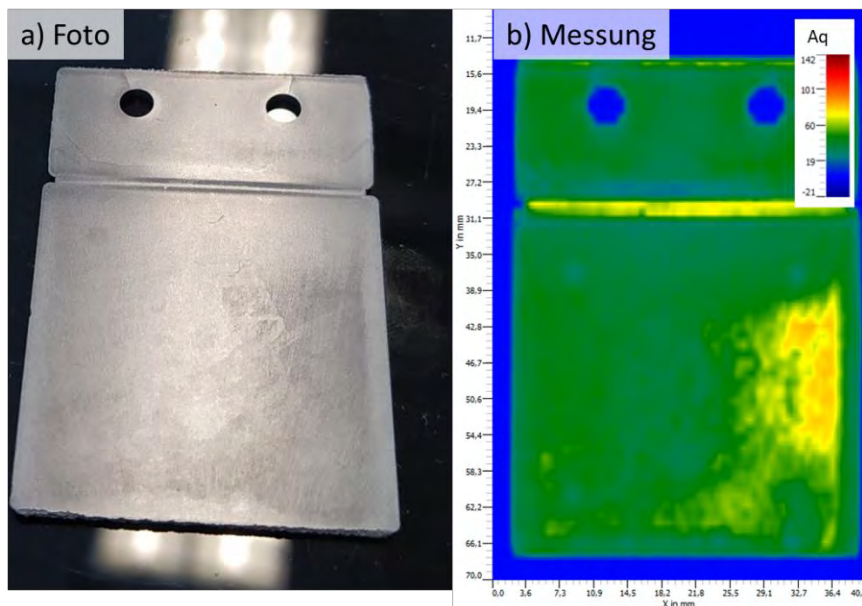


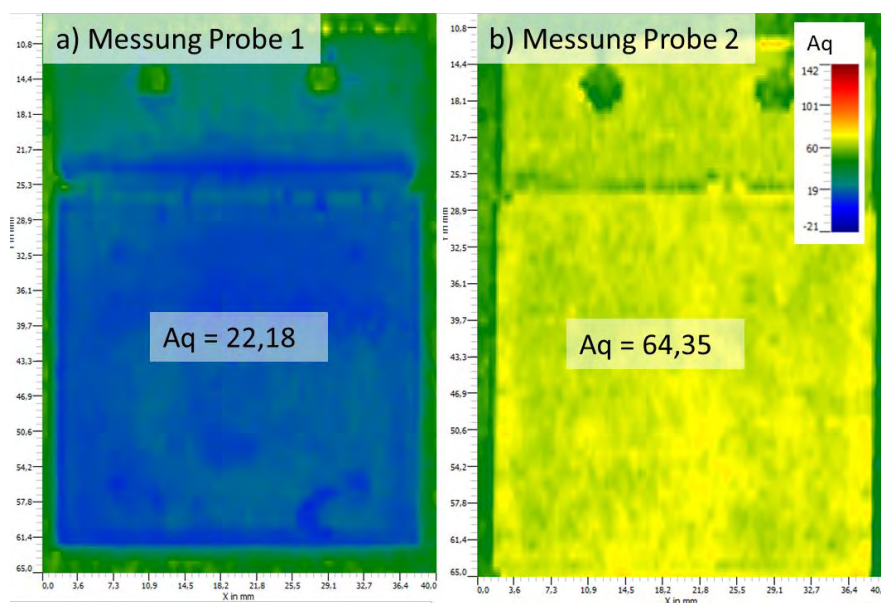
Abbildung 26: Gegenüberstellung eines Probenfotos mit der Streulichtmessung für eine LCP-Probe bei niedrigem Spritzdruck. Bereiche mit unterschiedlichem A_q (im Foto rechts) zeigen auch visuell einen Kontrast, wie im linken Foto zu erkennen ist.

Tabelle 4: Übersicht der gemessenen A_q -Werte für trocken spritzgegossenes LCP Granulat (Positionen laut Abbildung 25)

Spritzdruck	Hoher A_q -Wert (Region)	Niedriger A_q -Wert (Region)
Niedrig	73-80 (rechter Bereich)	40 (links und Mitte)
Mittel	65-70 (rechter Bereich)	45-48 (grüner Streifen in Mitte)
Hoch	35 (rechter Bereich)	30 (restliche Probe)

Bei genauer Betrachtung der Proben bei flachem Lichteinfall sind diese Bereiche auch visuell auf den spritzgegossenen Proben sichtbar. Dies ist beispielhaft in Abbildung 26 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** für eine Probe bei niedrigem Spritzdruck dargestellt. Man erkennt den Bereich mit erhöhtem A_q -Wert rechts auf der Probe auch auf bei deren Inspektion anhand des Helligkeitskontrasts. Diese Inhomogenitäten lassen sich also mit dem Streulichtsensor gut automatisiert erfassen und der visuelle Eindruck, den das Probenfoto widerspiegelt, wird durch die rasche Messung mit dem Streulichtsensor objektiviert und quantifiziert.

Zudem wurden zwei Proben mit feucht spritzgegossenem Granulat mit dem Streulichtsensor vermessen, die unterschiedliche Rauheiten S_a in den LSCM-Messungen aufwiesen. Die Ergebnisse für beide Proben sind in Abbildung 27 dargestellt. Hier ist kein Bereich mit erhöhter Rauheit auf den Proben zu erkennen, auch nicht auf der rechten Probenseite.

**Abbildung 27:** Ergebnisse der Streulichtmessung zweier feucht spritzgegossenen Proben. Die mittleren A_q -Werte auf den Proben sind stark unterschiedlich zwischen beiden Proben, ebenso wie die gemessenen Rauheiten via LSCM.

Ebenso wie bei den LSCM-Messungen wird ein starker Unterschied zwischen den Proben deutlich. Der gemittelte A_q -Wert über beide Proben aus dem jeweiligen Spritzgussprozess beträgt hierbei $A_q = 22,2$ respektive $A_q = 64,4$. Der Vergleich mit den LSCM-Messungen zeigt daher auf, dass sich die Ergebnisse des Inline-fähigen Streulichtsenors mit dem LSCM korrelieren lassen.

Analog zum LCP wurden alle vorhandenen Proben, die aus XANTAR Granulat hergestellt worden waren, vermessen. Hierbei fiel ein deutlich geringerer A_q -Wert auf, der mit dem glänzenden Eindruck der Proben übereinstimmt. Dabei stimmten die Ergebnisse für alle Proben überein, für die mit trockenem Granulat spritzgegossenen also unabhängig vom Spritzdruck. Einzig die Proben aus feuchtem Granulat zeigten einen erhöhten A_q -Wert und Inhomogenitäten, die als Schlieren auch optisch auf der Probe erkennbar waren. Eine Gegenüberstellung von A_q -Maps für Proben aus trockenem und feuchtem Granulat ist in Abbildung 28 zu sehen.

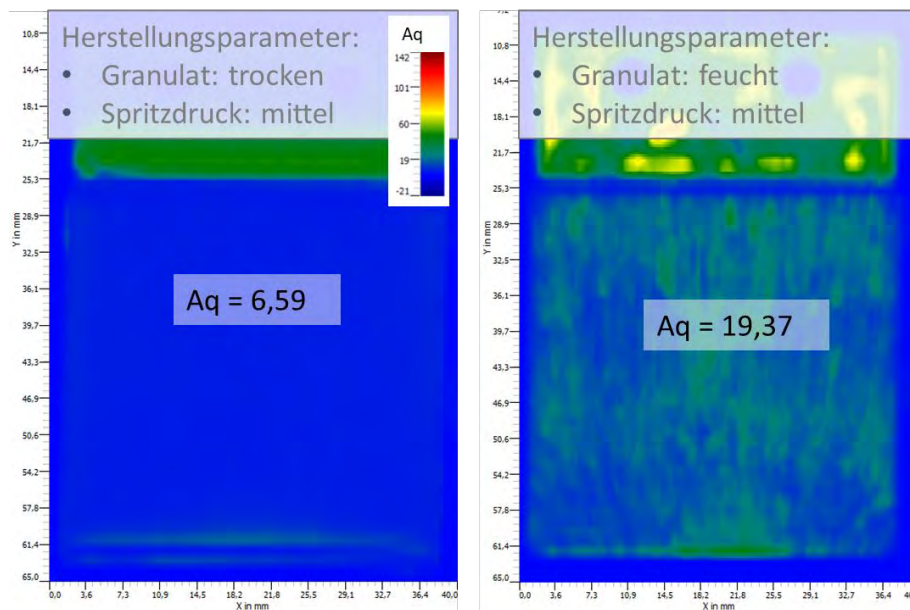


Abbildung 28: Ergebnisse der Vermessung von XANTAR-Proben mittels Streulichtsensor-Technik anhand von A_q -Maps. Gegenübergestellt sind Ergebnisse für trockenes und feuchtes Granulat.

7. Laserstrukturierung und Reinigung

7.1. Prozess- und Analyseergebnisse

Die spritzgegossenen Bauteile wurden mittels Laser strukturiert. Dabei wurde ein bei Hahn-Schickard standardisiertes Layout auf die neuen Bauteile angepasst (Abbildung 29). Dieses Layout beinhaltet eine Mäander-Kamm Struktur zur Ermittlung des elektrischen Widerstandes und etwaiger Kurzschlüsse, Leiterbahnen parallel und senkrecht zur Spritzrichtung für genormte taktile Rauheitsmessungen sowie Kreisflächen bzw. Stirnabzugskreise für Haftfestigkeitsmessungen mittels HPPT (Hot-Pin-Pull-Test).

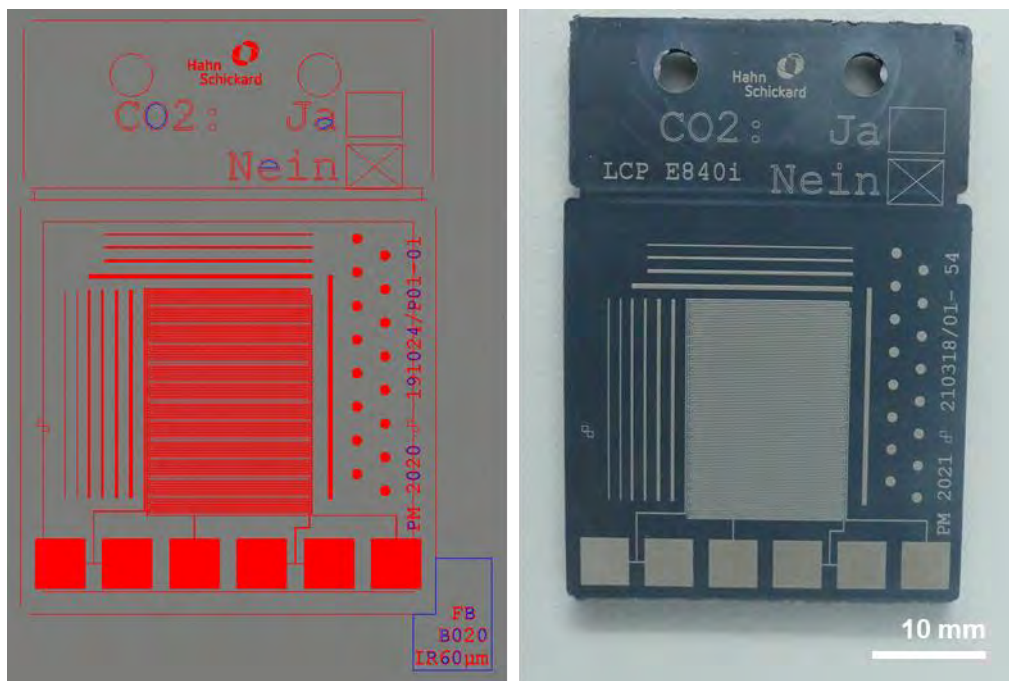


Abbildung 29: Angepasstes Testlayout und Lichtbildaufnahme einer damit gelaserten Probe.

Entsprechend des Versuchsplans (Tabelle 1) wurden auf allen Spritzguss-Varianten jeweils zwei verschiedene Laser-Varianten prozessiert. Dabei war jeder Laser-Variante noch ein individueller Reinigungsschritt nachgeschaltet. Letzteres ist besonders wichtig, um Laserdebris zu entfernen, der sonst zu Fremdmetalisierungen führen kann.

Laservariante 1 (standard) hatte das Ziel eine möglichst aufgeraute Oberflächenstruktur zu erzeugen, welche vorteilhaft für die mechanische Verankerung der Metallschichten, und damit für die Haftfestigkeit, ist. Generell ist dies durch höhere Laserleistungen und größere Pulsabstände zu erreichen. Diese Laservariante wurde mit der für die MID-Technologie typischen nasschemischen Reinigung kombiniert, die den Laserdebris in einer wässrigen Reinigungslösung in einem Ultraschallbad entfernt.

Laservariante 2 (fein) hatte das Ziel, möglichst glatte Strukturen zu generieren, was für die AVT, z.B. beim Drahtbonden, essentiell ist. Um dies zu erreichen, wurde neben „milder“ wirkenden Laserparametersätzen auch die CO₂-Schneestrahl-Reinigung angewendet.

Betrachtet man die verschiedenen Varianten unter dem Lichtmikroskop (Abbildung 30), so fällt direkt auf, dass sich LCP und XANTAR gänzlich in ihrer gelaserten Struktur unterscheiden. Während Laservariante 1 bei LCP zu einem ausgeprägten, fast schwammartigen „Gewöll“ führte, war die gelaserte Oberfläche beim XANTAR vergleichsweise kompakt. Bei der Laservariante 2 mit der CO₂-Schneestrahl-Reinigung war jedoch ein gegenläufiger Trend zu erkennen. Während das Gewöll beim LCP durch den CO₂-Schneestrahl deutlich eingeebnet und verdichtet wurde, wurden beim XANTAR kraterartige Strukturen ausgebildet. Die optischen Eindrücke wurden durch Höhen- und Rauheitsmessungen mittels LSCM verifiziert (Abbildung 31). Es zeigte sich, dass Laservariante 2 bei LCP im Durchschnitt zu einer Verringerung der Höhe und Rauheit gelaserner Bereiche von ca. 75 % führte, im Vergleich zu den Ergebnissen von Laservariante 1. Bei XANTAR hingegen verdoppelte bis verdreifachte sich die Rauheit bei ähnlicher Höhe durch Laservariante 2. Dies ist auf die Ausbildung der kraterartigen Oberfläche zurückzuführen.

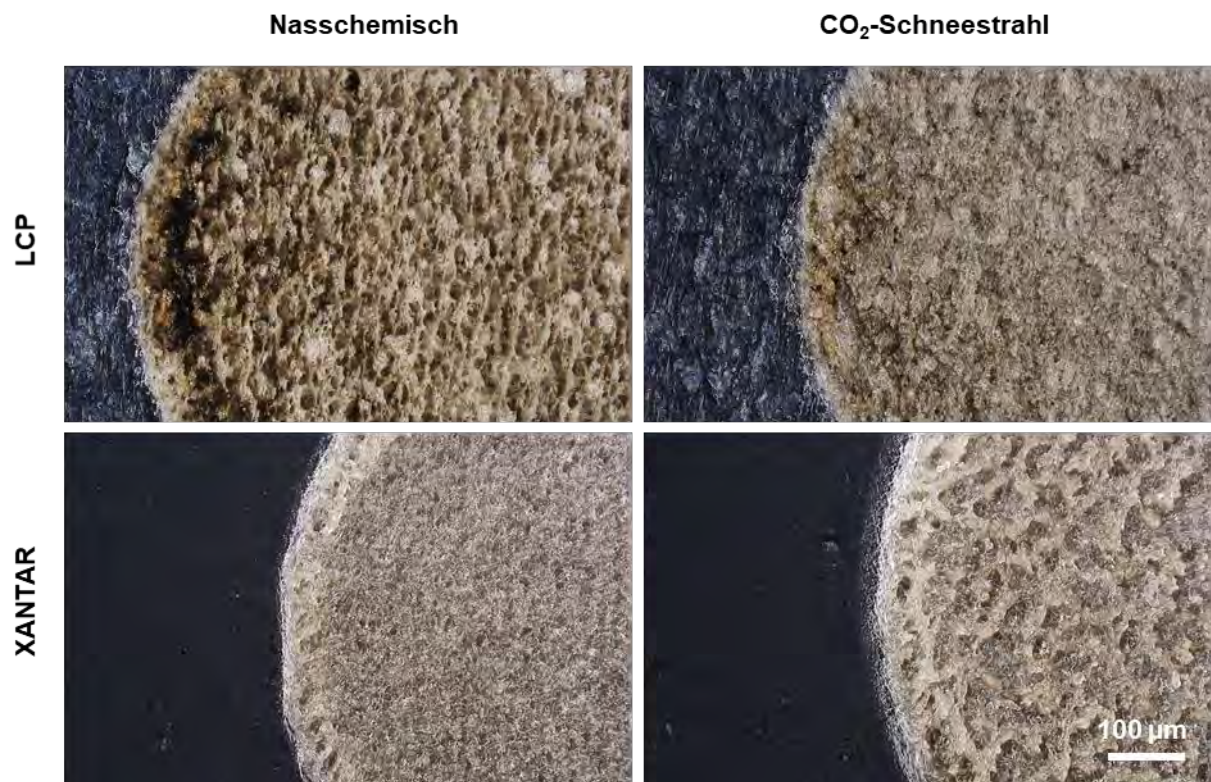


Abbildung 30: Lichtmikroskopische Aufnahmen von gelaserten Kreisflächen auf LCP und XANTAR (trockenes Granulat und mittlerer Spritzdruck) nach unterschiedlichen Reinigungsmethoden.

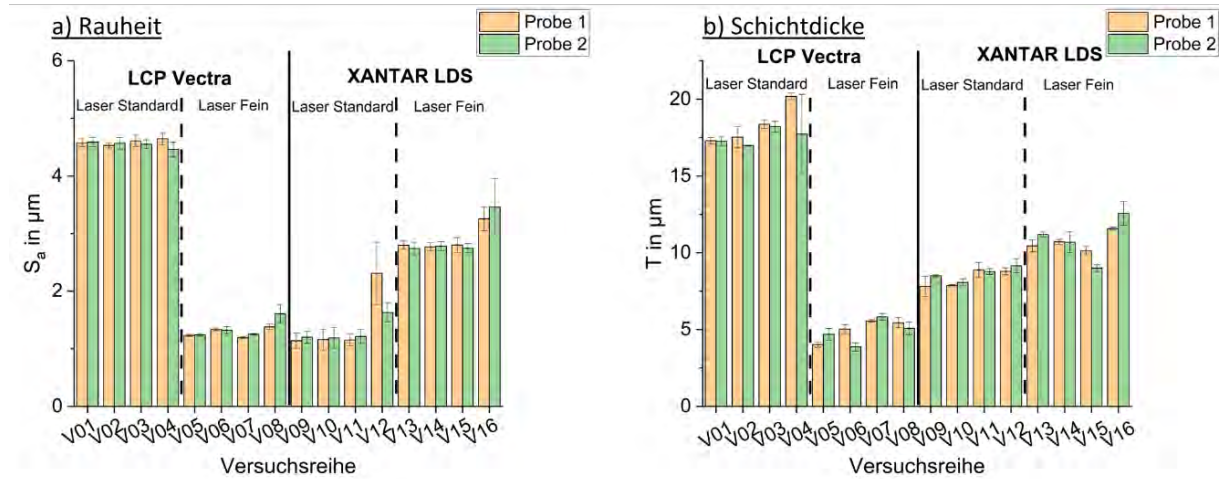


Abbildung 31: LSCM Höhen- und Rauheitsmessungen an gelaserten Strukturen aller Varianten.

