

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR WERKSTOFF- UND STRAHLTECHNIK IWS

TEIL I: KURZBERICHT

CHIMERA – FUNKTIONALISIERUNG VON LASERSTRUKTURIERTEN FASER- KUNSTSTOFF-VERBUNDEN DURCH THERMISCHES SPRITZEN

IM AUFTRAG DES BMBF

Institutsleiter
Prof. Dr. Christoph Leyens

Projektleiter
Jana Gebauer, M.Sc.

Mitarbeiter
Stefan Scheitz, Dipl.-Ing. (FH)
Volker Franke, Dipl.-Ing. (FH)

GEFÖRDERT VOM

Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS
Dresden



**Bundesministerium
für Bildung
und Forschung**

Förderkennzeichen: 03XP0368E
ZE: Fraunhofer IWS
Projektnummer: 10-07544
Projektlaufzeit: 05/2021 – 07/2024
Berichtszeitraum: 05/2021 – 07/2024

Inhalt

1	Kurzbericht zum Projekt "Chimera"	3
1.1	Ausgangssituation und Aufgabenstellung	3
1.2	Ablauf des Vorhabens	3
1.3	Wesentliche Ergebnisse des Vorhabens	4

Kurzbericht zum Projekt "Chimera"

1.1 Ausgangssituation und Aufgabenstellung

Im Rahmen des Projektes "Chimera" verfolgte das Fraunhofer IWS das Ziel, zwei Technologien für einen effizienten Leichtbau aufzuskalieren und marktfähig zu machen: die laserbasierte Oberflächenvorbehandlung und das Beschichten mittels Thermischen Spritzens, insbesondere durch atmosphärisches Plasmaspritzen (APS).

Zu Beginn des Projektes war der Stand der Technik geprägt von langen Laserprozesszeiten und begrenzter Flexibilität in der Oberflächenbearbeitung von Faser-Kunststoff-Verbunden (FKV). Etablierte Vorbehandlungsverfahren (wie das Sandstrahlen) ermöglichen auf FKV (von wenigen Schichtmaterialien abgesehen) nur eine unzureichende Schichtanhaftung. In IWS-eigenen Vorarbeiten auf duroplastischem FKV konnte nachgewiesen werden, dass eine präzise Laservorbehandlung hohe Haftfestigkeiten von Spritzschichten ermöglicht. Offene Forschungsfragen waren die Übertragbarkeit der Prozesskette auf temperatursensible thermoplastische FKV, die signifikante Steigerung der Laserprozess-Geschwindigkeit sowie die Erweiterung der applizierbaren Schichtmaterialien und resultierenden Funktionen.

Das Projektziel umfasste:

- Anpassen der Laservorbehandlung und der APS-Beschichtungsverfahrens an das thermoplastische Substratmaterial und die Zielfunktion (elektromagnetische Abschirmung)
- Skalieren der Laser-Oberflächenvorbehandlung zur Verkürzung der Bearbeitungszeiten Übertragung auf 3D-Konturen
- Übertragung der Technologien auf verschiedene Materialien und die Entwicklung einer flexiblen Prozesskette für unterschiedliche Beschichtungsmaterialien

1.2 Ablauf des Vorhabens

An dem im Gesamtkonsortium festgelegten Substratmaterial (GF-PA6) erfolgten Untersuchungen zur Auswahl eines geeigneten Lasersystems und zum Erzeugen geeigneter Oberflächentexturen für eine feste Schichtanhaftung. In mehreren Iterationsschleifen wurden der Laservorbehandlungsprozess (insbesondere erzeugte Oberflächenstrukturen) und der APS-Spritzprozess schrittweise optimiert. Für die beim Projektpartner GfE Fremat ablaufende Beschichtungsentwicklung mittels Lichtbogen-drahtspritzens wurden laservorbehandelte Proben hergestellt. Die mechanische und funktionale Charakterisierung erfolgte durch die Projektpartner. Zur Prozessbeschleunigung der Laservorbehandlung wurde der Ansatz einer Vervielfachung der Laserleistung durch Parallelisierung genutzt. Durch Übertragung der Prozesse auf weitere Substratmaterialien sollten zusätzliche Anwendungsfälle eröffnet werden. Zur finalen Umsetzung der entwickelten Prozesskette auf dem dreidimensional geformten Gehäusebauteil, mussten für beide Prozesse Strategien und Vorrichtungen zum Bauteilhandling erarbeitet und erprobt werden.

1.3 Wesentliche Ergebnisse des Vorhabens

Kurzbericht zum Projekt
"Chimera"

- Für das schonende und präzise Strukturieren des thermoplastischen FKV-Materials aus GF-PA6 erwies sich ein Ultrakurzpuls-Laser (Pikosekunden-Pulse) mit einer Wellenlänge von 532 nm als besonders geeignet.
- Für die Sicherung einer hohen Schichtanhaftung wurde eine Kombination aus (voll)flächigem Aufrauen und gitterförmigen Grabenstrukturen als zielführend ermittelt.
- Insbesondere über die Dimensionierung der Grabenstrukturen kann Einfluss auf die Schichtanhaftung und die Ausbildung einer geschlossenen oder unterbrochenen Schicht (gitterförmig entlang der Grabenstrukturen) genommen werden.
- Für die finale Umsetzung wurden Grabenstrukturen mit ca. 100 µm Tiefe und 150 µm Abstand gewählt. Je nach Beschichtungsprozess können hieraus geschlossene aber auch gitterförmige Beschichtungen resultieren.
- Die angestrebte Funktion einer elektromagnetischen Abschirmung konnte sowohl mit flächig geschlossenen als auch gitterförmig ausgebildeten Spritzschichten erreicht werden.
- Im Rahmen des Projektes wurde der Laserprozess durch den Einsatz eines sechsfachen Strahlteilers parallelisiert (ein Laserstrahl → sechs Laserstrahlen bei Nutzung der sechsfachen Laserleistung), was die Prozessgeschwindigkeit um den Faktor 6 erhöhte. Die Flächenrate der Strukturierung lag bei ca. 17,5 cm²/min (verglichen mit 2,9 cm²/min beim Einzelstrahl). Eine weitere, deutliche Steigerung wird als machbar eingeschätzt.
- Am IWS erfolgte das Beschichten mittels APS-Verfahren und Kupfer als leitfähigen Schichtwerkstoff. Aufgrund der hohen elektrischen Leitfähigkeit des Kupfers waren auch gitterförmige Schichten geeignet um die Zielfunktion zu erreichen.
- Die erfolgreiche Beschichtung der dreidimensionalen Geometrie des Demonstrators - ein Gehäusedeckel - erfolgte durch eine segmentweise und lückenlose Laserbearbeitung mithilfe eigens entworfener Haltevorrichtungen sowie eine angepasste mehrstufige Beschichtungsstrategie.
- Die Prozesskette (Laservorbehandeln und Thermisches Spritzen) wurde erfolgreich auf glasfaserverstärktes Sheet-Mold-Compound (SMC) übertragen. Die Ergebnisse zeigen, dass auch auf diesem weit verbreiteten Substratmaterial vergleichbare Beschichtungsergebnisse erzielt werden können.
- Daneben wurde durch die lokale Laser-Aufrauhung und die APS-Beschichtung das lokal definierte und nachhaltige Beschichten nachgewiesen, womit zusätzliche Prozessschritte und Maskierungsmaterial eingespart werden kann.

Die Projektergebnisse wurden bereits auf mehreren Fachmessen, Kongressen und Fachzeitschriften veröffentlicht (u.a. JEC, Leichtbausymposium, ITSC, Symposium Verbundwerkstoffe, WT Werkstatttechnik)

Die enge Zusammenarbeit mit den Partnern fußt auf der Verzahnung der eigenen Entwicklungsarbeiten zur Oberflächenbearbeitung und Beschichtungsentwicklung am IWS, mit der Materialcharakterisierung und Kennwertermittlung bei den Partnern LiA und Centrotherm für die Simulationsmodellentwicklung bei Tecosim und der Schichtentwicklung mit einem alternativen Beschichtungsverfahren beim Partner GFE Fremat. In monatlichen Regeltermin erfolgte der Austausch und die Abstimmung untereinander, wodurch eine produktive Kollaboration im Projekt herrschte. Wir bedanken uns bei den Partnern für eine vertrauensvolle Zusammenarbeit.

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR WERKSTOFF- UND STRAHLTECHNIK IWS

TEIL II: EINGEHENDE DARSTELLUNG

CHIMERA – FUNKTIONALISIERUNG VON LASERSTRUKTURIERTEN FASER- KUNSTSTOFF-VERBUNDEN DURCH THERMISCHES SPRITZEN

IM AUFTRAG DES BMBF

Institutsleiter
Prof. Dr. Christoph Leyens

Projektleiter
Jana Gebauer, M.Sc.

Mitarbeiter
Stefan Scheitz, Dipl.-Ing. (FH)
Volker Franke, Dipl.-Ing. (FH)

GEFÖRDERT VOM

Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS
Dresden



**Bundesministerium
für Bildung
und Forschung**

Förderkennzeichen: 03XP0368E
ZE: Fraunhofer IWS
Projektnummer: 10-07544
Projektlaufzeit: 05/2021 – 07/2024
Berichtszeitraum: 05/2021 – 07/2024

Inhalt

1	Zielstellung	3
2	Wichtigste wissenschaftlich-technische Ergebnisse und andere wesentliche Ereignisse.....	4
2.1	Arbeitspaket 1 - Anforderungen an das Hybridsystem und Demonstrator	4
2.2	Arbeitspaket 2 - Oberflächenvorbehandlung durch Lasermikromaterialbearbeiten	4
2.2.1	Material- und Lasertechnische Voruntersuchungen	4
2.2.2	Materialangepasste Optimierung der Interfacegestaltung.....	4
2.2.3	Transfer auf alternative Materialien	7
2.2.4	Skalieren Laserabtrag	9
2.2.5	Übertragung auf komplexes Bauteil	10
2.3	Arbeitspaket 3 - Funktionalisierung mittels Thermischen Spritzens	12
2.3.1	Prozessmonitoring zur Qualitätssicherung für APS.....	12
2.3.2	Schichtentwicklung und Prozessvalidierung für APS an Oberflächenstrukturen.....	12
2.3.3	Transfer auf alternative Materialsysteme und Geometrien für Upscaling.....	17
2.3.4	Beschichtung eines Funktionsdemonstrators	18
2.4	Arbeitspaket 6 - Ergebnis- und Wissenstransfer in Wirtschaft und Gesellschaft	20
3	Vergleich des Vorhabenstands mit ursprünglicher Arbeits-/Zeit- und Kostenplanung	22
4	Rückblick auf Erreichung der Ziele	23
5	FE-Ergebnisse Dritter	24
6	Fortschreibung des Verwertungsplans	25
6.1	Erfindungen/ Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte.....	25
6.2	Wirtschaftliche Erfolgsaussichten	25
6.3	Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten.....	25
6.4	Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit.....	26

1 Zielstellung

Im Rahmen des Projektes "Chimera" verfolgte das Fraunhofer IWS das Ziel, für einen effizienten Leichtbau zwei seiner Technologien aufzuskalieren und dadurch marktfähig zu machen. Hierbei handelte es sich um die laserbasierte Oberflächenvorbehandlung sowie das Beschichten mittels Thermischen Spritzens, wobei letzteres am Beispiel des atmosphärischen Plasmaspritzens (APS) erläutert wurde.

