

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel A-MELIUS - Additive Manufacturing of functional and Effective Light-Use-caseS	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Dipl.-Ing. Florian Kuisat Prof. Dr.-Ing. A. Lasagni	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.06.2022
	6. Veröffentlichungsdatum 31.12.2022
	7. Form der Publikation Schlussbericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Technische Universität Dresden (TUD) Fakultät Maschinenwesen Institut für Fertigungstechnik Professur für laserbasierte Methoden der großflächigen Oberflächenstrukturierung	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 02P18E010
	11. Seitenzahl 32
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben 8
	14. Tabellen 2
	15. Abbildungen 24
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Projektträger Karlsruhe PTKA	
18. Kurzfassung Das übergeordnete Projektziel von A-MELIUS besteht in der Verbesserung von additiv gefertigten Luft- und Raumfahrtkomponenten aus Titan- und Aluminiumlegierungen. Dies erfolgt durch die Verbesserung der Herstellung und Prüfung der AM-Teile, sowie der Entwicklung von laserbasierten Technologien zur Beeinflussung der Oberflächentopografie. Das Ziel ist die Verbesserung der Oberflächengüte (Reduzierung der Rauheit) und der Implementierung neuer Eigenschaften, wie beispielsweise eisabweisende Oberflächen generieren. Im Projekt wurden anwendungstaugliche Verfahren entwickelt und mit Blick auf die Oberflächencharakteristik quantifiziert. Insbesondere wurden laserbasierte Verfahren eingesetzt, um die Rauheit der Oberfläche zu verringern und periodische Oberflächenmuster im Mikrometer- und Submikrometerbereich zu erzeugen. Dadurch wurden topografische Elemente erzeugt, um wasser- und eisabweisende Oberflächen herzustellen, was in der Luftfahrtindustrie einen wichtigen Aspekt darstellt. Die Laserbehandlung ermöglichte eine Verringerung der Rauheitswerte um bis zu 89% im Vergleich zur ursprünglichen Oberfläche mit Wasserkontaktwinkeln von bis zu 153° und superhydrophoben Oberflächenbedingungen. Die Kombination aus Rauheitsreduzierung und Oberflächenstrukturierung wird es ermöglichen, den Einsatz der additiven Fertigung über den aktuellen Stand der Technik hinaus zu erweitern und neue Wege für die Anwendung in der Luftfahrt zu beschreiten.	
19. Schlagwörter Additive Fertigung, Titan 64, Scalmalloy®, ScanCromAl®, Laserglättung, Direkte Laserinterferenzstrukturierung	
20. Verlag	21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Final report
3. title A-MELIUS - Additive Manufacturing of functional and Effective Light-Use-caseS	
4. author(s) (family name, first name(s)) Dipl.-Ing. Florian Kuisat Prof. Dr.-Ing. A. Lasagni	5. end of project 30.06.2022
	6. publication date 31.12.2022
	7. form of publication Final report
8. performing organization(s) (name, address) Technische Universität Dresden (TUD) Fakultät Maschinenwesen Institut für Fertigungstechnik Professur für laserbasierte Methoden der großflächigen Oberflächenstrukturierung	9. originator's report no.
	10. reference no. 02P18E010
	11. no. of pages 32
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	1313. no. of references 8
	14. no. of tables 2
	15. no. of figures 24
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date) Projekträger Karlsruhe PTKA	
18. abstract The main objective of the A-MELIUS project is to improve additively manufactured aerospace components made of titanium and aluminium alloys. This is done by improving the manufacturing and testing of AM parts, as well as developing laser-based technologies to influence the surface topography. The aim is to improve the surface quality (reduction of roughness) and to implement new properties, such as generating ice-repellent surfaces. In the project, processes suitable for application were developed and quantified with regard to surface characteristics. In particular, laser-based methods were used to reduce the roughness of the surface and to generate periodic surface patterns in the micrometre and submicrometre range. This created topographical elements to produce water and ice repellent surfaces, which is an important aspect in the aerospace industry. The laser treatment enabled a reduction in roughness values of up to 89% compared to the original surface with water contact angles of up to 153° and superhydrophobic surface conditions. The combination of roughness reduction and surface structuring will make it possible to expand the use of additive manufacturing beyond the current state of the art and break new ground for aerospace applications.	
19. keywords Additive manufacturing, Titanium 64, Scalmalloy, Scancromal, laser smoothing, direct laser interference patterning	
20. publisher	21. price

Schlussbericht

Zuwendungsempfänger: Technische Universität Dresden	Förderkennzeichen: 02P18E010
Förderprogramm: Additive Manufacturing of functional and Effective Light-Use-caseS (A-MELIUS)	
Titel des Vorhabens: Modifikation der Oberflächenchemie, Topographie und des Gefüges durch Entwicklung von dreidimensionalen Laserstrukturierungs- und Laserumschmelzverfahren	
Projektleiter/ Projektleiterin: Prof. Dr.-Ing. Andrés Fabián Lasagni	Tel.: +49 (0)351 463 33343 E- Mail: andres_fabian.lasagni@tu-dresden.de
Laufzeit des Vorhabens von: 01.07.2019	bis: 30.06.2022
<p>1. Aufgabenstellung</p> <p>Das A-MELIUS Forschungsprojekt zielt darauf ab, die Leistung von additiv gefertigten Luft- und Raumfahrtteilen zu verbessern. Dies soll durch ein geringeres Gewicht, eine verbesserte Oberflächenqualität und mit der Möglichkeit der Oberflächenfunktionalisierung realisiert werden. Diese Aspekte ermöglichen es, die Anwendbarkeit der additiven Fertigung über den aktuellen Stand der Technik hinaus zu erweitern und neue Wege für die Anwendung in der Luft- und Raumfahrt zu bestreiten.</p> <p>Die wichtigsten wirtschaftlichen Vorteile für die anvisierten Anwendungsfälle sind die Möglichkeit der Einsparung von Rohstoffen und Gewicht, die Verbesserung der Oberflächenqualität und -eigenschaften, sowie das Hinzufügen gewünschter Funktionen oder die Reduzierung der Anzahl von Bauteilkomponenten durch ein optimiertes Konstruktionsdesign.</p> <p>Dieses Teilvorhaben, welches an der TU Dresden durchgeführt wurde, befasste sich mit der Erforschung und Entwicklung von Verfahren zur gezielten Modifizierung von additiv hergestellten Bauteiloberflächen mittels laserbasierter Werkzeuge. Ziel der Oberflächenbearbeitung ist die Verbesserung der Oberflächenqualität und die gezielte Implementierung von spezifischen Oberflächeneigenschaften an neuartigen Materialien. Im Bereich der laserbasierten Oberflächenbearbeitung werden neuartiger Lasertechnologien verwendet, um additiv hergestellten Bauteilen ohne Rohstoffzusatz zu funktionalisieren. Zusammenfassend adressieren wir in diesem Teilprojekt folgende wissenschaftlich-technischen Ziele des Gesamtverbundes:</p> <ol style="list-style-type: none">1) Grundlegende Untersuchungen der Laserbehandlung von AM Bauteilen zur Reduzierung der Oberflächenrauheit für die vorgeschlagenen Anwendungen.2) Grundlagenuntersuchungen an AM Bauteilen zur Herstellung von mikro-/ nanostrukturierten Oberflächen für die vorgeschlagenen Anwendungen. <p>2. Voraussetzung unter der das Vorhaben durchgeführt wurde</p> <p>Das Vorhaben wurde als Verbundprojekt innerhalb eines Konsortiums aus Industrieunternehmen und Forschungsstellen durchgeführt. Das Konsortium bestand seitens der Industrie aus den beiden Unternehmen Airbus Defence and Space GmbH und Pulsar Photonics GmbH. Die laserbasierte Oberflächenmodifikation sowie die technische und wissenschaftliche nationale Steuerung des Forschungsprojektes und die Verbreitung der Ergebnisse wurde von der TU Dresden durchgeführt. Die Partner sind sehr erfahren in den Technologien, die</p>	

zur Entwicklung der vom Projekt vorgeschlagenen Formulierung erforderlich waren (Konzeptionierung einer Laseranlage, Bauteilentwicklung, Bauteilcharakterisierung und Herstellung von AM gedruckten Komponenten).

Am Institut für Fertigungstechnik (TUD-IF) werden die Grundlagen der Hauptbereiche der Fertigungstechnik untersucht und die entsprechenden Produktionsverfahren weiterentwickelt. Diese reichen von der Oberflächenbearbeitung und Nanotechnologie sowie von der Fügetechnik bis zur Montage. Lasertechnik, Fertigungsmesstechnik und Qualitätsmanagement sind dabei interdisziplinäre Themen. Insbesondere der Lehrstuhl für großflächige Oberflächentexturierung (LMO) von Prof. Dr.-Ing. A. Lasagni konzentriert sich auf die Entwicklung neuer laserbasierter Methoden und Technologien zur Hochgeschwindigkeitsoberflächenstrukturierung von Materialien, um diese mit Mikro- und Submikrometerstrukturen zu versehen, um dadurch Oberflächen zu funktionalisieren. Der Schwerpunkt der Forschung und Lehre liegt auf der direkten Strukturierung von Polymeren, Metalle und Keramiken bis hinunter in den sub- μm -Bereich; Funktionalisierung biokompatibler Materialien; Herstellung von 3D-Mustern in photopolymerisierbaren Materialien; Zwei-Photonen-Polymerisation; Entwicklung laserbasierter Technologien zur Strukturierung von planaren und dreidimensionalen Teilen.

3. Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn und Ende des Vorhabens

Das „A-MELIUS“-Projekt wird einzigartige Luft- und Raumfahrt hardware entwickeln, die durch additive Fertigungstechniken einschließlich Design, zu einer verbesserter Ermüdungs- und Korrosionsbeständigkeit führen. Die, durch Laserbearbeitungstechnologie hergestellten, funktionalisierten Oberflächen bieten zusätzlich die Möglichkeit einer kundenspezifischen Anpassung. A-MELIUS konzentriert sich dabei gleichzeitig, die Kosten um bis zu 30% zu reduzieren oder die Komplexität, im Sinne des Montageaufwandes (One-Shot-Fertigung), um bis zu 50% zu verringern. Um diese Vision zu unterstützen, werden mehrere Demonstratoren entwickelt und hergestellt: Lufteinlassschutzgitter, Eisschutzsysteme, Lamellen, Halterungen und Strukturteile. Die Innovationen (dargestellt in Demonstratoren) werden, in Bezug zum Stand der Technik, im Folgenden beschrieben.

Design- und Topologieoptimierung

Modernste Hardware-Designs für die Luft- und Raumfahrt basieren auf konventionellen Fertigungstechnologien, was zu Strukturen mit höheren Massen führt. Eine Gewichtsreduzierung bei verschiedenen Demonstratoren wird durch den Austausch von Ti64- oder Stahlkomponenten durch optimierte Scalmalloy®-Versionen erreicht. Unter Berücksichtigung der Massenreduzierung und des Ersatzes z.B. eines Bauteils aus Ti64 (mit hohen Herstellungskosten durch konventionelle Bearbeitung von Hart- und komplexen Legierungen wie Ti64) wird ebenfalls ein erheblicher Einfluss auf die Teilekosten erwartet. Daher müssen Topologieoptimierungsstrategien zusammen mit Designregeln für die additive Fertigung implementiert werden, um die Teilefunktionalisierung zu optimieren und die Herstellbarkeit von additiv gefertigten Bauteilen zu erhöhen.

Verbesserung der Ermüdungsbeständigkeit

Es ist bekannt, dass additiv gefertigte Bauteile im Allgemeinen nicht die geforderten Standards in Bezug auf die Oberflächenrauheit erreichen. Daher benötigen additiv gefertigte Oberflächen einen zusätzlichen Schlichtvorgang, wie beispielsweise einen Poliervorgang. Polierverfahren basieren in der Regel auf abrasiven oder chemischen Verfahren. Diese konventionellen Prozesse besitzen viele Nachteile, wie der Zugänglichkeit komplexer Formen, Umweltauswirkungen, hohem Zeit- und Kostenaufwand sowie Gesundheitsrisiken für die Betreiber. Laserbehandlungen bieten die Möglichkeit, die Oberfläche eines Metallteils selektiv in einem perfekt-kontrollierbaren Volumen zu bearbeiten. Aufgrund der Oberflächenspannung der Metallschmelze, wird der Materialfluss in die Oberflächenunebenheiten umverteilt und glättet so die ursprüngliche Topographie. Darüber hinaus sind je nach Ausgangsoberflächenqualität Bearbeitungszeiten von 10 bis 200 s/cm² möglich. Dieser Ansatz führt zu einer voraussichtlich höheren Lebensdauer. Dieser Effekt wurde durch den Vergleich von additiv bearbeiteten Oberflächen oder sandgestrahlten Oberflächen nachgewiesen. Dabei war eine Verbesserung der Dauerfestigkeit um das 5- bis 10-fache in z.B. Ti64-Legierung (bei unterschiedlichen thermischen Bedingungen) festzustellen [1].

Oberflächenfunktionalisierung

Oberflächen mit kontrollierten topographischen Eigenschaften, die deterministische oder stochastische Strukturen im Mikrometer-, Submikrometer- und Nanometerlängenbereich aufweisen, haben in der Vergangenheit gezeigt, dass sie die Eigenschaften von technologischen Materialien für verschiedene Anwendungen ergänzen und verbessern. Diese Oberflächen können beispielsweise die optischen, mechanischen und biologischen Eigenschaften verbessern. Einige dieser Oberflächen befinden sich auf verschiedenen Pflanzen und Tieren und sind das Ergebnis einer mehrtausendjährigen Evolution. Um diese Oberflächen herzustellen, sticht die Laseroberflächenbearbeitung gegenüber mechanische (z.B. Kugelstrahlen oder Sandstrahlen), chemische und elektrische (Funkenerosion) heraus, da sie lokalisierte Modifikationen mit einem hohen Maß an Kontrolle über Form und Größe der gebildeten Merkmale in einem größeren herstellbaren Größenbereich ermöglicht. Es ist im Allgemeinen kostengünstiger als die Elektronenstrahltexturierung und flexibler, da es kein Vakuum benötigt. Verschiedene Texturen können durch die Steuerung von Verarbeitungsparametern, wie Strahlintensität, räumliches und zeitliches Profil, Wellenlänge und Prozessumgebung (Prozessgas oder Flüssigkeit) präzise erzeugt werden. Darüber hinaus werden in A-MELIUS neue Strategien und Lasermaschinenkonzepte für die Bearbeitung von 3D-Bauteilen durch die Integration einer maschinenintegrierten Messtechnik entwickelt, die es ermöglicht, die originalen 3D-additiven gefertigten Bauteile mit fertigungsbedingten Abweichungen vom Idealmodell herzustellen.

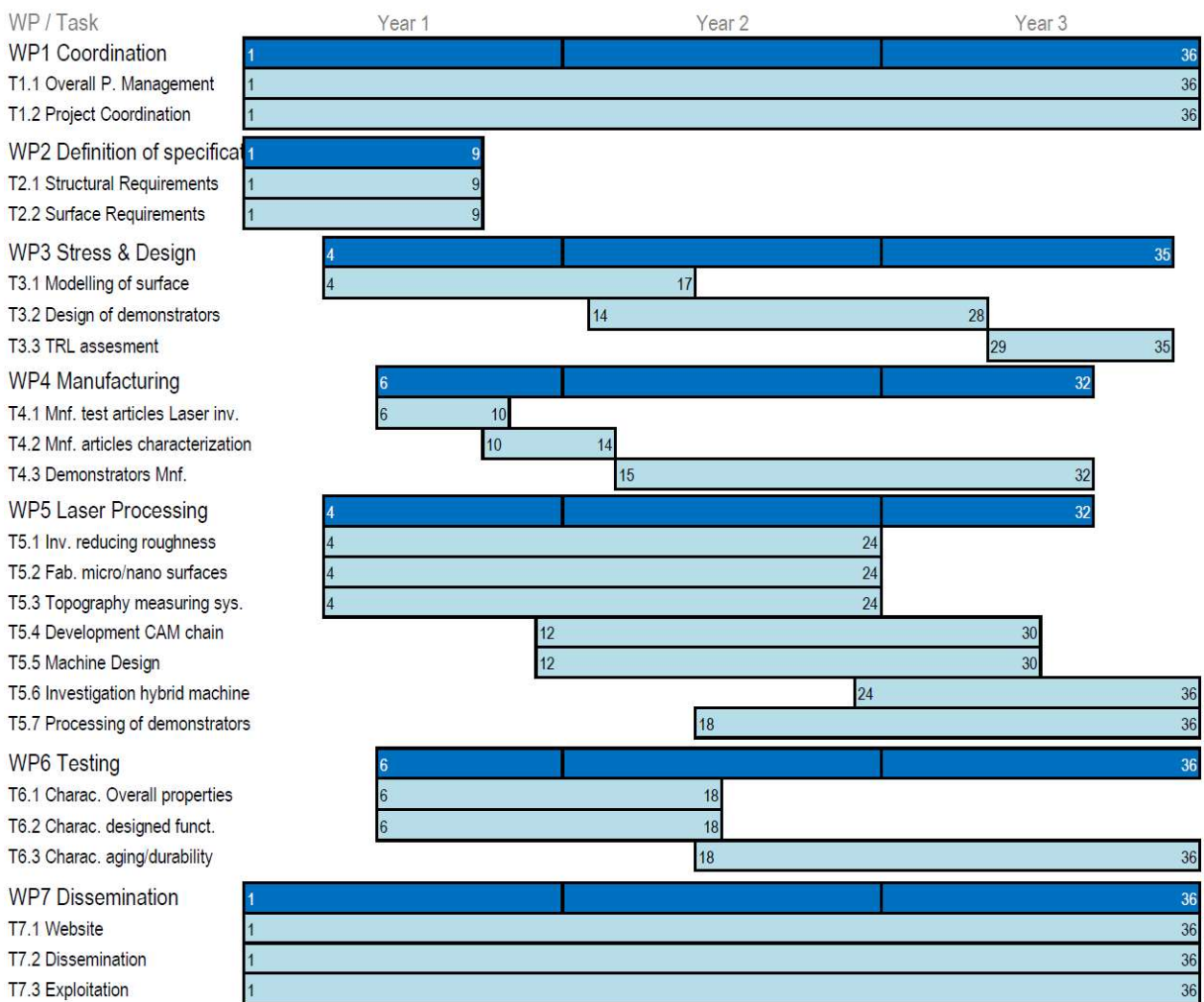
Das Design wird auch die Kombination des Laserschmelzverfahrens beinhalten, um die Oberflächenrauheit der Komponenten zu reduzieren.