Betrachtet man zudem den Einfluss vom Substratmaterial, so wird deutlich, dass die Variation des Spritzdruckes (V1-3, V5-7, V9-11, V13-15) keinen merklichen Einfluss hat, während sich die stark inhomogenen Oberflächen der mit nassem Granulat hergestellten Proben (V4, V8, V12, V16) auch in Schwankungen der Rauheitsmessungen äußert.

Daneben wurde mittels LSCM festgestellt, dass sich die Rauheiten der verschiedenen Teststrukturen auf derselben Platte unterscheiden, obwohl die Laserparametersätze dieselben waren. So wiesen z.B. die Kreisflächen auf LCP bei Laservariante 1 stets eine etwas höhere Rauheit auf als die quadratischen Pads. Dieser Sachverhalt lässt sich mit der Größe der Teststruktur erklären. Generell wurde bei allen Strukturen erst eine Kontur gelasert und diese dann mit parallelen Linien, welche sich überlappen gefüllt. Sind die zu füllenden Strukturen groß, benötigt der Laser eine gewisse Zeit für eine Linie, sodass der lokale Bereich z.B. am Anfang der Linie wieder abkühlen kann, bevor der Laser mit einer neuen Linie leicht versetzt daneben beginnt. Je kleiner die Struktur ist, desto kürzer sind die Verfahrswege des Lasers und desto weniger Zeit hat das Material abzukühlen, sodass die lokale Temperaturerhöhung bei kleinen Strukturen höher ist und das Material dadurch stärker beansprucht wird.



Abbildung 32: Lichtmikroskopische Aufnahmen von LCP nach dem Lasern und nach der nasschemischen Reinigung derselben Probe.

Weitere lichtmikroskopische Untersuchungen zeigten, dass ebendiese kleinen, kreisförmigen Strukturen teils sehr anfällig für Defekte waren. Dies wurde vor allem an den Kreisflächen bei

LCP, seltener bei XANTAR, nach der nasschemischen Reinigung deutlich, wie in Abbildung 32 gezeigt, sowie bei einigen quadratischen Pads, worauf später genauer eingegangen wird. Bei den Kreisflächen waren meist ganze Bereiche aus der Mitte ausgerissen. Um dieses Phänomen genauer zu untersuchen, wurde ein neues Layout erstellt, das aus 161 Kreisflächen bestand, welche jeweils in Reihen angeordnet waren (Abbildung 33). Es wurden u.a. je zehn LCP- und XANTAR-Platten aus trockenem und feuchten Granulat strukturiert, sowie unterschiedliche Füllstrategien angewendet. Bei der Strategie „Punkte einzeln gefüllt“ wurde wie im ursprünglichen Layout jede Kreisfläche vollständig strukturiert und dann erst wurde zur nächsten Kreisfläche gesprungen. Um die lokalen Temperaturerhöhung in den Punkten zu verringern, wurden bei der zweiten Füllstrategie „Punkte zusammen gefüllt“ immer alle Kreisflächen in einer Reihe Linie für Linie gefüllt und der Laserstrahl für die Strecke zwischen den Kreisflächen ausgeschaltet.

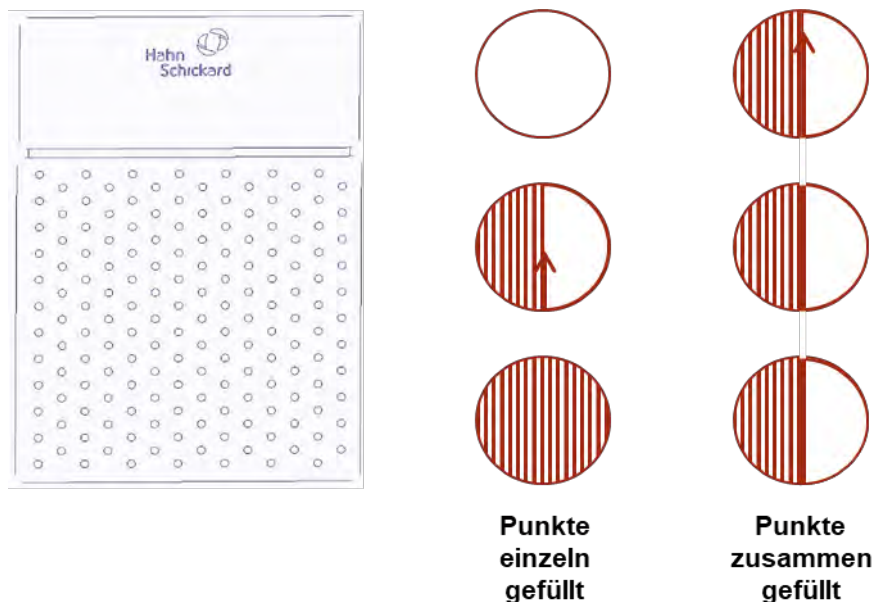


Abbildung 33: Laserlayout mit 161 Kreisflächen pro Platte. Dabei wurden die Punkte auf den Platten entweder einzeln oder zusammen gefüllt.

Alle Platten wurden nach dem Lasern nasschemisch gereinigt und im Anschluss auf Fehlstellen untersucht, was in Abbildung 34 zusammengefasst ist. Dabei zeigte sich, dass sowohl bei LCP als auch bei XANTAR feuchtes Granulat zu deutlich mehr Fehlern führt. Bei feuchtem XANTAR waren ca. 6 % der Kreisflächen fehlerhaft, bei LCP waren es sogar knapp 24 %. Durch Verwendung von trockenem Granulat und der neuen Füllstrategie „Punkte zusammen gefüllt“ konnte bei beiden Materialien die Fehlerquote auf 0 % bzw. 0,5 % deutlich reduziert werden. Für eine vollständige Eliminierung von Fehlern war allerdings noch eine weitere Optimierung notwendig.

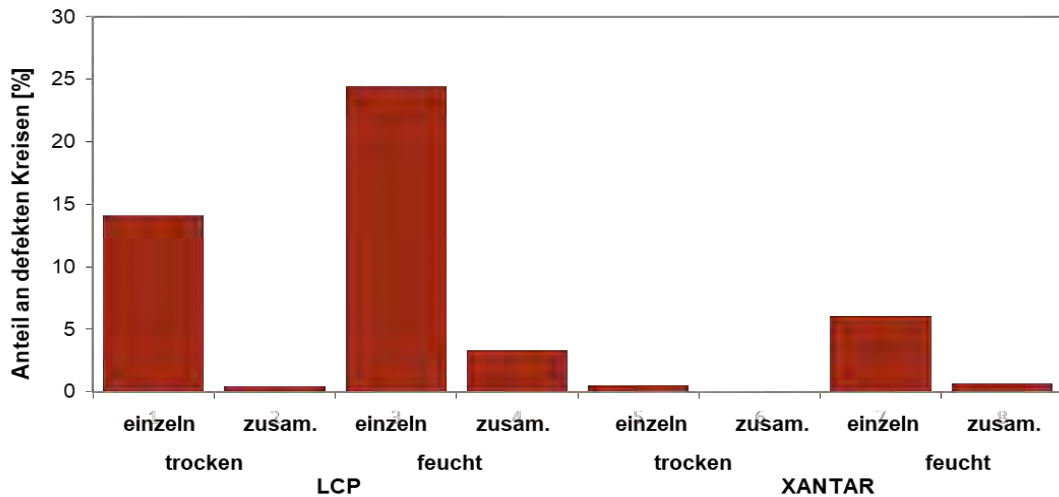


Abbildung 34: Prozentualer Anteil an Defekten bei 1610 Kreisflächen pro untersuchter Variante.

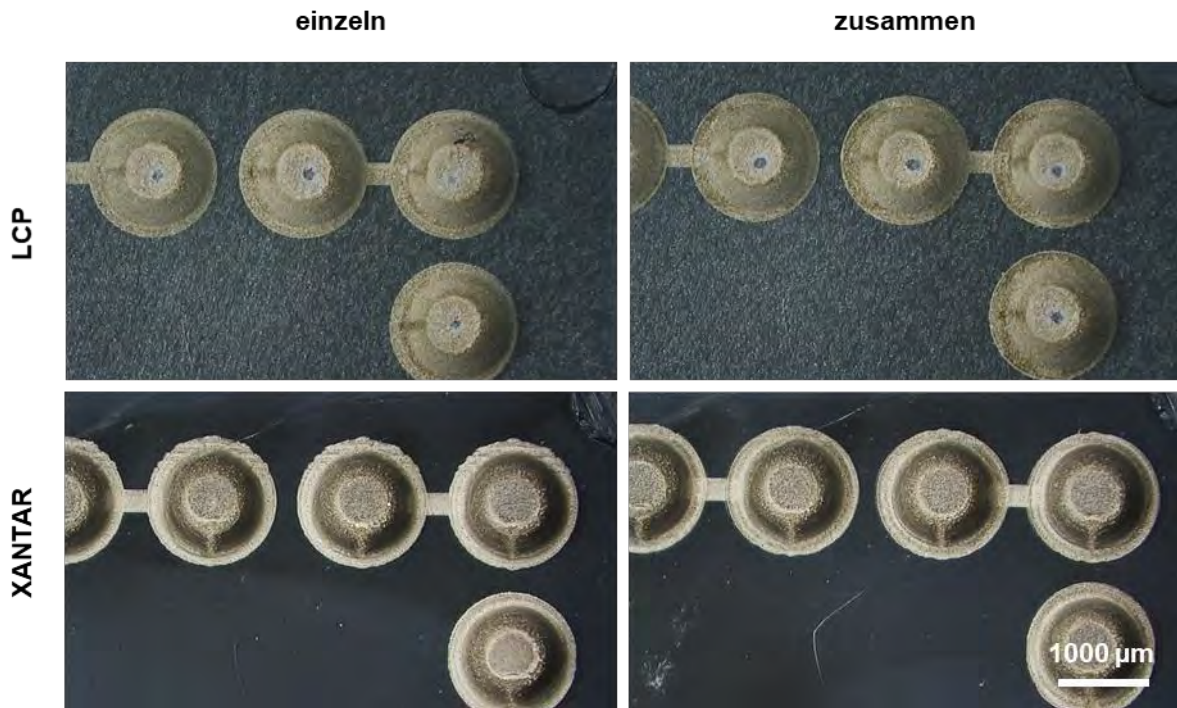


Abbildung 35: Lichtmikroskopische Aufnahmen von gelaserten 3D-Bauteilen aus trockenem LCP und XANTAR mit unterschiedlichen Füllstrategien analog der 2D-Platten.

Diese Notwendigkeit zeigte sich vor allem an den 3D-Bauteilen, welche analog zu den Platten prozessiert wurden. Dabei wurden die Kegelstümpfe bzw. Bumps jeweils auch einzeln oder zusammen gelasert (Abbildung 35). Während hier XANTAR ähnlich der Platten kaum Fehler aufwies, waren bei LCP sowohl die einzeln gefüllten als auch die zusammen gefüllten Bumps fehlerbehaftet. Zur Vermeidung solcher Fehler und zu deren vollständiger Eliminierung wurde im nächsten Schritt die nasschemische Reinigung genauer untersucht.

Die nasschemische Reinigung der Proben wird in einem Ultraschall-Bad durchgeführt, das üblicherweise mit einer Ultraschall-Leistung (US) von 100 % betrieben wird. Zusätzliche

Versuche an den Platten mit den Kreisflächen (Abbildung 33) zeigten, dass, unabhängig von Granulatfeuchte und Laser-Füllstrategie, durch gänzlich Auslassen der Ultraschall-Funktion die Fehleranfälligkeit zwischen 0,0 % und 0,1 % lag, und auch die 3D-Bauteile zeigten signifikant weniger bis keine Fehlstellen. Daraus lässt sich schließen, dass durch die Ultraschallwirkung die Probenoberflächen, vor allem die aus LCP, mechanisch teils stark belastet werden.

Diese mechanische Belastung zeigte sich auch in Fehlstellen in den quadratischen Pads. Jedoch schien das Auftreten der Fehler keinem erkennbaren Muster zu folgen. Um diesen Sachverhalt genauer zu untersuchen, wurde ein weiteres Layout erstellt, welches in Abbildung 36 abgebildet ist. Hierbei wurden Pads unterschiedlicher Größe und Laser-Strukturierungsrichtung gewählt sowie Kreisflächen und Leiterbahnen integriert.

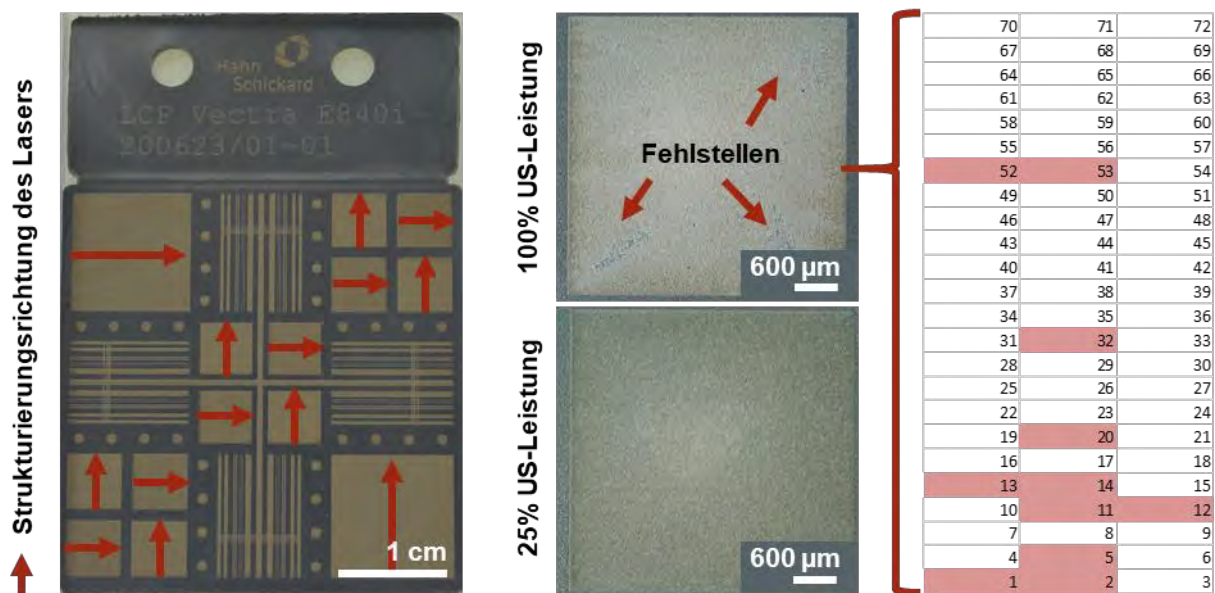


Abbildung 36: Layout zur Untersuchung des Ultraschall-Einflusses während der nasschemischen Reinigung. Beispiel eines Pads auf LCP mit Fehlern nach 100 % Ultraschall-Leistung und Verteilung der defektbehafteten Proben im Bad, sowie Beispiel eines Pads auf LCP mit Fehlern nach 25 % Ultraschall-Leistung.

Sowohl von LCP als auch von XANTAR (trockenes Granulat/mittlerer Spritzdruck) wurden 72 Platten mit diesem Layout gelasert und entsprechend nummeriert. Die Anzahl der Platten wurde auf die Größe des Ultraschall-Bades abgestimmt, in welches ein Gestell mit den Proben eingebracht wurde. Auf dieses Gestell passten 3 x 24 Platten. Die Platten wurden entsprechend ihrer Nummerierung auf die jeweilige Position gehängt. Dabei wurden LCP und XANTAR immer Rücken an Rücken gehängt. In einer ersten Iteration wurden Proben mit 100 % Ultraschall-Leistung behandelt und die Proben anschließend lichtmikroskopisch untersucht.

Generell zeigte sich auch hier, dass gelasertes und metallisiertes LCP deutlich fehleranfälliger war als XANTAR. Deutlich wurde auch, dass, wenn Fehlstellen auftraten, diese meist im unteren Bereich der Platte zu finden waren und die Pads wiesen dann meist kreuzförmige Fehlstellen auf (Abbildung 36). Ordnete man die LCP Platten mit den meisten Fehlstellen an die entsprechenden Positionen im Ultraschall-Bad, wurde deutlich, dass zum einen viele Platten aus dem vorderen Bereich sowie in regelmäßigen Abständen nach hinten im Bad hängende Platten betroffen waren. Diese Positionen können sich mit den im Bad verbauten Ultraschall-Schwingern korrelieren lassen, welche offensichtlich zu lokal stärkerer Belastung der Proben führen. Ein gänzlich Auslassen des Ultraschalls, wie es testweise für die Platten mit den Kreisflächen gemacht wurde, würde diese Fehlstellen zwar vermeiden, aber den Laserdebris nicht ausreichend entfernen. Um prozesssicher Bauteile ohne Fehlstellen oder Fremdmetallisierung herstellen zu können, musste daher ein Kompromiss gefunden werden. Daher wurde der Versuch nochmal mit einer Ultraschall-Leistung von 25 % wiederholt. Hierbei zeigten sich weder an den kritischen Positionen im Bad noch an den restlichen Positionen im Bad Fehlstellen auf den Proben, trotzdem war die Reinigung ausreichend, um Laserdebris zu entfernen. Es konnte somit ein Kompromiss gefunden werden.

7.2. Inline-fähige Messungen

Auf den laserstrukturierten Bauteilen wurden Messungen mittels LIBS und AWT durchgeführt, die im Folgenden nacheinander vorgestellt werden.

Laserinduzierte Plasmaspektroskopie (LIBS)

Die LIBS-Messungen wurden mit einer Laseranregungswellenlänge von 266 nm durchgeführt. Die verwendete Pulsenergie wurde nach Voruntersuchungen an den Proben für alle Untersuchungen auf 80 mJ festgelegt. Jede Probe wurde auf zwei Positionen vermessen. Zum einen wurde ein laserstrukturiertes Pad mit 64 Messpunkten und zum anderen die Spritzgussoberfläche mit 60 Messpunkten vermessen. Der verwendete Aufbau zusammen mit den vermessenen Proben ist in Abbildung 37 zu sehen. Anschließend wurde aus den Ergebnissen dieser Messungen jeweils der Mittelwert sowie das 95 %-Konfidenzintervall bestimmt.

Das aufgenommene Spektrum einer LIBS-Untersuchung ist für eine Messung auf einem laserstrukturierten Pad beispielhaft in Abbildung 38 zu sehen. Hier ist das Mittelwertspektrum aus allen 64 Messpositionen dargestellt. Es wurde der Anteil an Kupfer und Chrom auf der Oberfläche erfasst. Hierfür wurden die charakteristischen Peaks der jeweiligen Elemente ausgewählt und die Peakfläche als Maß der Intensität und damit der Emitter-Konzentration ermittelt.

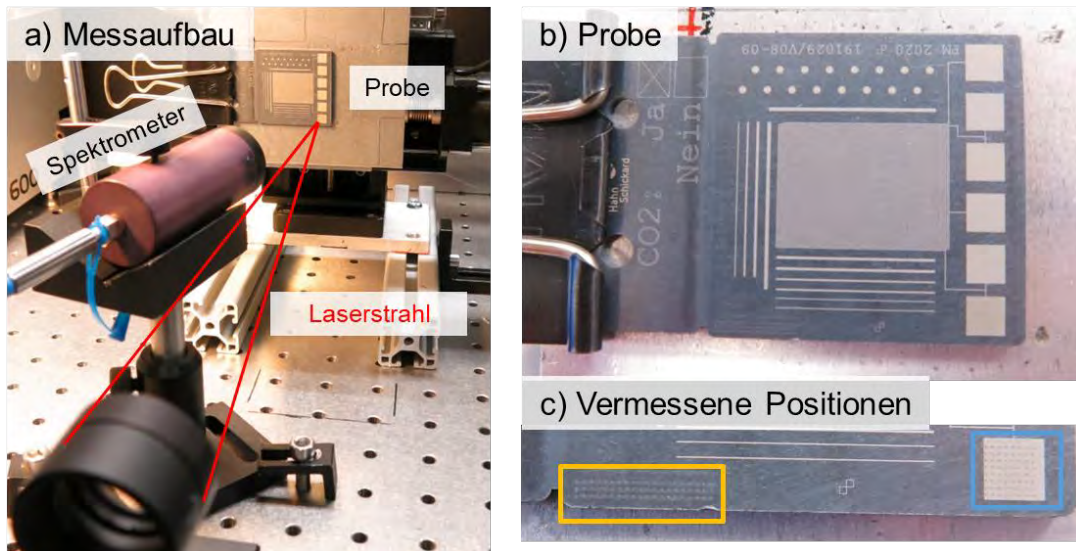


Abbildung 37: Zu sehen sind a) der Messaufbau des LIBS, b) die an der Halterung befestigte Probe und c) die punktuell vermessenen Positionen auf der Probe.