Daraus leiteten sich folgende technologische Teilziele ab:

- Anpassen des Laserbearbeitungsprozesses an im Projekt ausgewähltes Substratmaterial und Beschichtung
- Anpassen des Laserbearbeitungsprozesses an ein alternatives Substratmaterial zum Nachweis der Transferfähigkeit
- Aufskalieren des Laserprozesses zum Verkürzen der Bearbeitungsdauer
- Prozessauslegung und Bearbeitung von komplexen 3-dimensionalen Funktionsdemonstratoren
- Anpassen des Beschichtungsprozesses an im Projekt ausgewähltes Substrat- und Schichtmaterial
- Einführen einer datenbankbasierten Dokumentation für das Prozessmonitoring und zur Qualitätssicherung
- Nachweis der Möglichkeit zum selektiven, maskenfreien Beschichten
- Übertragen und Anpassen des Beschichtungsprozesses an komplexe Geometrien und alternative Materialien
- Beschichten von komplexen 3-dimensionalen Funktionsdemonstratoren
- Auswertung und Interpretation von Prüfergebnissen des Prüfkonzepts zur Festigkeitsermittlung

2

Wichtigste wissenschaftlich-technische Ergebnisse und andere wesentliche Ereignisse

Wichtigste wissenschaftlich-technische Ergebnisse und andere wesentliche Ereignisse

2.1 Arbeitspaket 1 - Anforderungen an das Hybridsystem und Demonstrator

Durch Analyse der Vorarbeiten des IWS im Bereich Laserstrukturieren von FKV und Thermischem Spritzen wurden für die Materialauswahl des FKV-Substrates im Projekt folgende Randbedingungen aufgestellt:

- Die Kunststoffmatrix sollte zur Erhöhung der Laser-Strahlungs-Absorption mit Ruß eingefärbt sein um ggf. einen selektiven Abtrag der Matrix zu ermöglichen ohne die Glasfasern zu beschädigen.
- Die Materialdicke des Substrates sollte 2 mm nicht unterschreiten, damit Bauteilverzug im Thermischen Spritzprozess vermieden werden kann.

2.2 Arbeitspaket 2 - Oberflächenvorbehandlung durch Lasermikromaterialbearbeiten

2.2.1 Material- und Lasertechnische Voruntersuchungen

Basierend auf spektroskopischen Untersuchungen (FTIR Messungen) und initialen vergleichenden Voruntersuchungen mit 4 unterschiedlichen Lasersystemen konnte ein Vorzugs-Lasersetup ermittelt werden. Mit einem Pikosekunden-Laser einer Wellenlänge von 532 nm war es möglich reproduzierbare, definierte Grabenstrukturen mit vernachlässigbaren Schmelzeffekten in unterschiedlichen Varianten des thermoplastischen FKV-Materials (GF-PA6) zu erzeugen. Dieses Lasersetup verfügt darüber hinaus über ausreichende Leistungsreserven für das spätere Aufskalieren des Prozesses.

2.2.2 Materialangepasste Optimierung der Interfacegestaltung

Mit dem ausgewählten Lasersystem und Versuchssetup erfolgten Untersuchungen zum Erzeugen von unterschiedlich ausgeprägten Oberflächenstrukturen auf dem GF-PA6-Substrat sowie deren Wirkung auf die Schichtanhaftung am Substrat. Basierend auf Vorarbeiten können folgende drei Grundstrukturen unterschieden werden: a) oberflächennahe Faserfreilegung durch selektiven Abtrag der Kunststoffmatrix, b) Aufrauen der FKV-Oberfläche durch einen vollflächigen Materialabtrag und c) Grabenstrukturen durch lokalen Abtrag von Matrix und Verstärkungsfasern.

Durch Variation von Laser- und Prozessparametern können der Grad der Faserfreilegung bzw. Aufrauung sowie die Dimensionen der Grabenstrukturen (Breite, Tiefe, Abstand und Anordnung) eingestellt werden. Die Grabenbreite an der Substratoberfläche wird primär durch das Optiksetup und in geringerem Maße von den Laserparametern bestimmt und lag in den Untersuchungen bei ca. 30-40 μm . Der Schwerpunkt der Untersuchungen lag auf einer Kombination aus Aufrauen und gekreuzten Grabenstrukturen mit unterschiedlichen Grabenabständen und -tiefen. Über die Variation der Prozessparameter wurden hierbei Grabentiefen im Bereich von ca. 50 bis 150 μm und Grabenabstände zwischen 150 und 300 μm erzeugt. Die resultierenden Grabentiefen auf dem Substratmaterial unterliegen merklichen Schwankungen (bedingt durch das anisotrope Material mit schwankendem Aufkommen von Verstärkungsfasern und Matrix). Aus diesem Grund sind die angegebenen Grabentiefen immer ein

gemittelter Messwert. Es wurde sowohl mit als auch ohne zusätzliches, vollflächiges Aufrauen gearbeitet. Als Referenz dienten in den Untersuchungen Proben, die entsprechend dem Stand der Technik durch mechanisches Strahlen vorbehandelt wurden. Die Bewertung der Proben erfolgte nach dem Beschichtungsprozess hinsichtlich Bedeckung der Substratoberfläche (geschlossene oder lückenhafte (offene) Beschichtung) sowie anhand von Querschliffen (Einbettung der Spritzpartikel in die Oberflächenstrukturen).

Wichtigste wissenschaftlich-technische Ergebnisse und andere wesentliche Ereignisse

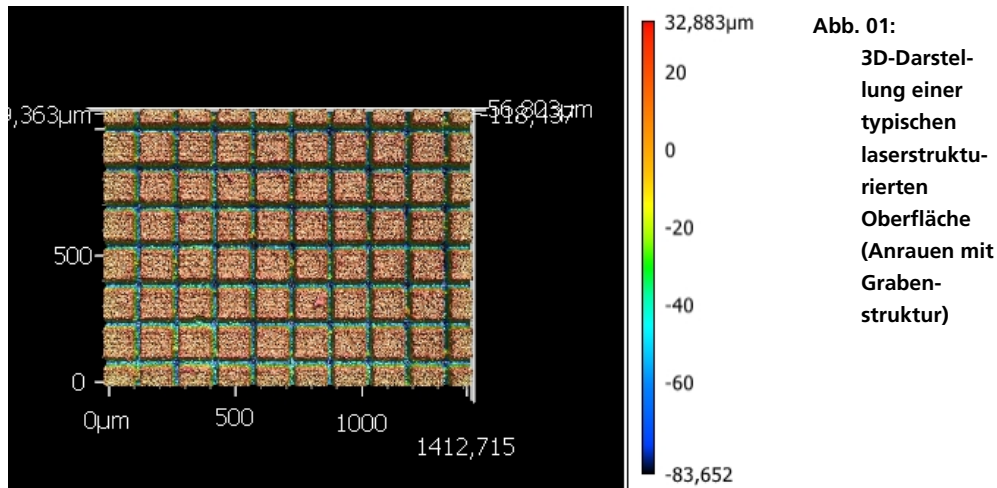


Abb. 01:
3D-Darstellung einer typischen laserstrukturierten Oberfläche (Anrauen mit Grabenstruktur)

Grabentiefe 100 µm, Grabenabstand 150 µm

Folgende grundlegenden Erkenntnisse konnten abgeleitet werden:

- Je kleiner der Grabenabstand desto weniger Lücken resultieren in der Beschichtung
- Je größer die Grabentiefe desto höher ist die benötigte Anzahl an Beschichtungszyklen um die gesamte strukturierte Fläche mit Kupfer zu bedecken
- Ein Verzicht auf das Anrauen vor der Gitterstruktur verhindert weitgehend eine vollflächige Beschichtung. Das Kupfer lagert sich in den Gräben ab und verdeckt vom Graben ausgehend zunehmend die unstrukturierten Bereiche zwischen den Gräben (»Brückenbildung«).

Für die im Rahmen der Entwicklungen zu bestimmenden Haftkennwerte der Beschichtung zum Substrat, war eine vollflächige Beschichtung erforderlich. Für die Zielfunktion der elektromagnetischen Abschirmung ist nicht zwingend eine vollflächige Benetzung mit Metall erforderlich.

Im Verlauf des Projektes war es aufgrund technischer Defekte an Lasersystemen notwendig die zur Durchführung der Arbeiten verwendete Systemtechnik und die Prozesse mehrfach anzupassen, um vergleichbare Oberflächentexturen auf dem Substratmaterial zu realisieren. Hieraus resultierte u.a. die erforderliche Verlängerung der Projektlaufzeit.

Die finalen Untersuchungen zur Laserbearbeitung erfolgte mit folgenden Systemeigenschaften und Prozessparametern:

VIS Pikosekunden-Laser:

- Wellenlänge: 532 nm
- Maximale Leistung (bei 532 nm): 120 W
- Brennweite: 250 mm
- Pulsdauer: 10 ps

Folgende Parameter wurden mit diesem Lasersystem für die Laserstrukturierung (mit dem Einzelstrahl) verwendet:

	Laser-Anrauen	Gitterstruktur
■ Leistung:	3,3 W	6,5 W
■ Scangeschwindigkeit:	1,0 m/s	0,65 m/s
■ Repetitionsrate:	80 kHz	200 kHz
■ Anzahl Überfahrten:	1	variabel entsprechend angestrebter Grabentiefe

Mit dem erarbeiteten Laserprozess erfolgte die Vorbehandlung von verschiedenen Proben für die Untersuchungen im Projekt (u.a. Scherzugproben, Schulterzugproben, Biegeproben, Proben für Messungen der elektromagnetischen Schirmung) wobei die Strukturen im weiter oben genannten Bereich variiert wurden.

Im Lauf des Projektes wurde eine Strukturvariante mit ca. 100 µm Grabentiefe und 150 µm Grabenabstand als für die Anforderungen geeignet ermittelt und für die Herstellung der finalen Proben und Demonstratoren angewandt.

Für die Untersuchungen zur Auflösungsgenauigkeit des maskenfrien Beschichtens wurden definierte Strukturmuster mit variierender Breite und Abständen zwischen den strukturierten Bereichen hergestellt. Es wurden zwei verschiedene Musterplatten entwickelt und später durch Atmosphärischen Plasmaspritzen (APS) und durch Lichtbogendrahtspritzen (LDS) beschichtet. Musterplatte 1 umfasste Linien konstanter Breite von 100 µm und stufenweise zunehmendem Linienabstand zwischen 0,25 und 5 mm. Die Musterplatte 2 bildete unterschiedliche Linienbreiten zwischen 0,01 und 3,00 mm ab.

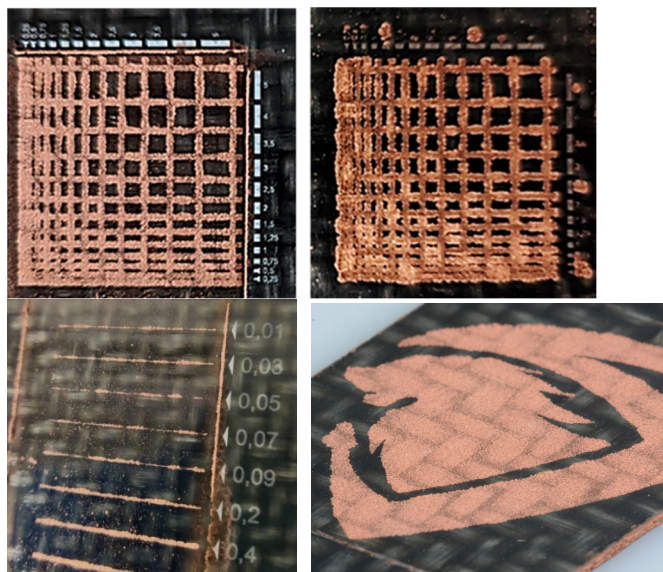


Abb. 02:
Musterplatten
zur
Bestimmung
der
Auflösungs-
genauigkeit
beim
maskenfrien
Beschichten,
Demonstrator
mit
Projektlogo

Variation Strukturabstand oben links und oben rechts,
Variation Linienbreite unten links und 2D-Abbild unten rechts (jeweils APS-Cu)

Der Mindestabstand der Laserstrukturen für eine separierte Beschichtung beträgt bei APS 1,25 mm und bei LDS 1,0 mm. Die Mindestbreite der Laserstruktur sollte für beide Verfahren 0,2 mm betragen, damit eine durchgängige, leitfähige Schichtabscheidung erzielt wird. Diese Werte können zukünftig zur Auslegung und Design von neuen Anwendungen genutzt werden – z.B. Designelemente oder elektrische Leitbahnen. Zur Veranschaulichung der gestalterischen Möglichkeiten durch das maskenfrie Beschichten, wurde auf Demonstratorbauteilen das Projektlogo appliziert.