Korrosionsbeständigkeit

Die standardmäßigen nassen elektrochemischen Oberflächenbehandlungen für den Korrosionsschutz sind effektive Prozesse, aber extrem ineffizient und nicht umweltfreundlich. Tausende Liter von Chemikalien werden benötigt, um eine solche Behandlung zum Abschluss zu bringen. Diese Prozesse sind langsam und die korrekte Entsorgung der Chemikalien extrem kostenintensiv. Eine laserbasierte Behandlung kann auch die Korrosionsschutzschicht direkt nach dem Herstellungsprozess des Bauteils erzeugen und ist somit wesentlich umweltfreundlicher. Es werden keine großen Mengen an nasschemischen Materialien mehr benötigt: Die Laserbehandlung erfolgt mit verschiedenen Prozessgasen, um die Charakteristik der gebildeten Schutzschicht zu steuern. Der Einsatz unterschiedlicher Chemikalien in verschiedenen Bearbeitungsschritten entfällt, da die Laserbehandlung die schützende Oxidschicht in einem Arbeitsgang erzeugt.

4. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projektkonsortium von A-MELIUS setzte sich zusammen aus dem Lehrstuhl für Laserbasierte Methoden der großflächigen Oberflächenstrukturierung (TUD) sowie der Industrieunternehmen Airbus GmbH, Pulsar Photonics GmbH, CT Ingenieros sowie Fada-Catec. Mit dieser Kombination aus universitären und industriellen Partnern wurde für das Projekt eine sehr günstige Ausgangssituation geschaffen, da sich die jeweils spezifischen und komplementären Kompetenzen der einzelnen Projektteilnehmer ergänzten und die gesamten Arbeiten mit hoher Fertigungstiefe erfolgen konnten. Die Aufteilung der Arbeitsfelder ist im Forschungsplan dargestellt und gliedert sich in verschiedene Arbeitspakete (WP – Work Package). Das Teilvorhaben (WP5 Laser Processing), welches das Hauptarbeitspaket der TU Dresden war, ist in das gesamte Forschungsvorhaben wie im folgenden zeitlichen Ablaufplan dargestellt:



Arbeitspakete

Innerhalb des Verbunds konzentriert sich das Teilvorhaben auf die laserbasierte Oberflächenmodifikation von additiv gefertigten Metallkomponenten. Zusätzlich leistet der Antragsteller Beiträge zu den folgenden Arbeitspaketen:

Arbeitspaket 1: Koordination

- Technische, administrative, finanzielle und rechtliche Koordination, um ein effektives Management von A-MELIUS zu gewährleisten.

Arbeitspaket 2: Definition der Spezifikationen und des Testplans

- Definition von Anforderungen und Spezifikationen in Bezug auf die Abmessungen der Demonstratoren und Merkmale der modifizierten Oberflächen.

Arbeitspaket 3: Stress & Design

- Unterstützung hinsichtlich der Herstellbarkeit der AM Teile und Laserbearbeitbarkeit der Oberflächen.

Arbeitspaket 5: Laserbearbeitung

- TUD: AP5.1: Grundlegende Untersuchung der Laserbehandlung von additiv gefertigten Bauteilen zur Reduzierung der Oberflächenrauheit für die vorgeschlagenen Anwendungen in 2D-Bauteilen
- TUD: AP5.2: Grundlagenuntersuchung an 2D-Bauteilen zur Herstellung von mikro-/nanostrukturierten Oberflächen für die vorgeschlagenen Anwendungen (Start: M4; Ende: M24).
- TUD: AP5.7: Verarbeitung von Demonstratoren, die von den Endverbrauchern nach den Vorgaben der AP2

Arbeitspaket 7: Verbreitung der Ergebnisse

- TUD: AP7.1: Projekt-Website
- TUD: AP7.2: Verbreitung der Projektergebnisse

Kommunikation im Verbund

Zur Absprache und Unterstützung der Kommunikation unter den Verbundpartnern fanden regelmäßige Telefonkonferenzen und Webmeetings mit involvierten Projektpartnern statt, um sich über den Projektfortschritt auszutauschen. Zusätzlich fand am 09.03.2022 im Rahmen der Projektkoordination ein Meeting in Sevilla (Spanien) statt. Im Unterschied zur ursprünglichen Planungen fanden die Projektmeetings hauptsächlich virtuell statt, da die Covid-19 Situation Präsenzveranstaltungen nicht ermöglichten.

5. Erzieltes Ergebnis

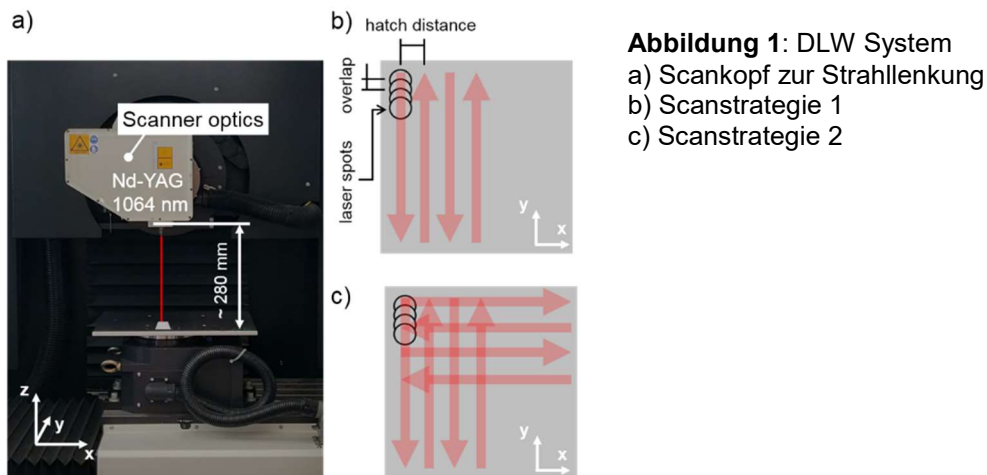
Arbeitspaket 5: Laserbearbeitung

Arbeitspaket 5 befasst sich mit der Modifikation der additiv gefertigten Komponenten aus AP 4 durch den Einsatz gepulster Lasersysteme. Dies ermöglicht die Oberfläche des Materials lokal zu schmelzen, um die Oberflächenrauheit zu reduzieren bzw. periodische Oberflächenmuster im Mikro- und Nanometerbereich mittels direkter Laserinterferenzstrukturierung zu erzeugen. Für die grundlegende Materialbearbeitung wurden zunächst die Ausgangsmaterialien Scalmalloy®, Titan64 und ScanChrome hinsichtlich der Oberflächentopografie mittels verschiedener Analysemethoden betrachtet und evaluiert. ScanChrome ist eine von AIRBUS neu entwickelte Legierung und wurde zusätzlich für ausgewählte Untersuchungen (ab 2021) betrachtet. Der besondere Fokus dieses Arbeitspakets lag in der Erprobung von laserbasierten Methoden zur Oberflächenglättung und Oberflächenstrukturierung unter Anwendung von gepulster Laserstrahlung. Es wurden folgende zwei Arbeitspunkte ausführlich untersucht:

- **Arbeitspaket 5.1:** Grundlegende Untersuchungen der Laserbehandlung von AM Bauteilen zur Reduzierung der Oberflächenrauheit für die vorgeschlagenen Anwendungen.
- **Arbeitspaket 5.2:** Grundlagenuntersuchung an 2D Bauteilen zur Herstellung von mikro-/nanostrukturierten Oberflächen für die vorgeschlagenen Anwendungen.

Arbeitspaket 5.1: Grundlegende Untersuchungen der Laserbehandlung von additiv gefertigten Bauteilen zur Reduzierung der Oberflächenrauheit für die vorgeschlagenen Anwendungen in 2D-Bauteilen:

Die Oberflächenbearbeitung zur Reduzierung der Rauheit der additiv hergestellten Substrate erfolgte mittels direkter Laserbearbeitung an der in Abbildung 1 (a) dargestellten DLW Anlage (Direct Laser Writing Anlage) und den eingangs aufgeführten Werkstoffen Scalmalloy® und Titan64. Es wurde ein Nanosekunden gepulster Nd:YAG Laser mit einer Wellenlänge von 1064 nm verwendet. Abbildung 1 (b und c) veranschaulicht die untersuchten Bearbeitungsstrategien für den Scanner. Weitere Informationen zur Methodik und zum Laserprozess sind im Zwischenbericht 2019 aufgeführt.



Zu Projektbeginn (siehe Zwischenbericht für 2019) wurde ein Screening zur Untersuchung des Einflusses der Pulsdauer und der Fokusversatzposition auf die Rauigkeit durchgeführt und bewertet. Es konnte nachgewiesen werden, dass die Pulsdauer und das verwendete Material einen wesentlichen Einfluss auf die erreichbare Oberflächenrauheit hatten. Die wichtigste Beobachtung ist, dass Titan64 und Scalmalloy® mit unterschiedlichen Einstellungsparametern geglättet werden können. Im Fall von Titan64 wurden die besten Ergebnisse bei 100 ns und einer Laserfluenz von 3,1 J/cm² erzielt. Im Gegensatz dazu lagen für Scalmalloy® die optimalen Bedingungen bei 200 ns-Pulsen und einer Laserfluenz von 23,4 J/cm². Diese Laserfluenz wurde während der weiteren Versuche konstant gehalten. Diese Unterschiede sind auf die unterschiedlichen optischen und thermischen Eigenschaften der Materialien zurückzuführen, wie beispielsweise die Reflexion und die Wärmeleitfähigkeit.

Auf Grundlage dieser Erkenntnisse wurden im Projektverlauf weiterführende Untersuchungen realisiert, um ein optimales Ergebnis mit bestmöglicher Oberflächenqualität zu generieren. Der Fokus der Untersuchungen wurde auf die Variation des Puls-zu-Puls Vorschubs (OV = 80 % - 99 %), die Anzahl Überfahrten (1 bis 25) sowie der Scanstrategie (parallel und 90° rotiert – siehe Abbildung 1 (b) und (c)) gelegt. Nachfolgend werden die wichtigsten Versuchsergebnisse aufgeführt. Abbildung 2 zeigt repräsentative 3D-Bilder der Oberflächentopographie für die Proben aus Titan64 (a-c) und Scalmalloy® (d-f) in Abhängigkeit des Puls-zu-Puls Vorschubs (OV) nach 10 Überfahrten. Anhand der Mikroskopie-Bilder ist ersichtlich, dass die Oberflächenrauheit durch den Laserprozess signifikant beeinflusst werden kann. Die konfokalmikroskopischen Aufnahmen belegen, dass bei einer Pulsüberlappung von beispielsweise 99 % (siehe Abb. 2 (a) und (d)) materialunabhängig eine sehr grobe Topografie generiert wird. Dies lässt sich durch die große Schmelzmenge infolge der hohen kumulierten Energiedichte, die ins Material durch den Laser eingebracht wurde, erklären. Im Gegensatz dazu war bei einer geringeren Pulsüberlappung die Menge des aufgeschmolzenen Materials geringer und es wurden unterschiedliche Oberflächenzustände, abhängig vom Werkstoff, beobachtet, wie in Abbildung 2 (b-c) und (e-f) dargestellt.

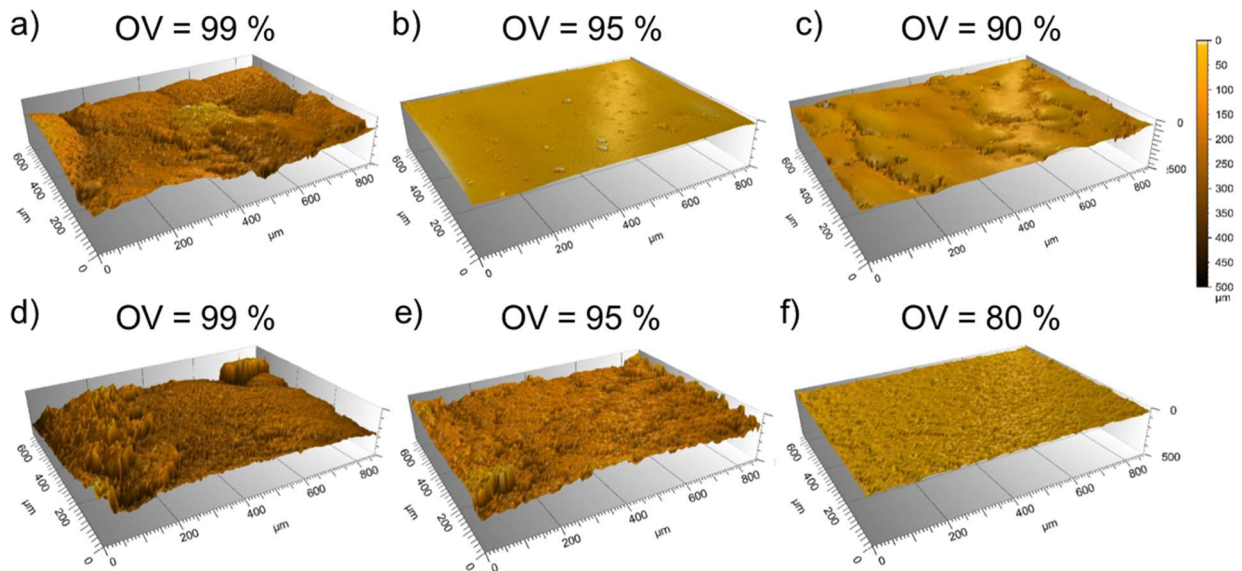


Abbildung 2: Konfokalmikroskopische Aufnahmen der Laser behandelten Oberflächen von Titan64 (a-c) und Scalmalloy® (d-f) für verschiedene Puls-zu-Puls Vorschübe und 10 Überfahrten.

Neben dieser qualitativen Bewertung der Topografie wurde die Oberfläche quantitativ durch Erfassung des Oberflächenrauheitsparameters (S_a) ausgewertet. S_a beschreibt die mittlere arithmetische Höhe der Oberfläche nach DIN EN ISO 25178. Die Messergebnisse sind in Abhängigkeit des Puls-zu-Puls Vorschubs, der Bewegungsstrategie und der Anzahl der Überfahrten in Abbildung 3 für Titan64 (a, b) und für Scalmalloy® (c, d) zusammengefasst. Wie in den Diagrammen ersichtlich ist, liegen die S_a -Rauheitswerte der unbehandelten, additiv hergestellten Oberflächen der beiden Werkstoffe etwa auf gleichem Niveau und sind in den Abbildung farblich grün markiert. Der anfängliche S_a -Wert der unbehandelten Scalmalloy® Oberfläche liegt bei $19,58 \mu\text{m} \pm 9,04 \mu\text{m}$ und der Titan64 Oberfläche bei $21,20 \mu\text{m} \pm 2,85 \mu\text{m}$. Allerdings ist zu erkennen, dass die statistische Standardabweichung des S_a -Wertes bei Scalmalloy® deutlich größer ausfällt als bei Titan64. Dies kann auf das Materialverhalten und das Ausgangspulver zurückgeführt werden. Darüber hinaus sind deutliche S_a -Rauheitsunterschiede hinsichtlich der verwendeten Laserparameter zu erkennen. Beispielsweise führt ein Puls-zu-Puls Vorschub von 99 % zu den höchsten S_a -Rauheitswerten, wie bereits bei den Mikroskopie-Aufnahmen beobachtet wurde. Dieses Verhalten ist unabhängig von der Scanstrategie- und vom Werkstoff. Ein anderes Verhalten wurde für geringere Pulsvorschiebe ($OV = 80 \% - 95 \%$) beobachtet.

Für Titan64 ist anhand der Analyse der Oberflächentopografie ersichtlich, dass bei geringen Pulsüberlappungen ($OV = 90 \%$) und wenigen Überfahrten die Oberfläche durch die Laserbehandlung nur geringfügig beeinflusst wurde. Dagegen wurde festgestellt, dass die glatteste Oberfläche bei einem Pulsvorschiebe von 95 % erreicht wurde. Dies führt zu der Vermutung, dass die kumulierte Energie bei einem Pulsvorschiebe von 90 % nicht ausreicht und bei einem Pulsvorschiebe von 95 % ein optimaler Parameter erreicht wurde, um die Materialspitzen abzutragen und umzuschmelzen. Darüber hinaus ist zu erkennen, dass die Rauheit bei einem Pulsvorschiebe von 95 % mit jeder Überfahrt abnimmt, wodurch von einem kontinuierlichen Glättungsvorgang ausgegangen werden kann. Die durchschnittliche Rauheit reduzierte sich von ursprünglich $21,20 \mu\text{m} \pm 2,85 \mu\text{m}$ auf einen minimalen Wert von $3,45 \mu\text{m} \pm 1,3 \mu\text{m}$ nach 10 Überfahrten, was einer prozentualen Reduzierung von 84 % entspricht. Die Erhöhung der Anzahl Überfahrten (> 10) führte zu keiner weiteren signifikanten Reduzierung der Rauheit (nicht im Diagramm dargestellt).