Es lassen sich dabei mittels LIBS nicht absolute Konzentrationen von Elementen bestimmen, sondern lediglich verschiedene Oberflächenzustände vergleichen. Hierbei wird die Peakfläche des jeweiligen zu untersuchenden chemischen Elements mit der Peakfläche eines Elements des Substratmaterials ins Verhältnis gesetzt (in diesem Fall für das Polymer charakteristisch Kohlenstoff), um das Peakflächenverhältnis zu bestimmen. Die drei untersuchten Peaks von Kohlenstoff bei 247 nm, Kupfer bei 282 nm und Chrom bei 425 nm sind im Übersichtsspektrum von Abbildung 38 zusammen mit den einzelnen Peaks von Kohlenstoff und Chrom dargestellt.

In Abbildung 39 sind die Ergebnisse des Peakflächenverhältnisses von Kupfer und Kohlenstoff dargestellt, wobei nur Platten aus dem feucht spritzgegossenen Granulat für den Standard-Laserprozess und den feinen Laserprozess vermessen wurde. Man erkennt hier für beide Probensätze ein erhöhtes Kupfersignal auf dem laserstrukturierten Pad im Vergleich zur Spritzgussoberfläche. Das Peakflächenverhältnis für Kupfer zu Kohlenstoff ist zudem deutlich erhöht für den Standard-Laserprozess, wodurch sich auch die Effekte unterschiedlicher Laserprozesse unterscheiden lassen und die Durchführung eines der unterschiedlichen Prozesse Inline-fähig nachgewiesen werden kann.

Analog sind die Ergebnisse für das Peakflächenverhältnis von Chrom und Kohlenstoff in Abbildung 40 zu sehen. Hier lassen sich ebenfalls die beiden Laserprozesse unterscheiden, zumal für den Standard Laserprozess ein Unterschied zwischen Spritzguss- und laserstrukturierter Oberfläche erkennbar ist, für den feinen Laserprozess hingegen nicht. LIBS eignet sich also zur Unterscheidung von unterschiedlichen Oberflächenzuständen der im Projekt verwendeten laserstrukturierten Kunststoffe, wie für LCP gezeigt.

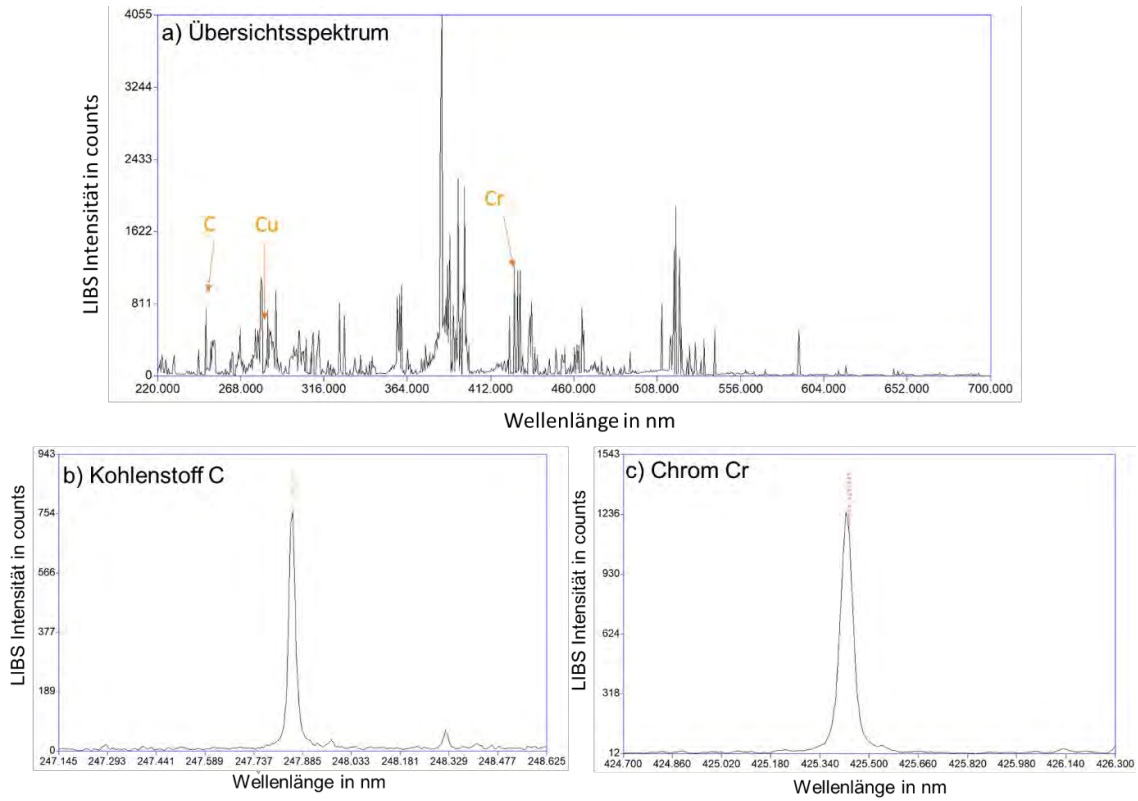


Abbildung 38: Aufgenommenes LIBS-Spektrum für eine Messung auf dem laserstrukturierten Bereich (Mittelwertspektrum von allen 64 Messpunkten). Zu sehen sind a) das Übersichtsspektrum sowie beispielhaft die ausgewerteten Peaks für b) Kohlenstoff und c) Chrom.

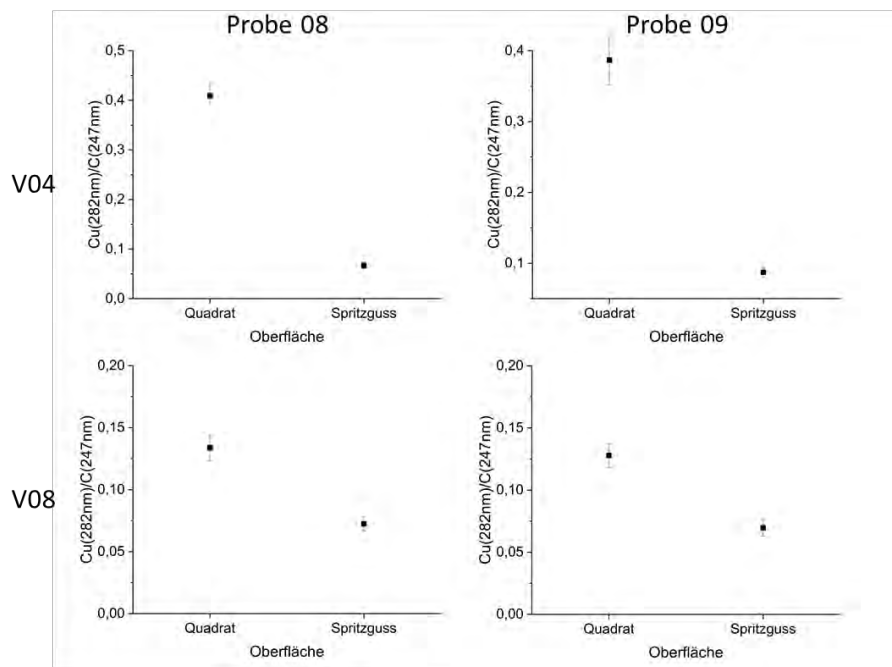


Abbildung 39: Darstellung des LIBS-Peakflächenverhältnisses von Kupfer und Kohlenstoff. Es ist für beide unterschiedlichen Laserprozesse ein Unterschied zwischen Spritzguss- und laserstrukturierter Oberfläche erkennbar. Der Unterschied ist größer für den Standard Laserprozess.

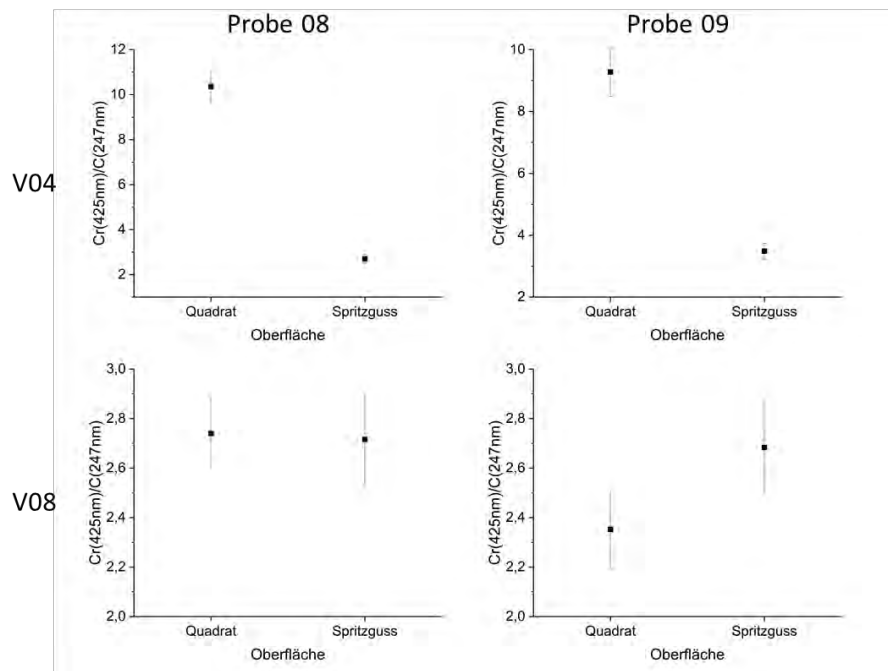


Abbildung 40: Darstellung des Peakflächenverhältnis von Chrom und Kohlenstoff.

Aerosol Benetzungsprüfung (AWT)

Die laserstrukturierten Proben wurden zudem mittels AWT untersucht. Hierbei wurden sowohl für LCP Vectra als auch für XANTAR drei Probensätze untersucht: Proben mit feuchtem Granulat und feinem Laserprozess, sowie Proben mit trockenem Granulat und jeweils feinem und Standard-Laserprozess. In Abbildung 41 ist beispielhaft eine AWT-Messung einer laserstrukturierten Probe nach dem Standardprozess für Platten aus dem Granulat LCP zu sehen, zusammen mit einer Lichtmikroskopie-Aufnahme derselben Probe. Man erkennt die Wassertropfenverteilung auf der Probe, die sich zwischen laserstrukturiertem Bereich und Spritzgussoberfläche unterscheidet. Im Falle einer sicheren Erkennung von Tropfenumrissen kann mittels Algorithmen aus diesen Daten die mittlere Tropfengröße und Anzahl der Tropfen für verschiedene Bereiche auf der Probe ermittelt werden. Diese Auswertung ist in diesem Fall jedoch nicht möglich, da die Kontraste zwischen den Bereichen sich stark unterscheiden und hierdurch unterschiedliche Parameter bei der Bildauswertung nötig wären, die eine quantitative Vergleichbarkeit der Werte nicht gewährleisten.

In Abbildung 42 ist für jeden Probensatz je ein Pad exemplarisch dargestellt. Auch hier sieht man starke Unterschiede im Helligkeitskontrast zwischen den Pads von verschiedenen Probensätzen, weswegen eine automatische Auswertung nicht erfolgen konnte. Mit AWT lassen sich demnach die Oberflächenzustände laserstrukturierter Kunststoffe nicht quantifizierbar unterscheiden.

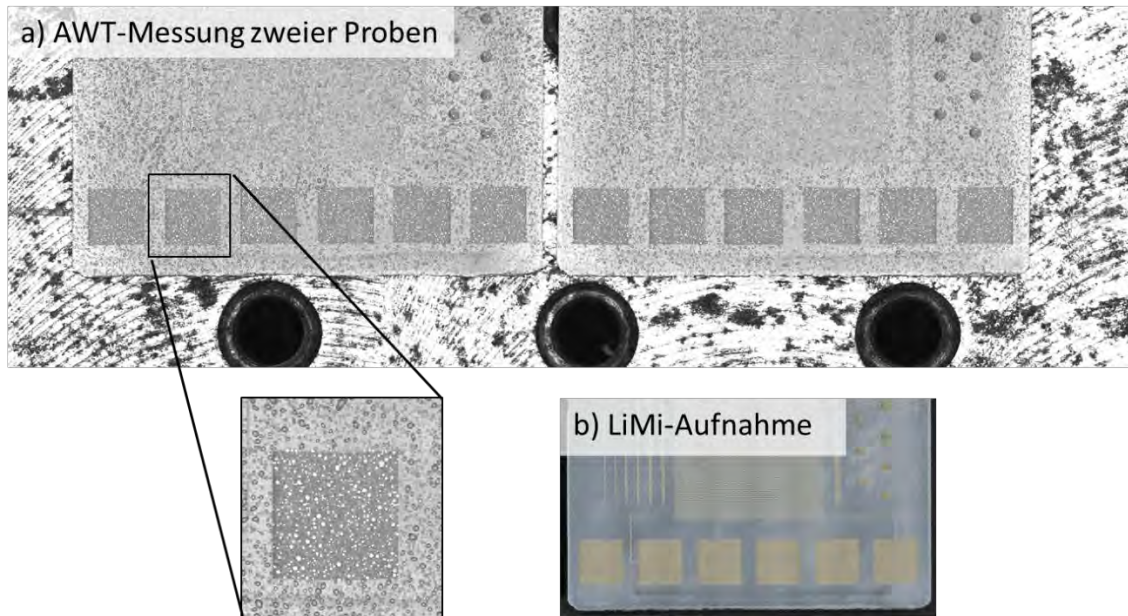


Abbildung 41: Beispiel einer AWT-Messung einer mit dem Standardprozess laserstrukturierten Probe (LCP). Zum Vergleich ist eine Lichtmikroskopie (LiMi)- Aufnahme dargestellt.

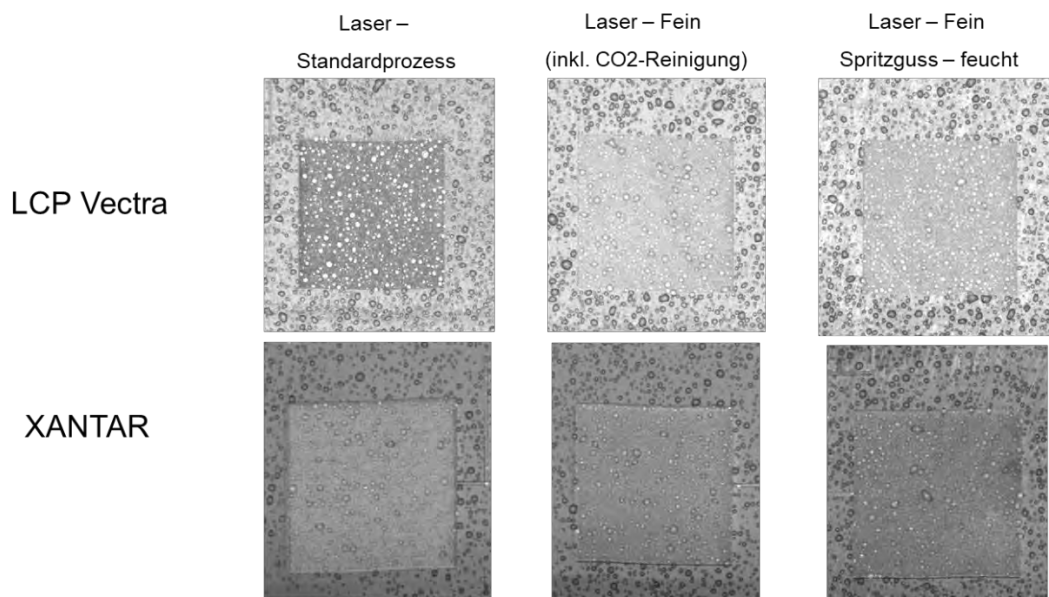


Abbildung 42: Ausschnitte von Pads während AWT Messungen von allen vermessenen Probensets.

8. Außenstromlose Metallisierung

8.1. Prozess- und Analyseergebnisse

Nach der Laserstrukturierung und Reinigung erfolgte die außenstromlose Metallisierung mit Kupfer, Nickel und Gold (Cu/Ni/Au), wobei das Finish Ni/Au auch unter dem Begriff ENIG (electroless nickel immersion gold) bekannt ist. Die Proben wurden sowohl nach Kupfer- als auch nach Goldmetallisierung genauer analysiert.

Cu-Metallisierung

Essentiell für die außenstromlose Metallisierung sind die LDS-Additive, wie z.B. CuCr_2O_4 , welche in den Substratmaterialien enthalten sind und nach der Laserstrukturierung als Keimbildungszentren für das abzuscheidende Kupfer fungieren. Diese wurden durch den Laserprozess freigelegt und aktiviert, wie REM- und XPS- Untersuchungen am Beispiel von LCP gezeigt haben (Abbildung 43 und Tabelle 5). In diesem Fall konnte eine Reduktion von Cu(II) (grün gezeichnete Cu2p-Signalanteile in Abbildung 43) zu Cu(0) oder Cu(I) (blau gezeichnete Cu2p-Signalanteile in Abbildung 43) detektiert werden, die bei Laservariante 1 (standard) stärker ausgeprägt war als bei der „milder“ wirkenden Laservariante 2 (fein), auf die eine CO_2 -Schneestrahl-Reinigung folgte. Zudem konnte in den gelaserten Bereichen Chrom nachgewiesen werden, wovon sich insgesamt Rückschlüsse auf eine erfolgreiche Laseraktivierung ziehen lassen.

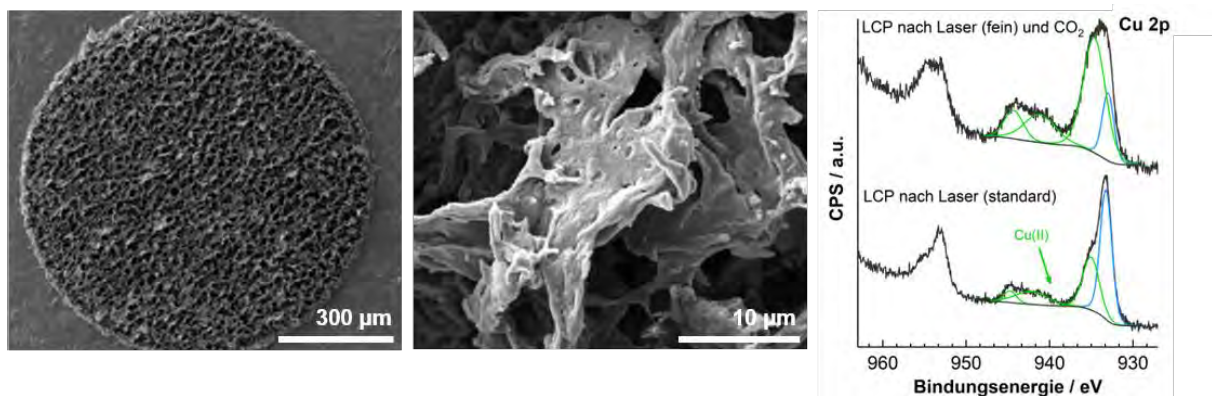


Abbildung 43: REM Aufnahmen einer gelaserten Kreisfläche auf LCP und XPS Befunde, welche die charakteristischen Kupfer-Signale ($\text{Cu}2p_{3/2}$ Peaks: ● Cu(II), ● Cu(0) oder Cu(I)) zeigen.