2.2.3 Transfer auf alternative Materialien

Das sogenannte Sheet Mould Compound (SMC) ist ein sehr kostengünstiges Verbundmaterial welches breite Verwendung bei Schalt- und Verteilerkästen sowie Verkleidungsteilen findet. Als Alternative zum GF-PA6 wurde SMC mit den Produktnamen Menzolit SMC 0170 ausgewählt. Es besteht aus einem ungesättigten Polyesterharz, welches zu 35 % mit Glasfasern gefüllt ist. Auf dem SMC wurden insgesamt zwölf verschiedene Teststrukturen als Oberflächenvorbehandlung erzeugt und je ein Probekörper für die verschiedenen Beschichtungsverfahren zur Verfügung gestellt. Abbildung 03 zeigt die Feldnummerierung (links), die entsprechend vorbehandelte (Mitte) und anschließend mittels APS-Verfahren Kupfer-beschichtete Oberfläche (rechts).

Wichtigste wissenschaftlich-technische Ergebnisse und andere wesentliche Ereignisse

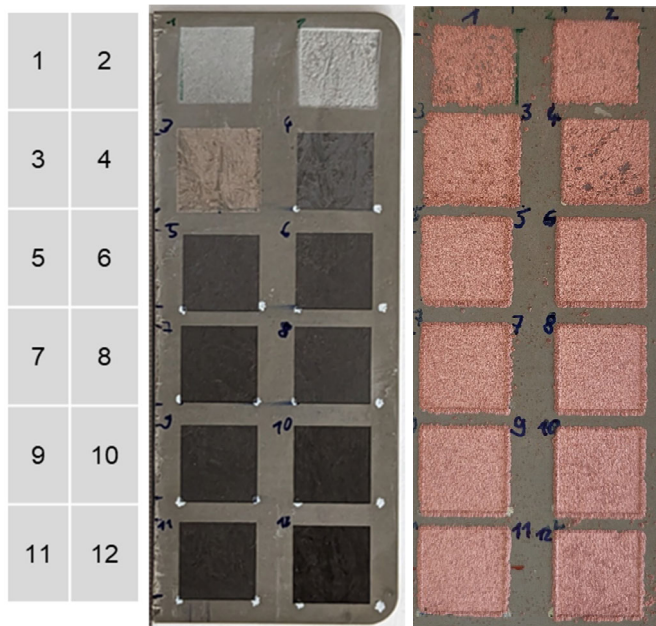


Abb. 03:
Transferversuche
mit APS auf SMC-
Probe
links:
Feld-
nummerierung
mittig:
SMC
laserstrukturiert
rechts:
SMC mit Kupfer
beschichtet

Die Felder entsprechen den folgenden Oberflächenvorbehandlungen:

- **Feld 1** und **2** Mechanisches Strahlen mit 2,5 und 3,0 bar Druck,
- **Feld 3** und **4** Anrauen mit CO₂-Laser (10,6 µm Wellenlänge) und Nd:YAG Laser mit 355 nm Wellenlänge,
- **Feld 5** bis **12** Kombinierte Strukturen aus Anrauen und Gitterstruktur bei konstant 200 µm Grabenabstand, mit Grabentiefen von 100, 150 oder 200 µm und Grabenbreiten von 50, 70 oder 90 µm.

Gemäß der optischen Charakterisierung im Lichtmikroskop weisen die mechanisch gestrahlten (Strukturfelder 1 und 2) und die laser-angerauten Oberflächen (Felder 3 und 4) eine lückenhafte Schicht auf. Mit höherem Strahlendruck (Feld 2) nimmt die Benetzung zu. Die Grabenstrukturen mit geringer Tiefe (T) und Breite (B) bilden homogene geschlossene Kupferbeschichtung aus (T 100 µm / B 50 µm , T 100 µm / B 70 µm , T 150 µm / B 50 µm (Felder 5, 6 und 7)). Bei größeren Grabenstrukturen mit höheren Tiefen und Breiten bilden sich ebenfalls geschlossene Schichten, jedoch mit erhöhter Unebenheit bei der sich merklich die Laserstruktur abzeichnet (Felder 8 bis 12).

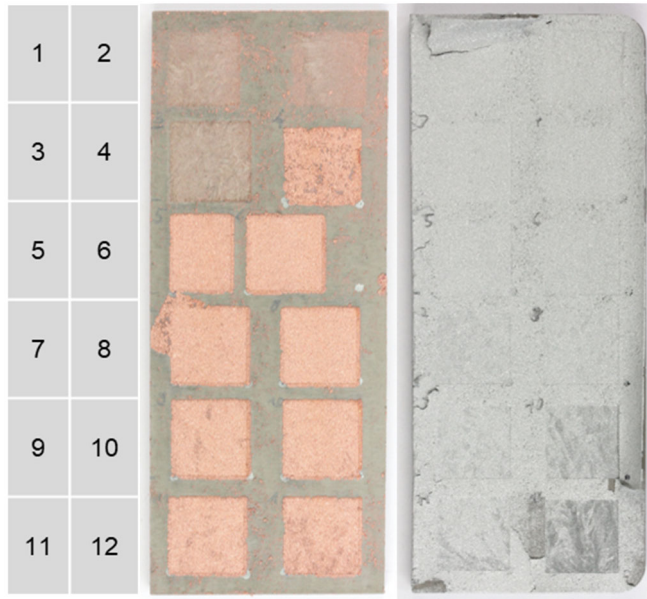


Abb. 04:
LDS-beschichtetes
SMC
links:
Feldnummerierung
mittig:
mit LDS Cu
beschichtet
rechts:
mit LDS Zn
beschichtet

Wichtigste wissenschaftlich-
 technische Ergebnisse und andere
 wesentliche Ereignisse

Die Ergebnisse des mittels LDS-Verfahren Kupfer-beschichteten SMC (Abbildung 04, mittig) zeigen ein sehr ähnliches Bild. Jedoch ist die Grabenbreite von 50 µm nicht immer ausreichend um alle Gräben mit Kupfer vollständig aufzufüllen wie Querschliffuntersuchungen zeigten. Zink (Abbildung 04, rechts) benetzt hingegen alle Oberflächenstrukturen. Auf der sandgestrahlten Oberfläche mit 2,5 bar (Feld 1) entstehen Spannungsrisse, welche zum Ablösen der Schicht führen. Genauere Ergebnisse siehe Entwicklungsarbeiten im Abschlussbericht GfE Fremat.

Die optische Charakterisierung mittels Querschliffen (beispielhaft in Abbildung 05) zeigt, dass bei den kombinierten Laserstrukturen aus Anrauen und Gitterstrukturen mit 200 µm Grabenabstand und 100 bzw. 150 µm Grabentiefe gleichmäßige und geschlossene Kupferbeschichtungen produziert werden konnten.

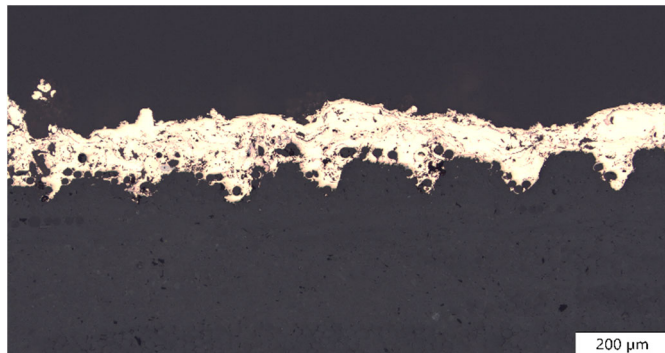


Abb. 05:
APS-Cu-
Beschichtung auf
Laserstrukturen mit
200 µm Grabenab-
stand und 150 µm
Grabentiefe

Im Projekt konnte demonstriert werden, dass auch auf alternativen FKV Substratmaterialien vergleichbare Beschichtungsergebnisse erzielt werden können wie auf GF-PA6. Hierfür müssen die Laserprozesse und die damit erzeugten Oberflächenstrukturen leicht angepasst werden. Die Kombination aus Laser-Aufräumen und Grabenstrukturen erwies sich ebenfalls als besonders günstig.

2.2.4 Skalieren Laserabtrag

Wichtigste wissenschaftlich-technische Ergebnisse und andere wesentliche Ereignisse

Die bisher beschriebene Prozessentwicklung der Laserstrukturierung erfolgte mit einem einzelnen fokussierten Laserstrahl mit dem alle Grabenstrukturen seriell in die Werkstückoberfläche geschrieben werden. Grundsätzlich lässt sich der Materialabtrag und damit die Prozessgeschwindigkeit erhöhen indem die Laserleistung erhöht wird. Dies führt allerdings zu einer erhöhten lokalen Wärmeeinbringung im Bearbeitungsfleck, was unerwünschte Schäden am Material nach sich ziehen kann. Ein alternativer Weg (insbesondere bei wiederkehrenden Strukturen) ist es den Prozess zu parallelisieren indem mit mehreren Laserstrahlen parallel gearbeitet wird. Hierdurch bleibt der Prozess im jeweiligen Einzelstrahl im optimalen Bereich, während in selber Zeit ein Vielfaches der Laserleistung auf eine größere Fläche appliziert werden kann. Die resultierende, erhöhte Wärmeeinbringung verteilt sich hierdurch ebenfalls auf eine größere Fläche wodurch das Risiko einer Materialschädigung sinkt. Für die Strahlaufteilung zur Verkürzung der Bearbeitungsdauer können optische Elemente (sogenannte diffraktive optische Elemente DOEs) in den Strahlengang eingebaut werden. Für die Prozessskalierung wurde im Projekt ein eindimensionaler sechsfach-Strahlteiler beschafft, welcher die in Abbildung 06 dargestellte Energieverteilung aufweist und in den Strahlengang vor dem Scanner integriert wurde. Hierdurch wurde angestrebt die sechsfache Laserleistung anwenden und damit die sechsfache Prozessgeschwindigkeit realisieren zu können. Ein geringer Teil (typisch < 15 %) der Laserleistung befindet sich prinzipbedingt in sogenannten Nebenordnungen (schwache Strahlanteile außerhalb der 6 Laserstrahlen). Dies muss durch zusätzliche Laserleistung ausgeglichen werden, so dass in den Teilstrahlen wieder die zuvor ermittelten Leistungen vorliegen. Das DOE wurde so gewählt und eingestellt, dass auf dem Werkstück ein Abstand zwischen den Teilstrahlen von 300 μm resultiert (quer zur Vorschubrichtung). Durch einen programmierbaren Versatz von 150 μm zwischen den erzeugten Spuren kann der gewünschte Grabenabstand von 150 μm realisiert werden. Diese zeitlich versetzte Erzeugung der 150 μm entfernten Gräben führt zu einer zeitlichen Verteilung der Wärmeeinbringung und folglich zu niedrigeren Substrattemperaturen. Für das Schreiben von gekreuzten Grabenstrukturen wird entweder das Bauteil oder das DOE im Strahlengang um 90° gedreht.