Im Vergleich dazu ist bei Scalmalloy® bei einem Puls-zu-Puls Vorschub von 90 % und 95 % kein messbarer Effekt hinsichtlich der Oberflächenglättung ersichtlich. Die Messpunkte befinden sich alle innerhalb der Standardabweichung der Ausgangsrauheit. Bei einer Überlappung von 95 % ist darüber hinaus zu erkennen, dass der Wert mit steigender Anzahl der Überfahrten auch steigt. Dies deutet darauf hin, dass das Material nicht geglättet wird, sondern kontinuierlich aufgeraut wird. Bei einem Pulsvorschiebe von 80 % konnte nach 10 Überfahrten eine Reduzierung des S_a -Wertes festgestellt werden. Somit wurde genügend Energie in das Material

eingebraucht, um die Rauheitsspitzen abzutragen und damit die Rauheit zu reduzieren. Die minimale Rauigkeit betrug $6,84 \mu\text{m} \pm 3,73 \mu\text{m}$ und lag 65 % unter dem anfänglichen Wert von $19,58 \mu\text{m} \pm 9,04 \mu\text{m}$ nach der Laserglättung.

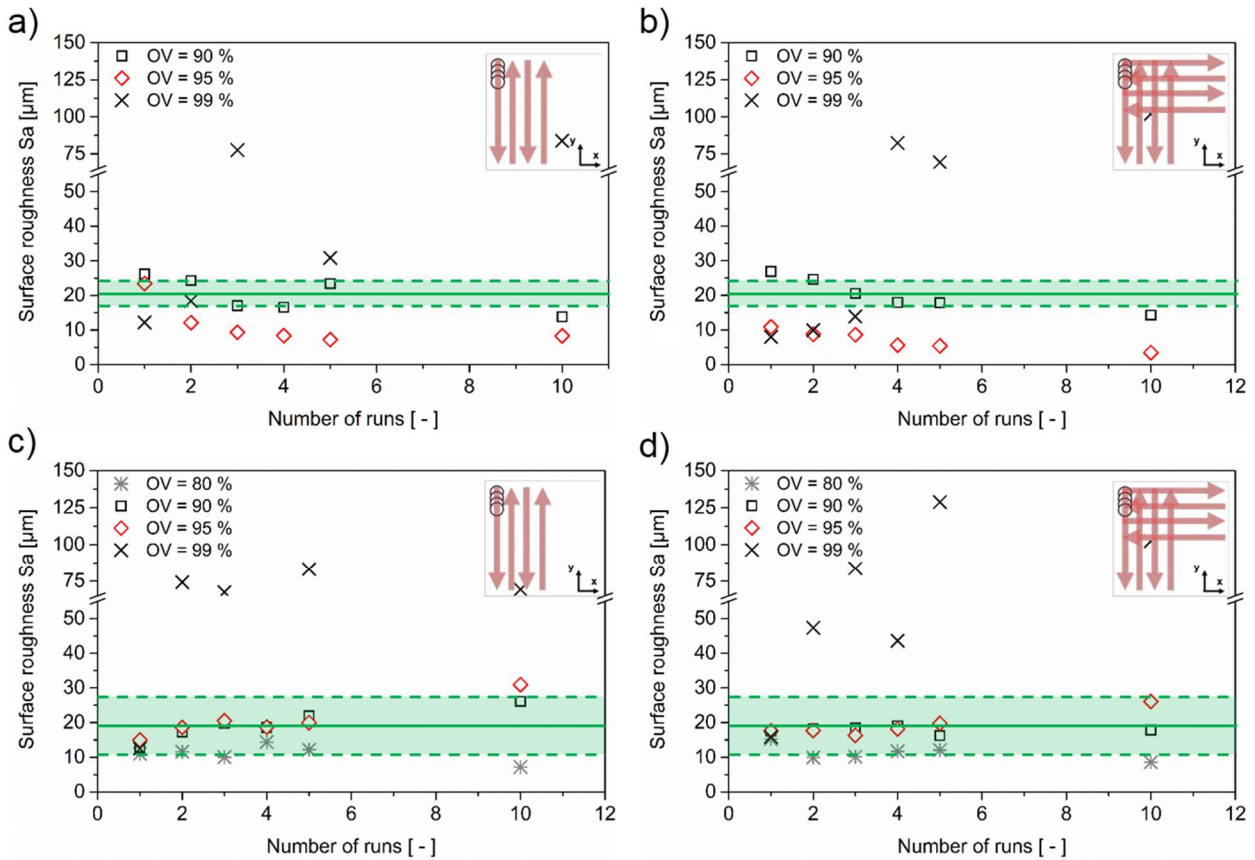


Abbildung 3: Oberflächenrauheit (S_a) der laserbehandelten Oberfläche für verschiedene Puls-zu-Puls Vorschübe (OV) und Anzahl der Überfahrten für Titan64 (a, b) und Scalmalloy® (c, d). Die verwendete Scanstrategie ist in jedem Diagramm angegeben: parallele (a, c) und 90° gedrehte (b, d) Strategien.

Um den Unterschied zwischen der Ausgangsoberfläche und der behandelten Oberfläche näher zu beurteilen, erfolgten REM-Aufnahmen beider Zustände und Materialien. In Abbildung 4 ist der Übergangsbereich zwischen der unbehandelten Oberfläche und der laserbehandelten Oberfläche für Titan64 (a) und Scalmalloy® (b) dargestellt. Wie zu erkennen ist, haben die unbehandelten Oberflächen tropfenförmige Rauheitsspitzen. Dies ist charakteristisch für additiv gefertigte Oberflächen, die nicht nachbehandelt wurden. Im Gegensatz dazu ist die Topographie der lasergeglätteten Oberflächen unterschiedlich. Bei Titan64 (Abbildung 4 (a)) weist die behandelte Oberfläche eine sehr flache und homogene Oberflächentopographie ohne sichtbare Schmelztropfen auf. Bei Scalmalloy® wurden die großen Schmelztropfen, wie sie im Ausgangszustand erkennbar sind, abgetragen und es bildete sich eine neue unregelmäßige Mikrostruktur aus. Es kann davon ausgegangen werden, dass diese Topografie infolge des Laserprozesses entstanden ist, hervorgerufen durch Nanopartikel innerhalb des Ablationsprozesses. Ähnliche Effekte wurden bereits von Boinovich et al. beobachtet [2]. Deshalb kann festgestellt werden, dass die neu ausgebildete Oberflächentopografie eine niedrigere Rauheit als die ursprüngliche Oberfläche aufweist. Die REM-Aufnahmen bekräftigen die zuvor gezeigten Ergebnisse aus Abbildung 3 und verdeutlichen den signifikanten Einfluss der Laserstrahlung auf die Oberflächentopografie.

Basierend auf den zuvor vorgestellten experimentellen Daten können Aussagen zur Einstellung der Laserparameter und den allgemeinen Laserglättungsprozess aufgestellt werden. Erstens wird deutlich, dass die Oberflächenqualität, im Sinne einer Reduzierung des mittleren Rauheitswertes S_a durch die Einstellung des Puls-zu-Puls-Vorschubs erreicht werden kann. Die Ergebnisse zeigen ebenfalls, dass die Anzahl der Überfahrten einen maßgeblichen Einfluss auf die Oberflächentopografie hat. Allgemein kann festgehalten werden, dass es effektiver

Schlussbericht

ist, mit einer geringeren Pulsüberlappung und mehreren Überfahrten zu arbeiten. Eine weitere Erkenntnis ist, dass die Oberflächenrauheit nicht signifikant durch die Scanstrategie beeinflusst wurde. Darüber hinaus ist zu erwähnen, dass die Standardabweichung der Oberflächenrauheit S_a nach dem Laserprozess deutlich geringer ist als die Standardabweichung der Oberflächenrauheit des Ausgangsmaterials, was für beide Materialien gilt. Dies bedeutet, dass die Rauheitsspitzen umgeschmolzen wurden und die Oberfläche eingeebnet wurde.

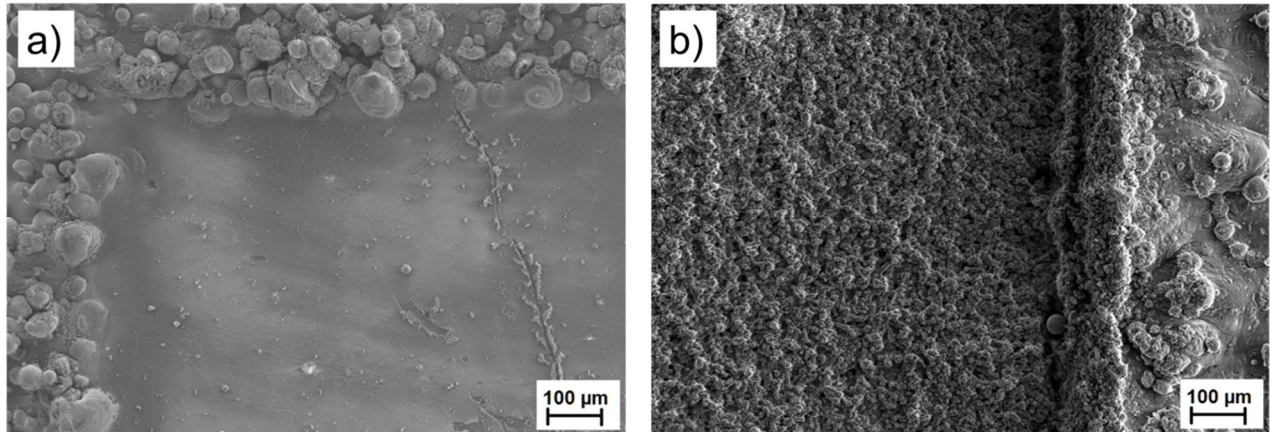


Abbildung 4: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen zeigen die Wirksamkeit des Laserglättungsprozesses für Titan64 (a) (OV = 80 %, Anzahl Überfahrten: 10, Scanstrategie: 90° gedreht) und Scalmalloy® (b) (OV = 95 %, Anzahl Überfahrten: 10, Scanstrategie: 90° gedreht). Die Bilder zeigen jeweils den Übergangsbereich zwischen der unbehandelten und lasergeglätteten Oberfläche.

Neben der Oberflächenqualität wurde die Ablationstiefe, die infolge des Bearbeitungsprozesses entsteht, vermessen und bewertet. Eine grafische Darstellung der mit der Anzahl der Durchgänge zunehmenden Ablationstiefe, auch als Abtragtiefe bezeichnet, ist in Abbildung 5 (a) zu sehen. Um die Abtragtiefe zu quantifizieren, wurde die Höhendifferenz des unbehandelten und des laserbehandelten Bereichs gemessen. Beispielhaft ist dies in Abbildung 5 (b) für Titan64 dargestellt. Das Substrat wurde in diesem Fall mit einem Pulsüberlapp von 95 % und 10 Überfahrten bearbeitet. Anhand des Diagramms ist ersichtlich, dass der Materialabtrag bei 1 bis 2 Überfahrten sehr gering ist ($< 2,5 \mu\text{m}$). Mit steigender Anzahl der Überfahrten nimmt die Ablationstiefe signifikant zu und kann auf die kumulierte Energie, die durch wiederholtes Überfahren eingebracht wird, zurückgeführt werden. Die Ergebnisse geben Aufschluss darüber, dass das Material infolge des Laserprozesses nicht ausschließlich umgeschmolzen, sondern auch abgetragen wird. Die maximal gemessenen Ablationstiefen wurde nach 10 Überfahrten erreicht und lagen bei $44,6 \mu\text{m} \pm 7,5 \mu\text{m}$ bei Titan64 (OV = 95 %, Scanstrategie: 90° gedreht) und $60,4 \mu\text{m} \pm 7,6 \mu\text{m}$ bei Scalmalloy® (OV = 80 %, Scanstrategie: 90° gedreht). Die Ablationstiefe ist nahezu unabhängig von der Bearbeitungsstrategie. Generell lässt sich sagen, dass die Ablationstiefe bei Scalmalloy® höher ausfällt als bei Titan64, was auf die höhere verwendete Laserfluenz zurückzuführen ist ($3,1 \text{ J/cm}^2$ bzw. $23,4 \text{ J/cm}^2$ für Titan64 bzw. Scalmalloy®). Infolgedessen muss der Materialabtrag durch den Laser-Glättungsprozess bei der Konstruktion des 3D-Teils berücksichtigt werden, um die geforderten Abmessungen nach der Laserbearbeitung einzuhalten.

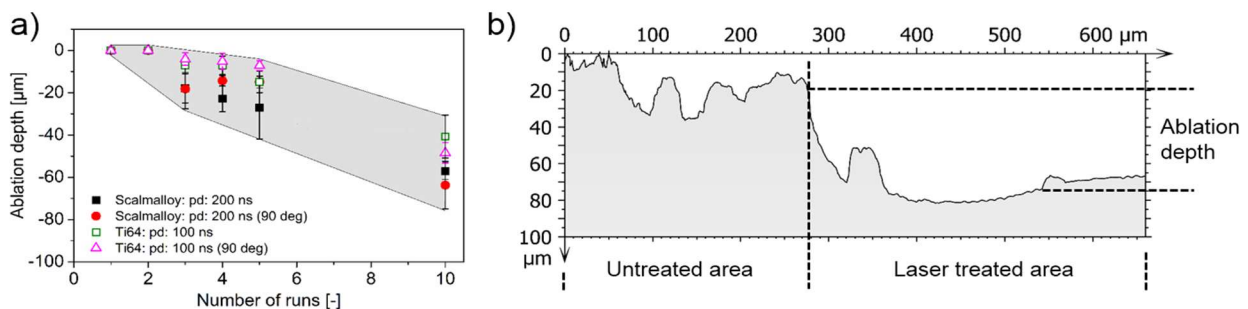


Abbildung 5: (a) Materialabtrag durch den Laserprozess in Abhängigkeit von der Anzahl der Überfahrten; (b) Profil des Übergangsbereichs zwischen dem unbehandelten und dem laserbehandelten Bereich.

Zusammenfassung:

In diesem Arbeitspaket wurden experimentelle Untersuchungen auf der DLW Anlage (Direct Laser Writing Anlage) mit einem Nanosekunden gepulsten Nd:YAG Laser mit einer Wellenlänge von 1064 nm bei vorher ermittelter konstanter Fluenz (Titan: 3,1 J/cm² bzw. Scalmalloy®: 23,4 J/cm²) und festgelegter Pulsdauer (Titan: 100 ns bzw. Scalmalloy®: 200 ns) für die additiv gefertigten Bauteile durchgeführt. Um den Glättungsprozess besser zu verstehen, wurden die Prozessparameter Scanstrategie, Puls-zu-Puls Vorschub und Anzahl Überfahrten variiert. Die wichtigsten Erkenntnisse der Versuche sind:

- Es konnte nachgewiesen werden, dass die Anwendung von Nanosekunden gepulsten Lasern eine wirksame Methode zur Reduzierung der Oberflächenrauheit ist.
- Die erreichte Oberflächenrauheit hing im Wesentlichen vom Material und den untersuchten Prozessparametern Puls-zu-Puls-Vorschub (OV = 80 % - 99 %) und Anzahl der Überfahrten (1 bis 25) ab.
- Die Anzahl der Überfahrten > 10 führte zu keiner weiteren signifikanten Reduzierung der Rauheit und wurde deshalb im Bericht nicht dargestellt. Es konnte kein signifikanter Einfluss der Scanstrategie (unidirektional oder 90° gedreht) auf die Oberflächenrauheit festgestellt werden.
- Die Laserglättung erlaubte die Reduzierung der Oberflächenrauheit von anfänglich 21,20 µm ± 2,85 µm auf 3,45 µm ± 1,3 µm für Titan64 (OV = 95 %, 10 Überfahrten) und von 19,58 µm ± 9,04 µm auf 6,84 µm ± 3,73 für Scalmalloy® (OV = 80%, 10 Überfahrten), was einer prozentualen Reduzierung von 84 % bzw. 65 % entspricht.
- Die Glättung der Oberfläche wurde durch Umschmelzen erzielt. Der Oberflächenzustand nach dem Laserprozess ist materialabhängig entweder flach und homogen (Titan64) oder weist eine unregelmäßige Mikrostruktur auf (Scalmalloy®). Letzteres ist auf die Bildung von Nanopartikeln innerhalb des Ablationsprozesses zurückzuführen.
- Das Material wurde aufgrund der Laserbehandlung auch partiell abgetragen. Die Ablationstiefe hing stark von der Anzahl der Überfahrten, aber nicht von der Scanstrategie ab. Die maximal gemessene Ablationstiefe nach 10 Überfahrten und einem Puls-Überlapp von 95 % (Titan64) und 80 % (Scalmalloy®) betrug 44,6 µm ± 7,5 µm für Titan64 und 60,4 µm ± 7,6 µm für Scalmalloy®. Diese muss folglich bei der Konstruktion des 3D-Bauteils berücksichtigt werden.

Ergänzende experimentelle Untersuchungen:

Weiterführend wurden im Rahmen des Projekts umfangreiche Untersuchungen zur Rauheitsreduzierung an einer innovativen, neuentwickelten Al-Legierung (Scancromal®), welche von Airbus entwickelt wurde, realisiert. Weitere Informationen bzgl. Material- und Herstellungseigenschaften finden sich im Abschlussbericht von Airbus Defence and Space GmbH.