Die gelaserten Proben wurden schließlich in einem Cu-Elektrolyten metallisiert. Nach zwei Stunden Prozesszeit wurde ein Teil davon entnommen, getrocknet und charakterisiert. Die restlichen Proben wurden mit ENIG weiter prozessiert. Zunächst wurden die verkupferten Proben optisch begutachtet. Dabei fielen bei den nasschemisch gereinigten Proben, welche mit 100 % Ultraschall-Leistung prozessiert wurden, die oben beschriebenen Fehlerbilder auf

(Abbildung 44). Dagegen war die Cu-Metallisierung an den Proben, die mit 25 % Ultraschall-Leistung gereinigt wurden, deutlich homogener, auch in der Farbgebung.

Tabelle 5: Mit XPS bestimmte Elementkonzentrationen auf Oberflächen von LCP Proben [at.%].

	C	O	N	Si	Cu	Cr	Mg
nach Spritzguss	80.2	19.0	0.4	0.3	<0.1	-	-
nach Lasern (standard)	76.3	20.0	0.3	0.9	2.0	0.5	<0.1
im Defekt nach Cu-Metallisierung	78.9	19.4	-	-	1.7	-	-
nach Lasern (fein) und CO ₂	75.8	20.7	0.9	1.0	1.2	0.3	0.2

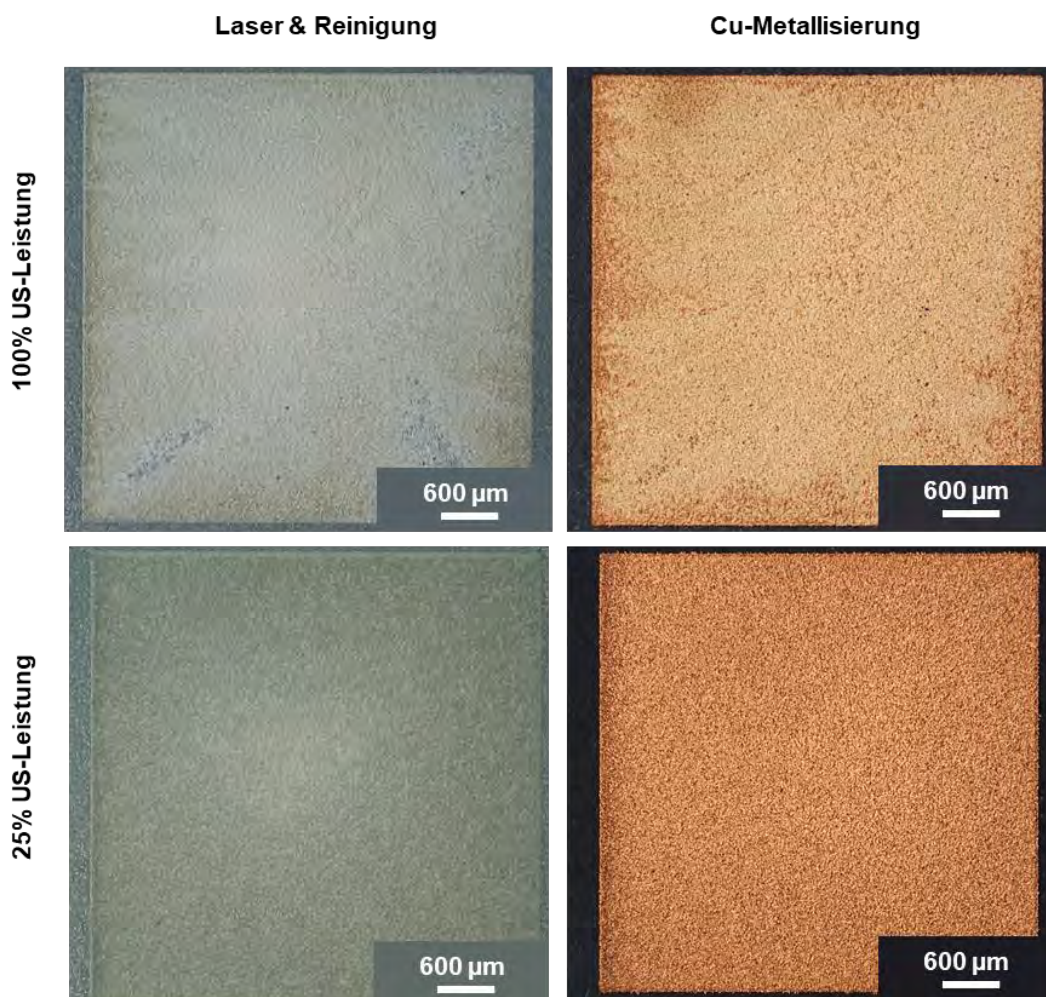


Abbildung 44: Lichtmikroskopische Aufnahmen einer gelaserten und nasschemisch Ultraschall (US)-unterstützt gereinigten LCP Probe vor (links) und nach (rechts) der Metallisierung mit Kupfer.



Abbildung 45: Übersicht von Fehlerbildern bei verkupferten quadratischen Pads auf LCP.

Bei den Proben, welche mit 100 % Ultraschall-Leistung behandelt wurden, zeichneten sich zwei unterschiedliche Arten von Fehlern ab. Zum einen gab es farbliche Unterschiede im Bereich der Metallisierung, zum anderen wies die ansonsten flächendeckende Metallisierung ganze Fehlstellen auf (Abbildung 45). Die farblichen Unterschiede konnten auf Unterschiede in der gemessenen Rauheit zurückgeführt werden. Diese war auf den dunkler erscheinenden Pads (Q1-Q3) $R_a = 5,0 \pm 0,1 \mu\text{m}$ und auf den heller erscheinenden Pads (Q4-Q6) $R_a = 3,5 \pm 0,1 \mu\text{m}$. Betrachtet man die gelaserten und nasschemischen gereinigten Proben vor der Metallisierung genauer (Abbildung 44), zeigen sich auch hier bereits gewisse Helligkeitsunterschiede, die darauf schließen lassen, dass eine hohe Ultraschall-Leistung oberflächlich etwas Gewöll entfernt bzw. die Oberfläche geglättet hat, was sich dann in der Cu-Metallisierung widerspiegelt. Zur genaueren Untersuchung von Stellen mit gänzlich fehlender Metallisierung wurden XPS Messungen und REM Untersuchungen an Probenquerschnitten durchgeführt. Mit der XPS Messung (Tabelle 5) konnte in der Fehlstelle kein Chrom nachgewiesen werden. Dies bedeutet, dass die freigelegten und aktivierten LDS-Additive mitsamt des Gewölls durch den Einfluss des Ultraschalls entfernt wurden und eine quasi nicht-laseraktivierte Stelle zurückließen, sodass hier auch keine Kupferschicht aufwachsen konnte. Dies wurde durch die REM Aufnahmen weiter bestätigt (Abbildung 46). Hier ließ sich in dem nicht-metallisierten Bereich kein Rückstand vom Gewöll finden. Vielmehr wurde deutlich, dass die schichtartige Mikrostruktur von LCP das Ablösen des Gewölls begünstigt, wodurch eine nahezu unbeanspruchte Lage LCP zum Vorschein kam, welche keinerlei Laseraktivierung erfahren hatte.

Neben den beiden identifizierten Fehlerbildern nach der Cu-Metallisierung hatten einige Proben dunkle Schlieren auf der Oberfläche, die weder Höhen- noch Rauheitsunterschiede aufwiesen. XPS und REM/EDX Messungen haben gezeigt, dass diese Schlieren eine erhöhte Na-Konzentration aufwiesen, was auf Eintrocknungsrückstände hindeutete. Dies ist v.a. in Bezug auf die AVT relevant und wird daher nochmal bei den ENIG-Finish aufgegriffen.

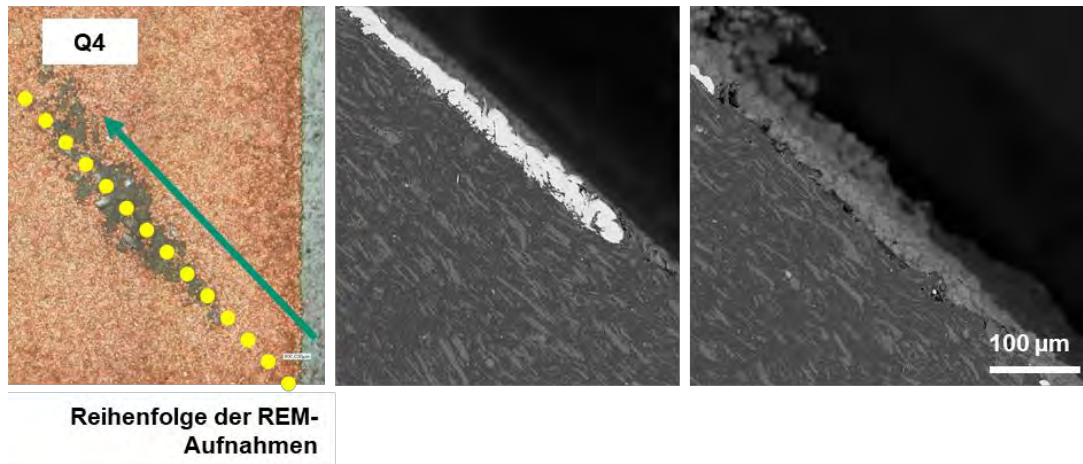


Abbildung 46: Lichtmikroskopische Aufnahme, die den Querschnitt andeutet, und REM Aufnahmen, die die Metallisierung hell kontrastieren, entlang der gepunkteten Linie.

Ungeachtet der teilweise auftretenden Fehlstellen auf LCP wurden an allen Proben aus Tabelle 1 die Kupferschichtdicke mittels LSCM bestimmt, indem die Höhe der gelaserten Strukturen (Abbildung 31) von der Gesamthöhe abgezogen wurde (ΔT), wie in Abbildung 47 dargestellt. Bei beiden Substratmaterialien ist die Cu-Schichtdicke auf den CO₂-Schneestrahlgereinigten Platten (LCP: V5-8, XANTAR: V13-16) tendenziell etwas höher ausfallen als nach Einsatz der Laservariante 1 (standard).

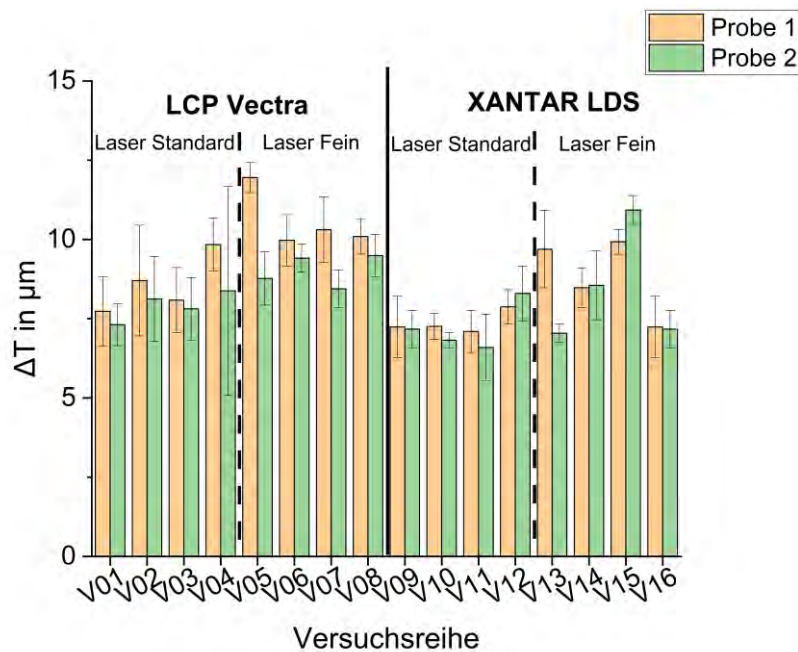


Abbildung 47: Cu-Schichtdicke aller Proben-Varianten, welche mittels LSCM bestimmt wurden.

Weiter ist auffällig, dass die Schichtdicke bei gleicher Prozessdauer im selben Cu-Bad bei LCP im Durchschnitt um 2 bis 3 µm höher ausfällt als bei XANTAR. Dies kann mehrere Gründe haben. Neben Rauheits- und Strukturunterschieden der gelaserten Oberflächenbereiche, die

die Zugänglichkeit für das Metallisierungsbad beeinflussen können, unterscheiden sich die Substratmaterialien zum einen höchstwahrscheinlich im Gehalt des LDS-Additivs, zum anderen beinhaltet LCP 40 % Mineral-Füllstoff, während XANTAR ungefüllt ist. Um den Einfluss von LDS-Additiv- und Talk-Gehalt auf die Cu-Metallisierung von XANTAR zu untersuchen, wurde an den XANTAR-Varianten aus Kapitel 5 das Anspringverhalten untersucht. Hierfür wurden je Variante sieben Platten mit dem Layout, welches die unterschiedlichen Pads, Kreisflächen und Leiterbahnen hatte, gelasert, nass-chemisch gereinigt und schließlich metallisiert. Dabei wurden die sieben Platten jeweils zu unterschiedlichen Zeiten aus dem Cu-Bad entnommen. Diese waren 5, 10, 15, 20, 30, 60 und 120 min. Alle Platten wurden dann mikroskopisch untersucht und die Cu-Schichtdicke wurde direkt im Anschluss mittels RFA ermittelt.

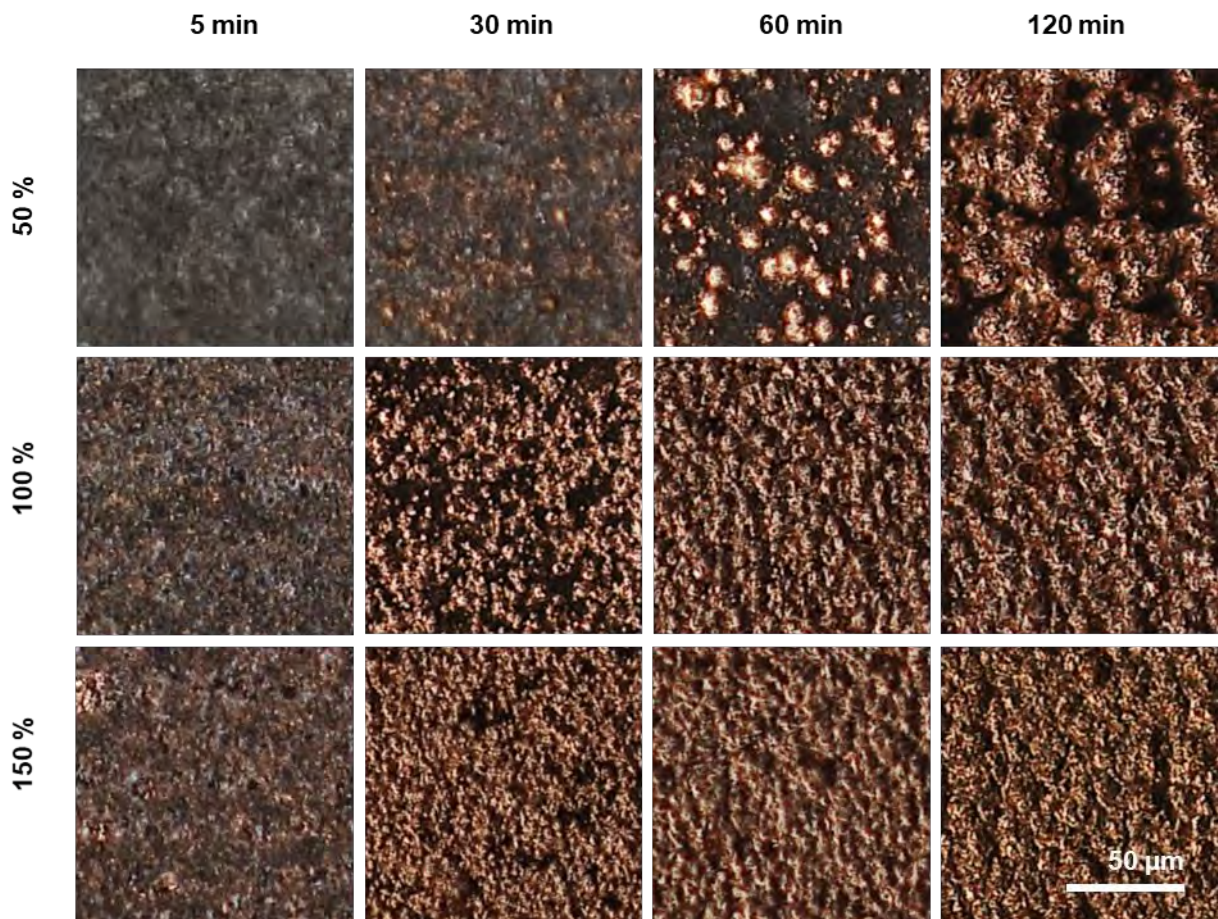


Abbildung 48: Lichtmikroskopische Aufnahmen des Cu-Anspringverhaltens in Abhängigkeit des LDS-Additiv-Gehalts in XANTAR.

Das Aufwachsen von Kupfer in Abhängigkeit des LDS-Additiv-Gehalts ist in Abbildung 48 dargestellt. Es zeigte sich, dass 50 % LDS-Additiv zu wenig ist, um eine homogene Cu-Schicht zu bilden. Im Gegensatz dazu zeigten Proben mit 100 % und 150 % Additiv ein ähnliches Anspringverhalten. Dieser optische Eindruck spiegelte sich auch in den Schichtdicken-

messungen wider, welche in Abbildung 49 aufgetragen sind. Zwar wuchs die Schichtdicke bei den Platten mit 150 % LDS-Additiv zu Beginn schneller an, nach 120 min wurde aber eine ähnliche Schichtdicke erreicht wie beim kommerziell erhältlichen XANTAR mit 100 % LDS-Additiv.

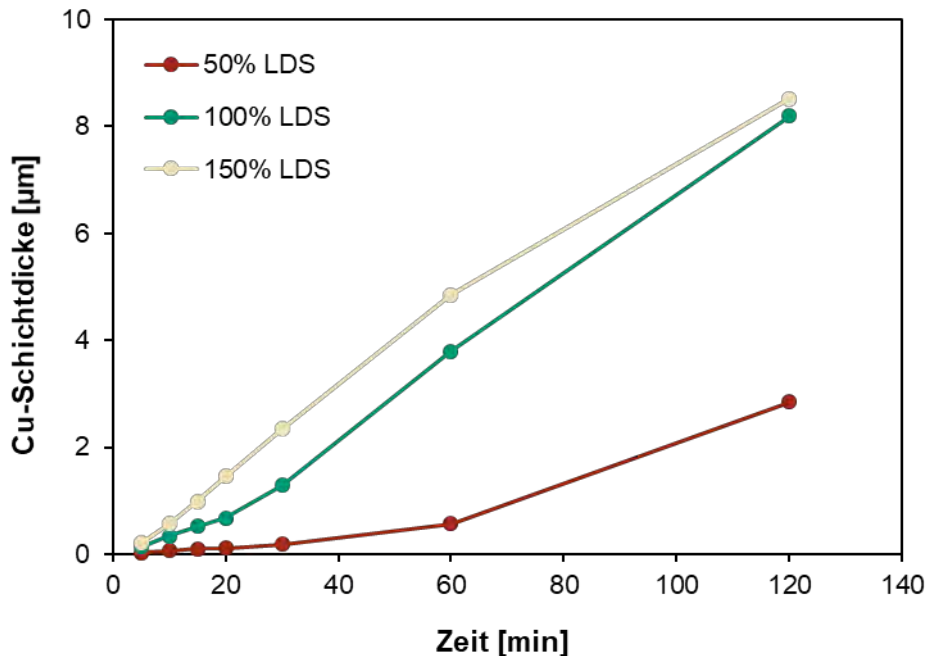


Abbildung 49: Cu-Schichtdicke in Abhängigkeit der Zeit und des LDS-Additiv-Gehalts im XANTAR.