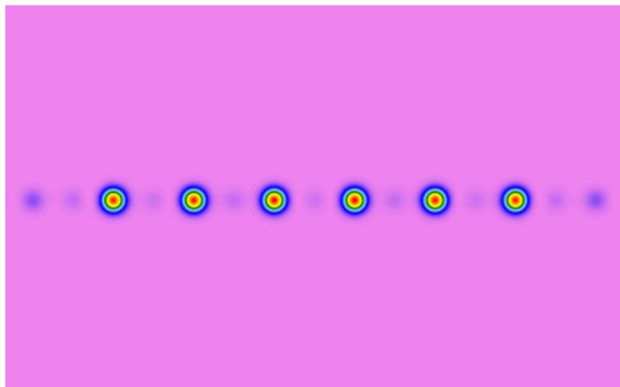


Abb. 06:
Energieverteilung
unter Verwendung
des
eindimensionalen
Strahlteilers
(1:6 DOE) © Topag

In den experimentellen Untersuchungen wurde geprüft ob sich die eng benachbarten Strukturierungsprozesse der Teilstrahlen merklich beeinflussen und ob die Laserleistung der Nebenordnungen zu deutlichen Erwärmungen im Material führen. Die Experimente wurden deshalb auch mit Thermografiemessungen begleitet, wofür ein geeignetes Kamerasystem genutzt wurde (InfraTec VarioCAM HD head 800). Die Entwicklungsarbeiten konzentrierten sich primär auf die Variation von Scan-Regimen und damit zur zeitlichen und flächigen Verteilung der eingebrachten Laserleistung. Im Ergebnis konnten die Strukturierungsparameter so gewählt werden, dass in jedem Teilstrahl die gleiche Laserleistung vorlag wie in den Untersuchungen mit Einzelstrahl. Die resultierenden Strukturen entsprachen denen der vorangegangenen Entwicklung

wobei die Prozessgeschwindigkeit auf das Sechsfache gesteigert wurde. Die Flächenrate der Grabenstrukturierung mit DOE lag bei ca. 17,5 cm²/min (verglichen mit 2,9 cm²/min beim Einzelstrahl). Die während der Bearbeitung größerer Flächen (größer als 5x5 cm²) gemessenen Bauteiltemperaturen blieben deutlich unterhalb von 100 °C und damit auch in für das Material unkritischen Werten. Eine zusätzliche Kühlung (z.B. durch Druckluft) ist nicht erforderlich. Bei kleinen Testfeldern (z.B. 1x1 cm²) wurde durch das Einfügen von (Abkühl-)Pausen zwischen den Wiederholungen einer übermäßigen Erwärmung entgegengewirkt. Aufgrund der Ergebnisse kann angenommen werden, dass zukünftig eine weitere deutliche Skalierung bzw. Beschleunigung der Laserstrukturierung realisierbar sein wird. Hierfür wären weitere Anpassungen am Optiksetup (angepasstes DOE) und weitergehende Optimierungen der Prozessführung erforderlich. Die ermittelten Prozesskennwerte wurden aufbereitet und dem Projektpartner Centrotherm für die Wirtschaftlichkeitsanalyse (AP6) bereitgestellt.

2.2.5 Übertragung auf komplexes Bauteil

Für die Bearbeitung der kompletten Innenseite des Demonstrators wurde ein segmentweises Vorgehen gewählt. Die Oberfläche wurde dafür in Segmente unterteilt welche sich planparallel zur Bearbeitungsebene des Scanners ausrichten und vom Strahl möglichst senkrecht von oben erreichen lassen. In Untersuchungen wurden gezielt in definiertem Abstand außerhalb der optimalen Fokusslage strukturiert und die resultierenden Grabenstrukturen anschließend vermessen. Mit dem verwendeten Setup führen Defokussierungen bis ca. +/- 0,5 mm zu keiner signifikanten Veränderung in der resultierenden Strukturierungstiefe. Basierend auf Strukturvermessungen an verschiedenen Stellen des maximal 170x170 mm² großen Arbeitsfeld des Scanners wurde festgelegt, dass das Arbeitsfeld bis maximal 150x150 mm² ausgenutzt werden kann. Die so ermittelten Beschränkungen wurden bei der Aufteilung der zu strukturierenden Bauteiloberfläche berücksichtigt. Hieraus resultierte eine Aufteilung in 14 Teilsegmente (8 Teilflächen an den Schrägen, 2 Teilflächen am Bauteilboden und 4 Teilflächen auf dem Bauteilrand). Benachbarte Segmentflächen erstrecken sich bis in die sie begrenzenden Rundungen des Bauteils hinein, und überlappen sich dort geringfügig (ca. 1 mm) mit dem benachbarten Segment. Hierdurch wird auch bei fertigungsbedingten Toleranzen eine lückenlose Bearbeitung der Gesamtfläche erreicht. Für die reproduzierbare Aufnahme und Positionierung der Demonstratorbauteile in den jeweiligen Ausrichtungen wurden 4 wechselbare Halterungen konstruiert und per 3D Druck aus Kunststoff gefertigt. Der Bauteilwechsel erfolgte von Hand. Mit dem beschriebenen Setup und Vorgehen erfolgte abschließend die Bearbeitung von ca. 20 Funktionsdemonstratoren für die anschließende Beschichtung.

Ein abgeleitetes Konzept für eine zukünftige Umsetzung der Laservorbereitung in einem automatisierten Prozess basiert ebenfalls auf dem Grundprinzip einer feststehenden Laserbearbeitungseinheit und einem bewegten Bauteil. Grund hierfür ist insbesondere, dass die eingesetzte Lasertechnik auf spiegelgeführten Freistrahlen basiert deren bewegliche Ausrichtung auf ein komplex geformtes Bauteil anspruchsvoller ist als eine flexibel programmierbare Handhabung des Bauteils selbst. Grundsätzlich sind sowohl Roboter als auch 4- bzw. 5-Achssysteme für die Positionierung von 3D-Bauteilen mit einigen Zehntel Millimetern Genauigkeit geeignet. In beiden Fällen muss eine bauteilspezifische Aufnahme (z.B. Greifer) erstellt werden. Zur Bearbeitung der dreidimensionalen Bauteiloberflächen wird diese je nach Komplexität der Form ebenfalls in Segmente unterteilt. Der Laserscanner kann durch eine zusätzliche Scanner-Z-Achse

erweitert werden, wodurch der Scanner Segmente auch in einem begrenzten Volumen strukturieren kann. Hierdurch kann die Anzahl der Segmente reduziert und der Übergang zwischen den Segmentflächen verbessert werden. Neben dem Lasersystem (einschließlich Strahlformung und Scanneroptik) sind als wesentliche Anlagenkomponenten das Handlingsystem (z.B. Roboter), eine Einhausung (Arbeitssicherheit) sowie eine Absaugung (Erfassen und Filtern der Ablationsprodukte) vorzusehen. Als wesentliche Verbrauchsmedien müssen elektrische Energie sowie Filter (für die Absaugung) einkalkuliert werden.

Wichtigste wissenschaftlich-technische Ergebnisse und andere wesentliche Ereignisse

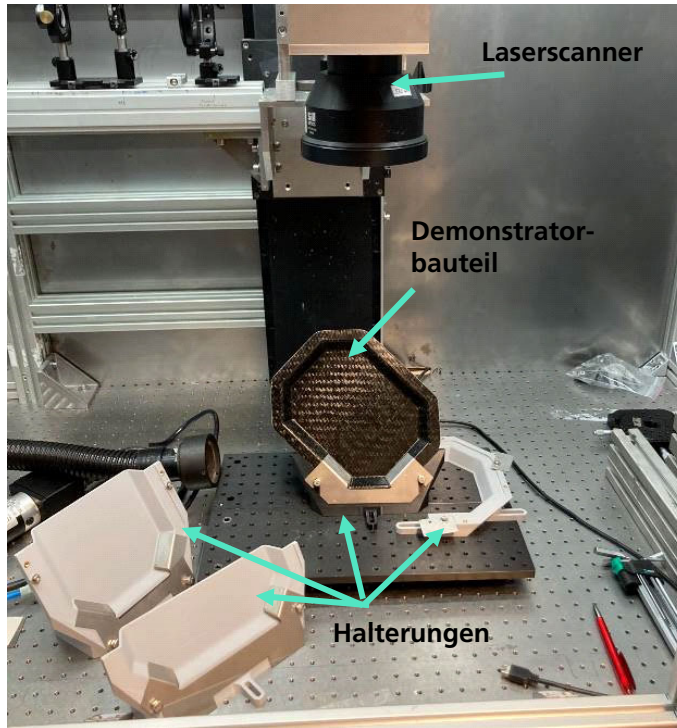


Abb. 07:
3D gedruckte Halteungen zur Aufnahme des Funktionsdemonstrators in der Laseranlage

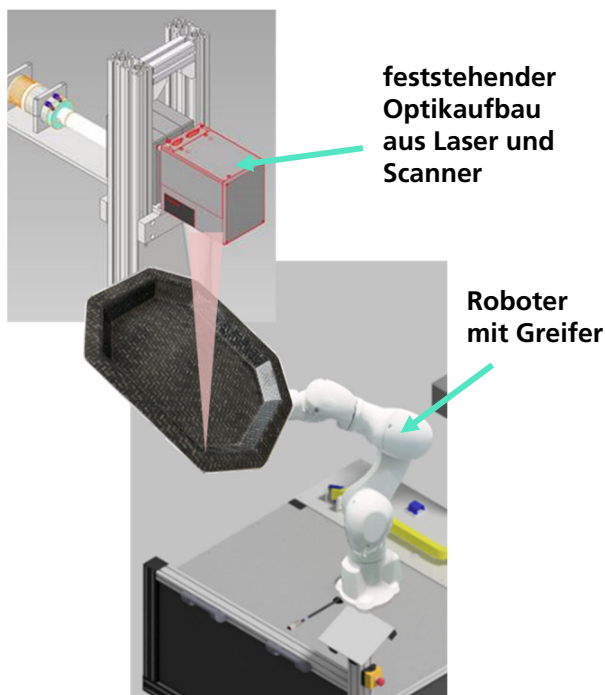


Abb. 08:
vereinfachte Konzeptdarstellung für Bauteilbearbeitung in automatisierter Laseranlage

2.3 Arbeitspaket 3 - Funktionalisierung mittels Thermischen Spritzens

Wichtigste wissenschaftlich-technische Ergebnisse und andere wesentliche Ereignisse

Im Folgenden werden die Projektinhalte und -ergebnisse der Arbeitsgruppe "Thermisches Spritzen" am Fraunhofer IWS präsentiert. Die Ausführungen zu den Themen Prozess-Monitoring und Qualitätssicherung beziehen sich dabei auf die Arbeiten mit dem APS-Prozess. Projektinhalte zum LDS-Prozess werden im Abschlussbericht der Partner von GfE Fremat vorgestellt.