Die Parameter wurden in Anlehnung an vorangegangene Experimente an der Al-Legierung mit der Bezeichnung Scalmalloy ausgewählt. Der Fokus dieser Untersuchungen wurde auf die Variation des Puls-zu-Puls Vorschubs (Overlap = OV = 40 % bis 70 %) sowie der Anzahl der Überfahrten (1 bis 250) gelegt. Hierbei wurde der Puls-zu-Puls Abstand in x-Richtung (HD = hatch distance) und y-Richtung (OV) gleich gehalten. Zusätzlich wurden für die Scancromal® Proben zwei aufbauende Bearbeitungsschritte (nachfolgend mit DLW 1 und DLW 2 bezeichnet) mit unterschiedlichen Parametern durchgeführt, um die Oberflächenbeschaffenheit (Rauheit) weiter zu reduzieren. Die Bearbeitung erfolgte nacheinander. Nachfolgende Tabelle 1 stellt die verwendeten Parameter für die besten Ergebnisse dar:

Tabelle 1: Parameterübersicht für Laserbearbeitung zur Rauheitsreduzierung für Scancromal®.

Laserabtragen (DLW 1)	<ul style="list-style-type: none">• Pulsdauer: 100 ns• Fluenz: 7,02 J/cm²• Frequenz: 30 kHz• OV = HD: 60 %• Anzahl Überfahrten: 250• Fokusversatz: 3 mm
Laserpolieren (DLW 2)	<ul style="list-style-type: none">• Pulsdauer: 200 ns• Fluenz: 21,04 J/cm²• Frequenz: 100 kHz• OV = HD: 60 %• Anzahl Überfahrten: 10• Fokusversatz: 0 mm

Abbildung 6 zeigt repräsentative 3D-Bilder der Oberflächentopographie für die Referenz-Scancromal®-Oberfläche (a) und die laserbearbeiteten Oberflächen für die Bearbeitungsschritte DLW 1 (b) und DLW 1 + DLW 2 (c). Anhand der Mikroskopie-Aufnahmen ist ersichtlich, dass die Oberflächenbeschaffenheit durch den Laserprozess signifikant beeinflusst wurde. Die konfokalmikroskopischen Aufnahmen belegen, dass infolge des ersten Bearbeitungsschrittes (b) die Rauheit bereits reduziert werden kann. Zusätzlich wird bei der Oberflächentopographie beobachtet, dass die großen Materialpartikel abgetragen werden und sich dadurch eine kleinere Mikrorauheit ausbildet. Die Mikrorauheit kann auf den Bearbeitungsprozess zurückgeführt werden (Vergleich Abschlussbericht Arbeitspaket 5.1 am Material Scalmalloy). Zusätzlich belegen die Aufnahmen, dass die Oberflächenrauheit durch Nachbehandlung mittels des zweiten Bearbeitungsschrittes weiter herabgesetzt werden kann, was anhand der Höhenskala ersichtlich ist. Die Oberfläche (c) weist eine sehr homogene, gleichmäßige Topografie auf. Die zuvor beobachtete Mikrorauheit konnte durch die weitere Bearbeitung vollständig abgetragen werden.

Schlussbericht

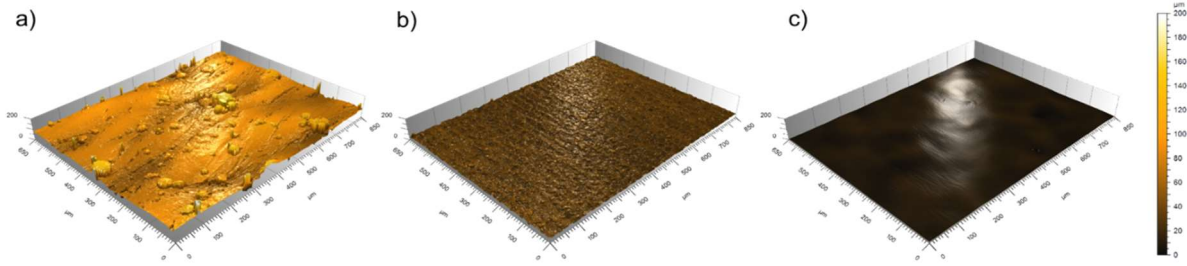


Abbildung 6: Konfokalmikroskopische Aufnahmen der Referenzoberfläche (a) und der laserbearbeiteten Oberflächen (b-c) von Scancromal® für beide Bearbeitungsschritte: DLW 1 (b) und DLW 1 + 2 (c).

Neben der qualitativen Bewertung der Topographie wurde die Oberfläche quantitativ durch Erfassung der Rauheitsparameter (S_a und S_z) ausgewertet. S_a beschreibt die mittlere arithmetische Höhe der Oberfläche nach DIN EN ISO 25178. S_z ist definiert als die Summe aus dem Höhenwert der höchsten Spitze und dem Höhenwert der stärksten Vertiefung innerhalb des Definitionsbereichs. Die Messergebnisse sind in Abhängigkeit des Puls-zu-Puls Vorschubs (OV) und der Bearbeitungsschritte (DLW 1 bzw. DLW 1 + DLW 2) für S_a (a) und S_z (b) zusammengefasst (Abbildung 7). Wie in den Diagrammen ersichtlich ist, liegen sowohl die S_a als auch die S_z Rauheitswerte der unbehandelten, additiv hergestellten Oberflächen (grün markiert) deutlich über den Werten der laserbehandelten Oberflächen. Der Ausgangswert der unbehandelten Oberfläche liegt bei $S_a = 12,4 \mu\text{m} \pm 1,7 \mu\text{m}$ und $S_z = 193,2 \mu\text{m} \pm 9,5 \mu\text{m}$, was für unbearbeitete additiv gefertigte Substrate üblich ist.

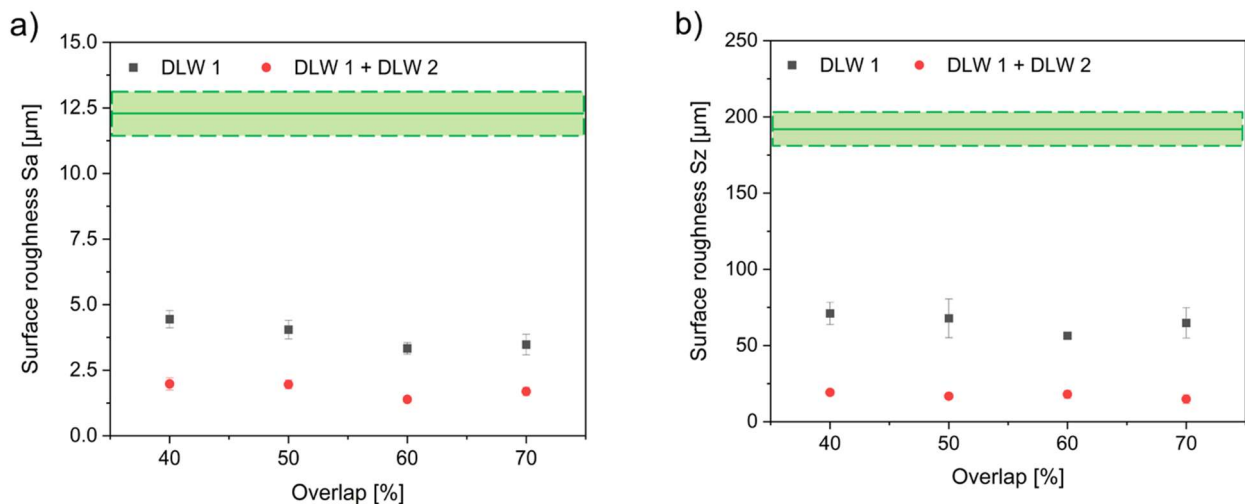


Abbildung 7: Oberflächenrauheit S_a (a) und S_z (b) der laserbehandelten Oberflächen für verschiedene Puls-zu-Puls Vorschübe (OV) und Bearbeitungsschritte (DLW 1 und DLW 1 + DLW 2) für Scancromal®.

Demgegenüber sind deutliche Rauheitsunterschiede hinsichtlich der verwendeten Laserparameter und Bearbeitungsschritte zu erkennen. Beispielsweise führt ein Puls-zu-Puls Vorschub von 60 % zum niedrigsten S_a -Wert, was auf einen optimalen Parametersatz (hinsichtlich Anzahl Überfahrten, Puls-zu-Puls-Vorschub) hindeutet. So konnte die S_a -Oberflächenrauheit (Abbildung 7a) von ursprünglich $12,4 \mu\text{m} \pm 1,7 \mu\text{m}$ (Referenz) auf $3,3 \mu\text{m} \pm 0,2 \mu\text{m}$ bzw. $1,4 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ für DLW 1 bzw. DLW 1 + DLW 2 bearbeitete Oberflächen reduziert werden, was einer prozentualen Rauheitsreduzierung von 73 % bzw. 89 % entspricht. Darüber hinaus ist eine signifikante Verringerung der Standardabweichung nach der Laserbearbeitung ersichtlich, was auf eine gleichmäßigere Oberflächentopografie hindeutet. So reduzierte sich die Standardabweichung von ursprünglich $1,7 \mu\text{m}$ (Referenz) auf $0,2 \mu\text{m}$ bzw. $0,1 \mu\text{m}$ nach dem Laserprozess, was einer prozentualen Reduzierung von 88 % bzw. 94 % entspricht. Bemerkenswert hierbei ist, dass die Rauheit zwischen der einfachen Bearbeitung (DLW 1) und der Multi-Bearbeitung (DLW 1 + DLW 2) nochmals halbiert werden konnte. Eine ähnliches Verhalten zeigen auch die S_z -Werte (Abbildung 7b).

Schlussbericht

Um den Unterschied zwischen der Ausgangsoberfläche und den laserbearbeiteten Oberflächen näher zu beurteilen, wurden REM-Aufnahmen erstellt. Abbildung 8 veranschaulicht die Referenzoberfläche (a), sowie die DLW 1 (b) und DLW 1 + DLW 2 (c) bearbeitete Oberfläche. Wie zu erkennen ist, hat die unbehandelte Oberfläche große tropfenförmige Rauheitsspitzen ($>150\ \mu\text{m}$), was bereits bei Scalmalloy® und Titan64 Substraten (Vergleich Zwischenbericht 2020) ersichtlich war. Dies ist charakteristisch für die unbehandelte additiv gefertigte Oberfläche und ist in Übereinstimmung mit den hohen Rauheitswerten aus Abbildung 3 ($S_z = 193,2\ \mu\text{m}$). Zurückgeführt werden können die tropfenförmigen Partikel auf den Herstellungsprozess, was bereits hinreichend in der Literatur diskutiert wurde [3]. Im Gegensatz dazu weist die Topographie der lasermodifizierten Oberflächen charakteristische Unterschiede auf. Beide Oberflächen haben sichtbar weniger und deutlich kleinere Unregelmäßigkeiten. Besonders die DLW 1 bearbeitete Oberfläche (b) ist gekennzeichnet von einer Mikrorauheit, die bereits anhand der Konfokalmikroskopie-Aufnahmen (vergleiche Abbildung 2b) beobachtet wurde. Bei der zweistufigen Bearbeitung wurde diese Mikrorauheit vollständig beseitigt und die Oberfläche ist sehr homogen. Dies ist in Übereinstimmung mit den zuvor beschriebenen niedrigen Rauheits-Werten und verdeutlicht den signifikanten Einfluss des Bearbeitungsschrittes DLW 2 auf die Oberflächenqualität. Es ist hierbei anzumerken, dass die Oberfläche vereinzelt Löcher enthält. Diese können als Poren identifiziert werden, die infolge der Rauheitsreduzierung freigesetzt werden. Poren entstehen infolge des Herstellungsprozesses der AM-Bauteile.

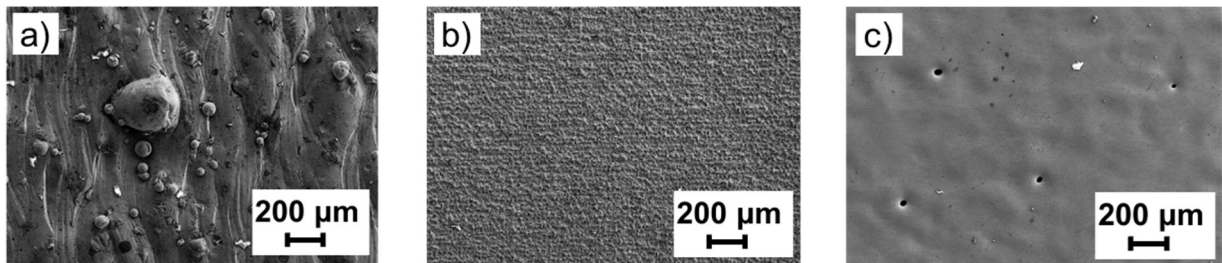


Abbildung 8: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen zeigen die Wirksamkeit der Lasermodifikation für Scancromal® Substrate. Die Aufnahmen zeigen die unbehandelte (a), DLW 1 bearbeitete (b) und DLW 1 + DLW 2 bearbeitete Oberfläche.

Neben der Oberflächenqualität wurde die Ablationstiefe (auch als Abtragtiefe bezeichnet), die infolge des Bearbeitungsprozesses entsteht, vermessen und bewertet. Eine grafische Darstellung der Abtragtiefe ist in Abbildung 9 exemplarisch dargestellt. Um die Ablationstiefe zu bestimmen, wurde die Höhendifferenz des unbehandelten und des laserbehandelten Bereichs gemessen. Das Substrat wurde in diesem Fall mit dem ersten Prozessschritt (DLW 1) und den Parametern aus Tabelle 1 bearbeitet. Anhand des 3D Bildes und des zugehörigen Höhenprofils (a) ist ersichtlich, dass infolge der Laserbearbeitung eine signifikante Materialablation erfolgte. Im Profil (b) wird die qualitative Beobachtung quantifiziert. Es wird beobachtet, dass infolge des Laserprozesses etwa $200\ \mu\text{m}$ abgetragen werden. Die Ergebnisse geben Aufschluss darüber, dass das Material infolge des Laserprozesses nicht ausschließlich umgeschmolzen, sondern auch abgetragen wird. Durch Anwendung des zweiten Prozessschrittes (DLW 2) wurde kein weiterer Materialabtrag beobachtet. Dies kann durch einen reinen Umschmelzprozess erklärt werden, bei dem kein Material abgetragen wurde. Durch Anwendung beider Prozessschritte muss der Abtrag durch den Glättungsprozess bei der Konstruktion des 3D-Bauteils berücksichtigt werden, um die geforderten Abmessungen nach der Laserbearbeitung einzuhalten.

Die Oberflächenmodifikation der neuentwickelten Al-Legierung unterstreicht die Sinnhaftigkeit der gewonnenen Erkenntnisse aus dem Forschungsvorhaben und deren Übertragbarkeit auf ähnliche Materialkategorien. Es konnten vergleichbare Ergebnisse an unterschiedlichen Materialien beobachtet werden, was den Lösungsansatz der laserbasierten Oberflächenglättung verdeutlicht und die Anwendungsmöglichkeiten erhöht.

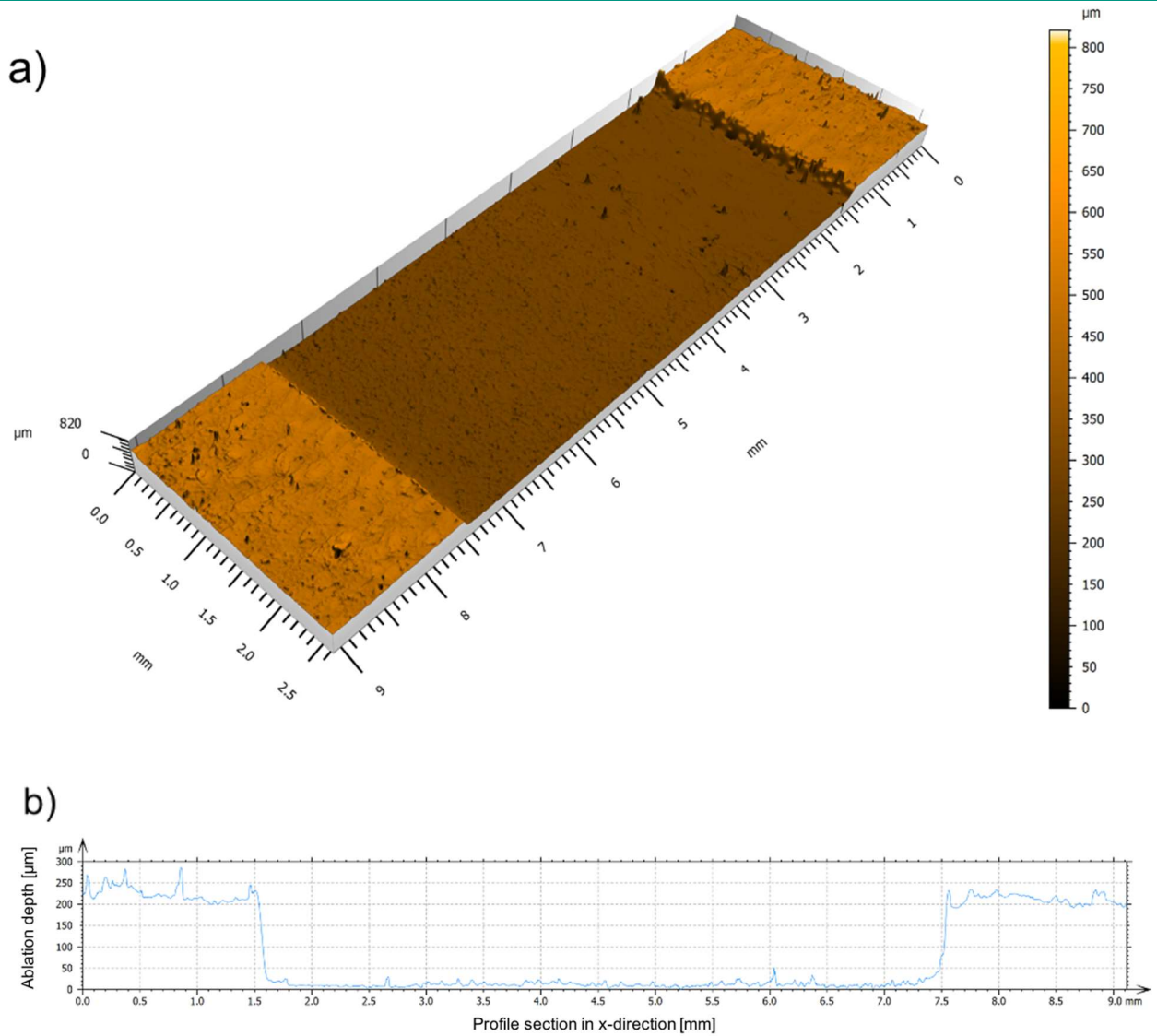


Abbildung 9: 3D- Aufnahme des Materialabtrages durch den Laserprozess (DLW 1) und der zugehörige Profilquerschnitt (b) für Scancromal®.