Obwohl es für 100 % und 150 % LDS-Additiv-Gehalt kaum einen Cu-Schichtdicken-Unterschied gab, wirkte sich der erhöhte LDS-Additiv-Gehalt auf die Struktur aus. So ergaben sich z.B. leicht breitere Leiterstrukturen, eine höhere Kantenschärfe sowie eine leicht geringere Rauheit. Diese Unterschiede lassen sich darauf zurückführen, dass bei 150 % LDS-Additiv die Dichte an Keimbildungszentren erhöht ist, was ein gleichmäßigeres Schichtwachstum begünstigt.

Der Einfluss des Talk-Gehalts auf das Anspringverhalten von XANTAR wird in Abbildung 50 präsentiert. Betrachtet man z.B. die Platten nach 30 min im Cu-Bad, wird deutlich, dass Talk das Anspringverhalten von gelasertem XANTAR positiv beeinflusst. Dies wurde beim Betrachten der Schichtdicke noch deutlicher (Abbildung 51). Zunächst schien das Kupfer unabhängig vom Talk-Gehalt im XANTAR aufzuwachsen, erst nach 30 min im Cu-Bad zeigte sich, dass die Cu-Schichtdicke mit zunehmendem Talk-Gehalt steigt. Im Fall von 9 % Talk konnte nach 120 min eine Steigerung der Cu-Schichtdicke von ca. 45 % erreicht werden, im Vergleich zu kommerziellem XANTAR, welches ungefüllt ist.

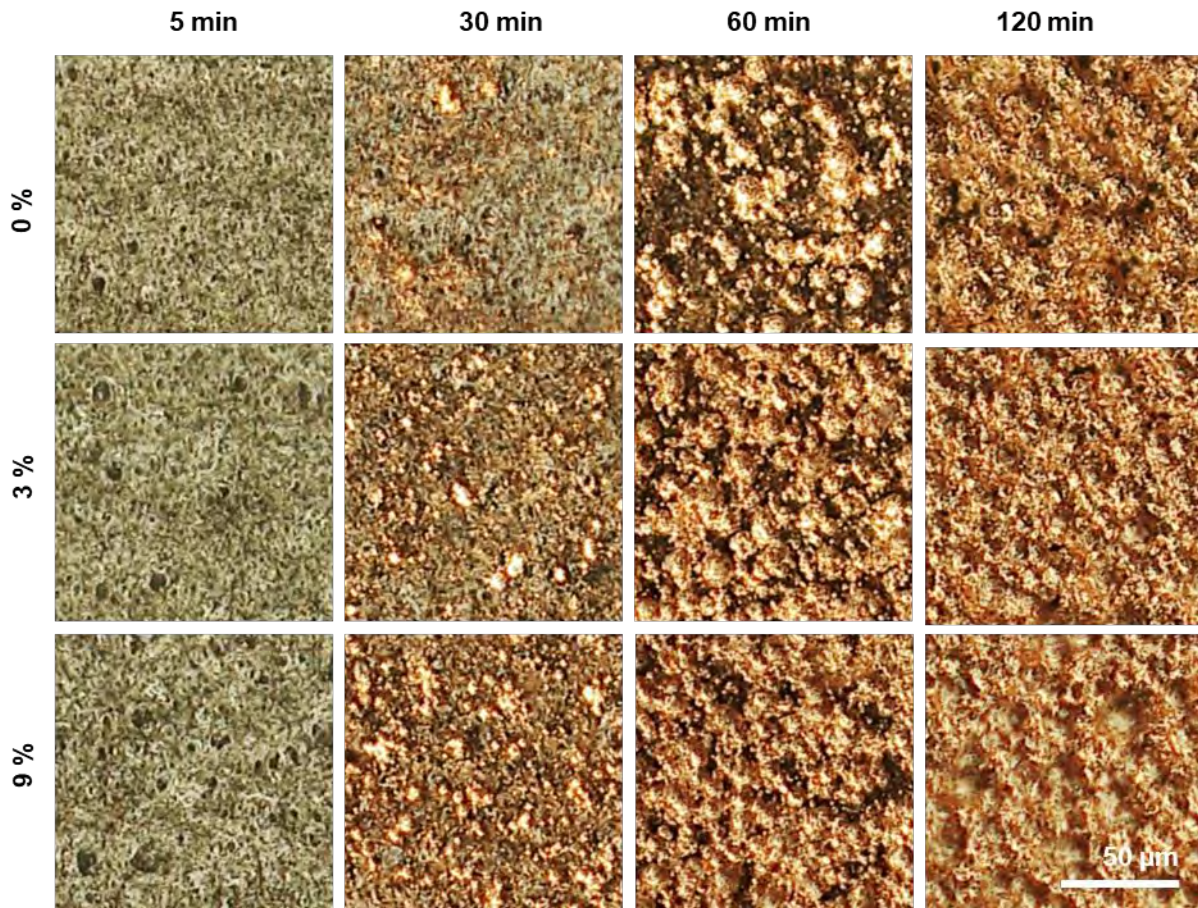


Abbildung 50: Lichtmikroskopische Aufnahmen der Cu-Schichtbildung als Effekt des Cu-Anspringverhaltens in Abhängigkeit des Talk-Gehalts in XANTAR.

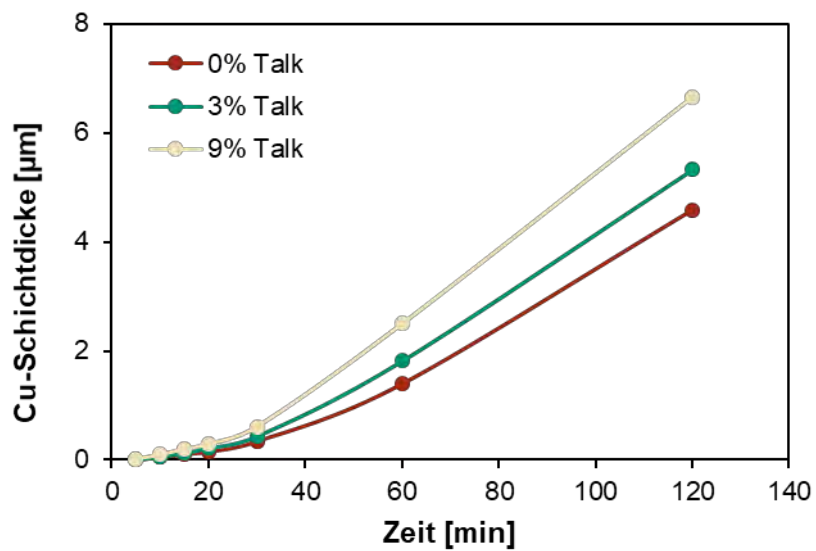


Abbildung 51: Cu-Schichtdicke in Abhängigkeit der Zeit und des Talk-Gehalts im XANTAR.

ENIG-Finish

Wie bereits erwähnt, wurde ein Teil der Proben nach der Cu-Metallisierung weiter prozessiert. Dabei wurden jeweils ca. 5 µm Nickel und 0,1 µm Gold außenstromlos auf dem Kupfer abgeschieden. Die Proben wurden optisch untersucht und es wurden Rauheits- und Haftfestigkeitsmessungen durchgeführt.

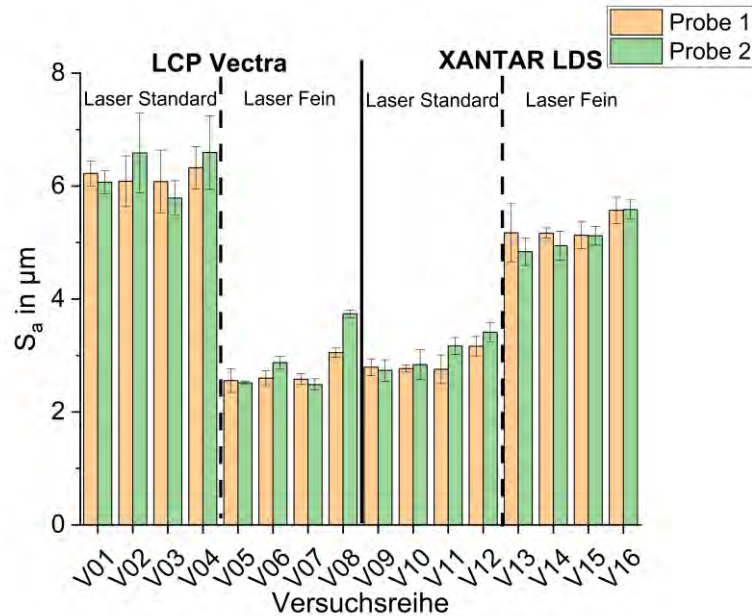


Abbildung 52: LSCM Rauheitsmessungen an Cu/Ni/Au-metallisierten Strukturen aller Varianten.

Vergleicht man die Rauheitsmessungen nach dem Lasern (Abbildung 31) und nach der Metallisierung (Abbildung 52), fällt auf, dass die Rauheit S_a durch die Metallisierung für alle Varianten in ähnlichem Maße (um ca. 2 µm) ansteigt. Dies wird durch das Inselwachstum des Kupfers an den LDS-Keimbildungszentren hervorgerufen, sodass sich eine körnige Struktur ausbildet, wie sie z.B. auch in Abbildung 50 zu erkennen ist. Durch das nachträgliche Aufwachsen von Nickel und Gold bleibt diese Struktur weiterbestehen.

Wie bei der Cu-Metallisierung schon angerissen, fanden sich auch auf der Goldoberfläche teils Schlieren, die weder nachweisbare Höhen- noch Rauheitsunterschiede aufwiesen. XPS Messungen an solchen Stellen sowie TEM/EDX Untersuchungen an FIB-Schnitten zeigten eine erhöhte Konzentration an Nickel und Natrium (Abbildung 53), was auf einen unzureichenden Spül- und Trockenschritt nach der Metallisierung hindeutete. Deshalb wurde eine Versuchsreihe mit unterschiedlichen Kombinationen durchgeführt. Diese waren:

- Kalt spülen + liegend trocknen
- Kalt spülen + hängend trocknen
- Warm spülen + liegend trocknen
- Warm spülen + hängend trocknen
- Kalt spülen + mit Isopropanol spülen + hängend trocknen

- Kalt spülen + mit Isopropanol spülen + abblasen + hängend trocken

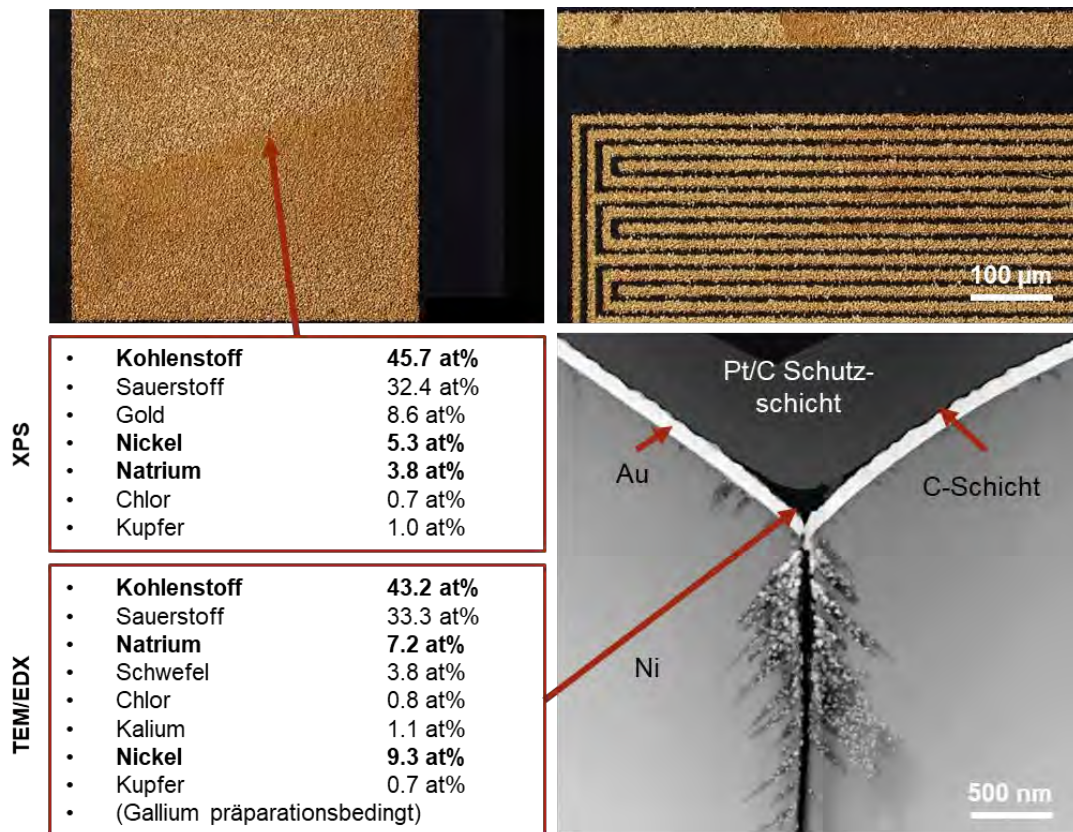


Abbildung 53: Lichtmikroskopische Aufnahmen der Au-Metallisierung mit optisch sichtbaren Schlieren in Kombination mit XPS Messungen sowie TEM/EDX Messungen an einem FIB-Schnitt (TEM-Bild rechts unten).

Auffällig war bei den ersten vier Kombinationen, dass bei liegend getrockneten Proben die Schlieren willkürlich verteilt waren, während bei hängend getrockneten Proben sich meist im unteren Teil der Platten Trocknungsrückstände zeigten. Die Kombinationen mit dem zusätzlichen Schritt des Spülens mit Isopropanol wiesen keine Schlieren bzw. Trocknungsrückstände mehr auf und diese Prozessführung konnte somit als die zu bevorzugende Vorgehensweise identifiziert werden.

Defekt- und schlierenfreie Oberflächen sind vor allem in Bezug auf nachfolgende AVT Prozesse wie z.B. Löten relevant. Letzteres ist auch für die Ermittlung der Haftfestigkeit mittels HPPT (siehe Kapitel 4.1) notwendig. Analog zu den LSCM Messungen wurden an allen 16 Varianten Haftfestigkeitsmessungen durchgeführt, welche in Abbildung 54 zusammengefasst sind. Zu beachten gilt hier, dass die Kreisflächen, welche für die Messungen verwendet wurden, einzeln gefüllt waren (vergl. Abbildung 33). Bei LCP liegt die Haftfestigkeit für Laservariante 1 im Durchschnitt bei 10 N/mm². Bei Laservariante 2, bei der das Gewöll durch die CO₂-Reinigung eingeebnet wurde, reduziert sich die Haftfestigkeit auf ca. 6 N/mm². Bei

beiden Laservarianten weisen zudem die Platten aus feuchtem Granulat eine signifikant verringerte Haftung zwischen LCP-Substrat und Metallisierung auf.

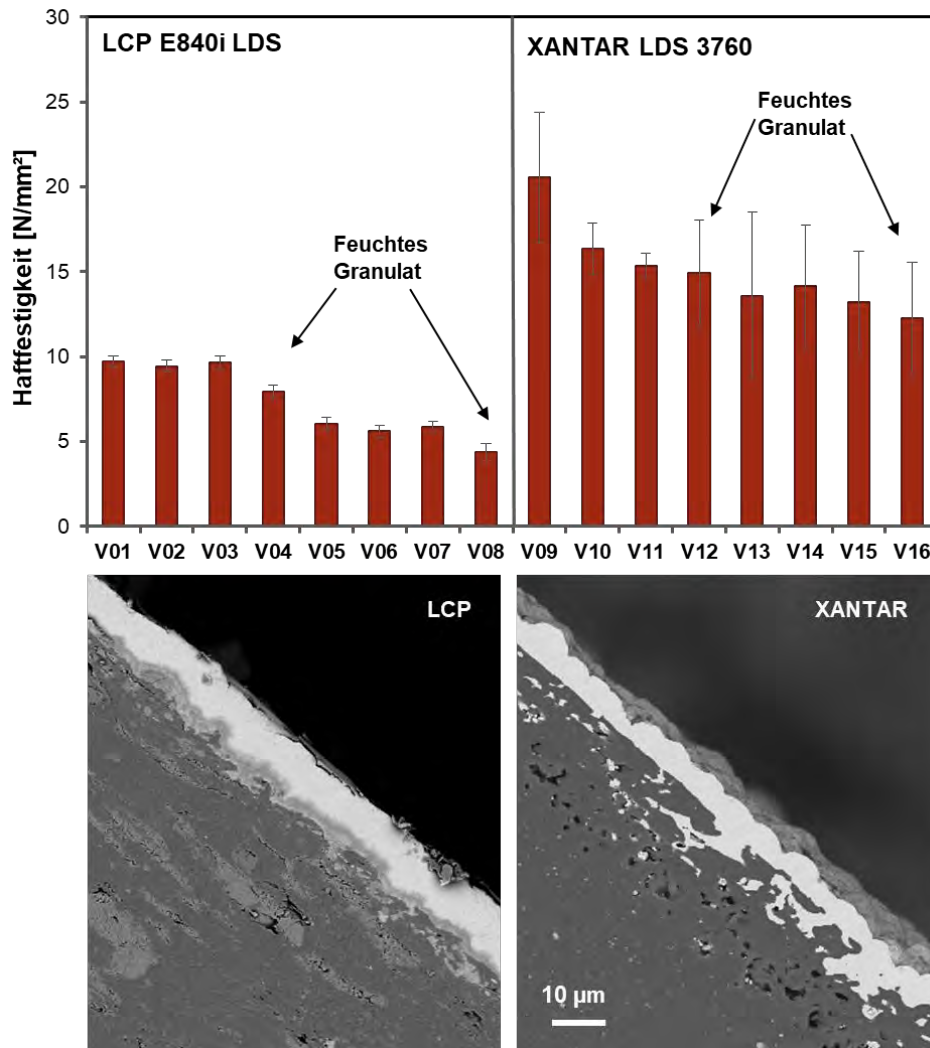


Abbildung 54: HPPT Haftfestigkeitsmessungen an metallisierten Strukturen aller Varianten und REM Aufnahmen an Mikrotomschnitten von LCP und XANTAR mit hell kontrastierter Metallisierung.

Im Vergleich dazu zeigt XANTAR bei allen Varianten deutliche höhere Werte zwischen 12 und 20 N/mm². Jedoch sind hier die Standardabweichungen so groß, dass untereinander kein klarer Trend erkennbar ist. Die vergleichsweise höhere Haftfestigkeit lässt sich gut begründen, wenn man Mikrotomschnitte der unterschiedlichen Materialien im REM betrachtet. Während zwischen LCP und Kupfer eine überwiegend definierte Grenzfläche vorliegt, weist XANTAR eine Zwischenphase oder Grenzschicht auf, in der das Substratmaterial von Kupfer durchdrungen ist. Es wird davon ausgegangen, dass diese oberflächennahe Mikroporosität durch die Laserstrukturierung induziert wurde, sodass der Cu-Elektrolyt in das Material eindringen konnte und so zu einer stärkeren mechanischen Verankerung der Metallisierung geführt hat.