2.3.1 Prozessmonitoring zur Qualitätssicherung für APS

Für jeden durchgeführten Beschichtungsprozess wurden Beschichtungsprotokolle angefertigt und in einer Probandatenbank hinterlegt. In dieser Dokumentation werden sowohl alle relevanten Prozesseinstellungen (z.B. Gaseinstellungen, Plasmaspannung, Kühlluftfeinstellung, Probenhandling etc.) als auch relevante Sensordaten und Messwerte (z.B. Daten der Gasdurchflussmesser, Oberflächentemperatur, Auftragsrate etc.) abgelegt. Zudem werden die entsprechenden Parameter der Laserstrukturierung abgelegt, um anschließend Rückschlüsse von der Oberflächenvorbereitung auf die Schichtanhaftung bzw. -qualität ziehen zu können. Abbildung 09 zeigt einen Ausschnitt der SQL-Probandatenbank. Protokolle, APS-Prozessparameter, Pulverdaten und Charakterisierungsdaten sind über die Oberfläche der Probenanzeige (Spalten) direkt verlinkt.

Anzeigeparameter	Probennummer	240030AM01	240029AM24	240028AM28
<input checked="" type="checkbox"/> Probennummer	Datum	27.06.2024	26.06.2024	25.06.2024
<input checked="" type="checkbox"/> Grundwerkstoff	Verfahren	GF-PA6	GF-PA6	GF-PA6
<input checked="" type="checkbox"/> Parametersatz	Projekt	A	A	A
<input checked="" type="checkbox"/> Bearbeiter	Parametersatz	AP211839AM	AP211839AM	AP211839AM
<input type="checkbox"/> Bemerkungen	Projekt	HyMat2 - CHIMERA	HyMat2 - CHIMERA	HyMat2 - CHIMERA
<input type="checkbox"/> Pulver	Bearbeiter	scheitz	scheitz	scheitz
<input type="checkbox"/> Oberflächenvorbereitung	Bemerkungen	DIN A4 Scratchtest	01-04 AR_GS_150-150 05-08 AR_GS_150-100/09-16 AR_GS_200-100/17-24 AR_GS_150-50	01-20 80x25 mm Zugproben 28-30 ACHTUNG
<input type="checkbox"/> alles	Bearbeitungsprotokoll	Ordner öffnen	Ordner öffnen	Ordner öffnen
	Pulver	P210948M	P210948M	P210948M
	Schichtwerkstoff	Cu	Cu	Cu
	Handelsname	Metco 55	Metco 55	Metco 55
	Lot-Nr.	22WP05514	22WP05514	22WP05514
	Oberflächenvorbereitung	Direktbeschichtung	Direktbeschichtung	Direktbeschichtung
	Strahldruck Bearb.			
	sonstiges			
	vergleichen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	bearbeiten	240030AM01 ändern	240029AM24 ändern	240028AM28 ändern
	kopieren	240030AM01 kopieren	240029AM24 kopieren	240028AM28 kopieren
	löschen	240030AM01 löschen	240029AM24 löschen	240028AM28 löschen

Abb. 09: Ausschnitt der Probandatenbank für Prozessmonitoring

2.3.2 Schichtentwicklung und Prozessvalidierung für APS an Oberflächenstrukturen

Verwendet wurde kommerziell erhältliches Kupferpulver (Metco 55 von der Fa. Oerlikon Metco) um eine Beschichtung mittels APS auf den FVK-Proben abzubilden, die elektrisch leitfähige und schützende Eigenschaften gegen elektromagnetische Strahlung aufweist. Für die Schichtentwicklung wurde ein APS-Prozess (F6-Spritzpistole der Fa GTV GmbH) mit Argon-Wasserstoff (Ar/H₂) Plasmagasen an die Anforderungen des temperatursensitiven Grundmaterials angepasst.

Durch eine Adaption der Prozessparameter (Plasmagas, Spritzabstand und Kühlluftfeinstellung) wurde die Entwicklung einer Beschichtungsstrategie durchgeführt. Ausgangspunkt der Entwicklungsarbeiten waren GF-PA6-Proben - entsprechend der Anforderungen aus Arbeitspaket 1: KingPly-Platten der Firma Kingfa mit UD-Gelege. Abbildung 10 zeigt Beschichtungsversuche auf KingPly Proben.

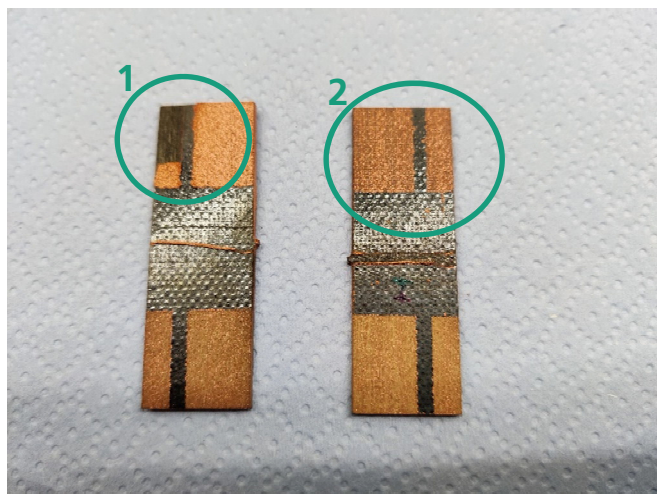


Abb. 10:
Beschichtete KingPly Proben mit Schichtablösung (1), offene Schicht (2) und Oxidation der Schicht (dunkle Bereiche)

Wichtigste wissenschaftlich-technische Ergebnisse und andere wesentliche Ereignisse

Aus den Ergebnissen wurden weitere Entwicklungsschritte zur **a) Vermeidung von Schichtablösungen, b) offenen Schichtoberflächen** und **c) Reduzierung der Oxidation** der Cu-Beschichtung abgeleitet. Davon ausgehend wurden die Einflüsse der Parameter Spritzabstand, Plasmagasmenge, Kühlstrategie und Pulverförderrate untersucht. Durch Festlegungen zur Materialauswahl in Arbeitspaket 1, wurden die GF-PA6-Proben um Tepex-Material der Fa. Bond Laminates mit Leinwand und Körperbindung erweitert. Neben der Schichtanbindung an den strukturierten Flächen wurde auch das maskenfreie Beschichten, d.h. Schichtanhaftung ausschließlich auf den strukturierten Bereichen, untersucht. Darüber hinaus wurde am Beispiel von strukturierten SMC-Proben (Menzolit SMC 0170) der Transfer der entwickelten APS-Beschichtung auf alternativen Materialien nachgewiesen.

Die APS-Prozessentwicklung zur flächendeckenden Cu-Beschichtung erfolgte iterativ mit den Entwicklungsarbeiten zur Oberflächenstrukturierung in Arbeitspaket 2. Zusammen mit den in Arbeitspaket 4 untersuchten mechanischen Kennwerte wurden optimierte Oberflächenstrukturen (vgl. Punkt 2.2.2) und Beschichtungsparameter ermittelt. Abbildung 11 stellt die ermittelten Prozessparameter für APS-Cu dar.

Parameter	Wert
Plasmaleistung [kW]	28
Spritzabstand [mm]	100
Plasmagasmenge Ar-H ₂ [l/min]	52
Pulverförderrate [g/min]	20
Pulverfördergas [l/min]	3,2
Pulverfraktion d ₁₀ ,d ₉₀ [µm]	-90 +38
Pulver [-]	Cu 99 (Metco 55)

Abb. 11:
Beschichtungsparameter für APS-Cu für GF-PA6

Die Beschichtungsstrategie für GF-PA-6-Platten (2D Geometrie) setzt sich aus den oben genannten Beschichtungsparametern sowie der Bewegungs- und Kühlstrategie zusammen. Die Bewegungsstrategie besteht aus einer linearen Bewegung der Spritzpistole, senkrecht zur strukturierten Oberfläche. Bei einer Oberflächengeschwindigkeit von 50 m/min wird auf angerauten Gitterstrukturen, mit z.B. 150 µm (AR_GS_150) oder 200 µm Grabenabstand (AR_GS_200) nach 6 Überfahrten eine nahezu blickdichte Schicht erzeugt (Abbildung 12). An die temperatursensitiven GF-PA6 Proben wurde die Kühlstrategie erfolgreich angepasst. Eine axiale Kühlung an der

Spritzpistole mit mindestens zwei Kühldüsen und eine Beschichtungspause von ca. 60 s nach jeder zweiten Überfahrt reduzieren den thermischen Eintrag in die GF-PA6-Probe und Cu-Schicht. Durch die Verwendung von drei Venturiekühldüsen, kann die Kühlleistung weiter erhöht werden. Dadurch wird der Schutz vor Oxidation des Cu und vor Schichtabplatzungen erhöht.

Wichtigste wissenschaftlich-technische Ergebnisse und andere wesentliche Ereignisse

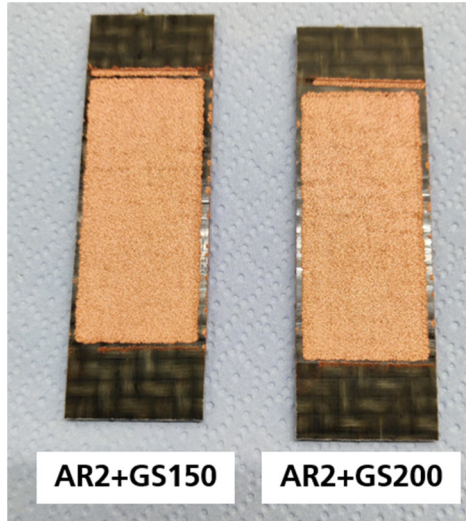


Abb. 12:
APS-Beschichtung auf einer vorbehandelten GF-PA6-Probe (Tepex); angeraut und mit Gitterstrukturen AR_GS_150 und AR_GS_200

Versuche zum maskenfremen Beschichten wurden an den in Arbeitspaket 2 vorbehandelt Tepex GF-PA6-Proben und an unterschiedlichen Strukturierungen durchgeführt. Für die Versuche wurden die Parameter aus Abbildung 11 verwendet. Exemplarisch zeigt Abbildung 13 eine GF-PA6-Platte mit Versuchsmatrix. Dabei zeigt sich, dass zusätzlich zum Anrauen (AR) eine Gitterstruktur (GS) zwingend nötig ist. An den Kanten der strukturierten Felder kommt es aufgrund der Anzahl von neun Überfahrten bei der Beschichtung zur Überlappung. Dennoch kann festgestellt werden, dass die Bereiche zwischen den strukturierten Flächen keine Partikelanhaftung aufweisen und das maskenfremes Beschichten mittels APS und Cu-Beschichtung möglich ist.

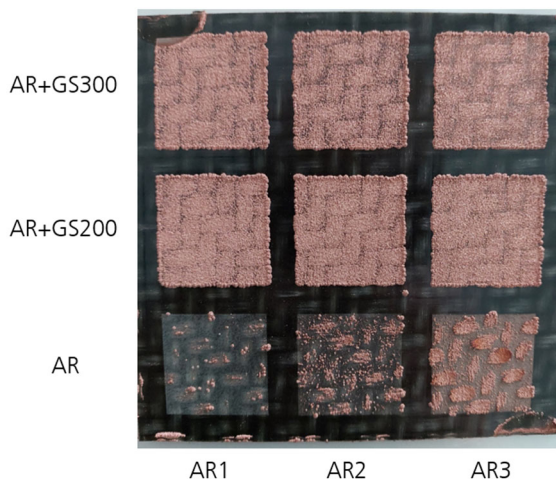


Abb. 13:
APS-Beschichtung auf einer vorbehandelten GF-PA6-Probe mit einer Matrix aus unterschiedlichen Gitterstrukturen (200 und 300 µm Grabenabstand) und mit/ohne anrauen

Mit den gewonnenen Erkenntnissen wurden unterschiedliche lokale Strukturen beschichtet um Demonstratoren für das maskenfremes und damit nachhaltige Beschichten herzustellen. Abbildung 14 zeigt den Ausschnitt eines erfolgreich beschichteten Demonstrators zum maskenfremes Beschichten mit dem Chimera-Logo. Entsprechend der verwendet Pulverpartikelgröße (-90 +38 µm $d_{90/10}$) ist die Auflösung bzw. die Randschärfe limitiert und grobkörnig.