Arbeitspaket 5.2: Grundlagenuntersuchung an 2D Bauteilen zur Herstellung von mikro-/ nanostrukturierten Oberflächen für die vorgeschlagenen Anwendungen.

Die Funktionalisierung der additiv hergestellten Substrate erfolgte mittels direkter Laserinterferenzstrukturierung (DLIP) an einem Nanosekunden gepulsten Nd:YAG Laser mit einer emittierten Laserwellenlänge von 1064 nm. In diesen Untersuchungen wurde ein 2-Strahl-Setup genutzt, bei dem sich ein linienförmiges Intensitätsprofil mit definiertem Interferenzvolumen ausbildet. Das Material wird oberflächlich mit jedem einzelnen Laserpuls ablatiert, wodurch sich direkt die Struktur des Intensitätsprofils auf das Substrat überträgt. Abbildung 10 (a) veranschaulicht schematisch das verwendete DLIP System mit zwei elongierten Laserstrahlen ($0,1 \times 5 \text{ mm}^2$), die auf der Substratoberfläche überlappt werden, um ein linienförmiges Intensitätsprofil zu generieren. In Abbildung 10 (b) ist die angewendete Bearbeitungsstrategie dargestellt, um eine gleichmäßige linienförmige Struktur zu erzeugen. Die Strukturperiode, das heißt der Abstand zwischen zwei Intensitätsmaxima, liegt bei diesem Setup bei rund $20 \mu\text{m}$ und die Überlappung (OV) in y-Richtung wurde zwischen 0 und 98% variiert. Aufgrund der elongierten Strahlformung und der damit verbundenen breiteren Materialbearbeitung in x-Richtung wird auf eine Überlappung (HD = hatch distance) in x-Richtung verzichtet.

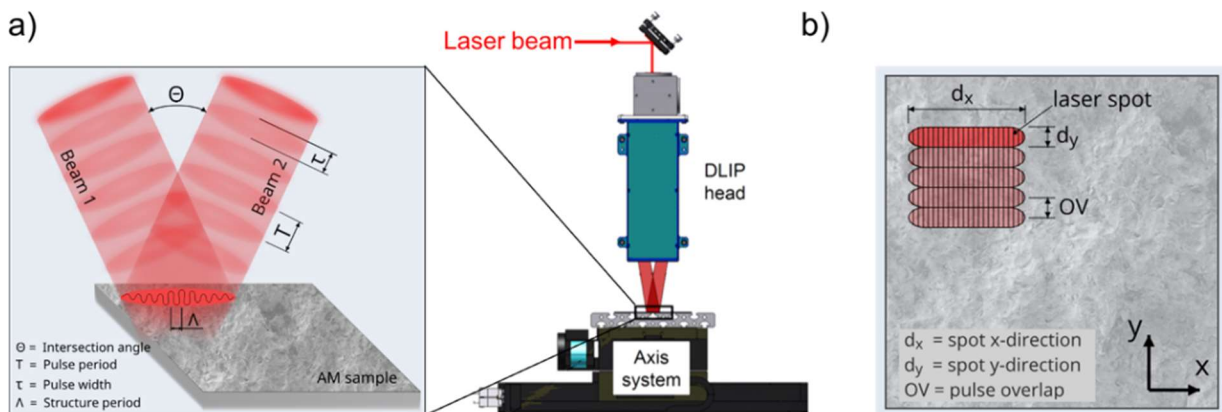


Abbildung 10: (a) Schematische Darstellung des verwendeten DLIP-Systems mit zwei elongierten und überlappenden Laserstrahlen; (b) Schematische Darstellung der DLIP-Strategie zur Erzeugung linienförmiger Muster durch Steuerung der Puls-zu-Puls Vorschubs (OV) [2].

In grundlegenden Untersuchungen wurden für beide Werkstoffe Scalmalloy® und Titan64 die Bearbeitbarkeit bzw. die Machbarkeit der Herstellung von mikro-/nanostrukturierten Oberflächen untersucht. Erste Erkenntnisse sind im Zwischenbericht 2020 aufgeführt. Die besondere Herausforderung der Bearbeitung der additiv gefertigten Substrate liegt an der hohen Grundrauheit, welche die Mikrostrukturierung erschwert. Aus diesem Grund wurde ein umfassendes Parameterscreening durchgeführt, bei dem die Pulsfrequenz, der Puls-zu-Puls Vorschub (OV) sowie die Laserleistung variiert wurden, um ein Grundverständnis über die Laser-Material-Wechselwirkung und deren Auswirkung auf das Strukturierungsergebnis zu erlangen. Abbildung 11 veranschaulicht exemplarische 3D-Oberflächentopografien der unbehandelten (a, d) und DLIP bearbeiteten (b-c, e-f) Proben für Titan64 (a-c) und Scalmalloy® (d-f). Die Abbildungen entsprechen Proben, die mit Puls-zu-Puls Vorschüben (OV) von 50% und 98% behandelt wurden. Anhand der 3D-Topografieaufnahmen ist ersichtlich, dass beide Materialien signifikant durch die Laserstrahlung beeinflusst werden können. Die Ausgangsoberflächen (a, d) sind deutlich gekennzeichnet von Materialerhöhungen und Unebenheiten. Die Materialerhöhungen unter Anwendung der Laserstrahlung und mit steigender Pulsüberlappung nahmen deutlich ab (siehe Abbildung 11 b, c und e, f). Die Mikroskopie-Aufnahmen deuten darauf hin, dass die Materialien infolge des Energieeintrages umgeschmolzen wurden und die Materialspitzen ins Tal flossen und dadurch reduziert wurden. Bei einer Pulsüberlappung von 50% ist noch keine sichtbare Mikrostruktur vorhanden. Mit höherem Pulsüberlapp (98%) ist die Mikrostruktur jedoch deutlich erkennbar und lässt sich damit erklären, dass mehr Einzelpulse auf die gleiche Position treffen und somit ein höherer kumulierter Energieeintrag pro Fläche aufgebracht wird. Darüber hinaus konnte beobachtet werden,

dass die Mikrostruktur bei Titan64 (Abbildung 11b, c) inhomogener ausfällt als bei Scalmalloy® (e, f). Diese sichtbaren Unterschiede lassen sich auf die unterschiedlichen optischen und thermischen Eigenschaften der beiden Materialien zurückführen, wie z. B. Reflexionsgrad und Wärmeleitfähigkeit. So beträgt beispielsweise die Wärmeleitfähigkeit für Titan etwa $22 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ und für reines Aluminium (99,5 %) $236 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Der Reflexionsgrad beträgt bei senkrechtem Strahleinfall R ($\varphi = 0$) für Titan etwa 0,55 und für reines Aluminium 0,95 im nahen Infrarotbereich [4].

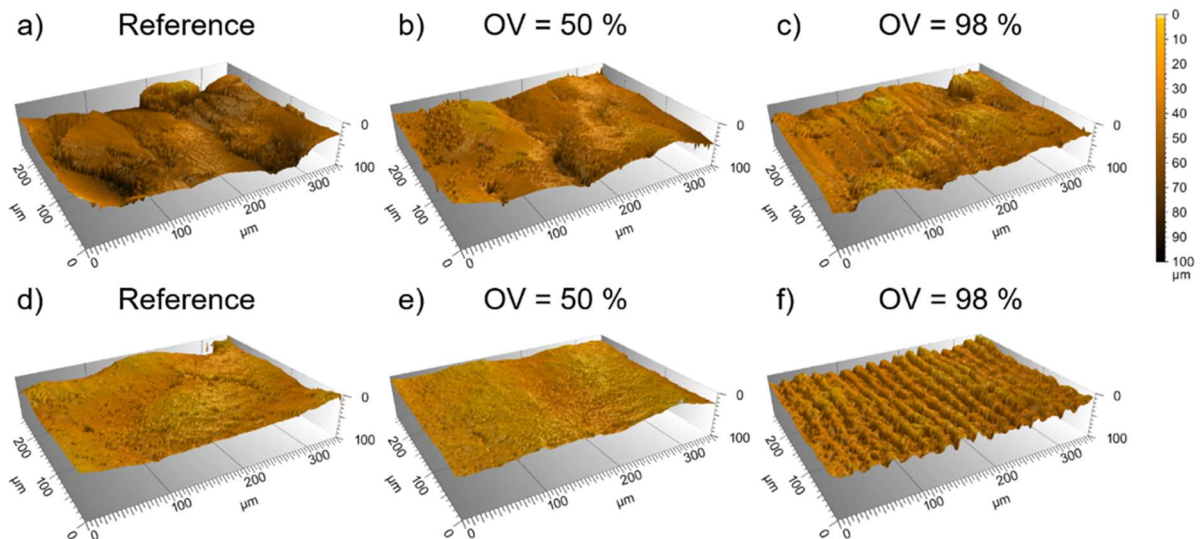


Abbildung 11: Konfokale 3D-Mikroskopieaufnahmen der unbehandelten und DLIP-behandelten Oberflächen für zwei unterschiedliche Pulsüberlappungen (OV = 50 % und 98 %) für Titan64 (a-c) und Scalmalloy® (d-f) Proben [2].

Abbildung 12 veranschaulicht die Oberflächenrauheit (S_a) (S_z wurde bereits im Zwischenbericht 2021 dargestellt) sowie die Höhe der Laserinterferenzstruktur (S_d) – auch als Strukturtiefe bezeichnet – als Funktion des Puls-zu-Puls-Vorschubs. Aus den Diagrammen ist ersichtlich, dass zum einen die Oberflächenrauheit mit steigendem Puls-zu-Puls Vorschub abnimmt und zum anderen die Strukturtiefe mit steigendem Puls-zu-Puls Vorschub zunimmt. Dies lässt sich über den höheren Energieeintrag infolge der höheren Pulsüberlappung erklären. Die Oberflächenrauheit (S_a) verringerte sich von $13,6 \mu\text{m} \pm 5,7 \mu\text{m}$ auf $8,7 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$ bei Titan64 und von $9,6 \mu\text{m} \pm 2,1 \mu\text{m}$ auf $6,2 \mu\text{m} \pm 0,3 \mu\text{m}$ bei Scalmalloy®, was einer prozentualen Reduzierung von rund 35 % für beide Werkstoffe entspricht. Die maximal erreichte Strukturtiefe (S_d) beträgt für Titan64 $3,9 \pm 0,6 \mu\text{m}$ und für Scalmalloy® $11,4 \pm 2,8 \mu\text{m}$.

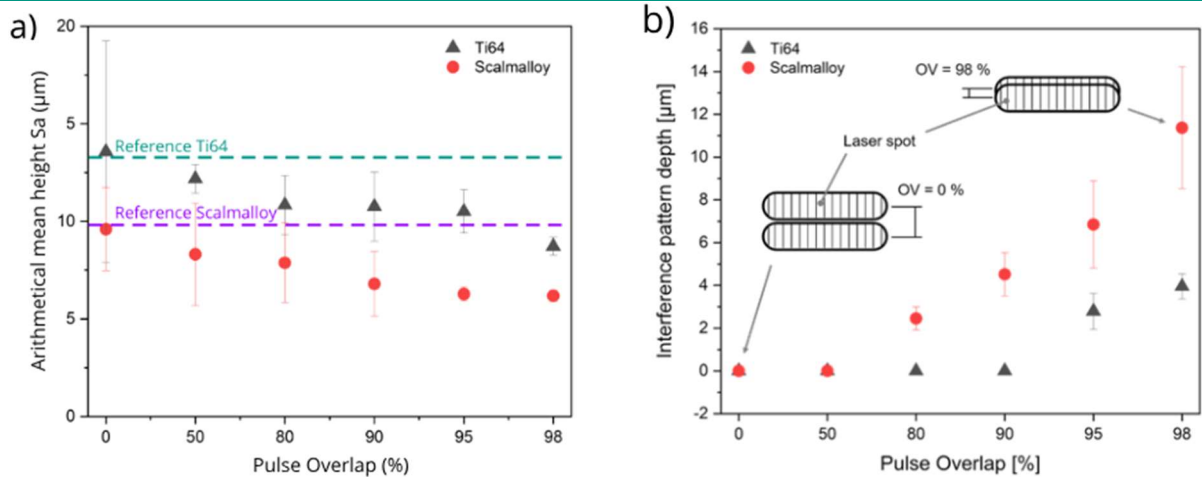


Abbildung 12: (a) Oberflächenrauheit (S_a) und (b) Höhe der Laserinterferenzstruktur (S_d) als Funktion des Puls-zu-Puls Vorschubs (OV = 0 % bis 98 %) bei konstanter Laserfluenz von $3,2 \text{ J/cm}^2$ [2].

Für eine detaillierte Auswertung der unbehandelten und der DLIP-strukturierten Oberflächen wurden REM-Aufnahmen erstellt. In Abbildung 13 sind exemplarisch drei Oberflächenzustände für Titan64 und Scalmalloy® dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass die Referenzoberflächen von Titan64 (a) als auch von Scalmalloy® (d) durch Unebenheiten und Rauheitsspitzen gekennzeichnet sind. Anhand der laserbearbeiteten Oberflächen lässt sich beobachten, dass große Materialpartikel abgetragen oder umgeschmolzen werden und sich eine gleichmäßigere Oberfläche mit sichtbarer Mikrostruktur ausbildet. Die Stärke der Mikrostruktur ist abhängig vom Puls-zu-Puls Vorschub. Beispielsweise zeigen die Abbildungen 13 (b, e), dass sich bei 50 % Pulsüberlappung eine Mikrostruktur ausgebildet hat, welche nach wie vor durch die ursprüngliche Anfangsrauheit geprägt ist. Im Vergleich dazu ist in Abbildung 13 (c, f) erkennbar, dass bei 98 % Pulsüberlappung die Mikrostruktur der DLIP-Behandlung die Oberflächentopografie dominiert. Dies stimmt mit den zuvor dargestellten Ergebnissen hinsichtlich der Oberflächenrauheit (S_a) und deren Abhängigkeit zum Puls-zu-Puls Vorschub (steigender OV führt zu niedrigeren S_a -Werten (Abbildung 8 (a)) überein. Dementsprechend liegt die Rauheit für Titan64 (c) zwischen $12,2 \mu\text{m}$ (OV = 50 %) und $8,7 \mu\text{m}$ (OV = 98 %) und die Strukturtiefe des Interferenzmusters zwischen $0,1 \mu\text{m}$ (OV = 50 %) und $3,9 \mu\text{m}$ (OV = 98 %) für Pulsüberlappungen zwischen 50 % und 98 %. Für Scalmalloy® liegt die Rauheit zwischen $8,3 \mu\text{m}$ (OV = 50 %) und $6,2 \mu\text{m}$ (OV = 98 %) und die Strukturtiefe des Interferenzmusters zwischen $0,2 \mu\text{m}$ (50 %) und $11,4 \mu\text{m}$ (98 %).