Je nach Füllstrategie beim Lasern ließ sich die Beanspruchung des Substratmaterials weiter steuern, was sich wiederum auf die Haftfestigkeit auswirkte. Wurden z.B. die Kreisflächen zusammen, und nicht einzeln, gefüllt (vergl. Abbildung 33), sodass die lokale Temperaturerhöhung reduziert wurde, konnte die Haftfestigkeit bei LCP um ca. 16 % gesteigert werden, bei XANTAR waren es sogar ca. 30 %. Diese Ergebnisse zeigen deutlich, wie wichtig das Zusammenspiel aus Substratmaterial, Laserparameter, Reinigung und Metallisierung für ein optimiertes Ergebnis ist.

8.2. Inline-fähige Messungen

Auf den laserstrukturierten Bauteilen wurden Messungen mittels OSEE und HSI durchgeführt, die im Folgenden nacheinander vorgestellt werden. Zudem wurden mit beiden Messtechniken industriennahe Proben vermessen, die von dem projektbegleitenden Ausschuss bereitgestellt wurden und zunächst vorgestellt werden sollen.

Industriennahe Probensätze aus dem projektbegleitenden Ausschuss.

Es wurden von den Partnern Umicore und MID Solutions GmbH Probensätze aus vergoldeten Proben sowohl mit LCP als auch XANTAR zur Verfügung gestellt. Die Proben von Umicore wurden mit demselben Layout laserstrukturiert wie die im Projekt hergestellten Proben von Hahn-Schickard. Dabei wurden jedoch zwei unterschiedliche Prozesse der Veredelung genutzt: Direct Immersion Gold (DIG) und Electroless Nickel Immersion Gold (ENIG). Im Projekt wurden bei Hahn-Schickard alle Proben mit ENIG metallisiert. Die Proben von MID Solutions GmbH wurden ebenfalls mit ENIG-Finish versehen. Jedoch wurden hier zwei Layouts hergestellt. Eine Übersicht ist in Abbildung 55 zu sehen.

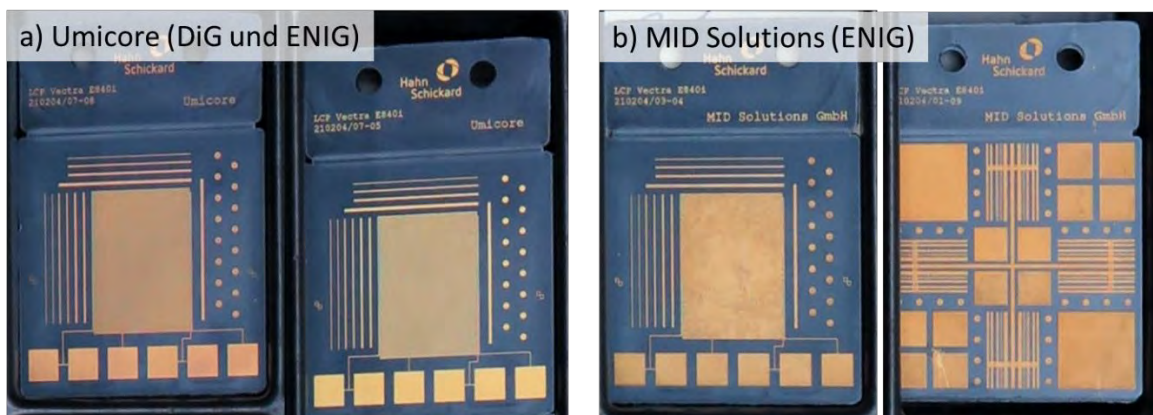


Abbildung 55: Übersicht der Unterschiede der Proben aus dem projektbegleitenden Ausschuss beispielhaft für LCP. Bei Umicore wurden Proben mit zwei unterschiedlichen Veredelungsprozessen hergestellt, bei MID Solutions GmbH zwei unterschiedliche Layouts strukturiert.

Optisch Stimulierte Elektronenemission (OSEE)

Mittels OSEE wurden vergoldete Proben vermessen. Hierbei wurden sowohl für LCP als auch für XANTAR drei Probensätze untersucht. Proben aus feuchtem Granulat und auf einen feinen Laserprozess folgende Metallisierung, sowie Proben aus trockenem Granulat und jeweils feinem und Standard-Laserprozess. Die Messungen wurden mit einer Blende von 3,2 mm durchgeführt und der Messabstand zwischen den Punkten betrug 1 mm. Dabei resultiert eine größere Blende in einem größeren mit UV-Licht bestrahlten Messfleck und damit mehr Signal bei gleichzeitig geringerer örtlicher Auflösung als bei einer kleineren Blende. Aufgrund der großen Blende wurden nur die großen Pads auf der Probe vermessen, da kleinere Strukturen so nicht aufgelöst werden konnten. Es wurden auch erste Tests mit verkupferten Proben gemacht, die allerdings auch bei der größten Blende mit 6,4 mm Durchmesser kein signifikantes Messsignal ergaben, was auf die Bildung einer Oxidschicht beim im Vergleich zu Gold unedleren Kupfer zurückgeführt werden kann.

Für die Messungen mussten die Proben geerdet werden, und da die Probe außerhalb der vergoldeten Bereiche aus Kunststoff besteht, wurden die Proben direkt auf den Pads geerdet. Dabei wurde ein Aufbau realisiert, bei dem die Proben in rascher Folge ausgetauscht werden konnten und gleichzeitig reproduzierbare Ergebnisse zeigten. Ein Übersichtsbild ist in Abbildung 56 zu sehen. Hier sieht man die geerdete Probe im Übersichtsbild sowie ein zweidimensionales falschfarbencodiertes OSEE-Map für den ausgewählten Bereich. In den Messdaten lassen sich die sechs Pads eindeutig ausmachen, da sie sich durch hohe OSEE Werte auszeichnen. Entgegen des ersten Eindrucks sind diese Messdaten allerdings nicht aus schräger Perspektive aufgenommen, sondern es ist ein Abfall des OSEE Signals vom Pad rechts außen zum Pad links außen zu erkennen.

Um nun die Elektronenemissionen von unterschiedliche Proben miteinander zu vergleichen, wurden die Mittelwerte des OSEE-Signals der einzelnen Pads ermittelt. Dies ist beispielhaft an einer Probe in Abbildung 57 mittels falschfarbencodierter OSEE-Messwerte in sechs quadratischen Regionen dargestellt.

Die ermittelten Mittelwerte für alle Pads und für alle untersuchten Proben sind in Abbildung 58 dargestellt. Man erkennt zunächst einmal, dass nicht jedes Pad ein OSEE Signal lieferte. Dies ist reproduzierbar aufgenommen worden und somit auf die Materialeigenschaften des jeweiligen Pads zurückzuführen, namentlich auf deren Emissionseigenschaften. Hierfür können Oxidationsschichten oder andere Oberflächeneffekte wie etwa auf der emittierenden Goldschicht deponierte Beläge verantwortlich sein.

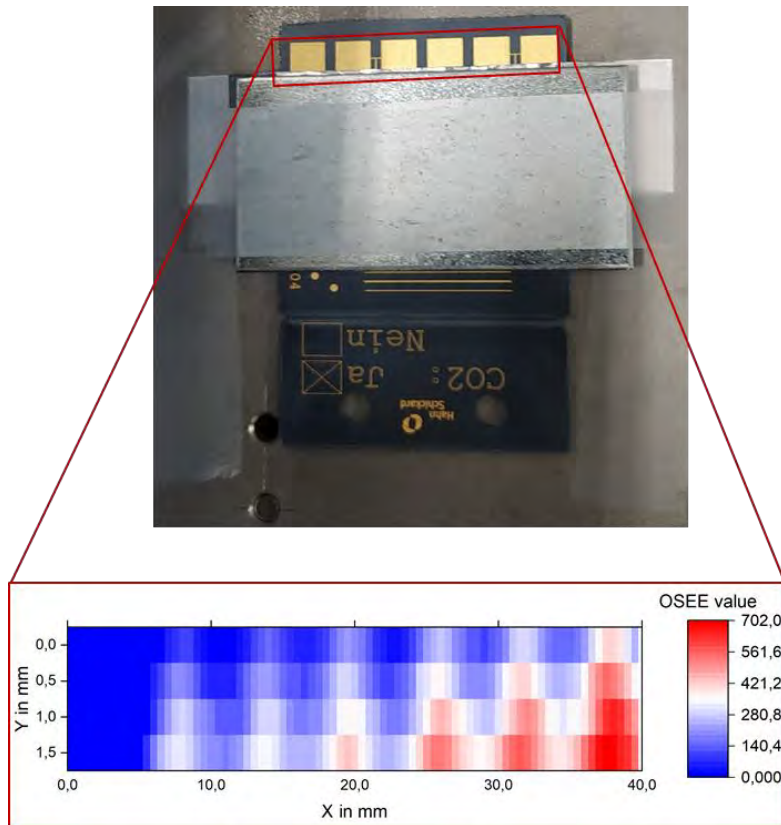


Abbildung 56: Übersichtsbild zur OSEE-Messung. Man sieht die Erdung der Probe direkt auf den Pads sowie den Messbereich und das dort aufgenommene zweidimensionale OSEE-Map.

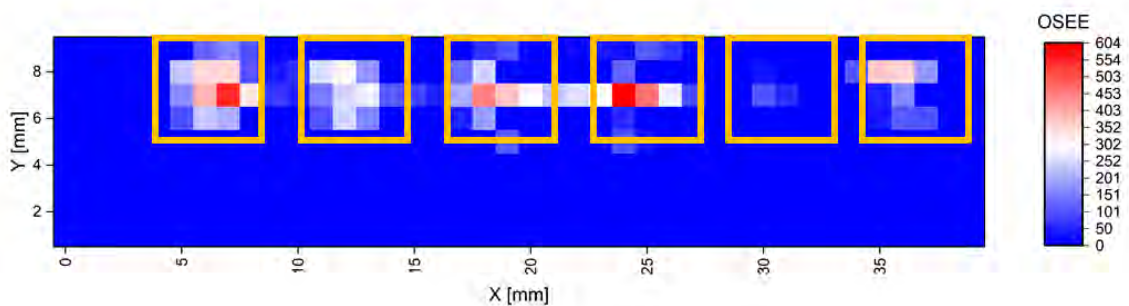


Abbildung 57: OSEE-Messdaten für eine fein gelaserte Probe aus trockenem LCP Granulat. Man erkennt die sechs erfassten Pads durch einen im Vergleich zur Umgebung höheren OSEE-Wert.

Generell erkennt man für LCP und XANTAR eine deutlich erhöhte Elektronenemission auf der Probe mit trockenem Granulat und fein gelaserte Oberfläche. Ansonsten lassen sich keine signifikanten Unterschiede erkennen, da der OSEE-Wert teilweise auch stark zwischen den einzelnen Pads derselben Probe schwankt, was mit Effekten erklärt werden kann, die in der Sequenz der Prozessschritte auf die Abscheidung der Au-Schicht folgen.

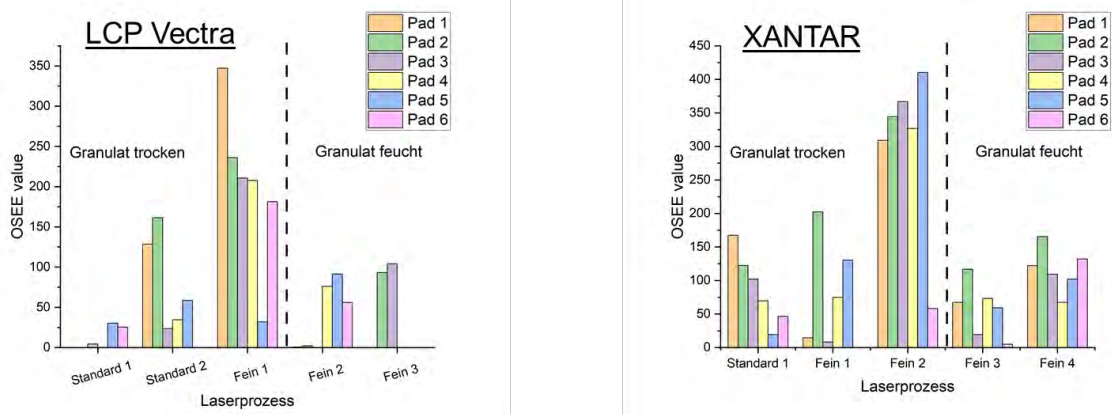


Abbildung 58: Übersicht der OSEE-Ergebnisse der einzelnen Pads für die vermessenen vergoldeten Proben von LCP (links) und XANTAR (rechts).

Analog wurden auch die Proben der Industriepartner aus dem projektbegleitenden Ausschuss charakterisiert. Die Auswertung der vermessenen Pads der unterschiedlichen Layouts bei Proben von MID Solutions ist in Abbildung 59 dargestellt. Hier wurden von den vier Pads auf der linken Seite im unteren Layout immer nur die oberen beiden gleichzeitig geerdet. Die Ergebnisse für beide Layouts sind in Abbildung 60 dargestellt. Man erkennt auch hier starke Schwankungen in den Messwerten zwischen den einzelnen Pads derselben Probe. Vereinzelt geben einige Pads gar kein Signal, was auf dem rechten Layout stärker der Fall ist. Beim linken Layout ist ein deutlich höherer OSEE-Wert auf den Proben aus XANTAR zu sehen.

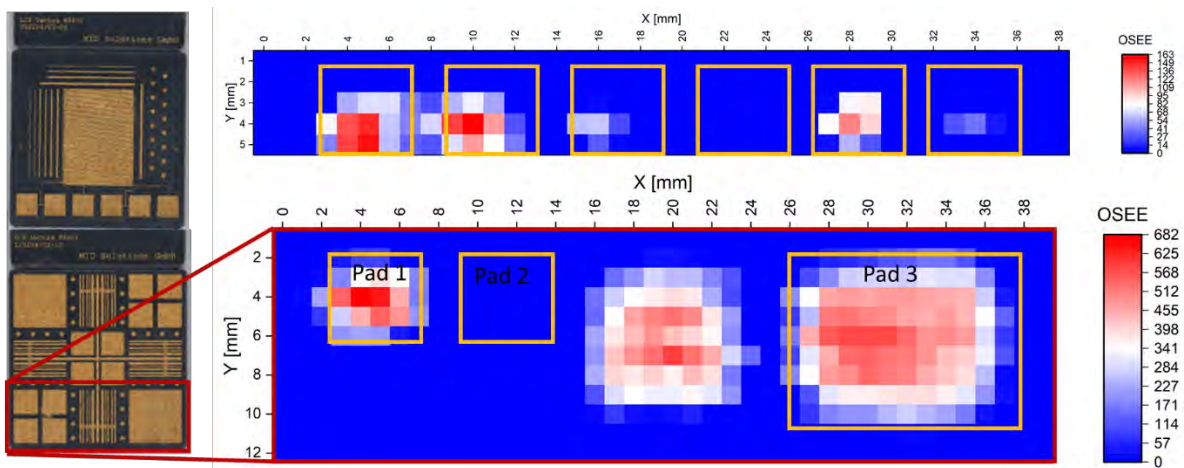


Abbildung 59: Übersicht der vermessenen Bereiche der Proben von MID Solutions GmbH. Bei der unteren Probe wurden nur die oberen drei Pads vermessen, da die beiden Pads unten links nicht gleichzeitig geerdet werden konnten.

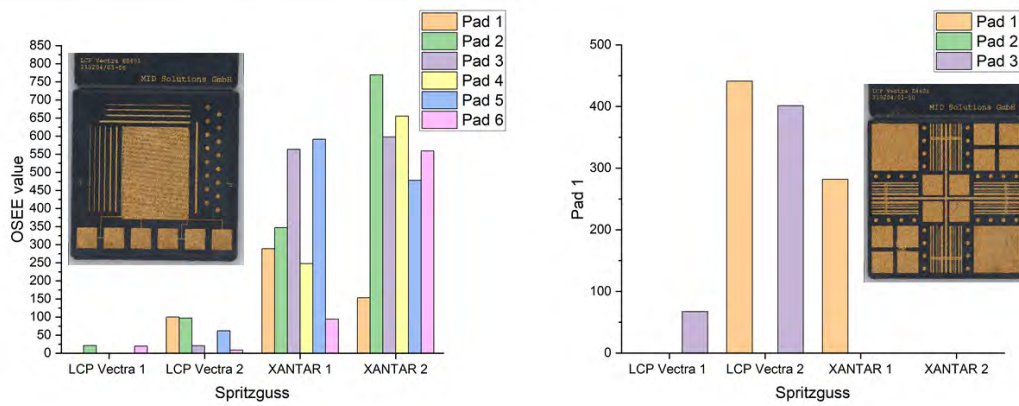


Abbildung 60: OSEE-Ergebnisse der Proben von MID Solutions GmbH. Dargestellt sind die Messwerte der jeweiligen Pads für die beiden Layouts.

Für Proben von Umicore sind die Ergebnisse zusammengefasst in Abbildung 61 dargestellt. Diese Proben zeigen durchgängig eine gute Elektronenemission (also ein hohes OSEE-Signal), wobei keine signifikanten Unterschiede zu sehen sind, weder zwischen den Proben aus verschiedenen Vergoldungsprozessen (DIG und ENIG) noch zwischen Proben aus LCP und XANTAR Substratmaterialien.

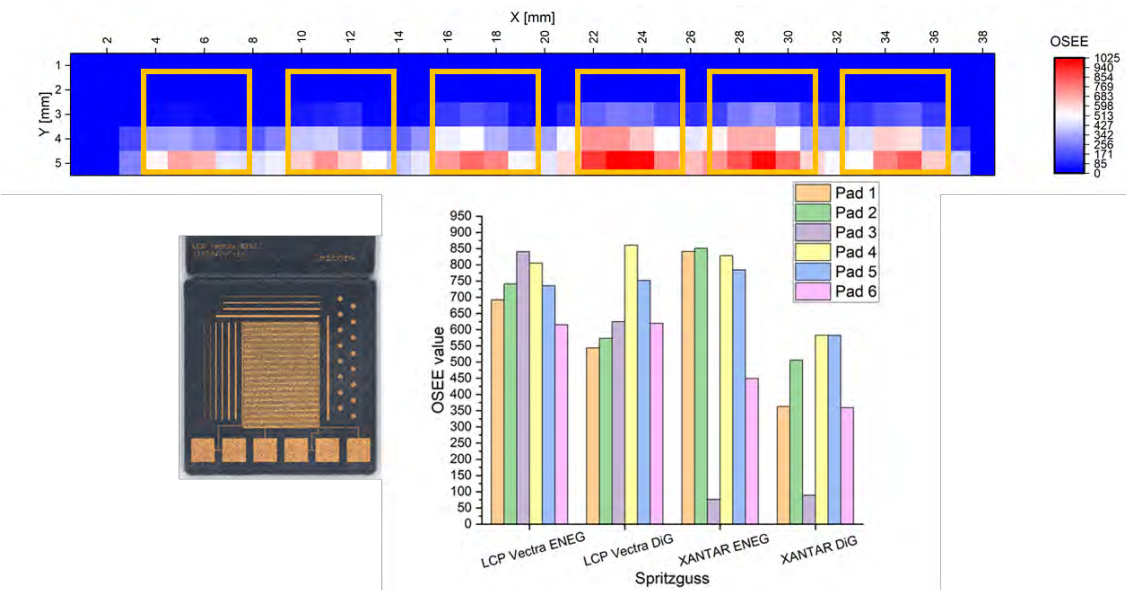


Abbildung 61: Darstellung der OSEE-Messergebnisse für die Proben von Umicore. Die Proben geben ein vergleichsweise hohes OSEE-Signal, wobei keine nennenswerten Unterschiede zwischen Proben mit DIG und ENIG zu erkennen sind.