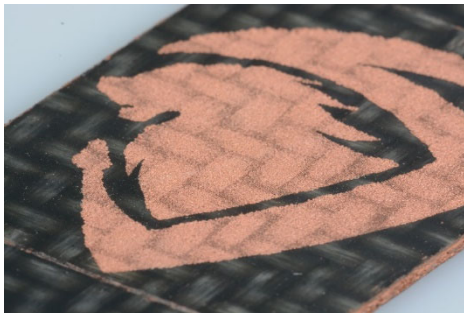


Abb. 14:
Ausschnitt eines maskenfrei beschichteten Demonstrators in Form eines Chimera-Logos

Wichtigste wissenschaftlich-technische Ergebnisse und andere wesentliche Ereignisse

Aufbauend auf den Versuchsergebnissen zur Schichtentwicklung wurden APS-Beschichtung auf unterschiedlichen Prüfkörpern hergestellt. Durch den Ausfall des Lasers zur Oberflächenstrukturierung, wurden weitere Iterationsschleifen mit verschiedenen Laserquellen durchgeführt. Das Portfolio der beschichteten Testproben umfasst Proben zur *3-Punkt-Biege-Prüfung* (Zyklisch, auf Druck und auf Zug beansprucht), *Miniaturbiegeversuche*, *Druckuntersuchung*, *Scratchtests* (bis DIN A4), *Scherzugversuche* und *Schulterzugproben* für Zugversuche. Im letzten Schritt wurden Demonstratoren in Form von *Halbschalen* (3D Geometrie) beschichtet und der Charakterisierung in Arbeitspaket 4 zur Verfügung gestellt. Abbildung 15 zeigt eine Übersicht der Proben für die mechanische Charakterisierung, die mit APS-Cu beschichtet wurden.

Probentyp	Strukturen
Zyklische 3-Punkt-Biege-Probe	AR_GS_150_100
Miniatür Biegeversuch	AR_GS_150_100, Ohne_AR_GS_150_100
Druckversuch	AR_GS_150_100
3-Punkt-Biegeversuch (auf Druck)	AR_GS_150_100, Ohne_AR_GS_150_100
3-Punkt-Biegeversuch (auf Zug)	AR_GS_150_100, Ohne_AR_GS_150_100
Scratch-Versuch	AR_GS_150_100 MS
Scratchversuch DIN-A4	AR_GS_150_100
Scherrzugprobe	AR_GS_150_100 AR_GS_150_150 AR_GS_150_50 Ohne_AR_GS_200_100
Zugprobe	AR_GS_150_100 AR_GS_150_150 AR_GS_150_50 Ohne_AR_GS_200_100 MS
Demonstrator	AR_GS_150_100

Abb. 15:
Übersicht der Proben zur mechanischen Kennwertermittlung die mit Cu-APS beschichtet wurden

Beispielhaft sind in Abbildung 16 Schulterzugproben und Abbildung 17 Scherzugproben dargestellt.

Wichtigste wissenschaftlich-technische Ergebnisse und andere wesentliche Ereignisse



Abb. 16:
Schulterzugproben
mit Laserstrukturen:
150 µm Graben-
abstand und 100 µm
Grabentiefe und
Anrauen
(AR_GS_150_100)
mit APS
Cu-Beschichtung

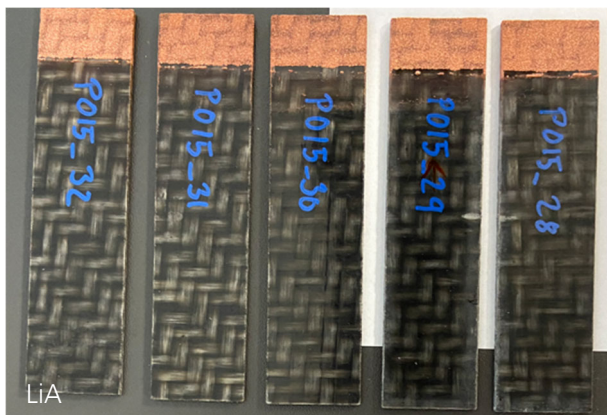


Abb. 17:
Scherzugproben mit
Laserstrukturen
AR_GS_150_100 mit
APS-Cu-Beschichtung

Als Vergleich wurden Versuche mit konventionellem Sandstrahlen durchgeführt, da dieses Verfahren in der Regel beim thermischen Spritzen zur Oberflächenvorbereitung verwendet wird. In Abbildung 18 ist zu erkennen, dass durch mechanisches Strahlen (MS) mit Edelkorund und Strahldrücken zwischen 1,5 bar und 4 bar keine flächendeckende Cu-Beschichtung bei gleichen APS-Prozessbedingungen realisiert werden kann. Die Partikel haften ausschließlich an freigelegten Fasern. Abbildung 19 zeigt zudem, dass eine Kontamination mit Sandstrahlpartikeln nicht ausgeschlossen werden kann.

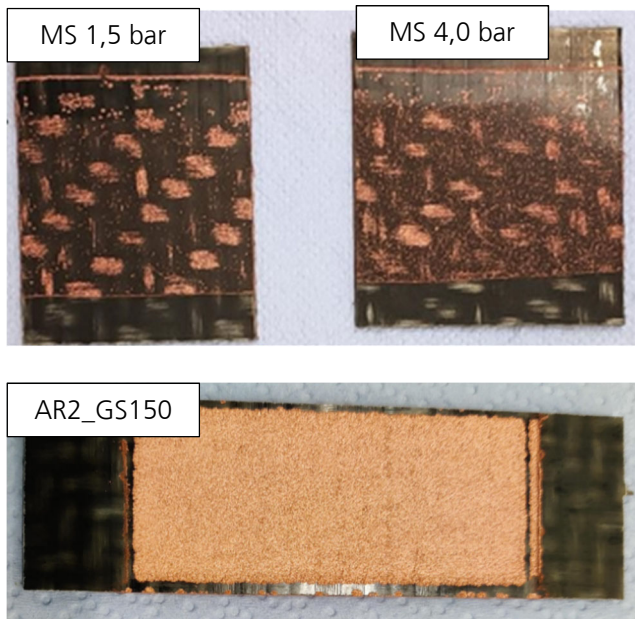


Abb. 18:
Sandgestrahlte und laserstrukturierte Testproben und APS Cu-Beschichtung
Im Vergleich: jeweils nach 6 Überfahrten

Wichtigste wissenschaftlich-technische Ergebnisse und andere wesentliche Ereignisse

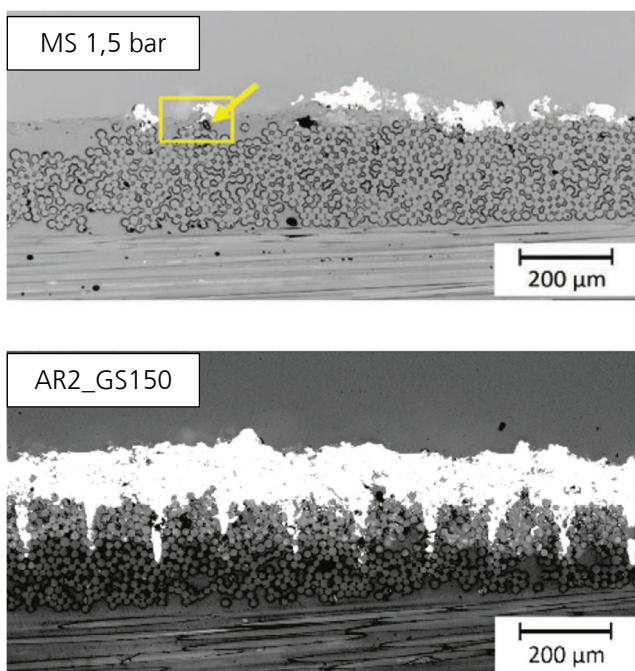


Abb. 19:
Mikroskopische Aufnahme eines Querschnitts mit APS Cu-Beschichtung,
oben:
sandgestrahlt,
Gelber Kasten zeigt mit Kupfer gefüllten Riss und der Pfeil eingeschlossene Korundteilchen vom Sandstrahlen
unten:
laserstrukturiert mit AR2_GS150;

2.3.3 Transfer auf alternative Materialsysteme und Geometrien für Upscaling

An vorbehandelten SMC Proben aus Arbeitspaket 2 wurden Beschichtungsversuche mit den gleichen APS-Prozessparametern durchgeführt mit denen auch die Tepex GF-PA6 Proben beschichtet wurden. Die Ergebnisse wurden bereits unter Punkt 2.2.3 im Arbeitspaket 2 vorgestellt.

2.3.4 Beschichtung eines Funktionsdemonstrators

Mit den entwickelten APS-Parametern wurde der Transfer von 2D-Probekörpern auf ein 3D-Demonstrator in Form einer GF-PA6-Halbschale aus Tepex untersucht. Die Geometrie vereint unterschiedliche Orientierungen der Beschichtungsflächen im 3D Raum, die eine Anpassung an den Spritzprozess erfordern. Als Beschichtungsstrategie wurde eine mehrstufige Beschichtung anvisiert. In der ersten Stufe erfolgt eine Beschichtung senkrecht zur Grundfläche und dem Rand (Spritzabstand: Abstand zur Grundfläche minus halber Randabstand zur Grundfläche). In der zweiten Stufe werden die acht schrägen Flanken mit einem Anstellwinkel beschichtet und das Bauteil in sieben darauffolgenden Schritten rotiert (45° Drehung, Rotationsachse senkrecht zur Grundfläche). Bereits in der ersten Stufe wird deutlich, dass sich in den Kehlen, zwischen Grundfläche und Flanken, eine deutlich höherer Schichtauftragsrate in Schichteigen-
spannungen und daraus resultierenden Rissen und Abplatzungen widerspiegelt. Die Beschichtung erfolgte entsprechend der entwickelten Beschichtungsstrategie mit 6 Überfahrten.

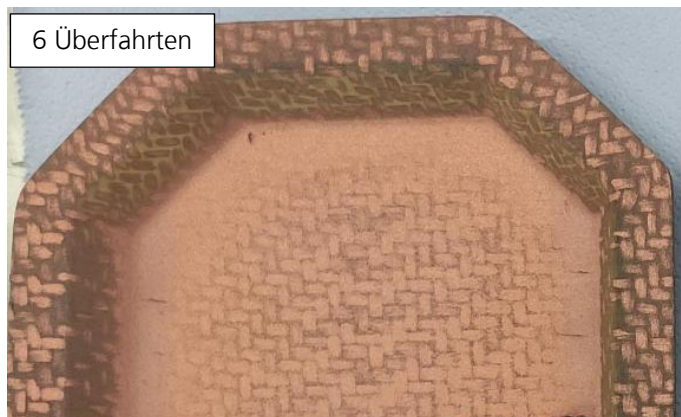


Abb. 20:
Vergrößerte
Aufnahme eines
APS-beschichteten
GF-PA6-
Demonstrators
(Struktur
AR_GS_150_100)

Die höhere Schichtauftragsrate resultiert aus der Aufstauung des Partikelstrahls an den Flanken der Halbschale. Durch eine Reduzierung der Anzahl der Überfahrten sollte die Schichtschädigung in den Flanken vermieden werden. Wie Abbildung 21 zeigt, treten Risse auch bei 4 Überfahrten auf.