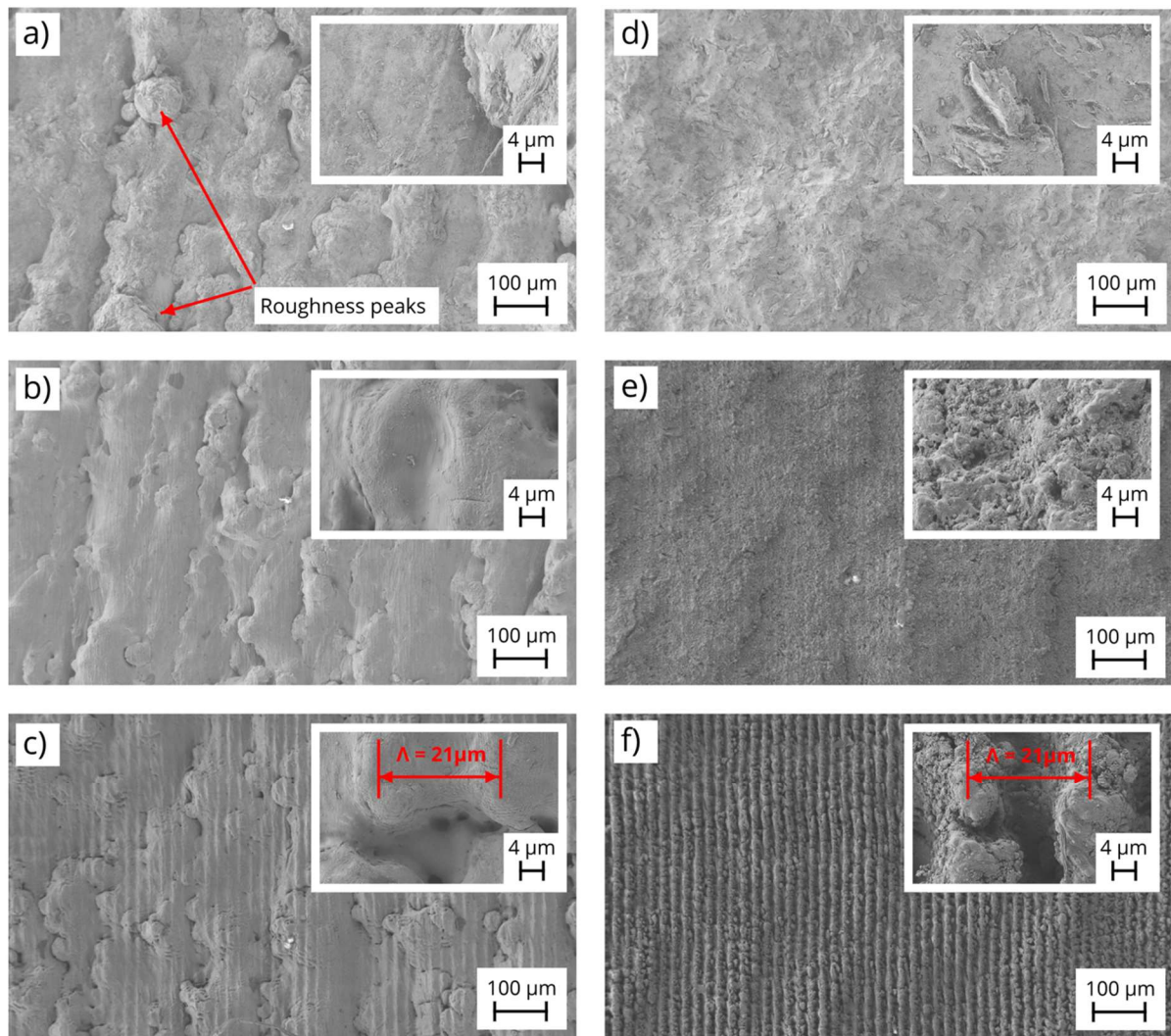


Abbildung 13: REM-Aufnahmen von unbearbeiteten (a, d) und DLIP-behandelten Proben mit Pulsüberlappungen von 50 % (b, e) und 98 % (c, f) für AM-Proben aus Titan64 (a-c) und Scalmalloy® (d-f) bei einer konstanten Laserfluenz von $3,2 \text{ J/cm}^2$.

Neben der topografischen Analyse der Oberfläche wurde zusätzlich das Benetzungsverhalten durch Messung des statischen Wasserkontaktwinkels (WCA) evaluiert. Die Messungen erfolgten im Abstand von 7 Tagen über einen Zeitraum von 49 Tagen. Abbildung 14 veranschaulicht den Kontaktwinkelverlauf der unbehandelten (Strichpunktlinie) und ausgewählter DLIP-behandelter Oberflächen (farbige Symbole) für Titan64 (a) und Scalmalloy® (b). Zusätzlich sind in den Diagrammen die auf der Substratoberfläche aufgesetzten Tropfen abgebildet, um die Veränderung des WCAs zu visualisieren. Wie aus den Diagrammen ersichtlich ist, zeigen alle Oberflächen unmittelbar nach der DLIP-Behandlung ein hydrophiles Verhalten. Die gemittelten WCAs der unbehandelten Proben betragen $25,9 \pm 5,8^\circ$ und $16,3 \pm 3,1^\circ$ für Ti64 bzw. Scalmalloy®. Bei allen laserstrukturierten Proben zeigt sich ein deutlicher Anstieg des WCAs im Laufe der Zeit. Im Fall von Titan64 (Abbildung 14a) zeigen die drei Kurven, die unterschiedliche Pulsüberlappungen darstellen, eine vergleichbare Entwicklung während der ersten 49 Tage. Die gemessenen WCAs liegen unmittelbar nach dem Laserprozess zwischen $32,7^\circ$ und $55,7^\circ$ und steigen mit der Zeit auf Kontaktwinkel zwischen $87,4^\circ$ und $93,4^\circ$ an, was nah an der hydrophoben Grenzbedingung ($\text{WCA} \geq 90^\circ$) liegt. Der Anstieg des WCAs als Funktion der Zeit kann auf die Veränderung der Oberflächenchemie zurückgeführt werden, die nach der Laserbehandlung eintritt. Der höchste gemessene WCA wurde bei den AM-Proben beobachtet, die mit 90 % Pulsüberlappung bearbeitet wurden, wo der Kontaktwinkel von $32,7 \pm 8,1^\circ$ auf $93,4 \pm 2,7^\circ$ anstieg, was einer Verdreifachung des WCAs entspricht. Bei Overlaps von 50 % bzw. 98 % lagen die WCAs nach 49 Tagen sehr ähnlich hoch.

Schlussbericht

Die mit DLIP behandelten Scalmalloy®-Proben (Abbildung 14b) zeigten direkt nach der Laserbearbeitung sehr stark hydrophiles Verhalten und erreichten WCAs zwischen $5,1^\circ$ und $14,3^\circ$. Wie bei den Titan64 Proben stieg der WCA im Laufe der Zeit auf bis maximal $131,4^\circ$ nach 49 Tagen (98 % Pulsoverlapp) an. Bei den geringeren Pulsüberlappungen von 50 % bzw. 90 % betragen die maximalen WCAs nach 50 Tagen $81,3^\circ \pm 5,0^\circ$ bzw. $107,9^\circ \pm 7,6^\circ$. Die WCAs können mit den unterschiedlichen Tiefen der Interferenzstrukturen S_d linear korreliert werden, die $0,2 \mu\text{m}$, $4,5 \mu\text{m}$ und $11,4 \mu\text{m}$ für die Pulsüberlappungen von 50%, 90% bzw. 98% betragen.

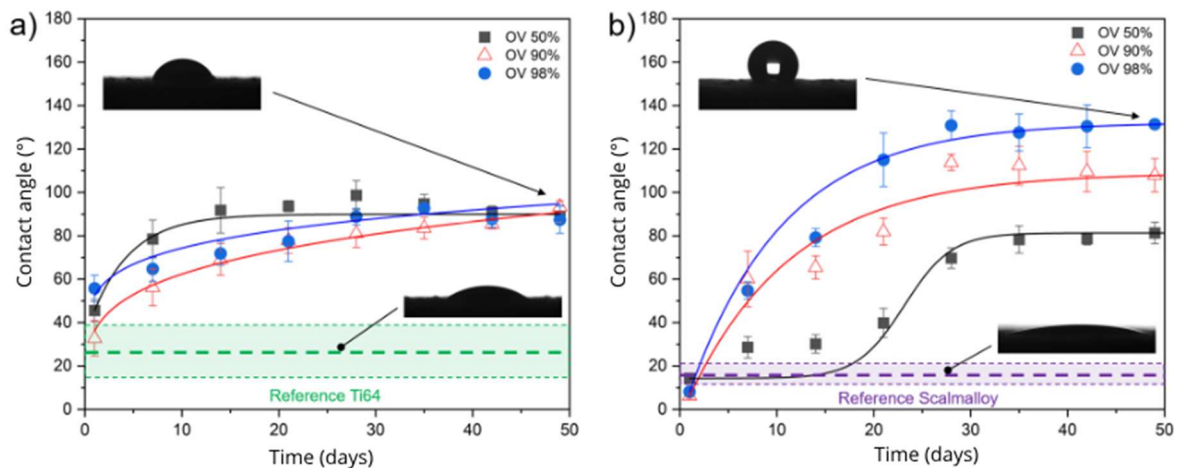


Abbildung 14: Zeitlicher Verlauf der statischen Wasserkontaktwinkel (WCA) für DLIP-modifizierte (a) Titan64- und (b) Scalmalloy®-Proben in Abhängigkeit von der Pulsüberlappung (OV = 50%, 90% und 98%) [2].

Eine größere Tiefe der Interferenzstrukturen bei gleichzeitiger Verringerung der Oberflächenrauheit (S_a , S_z) mit steigendem Puls-zu-Puls-Overlap führt bei Scalmalloy® zu höheren WCAs über die Zeit, was bedeutet, dass die erzeugte Topografie den WCA stark beeinflusst. Hier können die periodischen Texturen für Lufteinschlüsse zwischen dem Material und den Wassertropfen sorgen. Das beweist die Bedeutung der Herstellung einer gut definierten und geordneten Oberflächentopographie für die Kontrolle der Oberflächenbenetzbarkeit.

Insgesamt lässt sich zusammenfassen, dass im besten Fall die Kontaktwinkel nach der DLIP-Behandlung für Titan64 und Scalmalloy® nach 49 Tagen im Vergleich zu den unbehandelten Referenzproben etwa 4- bzw. 8-mal höher sind. Dabei ist Scalmalloy® besser zu einer hydrophoben Funktionalisierung geeignet als Titan64, da hier die Linientextur klarer ausgeprägt ist.

Zusammenfassung:

Die Oberflächenmorphologie und die damit verbundenen Benetzungseigenschaften der periodischen linienförmigen Texturen auf additiv hergestellten Titan- und Aluminiumlegierungen mittels DLIP-Technik wurden systematisch untersucht. Aus dieser Forschungsarbeit lassen sich die folgenden wichtigen Aussagen ableiten:

- Die Durchführbarkeit der ns-DLIP-Behandlung zur Verringerung der anfänglichen Rauheitswerte von additiv hergestellten Titan64- und Scalmalloy®-Proben wurde nachgewiesen.
- Insbesondere ermöglichte das DLIP-Verfahren die Verringerung der Oberflächenrauheit (S_a) von $13,6 \mu\text{m} \pm 5,7 \mu\text{m}$ auf $8,7 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$ bei Titan64 und von $9,6 \mu\text{m} \pm 2,1 \mu\text{m}$ auf $6,2 \mu\text{m} \pm 0,3 \mu\text{m}$ bei Scalmalloy®, was einer prozentualen Reduzierung von rund 35 % für beide Werkstoffe entspricht.
- Außerdem ermöglichte das DLIP-Verfahren, linienartige Muster mit Strukturturen von bis zu $3,9 \mu\text{m} \pm 0,6 \mu\text{m}$ bzw. $11,4 \mu\text{m} \pm 2,8 \mu\text{m}$ für Titan64 und Scalmalloy® bei 99 % Pulsüberlappung zu erzeugen.
- Die DLIP-Behandlung führt bei beiden Materialien zu einer Vergrößerung des statischen Wasserkontaktwinkels nach 49 Tagen. Dieser WCA stieg von $25,9^\circ$ auf $93,4^\circ$ für Titan64 (90 %

Schlussbericht

Pulsüberlappung) und von $16,3^\circ$ auf $131,4^\circ$ für die Scalmalloy®-Legierungen (98 % Pulsüberlappung). Verantwortlich für dieses Verhalten ist die erzeugte periodische Linientextur, die für Luftporen zwischen dem Material und dem Wassertropfen sorgt. Da diese Linientextur bei Scalmalloy®-Oberflächen klarer ausgeprägt ist, verhält sich das Material hydrophober.

Arbeitspaket 5.2: Ergänzende Experimente zu mehrskaligen Oberflächenstrukturen an additiv hergestellten Komponenten.

Darüber hinaus wurden mehrskalige Strukturen auf additiv gefertigten Substraten hergestellt, um den Effekt auf das Benetzungsverhalten zu analysieren. Dies kann damit begründet werden, da aus der Literatur bekannt ist, dass mehrskalige Oberflächenmerkmale verbesserte wasserabweisende Eigenschaften begünstigen [5]. Aus diesem Grund wurden im Rahmen der Projektlaufzeit die Herstellung mehrskaliger Strukturen durchgeführt und hinsichtlich des Wasserkontaktwinkels, der Gefrierzeit, sowie der Oberflächenenergien analysiert.

Die Laserstrukturierung der AM-Proben erfolgte mit den DLIP und DLW Verfahren. Bei der DLIP-Methode wurde die räumliche Periode auf $21\ \mu\text{m}$ festgelegt. Anschließend konnte das erzeugte Muster auf die Materialoberfläche übertragen werden, indem es an den Positionen der Interferenzmaxima aufgeschmolzen oder abgetragen wurde. Im ersten Behandlungsschritt wurde das ns-DLIP-Verfahren mit einem Nanosekunden-Festkörperlaser (Edgewave GmbH) durchgeführt, der bei einer Wellenlänge λ von $1064\ \text{nm}$ und einer Pulsbreite von $10\ \text{ns}$ emittiert (Abbildung 15).

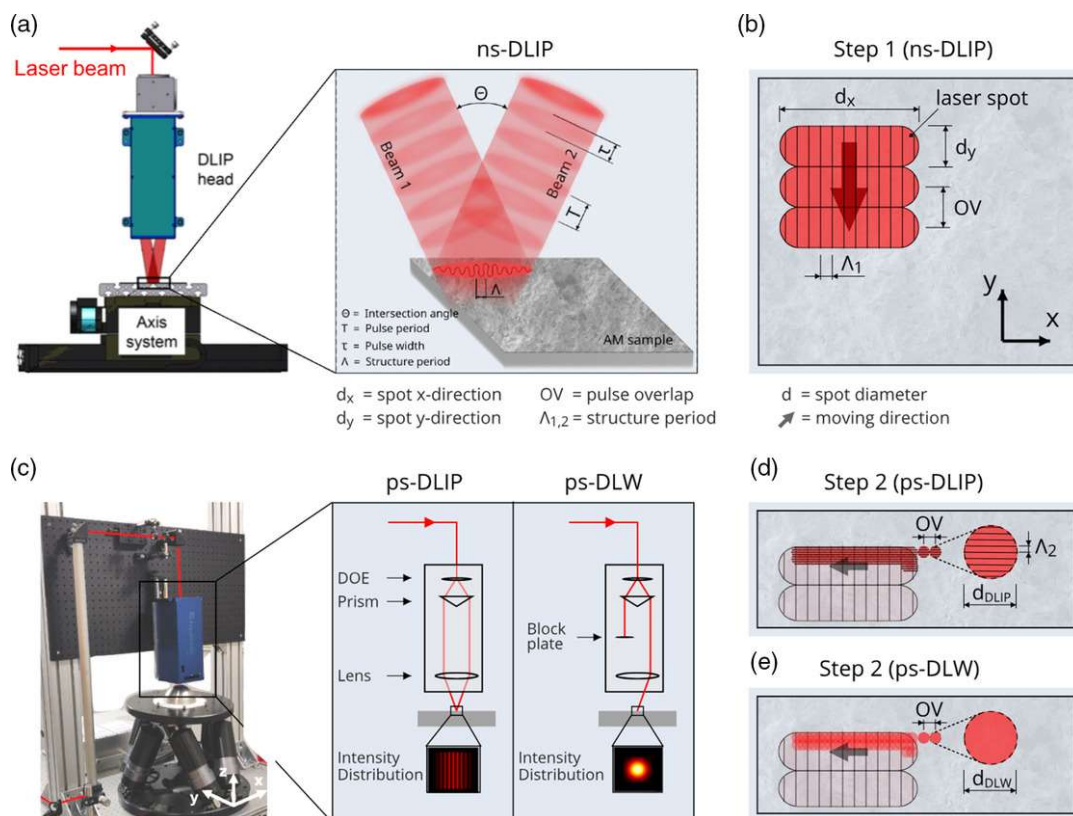


Abbildung 15: a) Versuchsaufbau für das ns-DLIP-Verfahren mit zwei langgestreckten Laserstrahlen, die sich auf der Substratoberfläche überlappen. b) Schematische Darstellung der bewegten Prozessstrategie. c) Versuchsaufbauten für das ps-DLIP- und das ps-DLW-Verfahren. d) Schematische Darstellung der ps-DLIP-Prozessstrategie. e) Schematische Darstellung der ps-DLW-Prozessstrategie.

Die Spotgröße des Interferenzbereichs betrug $\approx 0,1 \times 5\ \text{mm}^2$ und die Laserfluenz wurde auf $3,2\ \text{J/cm}^2$ eingestellt, was hohe Bearbeitungsraten durch Texturierung großer Flächen pro Laserpuls ermöglichte. Die Pulsüberlappung

Schlussbericht

(OV) zwischen zwei einzelnen Laserspots wurde auf 98% eingestellt, um eine kumulierte Laserfluenz F_{cum} von 160 J/cm^2 zu erreichen. Die grundlegenden Parameter des ns-DLIP-Prozesses wurden aus dem Parameterscreening, welche bereits im vorherigen Abschnitt diskutiert wurden, ausgewählt. Nach dem ns-DLIP-Prozess wurde eine zweite Behandlung durchgeführt, um eine mehrskalige Oberflächentextur zu erzeugen. In diesem Fall wurden zwei verschiedene Lasertexturierungstechniken in Betracht gezogen, die DLIP-Behandlung mit ps-Pulsen (ps-DLIP) oder das DLW-Verfahren ebenfalls mit ps-Pulsen (ps-DLW). In beiden Fällen wurde ein Festkörperlaser ($\lambda = 1064 \text{ nm}$) mit 10 ps Pulsbreite und einer maximalen Ausgangsleistung von 100 W verwendet. Weitere Informationen sind in [6] zu finden.