Zusammenfassend ließen sich mit OSEE Unterschiede in den Oberflächenzuständen vergoldeter Proben erfassen. Dabei zeigten die starken Unterschiede zwischen den Proben von Umicore, MID Solutions GmbH und Hahn-Schickard, dass das OSEE Signal sehr sensitiv auf unterschiedliche Prozessführungen und abhängig davon auftretende leichte Verunreinigungen, Oxidschichten oder ähnliche Grenzschichten auf der Oberfläche reagiert.

Hyperspektralkamera (HSI-Kamera)

Mithilfe der HSI-Kamera wurden verkupferte und vergoldete Proben vermessen. Mithilfe der spektralen Information sollten hier automatisch Schlieren, Verdunkelungen oder andere Auffälligkeiten auf den metallisierten Oberflächen erfasst werden. Ein aufgenommenes Bild sowie ein Probenfoto einer vergoldeten Probe sind Abbildung 62 zu sehen. Auf der HSI-Aufnahme wurden dann drei Bereiche ausgewählt, zwischen denen in der weiteren Auswertung unterschieden werden soll: visuell homogen-gute Metallisierung, inhomogen-schlechte Metallisierung (mit Schlieren o.ä.) und Kunststoff. Die spektrale Information jedes dieser drei Bereiche ist ebenfalls in Abbildung 62 zu sehen. Mithilfe von Machine-Learning Algorithmen wurde für jeden Pixel des aufgenommenen Bildes eine automatische Zuordnung in diese drei Kategorien vorgenommen. So ließen sich nach kurzem Anlern-Prozess (zu sehen durch die per Hand gezogenen Linien (grün, rot, blau)) die Messungen desselben Proben- bzw. Bauteilsatzes automatisiert erfassen, um Gut- und Schlecht-Bereiche zu detektieren.

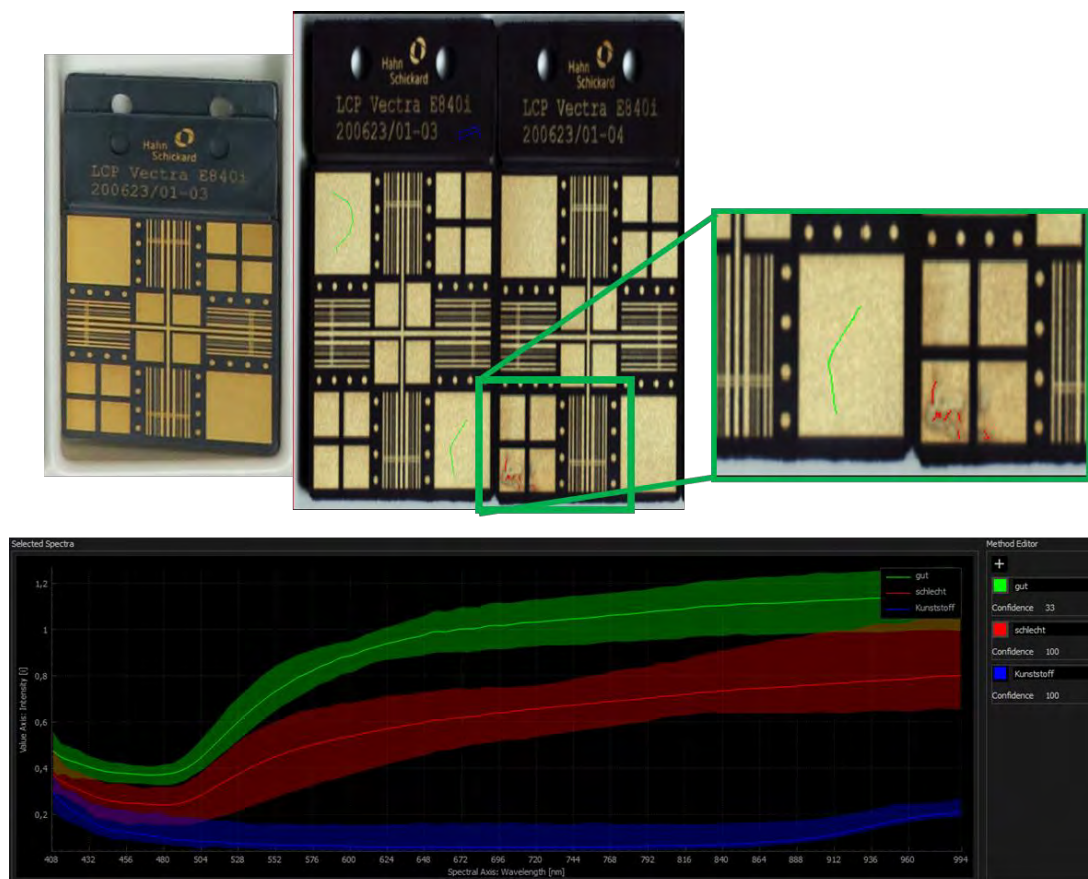


Abbildung 62: Prinzip der Schlienerkennung: Dargestellt sind ein Foto und eine HSI-Aufnahme einer goldmetallisierten Probe. Auf der Probenabbildung wurden unterschiedliche Bereiche markiert, was durch grüne, blaue und rote Linien kenntlich gemacht ist. Unten ist die spektrale Information für diese Bereiche dargestellt.

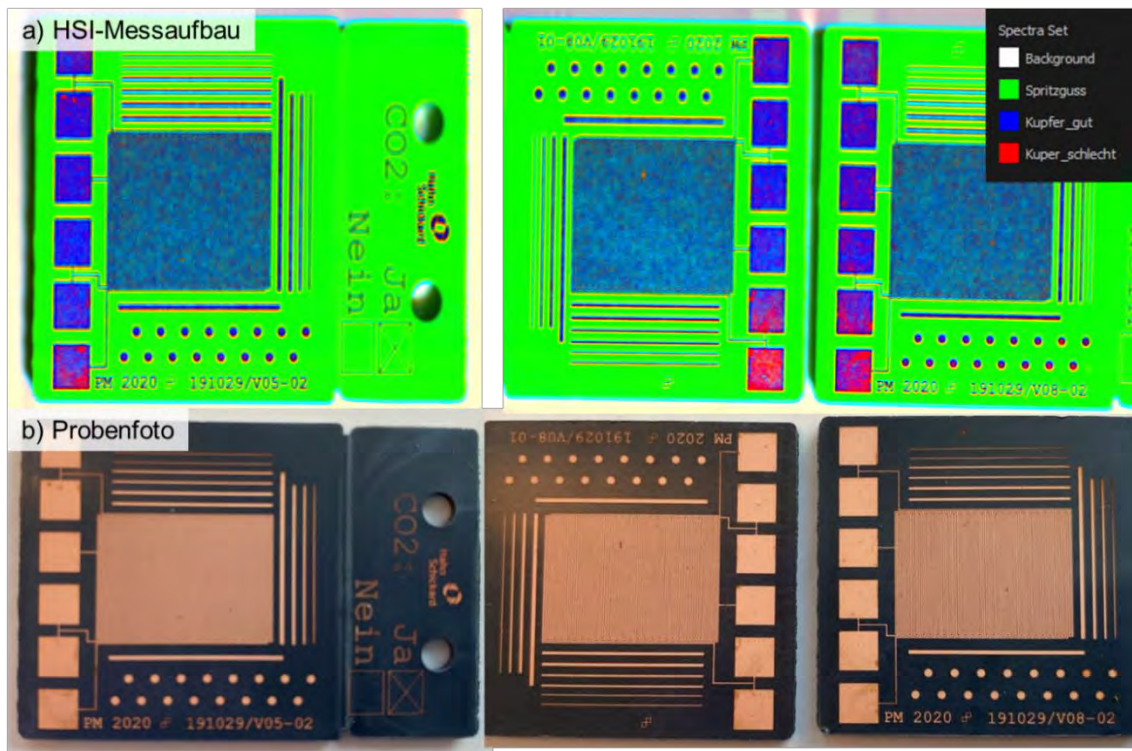


Abbildung 63: Ergebnisse der HSI-Kamera auf verkupferten Proben. Die roten Bereiche auf den verkupferten Flächen lassen sich direkt Schlieren im Probenfoto zuordnen.

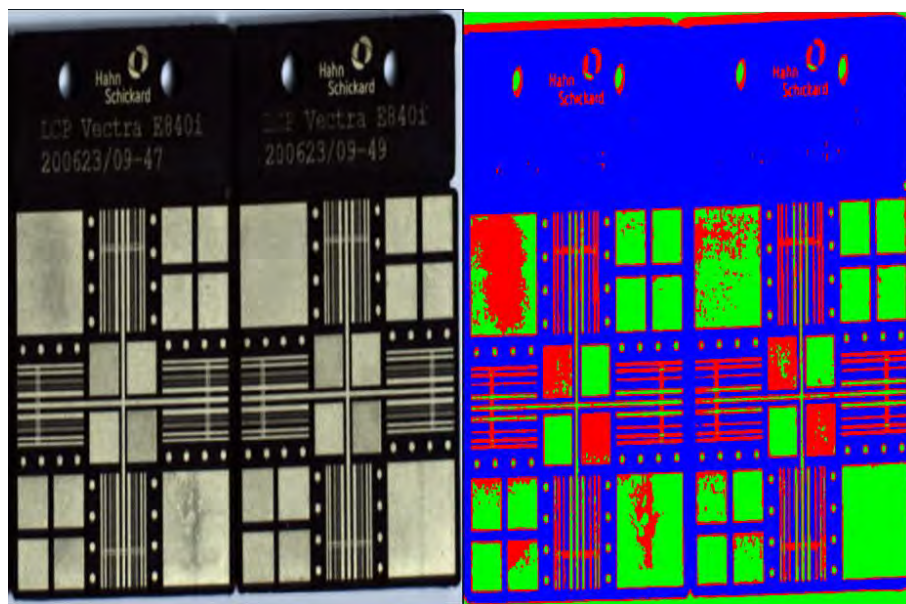


Abbildung 64: Ergebnisse der automatisierten HSI-Kamera-Bildauswertung (rechts) auf vergoldeten Proben. Die roten Bereiche auf den metallisierten Flächen lassen sich direkt Schlieren im Probenfoto (links) zuordnen.

In Abbildung 63 sind Ergebnisse für verkupferte Proben zu sehen. Hier wurden in den roten Bereichen Schlieren oder andere Verunreinigungen mit der erarbeiteten automatischen Auswerteprozedur entdeckt. Vergleicht man diese roten Bereiche mit den dazugehörigen Probenfotos, fällt auf, dass alle Schlieren gut detektiert werden konnten. Dies ist ebenso in

Abbildung 64 beispielhaft für die vergoldeten Proben zu sehen. Eine automatisierte Schlierenerkennung der metallisierten Oberflächen mittels HSI-Kameras ist demnach zweifelsfrei möglich.

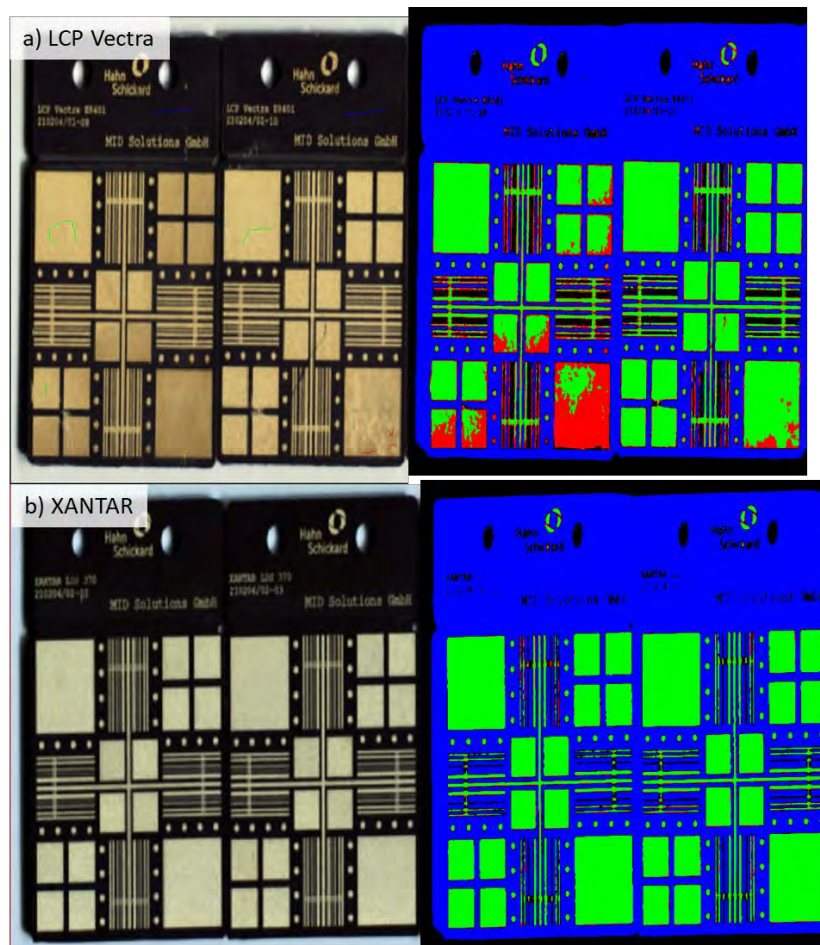


Abbildung 65: HSI-Ergebnisse der Proben von MID Solutions GmbH. Links sind jeweils die Kamera-Aufnahmen zu sehen, während rechts das Ergebnis der automatisierten Auswertung zu sehen ist. Die automatisierte Erkennung detektiert die Schlieren ausreichend.

Des Weiteren wurden Messungen der Proben von den Partnern aus dem projektbegleitenden Ausschuss ausgewertet. Auch hier sieht man schließlich eine gute Detektion von Schlieren und Verdunkelungen für die Proben von MID Solutions GmbH (Abbildung 65 und Abbildung 66). Bei den Proben von Umicore waren keine Auffälligkeiten vorhanden. Hier sind auch nach der Auswertung keine Fehldetektionen erfolgt (Abbildung 67).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich Schlieren und andere optische Auffälligkeiten auf den metallisierten Oberflächen mittels HSI-Kameras sehr gut automatisiert detektiert werden konnten.

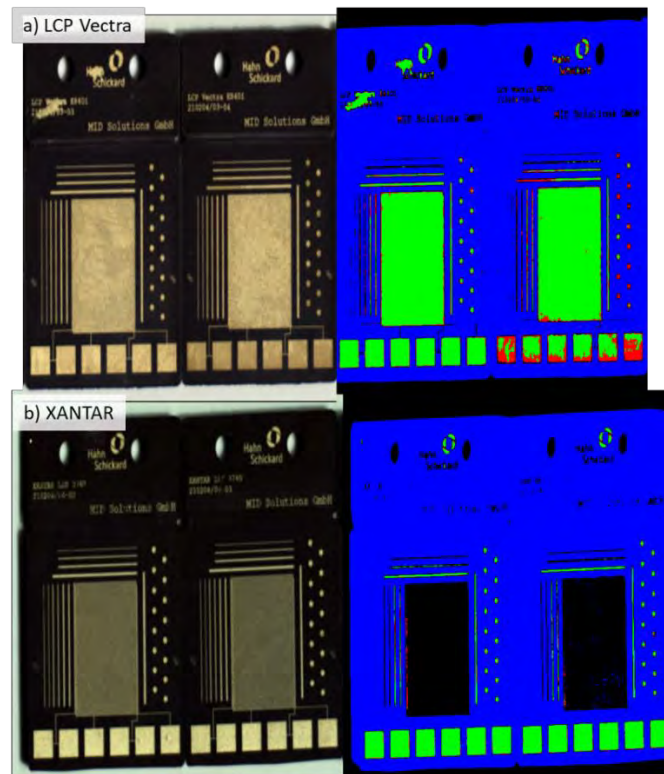


Abbildung 66: HSI-Ergebnisse der Proben von MID Solutions GmbH. Links sind jeweils die Kamera-Aufnahmen zu sehen, während rechts das Ergebnis der automatisierten Auswertung zu sehen ist. Die automatisierte Erkennung detektiert die Schlieren ausreichend.

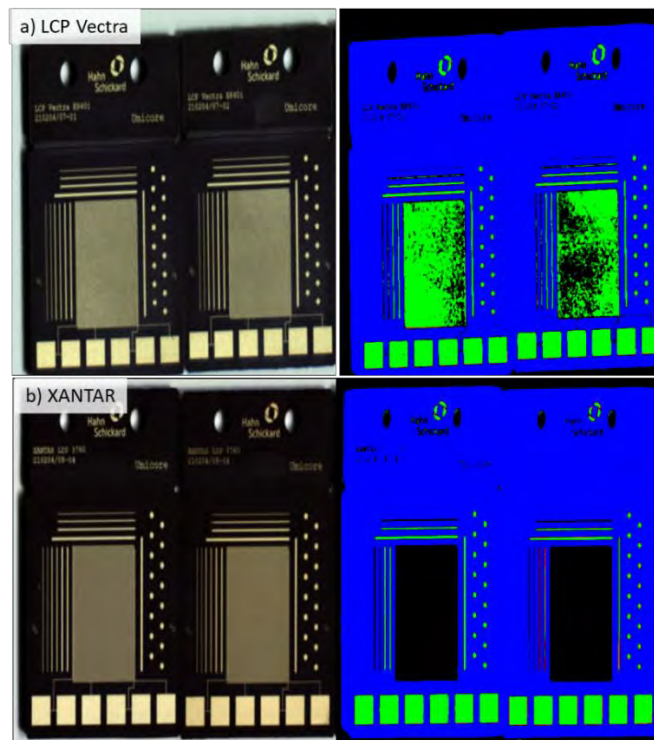


Abbildung 67: HSI-Ergebnisse der Proben von Umicore. Links sind jeweils die Kamera-Aufnahmen zu sehen, während rechts das Ergebnis der automatisierten Auswertung zu sehen ist. Die Proben sind schlierenfrei, was auch in der Auswertung zu sehen ist.

9. Empfehlungen zur Herstellung defektfreier MID und Möglichkeiten zur Analyse mit inline-fähiger Messtechnik

Die Erkenntnisse aus Prozess und Analyse ermöglichen es, Empfehlungen zur Herstellung defektfreier MID zu geben, welche in Abbildung 68 zusammengefasst sind.

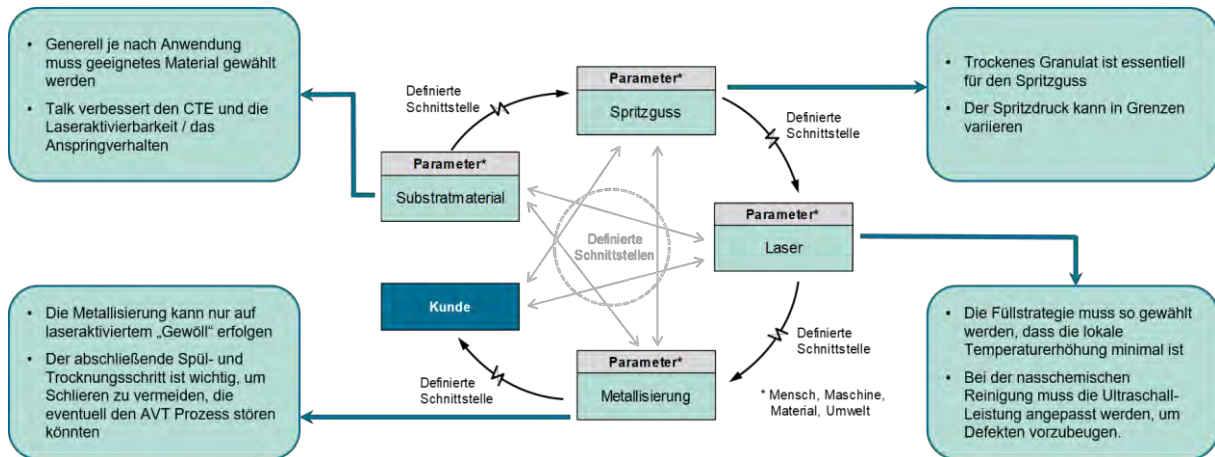


Abbildung 68: Prozessschritte ergänzt durch die im Projekt erzielten Ergebnisse zur Herstellung von defektfreier MID.