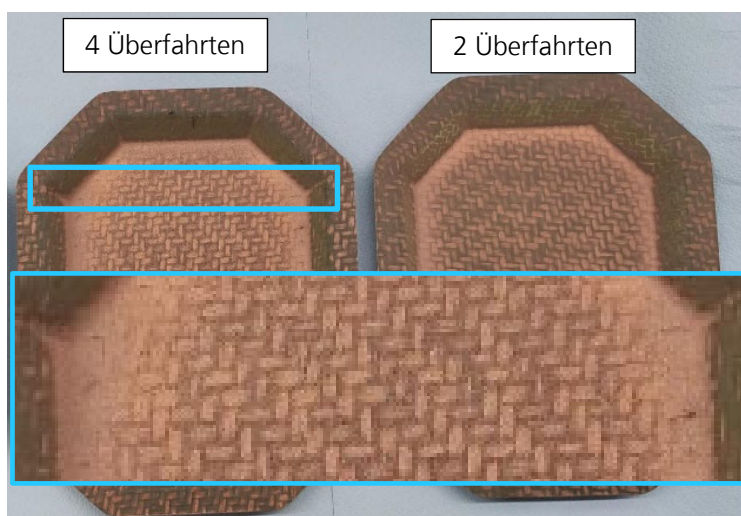


Abb. 21:
Vergleich zweier
APS-beschichteten
GF-PA6-
Demonstratoren
(Struktur
AR_GS_150_100)
mit verschiedener
Anzahl an
Überfahrten

Ein Demonstrator wurde mit zwei Überfahrten mit Cu beschichtet. Der konzeptionierte mehrstufige Beschichtungsprozess konnte nicht umgesetzt werden, da durch die Überlappung in den Bereichen der Flanken eine höhere Anzahl an Überfahrten entsteht, die zur Schichtschädigung in den Kehlen führen würde. Aufgrund der nachgewiesenen elektrischen Leitfähigkeit in der Fläche, wurden Demonstratoren für die mechanische Charakterisierung und EMV Messung mit zwei, anstelle von sechs, Überfahrten hergestellt.

Wichtigste wissenschaftlich-technische Ergebnisse und andere wesentliche Ereignisse

Für die wirtschaftliche Betrachtung der Projektergebnisse wurden die Kennwerte entsprechend der Abstimmung in Arbeitspaket 1 für eine zu betrachtende Jahresproduktion im Umfang von 10.000 Stück berücksichtigt. Als Produkt wurden die ermittelten Kenngrößen aus der Herstellung des Demonstratorbauteils als Grundlage verwendet. Innerhalb der Prozesskette wurde der APS-Prozess mit den Prozessgrößen Beschichtungsdauer, Vor- und Nachbearbeitungszeit, Pulverfördermenge und Standzeiten zum Pulverauffüllen und Verschleißteilwechsel angenommen. Die Materialkosten wurden aus Kosten für Verbrauchsstoffe sowie Verschleißteile kalkuliert. Die Personalkosten werden durch den Stundensatz eines Technikers (Kostensatz Fraunhofer IWS) abgebildet. Entsprechend der Pulverförderrate und dem durchschnittlichen Pulvervolumen eines Pulverförderers, sowie der Standzeit der Verschleißteile Anode und Kathode wurden die Standzeitintervalle berechnet und festgelegt. Neben der Beschichtungsstrategie des Demonstratorbauteils aus Punkt 2.3.4 wurden drei theoretische Varianten betrachtet, so dass zwei lineare und zwei rotative Beschichtungsstrategien, entsprechend Abbildung 22 ausgearbeitet wurden.

Beschichtungsstrategie	Linear		Rotativ	
	6	12	6	12
Anordnung	6	12	6	12
Batchgröße [Stk]	6	12	6	12
Kosten für 10.000 Stk [T€]	91,6	70,9	61,6	57,6
Stückkosten [€]	9,16	7,09	6,16	5,77
Beschichtungsdauer/Batch	18,27	30,69	16,45	23,83
kWh/Batch	8,5	14,3	7,7	11,1

Abb. 22:
Vergleich der Wirtschaftlichkeits-Kenngrößen unterschiedlicher APS Beschichtungsstrategien

Die Beschichtungsstrategien sind in Abbildung 23 als Skizzen dargestellt. Die Lineare Beschichtung ist mit einer Batchgröße von 6 Halbschalen abgebildet. Eine Batchgröße von 12 Halbschalen wurde mit zwei Reihen á 6 Halbschalen betrachtet. Die rotative Beschichtungsstrategie wurde mit rotierenden Halbschalenhalterungen (Hexagon für 6 Halbschalen und Dodekagon für 12 Halbschalen), die jeweils nebeneinander angebracht werden. Ein solcher Probenhalter wurde im Projekt nicht hergestellt und konnte nicht im Labormaßstab untersucht werden. Derartige Halterungen werden aber in der Industrie, z.B. für Plattenförmige Bauteile angewendet. Entsprechend der Kennwerte in Abbildung 22 hat die Beschichtungsstrategie einen großen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit. Die Stückkosten liegen in einem Bereich von 5,77 € bis zu fast doppelt so hohen Kosten von 9,16 €. Die Kenngrößen wurden mit gleichen Beschichtungsparametern für den APS-Prozess berechnet. Weitere Optimierung für eine Serienfertigung, z.B. die Verwendung von zwei Pulverförderern um die Standzeiten bei der Pulverbefüllung zu reduzieren, wurde nicht betrachtet.

Abb. 23:

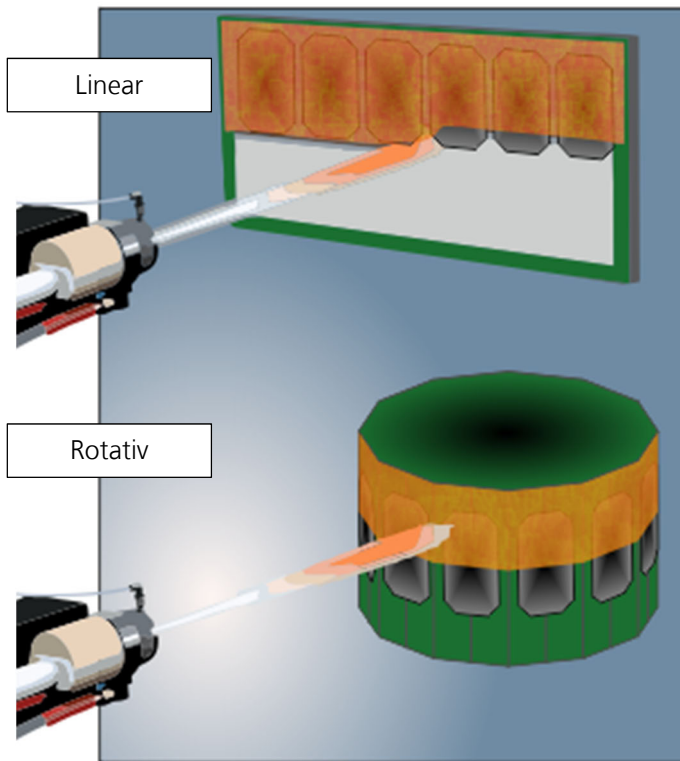
**Vergleich zweier
APS Beschichtungs-
strategien**

oben:

**Lineare
Beschichtung mit 6
Proben**

unten:

**Rotative
Beschichtung mit 12
Proben**



2.4 Arbeitspaket 6 - Ergebnis- und Wissenstransfer in Wirtschaft und Gesellschaft

Das Fraunhofer IWS fokussierte die Transferaktivitäten auf die Präsentation der Technologieketten aus Laservorbearbeitung und Thermischen Spritzen sowie deren Anwendungspotentialen. Dabei erfolgte die Auswahl der Veranstaltungen und Medien mit Blick auf die relevanten Zielgruppen. Die Projektarbeiten und Ergebnisse von Chimera wurden auf wissenschaftlichen Konferenzen aus den Bereichen Leichtbau und Beschichten sowie auf der Welt-Leitmesse für Verbundwerkstoffe (JEC) präsentiert. Darüber hinaus erfolgte eine Veröffentlichung in einer Fachzeitschrift für Produktionstechnik. Das IWS plant auch über das Projektende hinaus mit der aktiven Veröffentlichung und Präsentation der Projektergebnisse, u.a. auf der JEC 2025.

Messeauftritte:

- JEC 2022 in Paris, Frankreich
- JEC 2023 in Paris, Frankreich
- JEC 2024 in Paris, Frankreich
- Leichtbausymposium Dresden 2023

Konferenzbeiträge (Vortrag und Artikel):

- Statusseminar HyMat, Oktober 2023 in Stuttgart, Deutschland
- International Thermal Spray Conference ITSC, Mai 2023 in Ontario, Kanada (DOI: <https://doi.org/10.31399/asm.cp.itsc2023p0330>)
- International Thermal Spray Conference ITSC, Mai 2024 in Mailand, Italien, (ISBN: 979-8-3313-0543-7)
- Symposium Verbundwerkstoffe 2024 in Freiburg, Deutschland (ISBN 978-3-88355-438-9)

Weitere Veröffentlichungen:

- Beitrag „Metallische Funktionen im Faserverbundbauteil - Funktionalisieren von Faser-Kunststoff-Verbunden“ in Fachzeitschrift WT Werkstatttechnik (DOI: doi.org/10.37544/1436-4980-2022-11-12-96)

3

Vergleich des Vorhabenstands mit ursprünglicher Arbeits-/Zeit- und Kostenplanung

Vergleich des Vorhabenstands mit
ursprünglicher Arbeits-/Zeit- und
Kostenplanung

Abweichung von Arbeits-/Zeitplanung

Im Verlauf der Projektarbeiten kam es zu ungeplanten Verzögerungen, u.a. aufgrund technischer Ausfälle von Laseranlagentechnik. Das Projektkonsortium hat bei jeglicher Verzögerung schnell reagiert und potentiellen negativen Auswirkungen entgegengewirkt. Die Summe der genannten Verzögerung führte zu der Notwendigkeit einer kostenneutralen Verlängerung um insgesamt neun Monate.

Das gesamte Konsortium hat, trotz des wiederholten Ausfalls der verwendeten Anlagentechnik, alle geplanten Arbeiten vollständig innerhalb der verlängerten Projektlaufzeit durchgeführt.

Abweichung von Kostenplanung

Folgende Abweichungen vom ursprünglichen Kostenplan gibt es: Die im Projekt geplanten Investitionen (0847) für Anpassungen an der Lasersystemtechnik wurden nur in reduziertem Umfang verwendet. Für die Aufskalierung des Laserprozesses wurde eine Strahlteileroptik (DOE) als Verbrauchsmaterial (0813) beschafft (aufgrund der bei UKP-Lasern teilweise begrenzten Nutzungsdauer der Optiken) Für die Integration der Optik und Anpassungen am Laser-Strahlengang waren weitere opto-mechanische Bauelementen erforderlich. Im Projekt wurden Invest-Mittel eingeplant, die die Beschaffung einer F-Thea Optik ermöglichen. Das, nach den Voruntersuchungen erarbeitete, grundlegende Optiksetup konnte ohne wesentliche Einschränkungen auch für die Aufskalierung und Übertragung auf die 3D-Geometrie genutzt werden. Aufgrund wiederholter Ausfälle der verwendeten Laseranlagen, wurde von dieser Beschaffung abgesehen. Auch ein zweiter Strahlteiler musste nicht mehr beschafft werden.