Mehrskalige Strukturen wurden auf additiv gefertigten Scalmalloy- und Ti64-Bauteilen mit einer Kombination von Techniken hergestellt, nämlich 1) ns-DLIP + ps-DLIP sowie 2) ns-DLIP + ps-DLW. Abbildung 16 zeigt beispielhafte REM-Aufnahmen vor und nach der Lasermodifikation von Ti64 (a-c) und Scalmalloy-Oberflächen (d-f). Die unmodifizierten Oberflächen sind in Abbildung 16a,d dargestellt, während die laserbehandelten Oberflächen mit ns-DLIP + ps-DLIP in Abbildung 16b,e zu sehen sind. Das Ergebnis der ns-DLIP + ps-DLW-Behandlung ist in Abbildung 16c,f dargestellt.

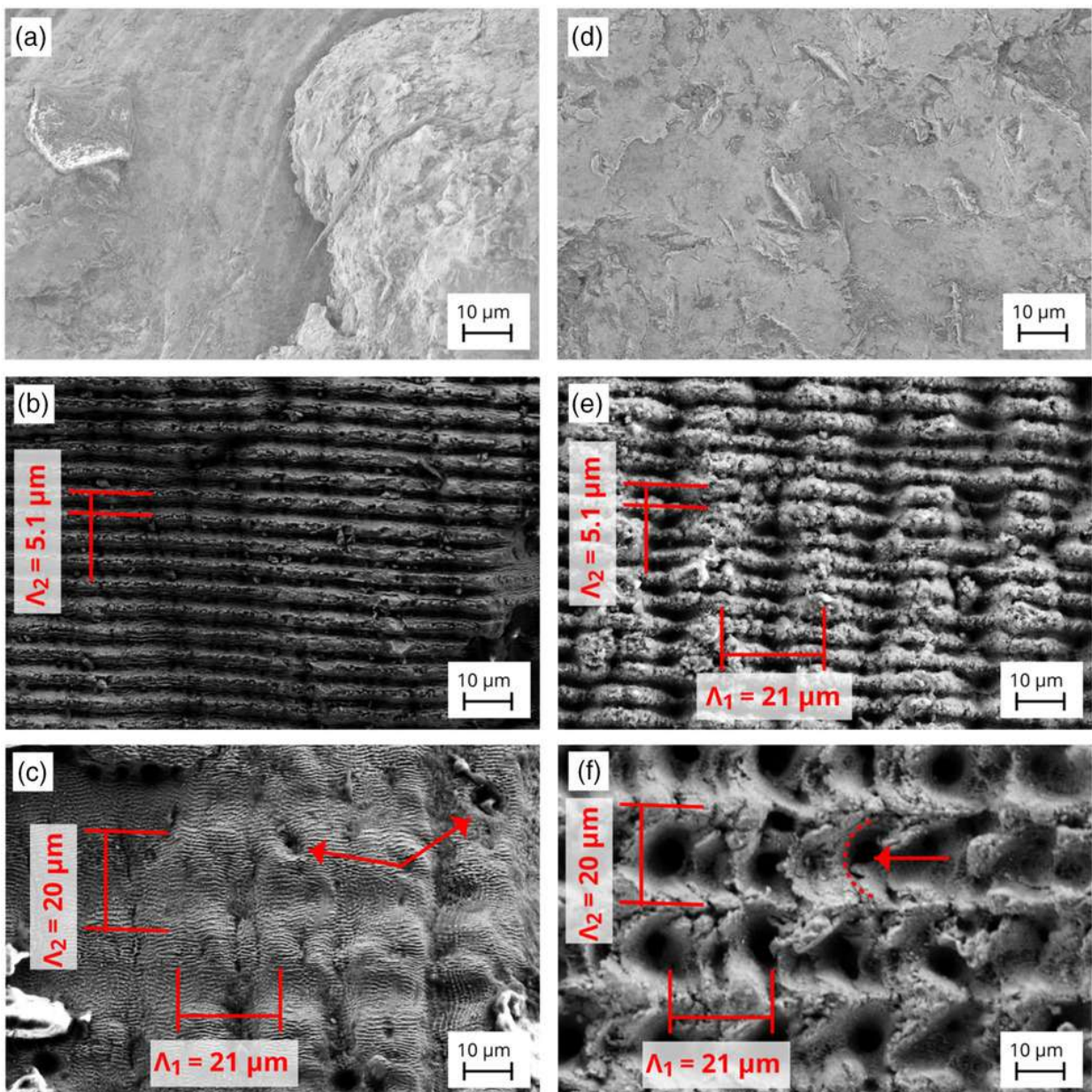


Abbildung 16: a,d) REM-Bilder von unstrukturierten und laserbehandelten Texturen mit b,e) ns-DLIP + ps-DLIP und c,f) ns-DLIP + ps-DLW für AM-Proben aus Ti64 (a-c) und Scalmalloy (d-f).

Schlussbericht

Die Funktionalität der laserbehandelten Oberflächen wurde durch Messungen des statische Wasserkontaktwinkels (WCA), der Kontaktwinkelhysterese (CAH) sowie durch die Bestimmung der Gefrierzeit untersucht. Darüber hinaus wurde die freie Oberflächenenergie (SFE) zum besseren Verständnis und zur Erklärung der damit verbundenen Benetzungseigenschaften eingesetzt. Abbildung 17 zeigt die Ergebnisse 50 Tage nach den Laserbehandlungen für Ti64 (Abbildung 17a) und Scalmalloy (Abbildung 17b). Die Diagramme zeigen die Ergebnisse mit (orangefarbener Bereich) und ohne (blauer Bereich) Anwendung von Mecasurf für alle Oberflächenbedingungen. Die Anwendung von Mecasurf ermöglicht es, die Auswirkungen der Oberflächentopographie auf das Benetzungsverhalten zu untersuchen, da in diesem Fall alle Proben genau die gleiche Oberflächenchemie aufweisen.

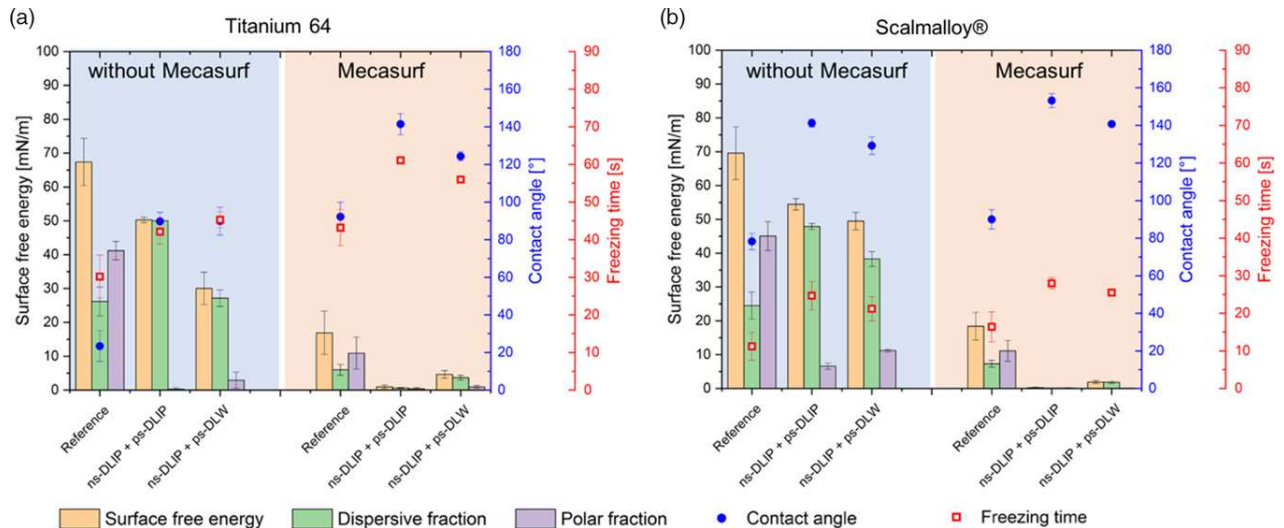


Abbildung 17: SFE, static WCA, and freezing time for a) Ti64 and b) Scalmalloy (specimens depending on the surface condition (reference and laser treated) with and without the use of the chemical agent Mecasurf).

Im Fall von Ti64 (siehe Abbildung 17a) betragen die durchschnittlichen WCAs ohne die Anwendung von Mecasurf-Lösung $23,4^\circ \pm 8,2^\circ$ für die Referenzproben, $89,7^\circ \pm 4,8^\circ$ für die ns-DLIP + ps-DLIP-behandelte Probe und $89,9^\circ \pm 7,4^\circ$ für die ns-DLIP + ps-DLW behandelte Probe (siehe blaue Punkte). Zusätzlich zu den WCAs wurde auch die Gefrierzeit gemessen. Letztere beschreibt die Zeit, die ein Wassertropfen (in diesem Fall $2 \mu\text{L}$) benötigt, um vollständig einzufrieren. Die Gefrierzeiten sind in Abbildung 17 (rote Quadrate) angegeben und ein typisches Experiment ist in Abbildung 18 dargestellt.

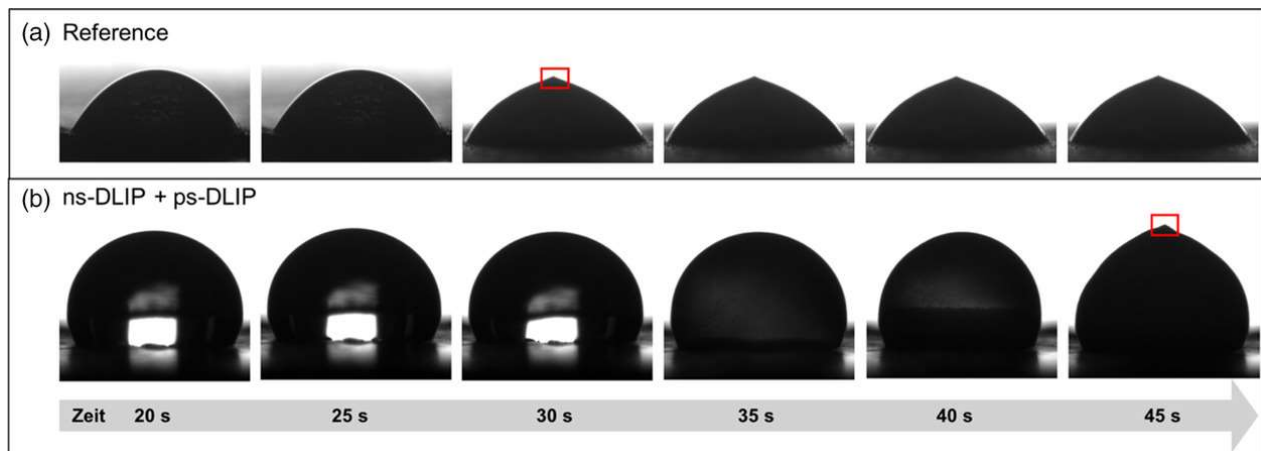


Abbildung 18: Optische Bilder der Entwicklung der Tröpfchenverfestigung auf der a) unbehandelten Referenz im Vergleich zur Ti64-Oberfläche, die mit der b) ns-DLIP + ps-DLW-Behandlungstextur behandelt wurde, aufgenommen über 45s. Die roten Kästen zeigen die gebildete Spitze des gefrorenen Tröpfchens an, was das Ende des Gefrierprozesses anzeigt.

Die Bilder in Abbildung 18 zeigen den Gefrierprozess eines einzelnen Tropfens über einen Zeitraum von 45s für die Referenzprobe (Abbildung 18a) und die ns-DLIP + ps-DLW-verarbeitete Probe (Abbildung 18b). Die Aufzeichnung begann mit dem ersten Kontakt des Wassertropfens mit der Oberfläche und endete, sobald der gesamte Tropfen gefroren war, was an der sichtbaren Spitze auf der Oberseite des Tropfens zu erkennen ist. Wie gezeigt, wurde die Gefrierzeit in diesem Fall von 30s (Referenz) auf 45s erhöht. Der Unterschied in der Gefrierzeit kann mit dem höheren WCA zusammenhängen, der für die laserbehandelte Probe gemessen wurde, was zu einer kleineren Kontaktfläche des Wassertropfens mit der Oberfläche führt und folglich den Wärmefluss vom Material zum Tropfen verringert.

Anschließend wurden die SFEs nach der OWRK-Methode berechnet. Die Unterschiede der WCAs und Gefrierzeiten zwischen den lasertexturierten und den unbehandelten Oberflächen können mit den gemessenen polaren und dispersiven Anteilen korreliert werden, die zusammen die SFE definieren. Die höchste gemessene SFE entspricht der unbehandelten Ti64-Referenz mit 67,4 mN/m. In diesem Fall war der polare Anteil etwas höher als der disperse Anteil, was für additiv hergestellte Titanlegierungen üblich ist. Bei den behandelten Ti64-Proben sank die SFE auf 50,3 bzw. 30,0 mN/m für die Behandlungen ns-DLIP + ps-DLIP und ns-DLIP + ps-DLW. Darüber hinaus war der polare Beitrag zur SFE im Vergleich zum dispersiven (unpolaren) Anteil fast vernachlässigbar. Infolgedessen werden höhere WCAs erzielt.

Bei der Anwendung des Hydrophobierungsmittels Mecasurf auf den Ti64-Oberflächen wurde jedoch eine andere Situation beobachtet (Abbildung 17a). Die OFEs für alle Oberflächenbedingungen zeigten deutlich niedrigere Werte (zwischen 16,9 und 0,1 mN/m), was auf die Sättigung der Oberfläche mit unpolaren Gruppen zurückgeführt werden kann. Da in diesem Fall die Oberflächenchemie aller Oberflächen gleich ist, kann die Verringerung der SFE der laserbehandelten Proben nur durch die erzeugten periodischen topographischen Elemente erklärt werden. Dementsprechend stieg der WCA von $92^\circ \pm 7,7^\circ$ (unbehandelte Referenz) auf $114,4^\circ \pm 9,9^\circ$, $141,4^\circ \pm 5,6^\circ$ und $124,3^\circ \pm 2,5^\circ$ für ns-DLIP (Einzelprozess), ns-DLIP + ps-DLIP bzw. ns-DLIP + ps-DLW. Die CAH betrug $12,3^\circ \pm 0,8^\circ$ für die mit ns-DLIP hergestellten einskaligen Strukturen, während bei den hierarchischen Mustern Werte von $8,1^\circ \pm 2,2^\circ$ (ns-DLIP + ps-DLIP) und $9,2^\circ \pm 2,2^\circ$ (ns-DLIP + ps-DLW) erzielt wurden. Diese Ergebnisse verdeutlichen die Vorteile der hierarchischen Muster im Vergleich zu den einskaligen Merkmalen. Auch in diesem Fall wurden längere Gefrierzeiten gemessen, die ebenfalls sehr gut mit den erhaltenen WCA korrelieren (Abbildung 17). Die längste Gefrierzeit (61s) wurde für die Ti64-Probe gemessen, die mit der ns-DLIP + ps-DLIP-Methode bearbeitet wurde. Diese Zeit ist 103% länger als im Ausgangszustand (Referenz ohne Mecasurf).

Eine ähnliche Analyse wurde für die Scalmalloy-Proben, mit und ohne Anwendung von Mecasurf, durchgeführt. Insbesondere ohne die chemische Behandlung (blauer Bereich in Abbildung 13b) wurden nach den Laserbehandlungen deutlich höhere WCAs als bei der unbehandelten Probe festgestellt. Die gemessenen WCAs betragen $131,4^\circ \pm 2,2^\circ$, $141,2^\circ \pm 2,2^\circ$ und $129,2^\circ \pm 4,7^\circ$ für die mit der ns-DLIP- (einskalige Struktur), ns-DLIP + ps-DLIP- bzw. ns-DLIP + ps-DLW-Methode behandelten Proben (mehrschalige Strukturen). Dies bedeutet einen Anstieg um mehr als 50 % im Vergleich zur unbehandelten Oberfläche (WCA = $78,3^\circ \pm 4,4^\circ$). Der starke Anstieg des WCA (von $78,3^\circ$ auf $141,2^\circ$) kann auch auf den Übergang des Benetzungszustands von Wenzel zu Cassie-Baxter zurückgeführt werden, der durch die erzeugten Multiskalenstrukturen hervorgerufen wird. Wie im Fall von Ti64 wurden auch bei den laserbehandelten Scalmalloy-Proben längere Gefrierzeiten gemessen. Die durchschnittliche Gefrierzeit stieg von 11 s bei der Referenzoberfläche auf 25s bei der ns-DLIP + ps-DLIP-behandelten Oberfläche, die auch den höchsten WCA aufwies. Dies entspricht einem Anstieg von 127%. Interessant ist in diesem Fall, dass die WCA zwar deutlich höher war als bei den Ti64-Oberflächen, die Gefrierzeiten aber generell kürzer waren. Dies kann jedoch durch die höhere Leitfähigkeit von Al-Legierungen im Vergleich zu Ti64-Material erklärt werden.