Die Wahl des Substratmaterials, also des Matrixpolymers und der Additive sowie Füllstoffe im Granulat für den Spritzguss, ist durch die spätere Anwendung und die dafür nötigen Anforderungen vorgegeben. Betrachtet müssen hierbei u.a. die Temperaturstabilität, der CTE, die erforderlichen Oberflächenrauigkeiten und die Spritzgießbarkeit. Mit Blick auf letztere ist es essentiell, dass das verwendete Granulat in einem ausreichend trockenen Zustand eingesetzt wird, um eine hohe Prozessstabilität und Oberflächenqualität der Bauteile zu gewährleisten. Beim Spritzgussprozess hat unter anderem der Spritzdruck einen hohen Einfluss auf das Formfüllverhalten der Bauteile und deren Oberflächengüte, die sich im Kontakt mit der Formoberfläche ergibt. Eine homogene und defektfreie Oberfläche ist für den nachfolgenden Laserstrukturierungsschritt essentiell. In diesem ist eine Kombination von Laserparametersatz und Füllstrategien zu ermitteln, die eine optimale Laseraktivierung bei minimaler Beanspruchung des Substratmaterials erreicht. Insbesondere das Anspringverhalten beim ersten stromlosen Metallisierungsschritt und die für eine hohe Metallschichthaftung vorteilhafte mechanische Verzahnung zwischen einerseits aufgerauter und andererseits in sich kohärierender MID-Substratoberfläche und der Metallschicht erwiesen sich als wegweisende Kriterien. Vor allem bei kleinen Strukturen muss dazu auf Füllstrategien zurückgegriffen werden, welche die lokale Temperaturerhöhung minimieren, entweder durch das „zusammen Füllen“ oder das Einbringen von sog. „Geisterstrukturen“, welche nicht Teil des späteren Leiterbahnbildes sind. Die Beanspruchung des Substratmaterials sollte auch

beim anschließenden Reinigungsprozessschritt mitberücksichtigt werden. So muss z.B. bei der nasschemischen Reinigung mit Ultraschall je nach Substratmaterial ein Kompromiss gefunden werden, bei dem der Ultraschall die Substratoberfläche bzw. die strukturierten Bereiche nicht mechanisch schädigt, aber dennoch die Laserdebris vollständig entfernt wird. Letzteres verhindert Übermetallisierungen und erlaubt eine hohe Konturtreue beim nachfolgenden Metallisierungsschritt und reduziert so das Risiko für Kurzschlüsse, v.a. bei Anwendungen, die sehr kleine Leiterbahn-pitches erfordern. Daneben sind die Badführung der Metallisierungsbäder sowie abschließende Spül- und Trocknungsschritte essentiell für die Eigenschaften der Metallschicht und Metalloberfläche, die wiederum und etwaige folgende Prozessierungsschritte, z.B. AVT-Prozesse, beeinflussen.

Eine Übersicht über die im Projekt als besonders geeignet identifizierten und angepassten Einsatzmöglichkeiten von Inline-Messtechniken entlang der Prozesskette ist in Abbildung 689 dargestellt.

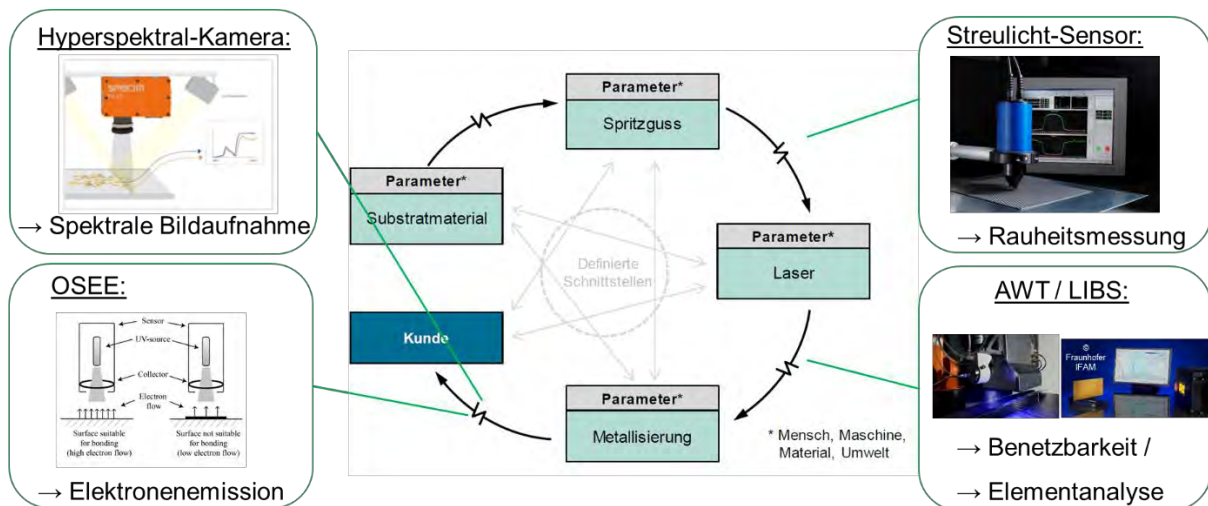


Abbildung 69: Übersicht der zur Qualitätssicherung eingesetzten und an die Anforderungen angepassten Inline-Messtechniken und Messprozeduren in den jeweiligen Prozessschritten.

Zur Begutachtung der spritzgegossenen Bauteile eignet sich der Streulichtsensor. Hiermit können sowohl Bauteile unterschieden werden, die eine unterschiedliche Rauheit aufweisen, als auch unterschiedlich raue Bereiche innerhalb eines Bauteils vermessen werden. Damit eignet sich der Einsatz eines Streulichtensors gut, um die Qualität der spritzgegossenen Bauteile, z.B. die Übereinstimmung zwischen Form- und Bauteiloberflächenstruktur, vollflächig zu beurteilen. Mithilfe der laserinduzierten Plasmaspektroskopie (LIBS) ist es möglich, Bauteile, die mit unterschiedlichen Laserprozessen hergestellt wurden, zu unterscheiden und so die Überwachung einer optimalen Laseraktivierung zu begleiten. Jedoch ist der Einfluss auf die weitere Prozessierbarkeit der Bauteile nicht geklärt, denn LIBS ist eine minimal invasive Technik, die die Oberfläche nach erfolgter Laseraktivierung nochmals durch die Entstehung

kleiner, bis zu mehrere Mikrometer tiefer Krater verändert. Mithilfe der Aerosol-Benetzungsprüfung (AWT) konnte eine qualitative Unterscheidung von Bauteiloberflächen nach Anwendung unterschiedlicher Herstellungsparameter durchgeführt werden. Quantitativ ließ sich dieser Unterschied jedoch nicht erfassen, da eine vergleichbare Auswertung der unterschiedlichen Proben nicht gewährleistet werden konnte. Somit kann man hieraus keine allgemeine Aussage über die Eignung des AWT an gelaserten Proben vor einer nasschemischen Metallisierung treffen. Die optisch stimulierte Elektronenemission (OSEE) kann insbesondere auf vergoldeten Oberflächen Unterschiede zwischen verschiedenen hergestellten Proben detektieren und so bei einer visuellen Inspektion subjektiv wahrgenommene Glanz- und Homogenitätseindrücke objektivieren helfen. Dabei ist das OSEE Signal sehr sensitiv gegenüber Oxidations- und anderen Deckschichten auf der Oberfläche, weshalb eine generelle Eignung im Sinne einer variablen Abstimmung auf die vom folgenden Prozessierungsschritt abhängigen Anforderungen an die Oberflächenreinheit zum aktuellen Stand nicht gegeben ist. Die Hyperspektralkameras sind in der Lage, optische Defekte/Verfärbungen zuverlässig und automatisiert zu detektieren und sind sehr geeignet zur vollflächigen abschließenden Endkontrolle der verkupferten und vergoldeten Oberflächen. Zudem erlaubt der hohe Informationsgehalt der erhaltenen Bilder unterstützt von Routinen des maschinellen Lernens eine automatisierte Defekterkennung, die in falschfarbenkodierte Bilder umgesetzt werden kann, welche dem fotografischen Probenbild überlagert werden können. Die Farbkodierung erlaubt auch einem wenig geübten Anwender auf einen Blick das Erkennen von zuvor von Experten identifizierten anwendungsrelevanten Defekten.

MID Anwendern wird als mittelfristige Handlungsoption empfohlen, die im Projekt entwickelte und umgesetzte Strategie zur Identifizierung geeigneter Inline-Prüftechniken und Ausarbeitung betriebsinterner Inline-Prüfprozeduren im Rahmen der Fertigungsplanung anzuwenden. In diesem Sinne werden ausgehend von einem Versuchsplan, der auf der Grundlage tiefer Kenntnisse des Einflusses von Prozessparametern aufbaut, einmalig gezielt Defekte in MID Bauteile eingebracht und anhand dieser nicht-konformen Proben wegbereitende Entscheidungen für einen Einsatz zur Qualitätssicherung getroffen. Die Umsetzbarkeit der Entwicklungen im Projekt wurde beispielhaft anhand von Proben, die von Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses zur Verfügung gestellt worden waren, erfolgreich demonstriert. Mit langfristigerer Perspektive wird MID Anwendern nahegelegt, im Falle sehr hoher Anforderungen an die Sicherstellung der Produktqualität – wie etwa bei der Herstellung sicherheitsrelevanter MID Komponenten – frühestmöglich im Produktentwicklungsprozess, also namentlich schon bei der Produktplanung, Qualitätsanforderungen zu sammeln und diese bei der Materialauswahl mit einzubeziehen. Insbesondere gilt es dabei auch, die Bandbreite der Einsatzmöglichkeiten verfügbarer Fertigungswerkzeuge zum Spritzgießen, zur Laseraktivierung, zur Reinigung und Metallisierung zu berücksichtigen. Innerhalb des somit

gesetzten Ausgestaltungsrahmens kann dann die Qualitätssteuerung relevanter Arbeitsschritte und Materialeigenschaften entlang des Prozesses Inline erfolgen.

10. Verwendung der Zuwendung

Durchführende Forschungseinrichtungen

Forschungseinrichtung 1 (federführend):

Hahn-Schickard

Allmandring 9 b

70569 Stuttgart

Leiter der Forschungseinrichtung: Prof. Dr. André Zimmermann

Projektleiterin: Dr. Andrea Knöller

Forschungseinrichtung 2:

Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM

Wiener Straße 12

28359 Bremen

Leiter der Forschungseinrichtung: Prof. Dr. Bernd Mayer

Projektleiter: Dr. Michael Noeske

Personaleinsatz

Forschungseinrichtung 1:

Wissenschaftlich-technisches Personal: 20,25 Personenmonate

Technisches Fachpersonal: 12,75 Personenmonate

Forschungseinrichtung 2:

Wissenschaftlich-technisches Personal: 28,89 Personenmonate

Technisches Fachpersonal: 6,7 Personenmonate

Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

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

11. Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der erzielten Ergebnisse

Innovativer Beitrag

MID bzw. spritzgegossene Schaltungsträger finden bereits in vielen Bereichen Anwendung. Dazu zählen vor allem Automotive, Automatisierungstechnik, Medizintechnik, sowie Kommunikations- und Informationstechnik. Dabei stehen für die Herstellung von MID neben der Bauteilqualität und Zuverlässigkeit auch die Herstellungskosten im Fokus. Durch die im Projekt erfolgte Erarbeitung einer systematischen Vorgehensweise sowohl zur Prozess-Optimierung als auch zum Einsatz geeigneter fertigungsbegleitender Methoden zur materialeitigen Qualitätssteuerung können fertigende KMU Fehlerbilder gezielt erkennen und ihr Auftreten weiter minimieren bzw. nicht konforme oder von der Norm abweichende Bauteile frühzeitig ausmustern, sodass diese KMU letztlich ihre Produktqualität und Wirtschaftlichkeit in einem verstetigten Verbesserungsprozess steigern können.

Voraussichtliche Nutzung der erzielten Forschungsergebnisse

Um die Praxisrelevanz der durchgeführten Untersuchungen sicherzustellen, fand die Bearbeitung des Projektes in enger Abstimmung mit den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses statt. Die 16 involvierten Unternehmen deckten dabei die gesamte MID-Prozesskette sowie Hersteller von Analysetools und Anwender ab, sodass in diesem Vorhaben unterschiedliche Anforderungen und Einflussfaktoren Prozess- und Materialübergreifend betrachtet werden konnten. Die dadurch erhaltenen Prozess- und Analyseergebnisse, die damit verbundenen Einsichten ins Materialverhalten und die daraus resultierenden Empfehlungen zur Herstellung von defektfreien MID können direkt nach Ende des Projektes industriell verwertet werden. Langfristig sollen auch prozessbegleitende Inline-fähige Analysemethoden, wie sie in diesem Projekt erarbeitet wurden, verstärkt Anwendung finden, um die Produktqualität und Herstellungseffizienz weiter steigern zu können. Durch die gesteigerte Prozess- und Material-seitige Qualitätskontrolle können KMU ihren Vorsprung weiter ausbauen, die Kundenzufriedenheit steigern und somit langfristig Arbeitsplätze sichern.

Neben der Bereitstellung aller Ergebnisse für den projektbegleitenden Ausschuss sind die wesentlichen bisherigen Maßnahmen zum Wissenstransfer aus den Erkenntnissen des Projektes tabellarisch in Kapitel 12 aufgelistet.

12. Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Die Projektergebnisse wurden laufend den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses mitgeteilt. Hierfür wurden während der Projektlaufzeit vier Sitzungen durchgeführt und eine Cloud-basierte Plattform zum Erkenntnisaustausch eingesetzt. Eine Auflistung aller während der Projektlaufzeit durchgeführten Maßnahmen zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft ist in Tabelle 6 zusammengefasst.

Tabelle 6: Durchgeführte spezifische Transfermaßnahmen in die Wirtschaft während der Projektlaufzeit.

Kat.	Maßnahme	Ziel und Rahmen	Datum/ Zeitraum
A	Beratung des Projektbegleitenden Ausschuss (PA)	A1: Vorstellung des geplanten Projektes und Diskussion der geplanten Arbeiten	27.06.2019
		A2: Vorstellung der ersten erzielten Ergebnisse und Diskussion weiteres Vorgehen	19.03.2020
		A3: Vorstellung der weiteren Ergebnisse und Diskussion weiteres Vorgehen	27.10.2020
		A4: Abschlusspräsentation und Diskussion der erzielten Ergebnisse	20.04. 2021
B	Transfer der Projektergebnisse	B1: Präsentation der bisherigen Ergebnisse auf einer Messe, z.B. Productronica am Gemeinschaftsstand 3-D MID e.V.	pandemiebedingt entfallen
		B2: Vorstellung der bisherigen Ergebnisse: Mitgliederversammlung Hahn-Schickard	2020
		B3: Präsentation erster Ergebnisse auf internationalen, einschlägigen ingenieurwissenschaftlichen Veranstaltungen, z.B. im Rahmen der Industrieausstellung Internationaler MID Kongress, DGZfP-Tagungen, WCNDT-Tagung	pandemiebedingt entfallen
C	Veröffentlichung der Projektergebnisse	C1: Information der Mitglieder bzw. Kunden und Interessenten über den aktuellen Stand: Homepage und Newsletter von Hahn-Schickard und IFAM	jährlich
		C2: Wissenschaftliche Publikation der Forschungsergebnisse in einer Fachzeitschrift: z.B. PLUS, Polymer Engineering and Science, ZfP-Zeitung	2021
D	Aufnahme der Ergebnisse in die Lehre bzw. Durchführung von Studien-, Bachelor- und Masterarbeiten	D1: Ausbildung der Studenten verschiedener Studienrichtungen	jährlich
		D2: Kurse Kunststoff-Kompetenz-zentrum (IFAM)	

Zusätzlich sind die in Tabelle 7 aufgeführten Maßnahmen nach Projektende geplant, um die Projektergebnisse in die Wirtschaft zu transferieren.

Tabelle 7: Geplante Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit.

Kat.	Maßnahme	Ziel und Rahmen	Datum/ Zeitraum
A	Beratung und Akquisition von Firmen	A1: Abschlussbericht und alle Projektergebnisse werden dem PA zur Verfügung gestellt.	IV. Quartal 2021
		A2: Akquisition von Firmen aus dem Mitgliederkreis von Hahn-Schickard, insbesondere KMU, für geeignete Kooperationen in Form von Direktaufträgen, Verbundprojekten etc.	Nach Abschluss des Projektes
		A3: Übernahme der erzielten Ergebnisse in die Fertigungslinie bei Hahn-Schickard und Integration in das BMWi-geförderte Schaufenster „Smarte Sensorsysteme für die Produktion im branchenübergreifenden Einsatz“ bei Hahn-Schickard	Nach Abschluss des Projektes
		A4: Nutzung der erzielten Ergebnisse und Anwendung des Systems in nachfolgenden Projekten	Nach Abschluss des Projektes
B	Transfer der Projektergebnisse	B1: Vorstellung der erzielten Ergebnisse: Mitgliederversammlung Hahn-Schickard	Nach Abschluss des Projektes
		B2: Übernahme der erzielten Ergebnisse über den GMM-Fachausschuss 5.6 in die Richtlinie zur Herstellung von MID mittels LPKF-LDS®-Verfahren	Nach Abschluss des Projektes
		B3: Vorstellung der im Projekt erzielten Ergebnisse auf einer Messe, z.B. Electronica am Gemeinschaftsstand 3-D MID e.V., K-Messe, Bondexpo	2022
		B4: Präsentation der Ergebnisse: Workshop MID and Beyond von Hahn-Schickard	2022
		B5: Vorstellung der erzielten Ergebnisse: Jahresbericht Hahn-Schickard	2021
		B6: Transfer an Fachverbände, z. B. VDI, GKV, DGZfP, PlasticsEurope	2021
C	Veröffentlichung der Projektergebnisse	C1: Information der Mitglieder bzw. Kunden und Interessenten: Homepage Hahn-Schickard und IFAM	2021
		C2: Wissenschaftliche Publikation der Forschungsergebnisse in einer Fachzeitschrift, z.B. Journal für Oberflächentechnik und Beschichtung	2021
		C3: Präsentation auf Tagungen z. B. DGZfP-Tagungen	2021
D	Aufnahme der Ergebnisse in die Lehre, Aus- und Weiterbildung bzw. Durchführung von studentischen Arbeiten	D1: Ausbildung der Studenten verschiedener Studienrichtungen	Nach Abschluss des Projektes
		D2: Weiterbildungsangebote am IFAM (DVS®/EWF-Lehrgangssystem)	Nach Abschluss des Projektes

13. Danksagung

Das IGF-Vorhaben Nr. 20653 N der Forschungsvereinigung Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e. V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und –entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Für diese Förderung sei gedankt.

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

14. Literaturverzeichnis

- [1] NAUNDORF, G.; WISSBROCK, H. Leiterbahnstrukturen und Verfahren zu ihrer Herstellung. LPKF Laser & Electronics AG, Deutschland. Veröffentlichungsnr. European Patent Office - EP 1274288 B1
- [2] Franke, J.; Gausemeier, J.; Goth, C.; Dumitrescu, R.: MID-Studie 2011. Markt- und Technologieanalyse. Forschungsvereinigung Räumliche Elektronische Baugruppen 3-D MID e.V. Erlangen, 2011