In Summe wurden weniger Mittel für Verbrauchsmaterial aufgewendet. Gründe sind einerseits die in geringerem Umfang als erwartet erforderlichen Anpassungen an den optischen Versuchsaufbauten der Laservorbehandlung (weniger Bedarf für opto-mechanische Bauteile und Kleinoptiken). Andererseits wurden aufgrund der wiederholten Lasersystem-Ausfälle weniger umfangreiche Untersuchungen zum Beschichten laserbehandelter Proben realisiert (geringerer Bedarf an Metall-Pulvern und Verschleißmaterial an der Beschichtungsanlage).

Durch die verstärkte Nutzung von Video-Konferenzen konnte der Umfang an Dienstreisen und entsprechende Kosten minimiert werden (0850). Die Kosten für die realisierten Messebeteiligungen konnten über andere Projekte finanziert werden, da auf den Messen auch Arbeiten über das Chimera-Projekt hinaus präsentiert wurden.

Die dadurch frei gewordenen finanziellen Mittel wurden in voller Höhe stattdessen als Personalkosten umgewidmet, um den zusätzlichen Personalaufwand für die wiederholten Prozessentwicklungen an den Ersatz-Laseranlagen zumindest zu einem Teil ausgleichen zu können.

Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Personal- und Sachmittel wurden gemäß den geplanten Arbeitspaketen sachgerecht eingesetzt. Die begrenzten Abweichungen wurden oben begründet. Der im Rahmen des Projektes geleistete Arbeitsumfang war notwendig, um die Projektziele zu erreichen.

Rückblick auf Erreichung der Ziele

Seitens des Fraunhofer IWS, wurde das Hauptziel des Projektes in Form der Aufskalierung zweier Technologien (Laser-Oberflächenvorbehandlung und Thermisches Spritzen auf Faserkunststoffverbunden) erfolgreich erreicht. Folgende Zielstellungen wurden im Rahmen der Projektarbeiten erfolgreich realisiert:

- Die Technologie zur laserbasierten Oberflächenvorbehandlung wurde erfolgreich auf das anspruchsvolle thermoplastische Substratmaterial GF-PA6 übertragen und infolge der erzeugten Oberflächenstrukturen eine zuverlässige Schichtanhaftung für den Beschichtungsprozess am Beispiel APS mit Kupfer nachgewiesen.
- Durch die Anwendung der Strategie einer Parallelbearbeitung mit Mehrfachstrahlen wurde die Prozessgeschwindigkeit um den Faktor 6 erhöht, wobei noch deutliches Potential für eine weitergehende Prozessbeschleunigung gesehen wird. Hierdurch werden Prozesszeiten erreicht, welche in der Größenordnung derer des Beschichtungsprozesses liegen. Dies ist die Voraussetzung für eine zukünftige wirtschaftliche Umsetzung der Laservorbehandlung.
- Im Rahmen des Projektes wurde anhand des Verbund-Materials SMC weiterhin demonstriert, dass die Verfahrenskombination leicht auf andere Werkstoffe übertragbar ist (auch mit alternativen Schichtwerkstoffen wie Zink). Mit der entwickelten Technologie ist es möglich auf unterschiedlichen Substratmaterialien verschiedene Schichtwerkstoffe zuverlässig und haftfest abzuscheiden. Dadurch eröffnen sich für die Verwertung vielfältige Anwendungsmöglichkeiten.
- Beide Prozesse wurden erfolgreich auf dreidimensionale Bauteilgeometrien übertragen.
- Die erfolgreiche EMV Funktionsprüfung bestätigte die elektromagnetische Verträglichkeit des Hybridverbundes anhand von Flachproben (Meilenstein 1) und Demonstratorbauteil (Ergebnisse von deren finaler Charakterisierung lagen zum Zeitpunkt der Berichtserstellung vom Projektpartner noch nicht vor).
- Das maskenfreie, selektive Beschichten des FKV wurde erfolgreich nachgewiesen (Meilenstein 2). Dies eröffnet neben der einhergehenden Einsparung von Vorbereitungsarbeiten (Maskierung) auch neue potentielle Anwendungen für eine lokale Funktionsintegration in Leichtbaustrukturen.

Im Verlauf des Projektes wurden keine Forschungs- und Entwicklungsarbeiten dritter bekannt, welche über die im Projekt verfolgten Ziele und Lösungsansätze hinausgehende Erkenntnisse erbrachten. Eine Arbeit mit Bezug zum Projektthema ist bekannt geworden, welche das Laserstrukturieren und Thermische Spritzen auf thermoplastischen faserverstärkten Kunststoff betrifft. Die Publikation von Costil et al. mit dem Titel *Laser-Induced Surface Texturing of Metal or Organic Substrates for Structural Adhesive Bonding* aus dem Jahr 2017 behandelt die Oberflächenvorbehandlung verschiedener Aluminiumlegierungen und eines kohlenstofffaserverstärkten PEEKs sowie eines kohlenstofffaserverstärkten Epoxids. Konkret werden die Substrate durch mechanisches Strahlen und Laserbohren vorbehandelt und anschließend im LDS-Verfahren beschichtet. Die Autoren kamen zu folgenden Ergebnissen:

- Die Laserstrukturierung erzeugt eine Oberflächenvergrößerung von ~2 bis 7 im Vergleich zu den gestrahlten Oberflächen mit etwa 1 - 2.
- „Eine laserstrukturierte Oberfläche mit optimierter Lochmorphologie ermöglicht es, einen Haftungswert zu erzielen, der höher ist als derjenige, der im Allgemeinen bei herkömmlichen Vorbehandlungen beobachtet wird.“
- „Löcher bilden Hindernisse für die Rissausbreitung. Risse gehen durch die Beschichtung [...] und erhöhen die erforderliche Energie für die Ablösung.“

Aus der Veröffentlichung (DOI: [10.4028/www.scientific.net/MSF.879.390](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.879.390)) gehen keine klar zuordenbare Haftkennwerte oder Ausprägungen der Laserstrukturen hervor. Die Autoren heben die generelle Eignung der Laserstrukturierung auf Substraten vor dem thermischen Spritzen hervor sowie dessen positive Auswirkung auf einen Rissvorschritt bei Versagen. Die Veröffentlichung untermauert und bestätigt die im Projekt Chimera verfolgte technologische Strategie, konnte jedoch keine darüberhinausgehenden Erkenntnisse bereitstellen.

6.1 Erfindungen/ Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte

Die Arbeiten des Fraunhofer IWS zur Oberflächenvorbehandlung vor dem Thermischen Spritzen mittels Laserstrukturierung des faserverstärkten Kunststoffes beruhen auf der eigenen Patentanmeldung DE 10 2017 201 507 A1. Das Patent wurde im September 2024 erteilt.

6.2 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Mit der Erweiterung des Kompetenzaufbaus im Bereich der Substratvorbehandlung thermoplastischer Faserverbundkunststoffe und dem thermischen Spritzen (Beschichtungsprozess, Schichtcharakterisierung) ist das Fraunhofer IWS nachhaltiger Partner für deutsche Unternehmen für die Entwicklung von kundenspezifischen bzw. anwendungsspezifischen Lösungen der Oberflächenstrukturierung, Beschichtung und Hybridbauteilherstellung. Für eine wirtschaftliche Verwertung in Form von anwendungsspezifischen F&E Aufträgen industrieller Anwender sind vor allem die folgenden zentralen Projektergebnisse bedeutend: Funktionsnachweis elektromagnetischer Schirmung, Demonstration der Prozesskette auf wärmeempfindlichem thermoplastischen Substraten sowie SMC, die nachgewiesenen Haftkennwerte der Schicht, die Demonstration des maskenfreien Beschichtens sowie die gesteigerte Prozessgeschwindigkeit der Laservorbehandlung.

Darüber hinaus können die erzielten Ergebnisse in neuen Anwendungsfelder im klassischen Maschinenbau und in verschiedenen Industriezweigen zur verbesserten Gewichtsreduktion durch Funktionsintegration, Verbesserung der Performance durch optimale Werkstoffausnutzung und Kostenminimierung beitragen. Zur weiteren wirtschaftlichen Vernetzung und Akquise werden Projektergebnisse auf Messen, nationalen Konferenzen (z. B. Symposium Verbundwerkstoffe) und internationalen Tagungen (z. B. ITSC, LPM) präsentiert.

6.3 Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten

Das gewonnene tiefe Verständnis über die Zusammenhänge aus der generierten Substratstrukturierung, den Beschichtungsprozessparametern und den daraus resultierenden Eigenschaften des Hybridverbundes ist eine wertvolle Kompetenz, die in verschiedenen F&E-Projekten einfließen und zukünftig für Forschung und Industrie von Bedeutung sein wird.

Weitere Fragestellungen fließen direkt in die Beantragung von zukünftigen Forschungsvorhaben. Ein erstes Beispiel ist die erfolgreiche Akquise eines von der Luftfahrtindustrie geführten Entwicklungsprojektes in die Prozesskette für elektrische Funktionalität demonstriert werden soll. Die mit dem Potential und Bedarf zur Weiterentwicklung verbundene positive Entwicklung dient der Sicherung und dem Erhalt der bisherigen Arbeitsplätze und insbesondere dem wissenschaftlichen und technologischen Vorsprung aller Projektpartner.

Die Ergebnisse bzgl. der Haftfestigkeit sind vielversprechend und es wird angenommen, dass die entwickelte Prozesskette bestenfalls „allgemeingültig“ aber mindestens übertragbar für zahlreiche Verbundwerkstoffe, Beschichtungsmaterialien und Beschichtungsverfahren ist. Die Übertragbarkeit von GF-PA6 auf SMC wurde im Projekt nachgewiesen.

Die Übertragbarkeit von 2D auf 3D Bauteilkonturen wurde demonstriert, bedarf aber weiteren Optimierung der Beschichtungsstrategie, um weitere Anwendungsfelder zu adressieren. Damit einher geht natürlich:

Fortschreibung des
Verwertungsplans

- Eine erhöhte wirtschaftliche Attraktivität,
- Eine höhere Flexibilität bei Produktgestaltung und Auslegung,
- Eine deutlich höhere Aussicht auf Folgeprojekte, durch einen größeren Kreis an Anwendungsmöglichkeiten bzw. Einsatzpotentialen.
- Ein Beitrag zur Nachhaltigkeit durch die Funktionalisierung von Leichtbauteilen

6.4 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Mit erfolgreichem Abschluss der Zielsetzungen im Projekt Chimera ist GfE Fremat technologisch dazu befähigt, eine neue Dienstleistung in ihr Portfolio aufzunehmen und gemeinsam mit dem IWS zu etablieren. Ein konsekutiver Entwicklungsschritt wäre die Automatisierbarkeit des Prozesses samt Qualitätsüberwachung. Am Fraunhofer IWS, konnten basierend auf den Projektergebnissen ein von der Fraunhofer Gesellschaft finanziertes, begrenztes Vorlaufprojekt gewonnen werden. Ziel dieses Projektes ist die weitere Steigerung der Prozessgeschwindigkeit durch Nutzung deutlich gesteigerter Laserleistungen und der Nachweis weiterer Schichtfunktionen in Form von Abrasionsschutz und Flammschutz. Hierdurch wird das Verwertungs-Potenzial der Chimera-Ergebnisse nochmals gesteigert.