Die SFEs der Scalmalloy-Proben wurden ebenfalls für alle Oberflächenbedingungen berechnet. In Abbildung 13b ist zu erkennen, dass die SFEs für die lasergestalteten Proben niedrigere Werte aufweisen. Hier schwankten die

Schlussbericht

OFEs von 69,6 mN/m für die Referenzprobe auf 49,5 und 54,4 mN/m für die Behandlungen ns-DLIP + ps-DLW und ns-DLIP + ps-DLIP. Wie bei den Ti64-Proben zeigte sich auch bei der unbehandelten Referenzprobe ein höherer Beitrag des polaren Anteils zur SFE, während bei den laserbehandelten Proben das gegenteilige Verhalten mit einer vernachlässigbaren polaren Komponente beobachtet wurde. Wie im vorherigen Fall wiesen die Proben mit den niedrigsten OFEs auch höhere WCAs auf.

Bei den mit Mecasurf-Lösung beschichteten Scalmalloy-Proben wurden WCAs von 139°, 141° und 153° für die mit ns-DLIP, ns-DLIP + ps-DLW bzw. ns-DLIP + ps-DLIP bearbeiteten Proben gemessen. Die zugehörige CAH betrug $17,1^\circ \pm 1,0^\circ$ für die einskaligen Strukturen (ns-DLIP) und war, wie bei dem Ti-basierten Material, deutlich niedriger für mehrskalige Strukturen mit Winkeln von $5,7^\circ \pm 0,2^\circ$ (ns-DLIP + ps-DLIP) und $6,5^\circ \pm 1,5^\circ$ (ns-DLIP + ps-DLW). Somit wurde die superhydrophobe Bedingung ($WCA > 150^\circ$; $CAH < 10^\circ$) nur für die mit der ns-DLIP + ps-DLIP-Behandlung behandelten Proben erreicht, was im Vergleich zu der mit dem Hydrophobierungsmittel behandelten Referenz ($WCA = 90,0^\circ$) eine Steigerung von 70% bedeutet. Auch bei diesem Material nahmen die berechneten SFEs durch die Anwendung von Mecasurf stark ab (Abbildung 17b), und die niedrigsten Werte (bis zu 0,2 mN/m) wurden für die laserbehandelten Proben erreicht und können nur durch die erzeugten Oberflächenelemente erklärt werden. Die durchschnittliche Gefrierzeit stieg von 16s für die Referenzoberfläche auf 28s für die ns-DLIP + ps-DLIP-behandelte Oberfläche, die auch die höchste WCA aufwies. Diese Werte unterscheiden sich nicht wesentlich von den Ergebnissen ohne das Hydrophobierungsmittel, da auch die letzten Proben ähnliche WCAs aufwiesen.

Insgesamt deuten die Ergebnisse beider Materialien darauf hin, dass die hierarchischen Texturen im Vergleich zu den zufälligen Topografien der Referenzprobe hydrophobe Oberflächeneigenschaften fördern können. Darüber hinaus weisen sie im Vergleich zu den mit ns-DLIP hergestellten einskaligen Texturen geringere Hysteresewinkel auf. Insbesondere die mit ns-DLIP + ps-DLIP hergestellten multiskaligen Strukturen zeigten im Vergleich zu den mit dem ns-DLIP + ps-DLW-Verfahren hergestellten Strukturen ein hydrophoberes Verhalten, was durch die kleineren Strukturgrößen des ps-DLIP-Verfahrens erklärt werden könnte. Weiterführende Ergebnisse können an andere Stelle nachgelesen werden [6]

Arbeitspaket 5.1 und 5.2: Kombination von DLW-Glättung und DLIP-Strukturierung

Die additiv gefertigten Titan 64- und Scalmalloy®-Proben wurden mittels der DLW-Technik geglättet und anschließend mittels DLIP texturiert. Abbildung 19 zeigt REM-Aufnahmen vor und nach der Laserbehandlung von Titan 64 (Abbildung 19a-c) und Scalmalloy® (Abbildung 19d-f). Die unbehandelten Oberflächen sind in Abbildung 19a und d dargestellt, während die lasergeglätteten und lasertexturierten Oberflächen in Abbildung 19b, e bzw. 19c,f zu sehen sind. Die Laserparameter für die Laserprozesse wurden entsprechend der zuvor dargestellten Experimente gewählt. Wie zu erkennen ist, sind die unmodifizierten Oberflächen (Abbildung 19a und d) durch große Rauheitsspitzen ($> 10\mu\text{m}$) gekennzeichnet, die auf nicht oder nur teilweise geschmolzene Pulverpartikel aus dem AM-Prozess zurückzuführen sind. Die anfänglichen Rauheitswerte (S_a) betrugen $13,3 \pm 4,4 \mu\text{m}$ für Titanium 64 und $9,9 \pm 2,9 \mu\text{m}$ für Scalmalloy® und sind in nachfolgender Tabelle 2 zusammen mit anderen Oberflächenparametern (z. B. Strukturtiefe und Raumperiode) aufgeführt.

Tabelle 2: Oberflächenrauheitsparameter (S_a , S_z) und entsprechende Strukturweiten (SD) und räumliche Perioden (Λ) für die mit DLW- und DLIP-Verfahren behandelten Proben.

Oberfläche	S_a [μm]	S_z [μm]	Λ [μm]	SD
Referenz (Ti64)	13.3 ± 4.4	94.0 ± 23.0	-	-
DLW (Ti64)	1.6 ± 0.5	12.9 ± 4.0	-	-
DLW + DLIP (Ti64)	1.8 ± 0.4	18.8 ± 4.8	5.1	2.7 ± 0.5
Referenz (Scalmalloy)	9.9 ± 2.9	83.1 ± 21.8	-	-
DLW (Scalmalloy)	4.9 ± 1.2	45.2 ± 7.9	-	-
DLW + DLIP (Scalmalloy)	6.4 ± 0.8	54.8 ± 3.5	5.1	2.1 ± 0.6

Schlussbericht

Die mit DLW behandelten Proben (Abbildung 19b und e) zeigen unterschiedliche Topografiemerkmale, von einer perfekt geglätteten Oberfläche bis hin zu einer geglätteten Oberfläche mit einer leichten Mikrorauheit. Darüber hinaus waren die gemessenen Oberflächenrauigkeiten im Vergleich zu den Referenzoberflächen in allen Fällen geringer. So verringerte sich beispielsweise die Oberflächenrauigkeit (S_a) von $13,3 \pm 4,4 \mu\text{m}$ auf $1,6 \pm 0,5 \mu\text{m}$ bzw. von $9,9 \pm 2,9 \mu\text{m}$ auf $4,9 \pm 1,2 \mu\text{m}$ bei Titan 64 und Scalmalloy®.

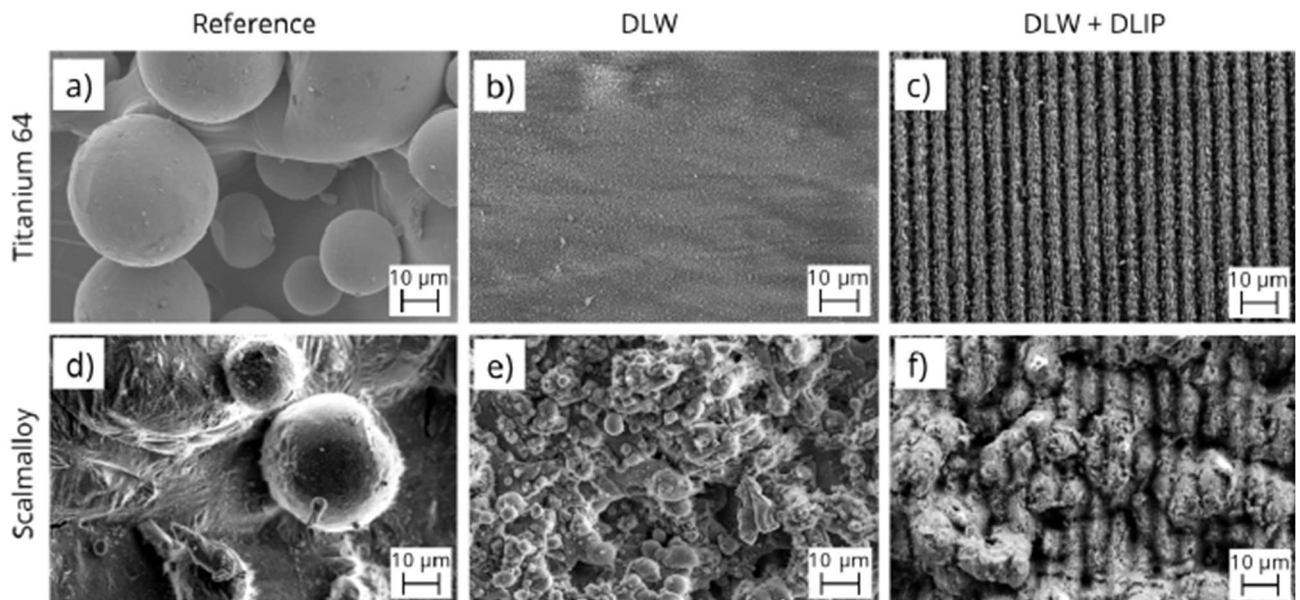


Abbildung 19: REM-Bilder von ursprünglichen (a, d), DLW-behandelten (b, e) und DLW+DLIP-behandelten (c, f) Proben von Titanium 64 (a-c) und Scalmalloy® (d-f).

Bei Titan 64 ist zu erkennen, dass die Oberfläche der DLW-behandelten Probe (Abbildung 19b) eine fast perfekt geglättete Topografie aufweist. Bei Scalmalloy® (Abbildung 19e) ist zu erkennen, dass große Partikel durch das DLW-Verfahren entfernt wurden, aber die behandelte Oberflächentopografie unterscheidet sich deutlich von der des Titan 64. Die Topografie ist durch eine geringe Mikrorauigkeit mit deutlich kleineren Partikeln ($<5 \mu\text{m}$) im Vergleich zur ursprünglichen Oberfläche gekennzeichnet (siehe Tabelle 2). Eine wahrscheinliche Erklärung für die beobachtete Topografie kann mit Nanopartikeln und Clustern aus geschmolzenem Metall zusammenhängen, die sich aus der Ablationswolke absetzen Wolke abgelagert werden, wie in Arbeitspaket 5.1 berichtet wurde.

Bei den DLIP-behandelten Proben (Abbildung 19c und f) ist die Oberflächenmorphologie erwartungsgemäß durch sichtbare linienartige Texturen gekennzeichnet, die der DLIP-Behandlung mit einer räumlichen Periode von $5,1 \mu\text{m}$ entsprechen. Beim Vergleich der beiden Materialien sind jedoch auch einige Unterschiede erkennbar. Die mit DLIP behandelte Titan-64-Probe (Abbildung 19c) weist eine sehr gut definierte periodische Textur ohne sichtbare Defekte auf. Die Strukturtiefe und die zugehörigen Rauheitswerte betragen $SD = 2,7 \pm 0,5 \mu\text{m}$ bzw. $S_a = 1,8 \pm 0,4 \mu\text{m}$ (siehe Tabelle 2). Dies bedeutet, dass sich die DLIP-Behandlung auch auf die Oberflächenrauigkeit der Probe auswirkt, was zu einem etwas höheren Wert im Vergleich zur DLW-behandelten Oberfläche ($S_a = 1,6 \pm 0,5 \mu\text{m}$) führt.

Die mit dem DLIP-Verfahren behandelte Scalmalloy®-Probe (Abbildung 19f) weist im Vergleich zu Titan 64 andere morphologische Merkmale auf. In diesem Fall konnte eine inhomogenere Oberfläche mit einer erheblichen Mikrorauigkeit im Hintergrund (erzeugt durch das DLW-Verfahren) festgestellt werden. Insbesondere kann auch beobachtet werden, dass die ungleichmäßige Hintergrundrauheit die Qualität der periodischen linienartigen Struktur beeinträchtigt, was zu einer undeutlicheren Textur mit einer Strukturtiefe von $SD = 2,1 \pm 0,6 \mu\text{m}$ führt. Eine weitere wichtige Beobachtung neben der Strukturqualität ist, dass die gemessene Oberflächenrauigkeit ebenfalls zunahm, was auf eine leichte Aufrauung der Morphologie durch den DLIP-Prozess hinweist. In diesem

Schlussbericht

Fall stieg der Rauheitswert von $Sa = 4,9 \pm 1,2 \mu\text{m}$ für die mit DLW behandelte Oberfläche auf $Sa = 6,4 \pm 0,8 \mu\text{m}$ für die mit DLW+DLIP behandelte Probe. Auch in diesem Fall kann der leichte Anstieg der Oberflächenrauheit durch die Bildung der linienartigen Mikrostrukturen durch die Zweistrahl-DLIP-Behandlung erklärt werden.

Arbeitspaket 5.3: Verarbeitung dreidimensionaler Bauteilgeometrien

Im Rahmen des Projektes wurden verschiedene 3-dimensionale Bauteilkomponenten erzeugt und mittels der direkten Laserstrukturierung und der direkten Laserinterferenzstrukturierung bearbeitet. Abbildung 20 veranschaulicht exemplarisch additiv gefertigte 3D Komponenten im unbearbeiteten (a, b) sowie im eingebauten Zustand an der Laseranlage (c, d). Abbildung 20a repräsentiert einen Demonstrator und Abbildung 20b veranschaulicht Rundproben die im Rahmen des A-MELIUS Projektes erzeugt und bearbeitet wurden. Dabei lag der Fokus auf das DLW-Verfahren (Abbildung 20c) zur Rauheitsreduzierung sowie auf das DLIP-Verfahren (Abbildung 20d) zur Funktionalisierung. Durch die Anwendung angepasster Bearbeitungskonzepte (z.B. Rotationsachsen, 5-Achs-Bearbeitungssysteme, Hexapod-Positioniersysteme) wird die direkte Laserbearbeitung komplexer Bauteilgeometrien ermöglicht.

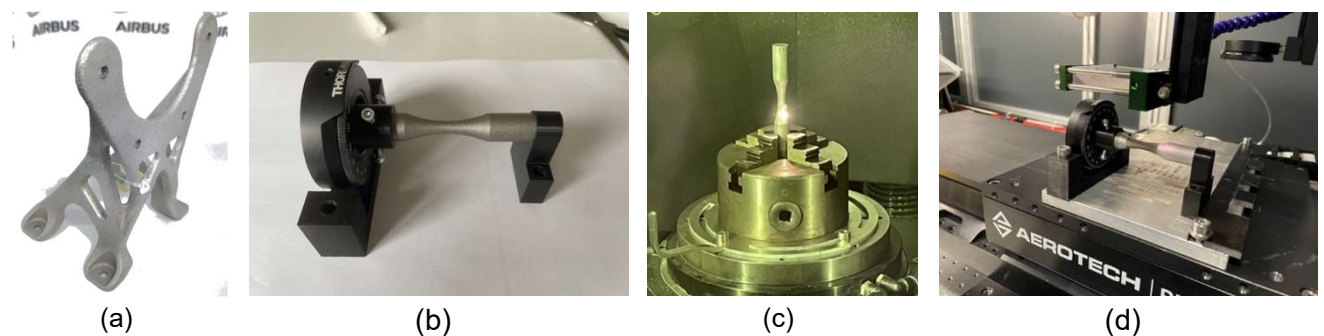


Abbildung 20: (a) 3D-Bauteilgeometrie als Demonstrator (b) Exemplarische Rundproben für Ermüdungsuntersuchungen die mittels DLW (c) und DLIP (d) bearbeitet wurden.

Zusammenfassung

Im Rahmen der Projektlaufzeit konnte die laserbasierte Oberflächenbearbeitung von additiv gefertigten Komponenten erfolgreich angewendet werden. Im speziellen war es möglich die Oberfläche von Al- (Scalmalloy und Scancromal) und Ti-basierten (Titan 64) Legierungen unter Anwendung von gepulster Laserstrahlung zu modifizieren. Die angedachten Ziele, die Oberflächenrauheit zu reduzieren und eine Mikrostruktur zu integrieren, konnten nachgewiesen werden. Folgende wesentliche Erkenntnisse lassen sich daraus ableiten:

- Das direkte Laserschreiben (engl.: Direct Laser Writing: DLW) unter Anwendung von Nanosekunden gepulster Laserstrahlung eignet sich um die Oberflächenrauheit deutlich zu reduzieren und die Oberflächengüte zu verbessern.
- Die direkte Laserinterferenzstrukturierung (engl. Direct Laser Interference Patterning: DLIP) eignet sich um eine Mikrostruktur auf die Substratoberfläche zu integrieren und gleichzeitig das Rauheitslevel zu reduzieren ohne vorherige Poliervorgänge.
- Eine Kombination aus DLW und DLIP ermöglicht eine homogene Strukturierung der Substratoberfläche mit reduzierter Hintergrundrauheit.
- Durch die Herstellung von ein- bzw. mehrskaligen Mikrostrukturen konnten wasser- und eisabweisende Oberflächen mit Wasserkontaktwinkeln $>150^\circ$ für Al-basierte Legierungen und $>140^\circ$ für die Titanlegierung erzeugt werden.

Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen der Projektlaufzeit fanden intensive Kooperationen und Interaktionen mit den Projektpartnern statt, mit dem Ziel die lasermodifizierten Oberflächen mit verschiedenen Charakterisierungsmethoden weiter zu bewerten. Zusammenarbeit bestand hierbei bei Faca-Catec mit Dr. Fernando Lasagni, bei Airbus mit Frank Palm sowie bei Pulsar mit Dr. Frank Zibner. Weiterführende Absprachen erfolgten mit Javier Sánchez, Antonio Butrón (Catec) sowie mit José Antonio de Vicente (CT Ingenieros). Detaillierte Informationen (z.B. Herstellungsverfahren, Materialzusammensetzungen und Analysemethoden) und Ergebnisse sind in den separat veröffentlichten Schlussberichten der Projektpartner dargelegt:

Airbus Defence and Space GmbH: Airbus Central R&T hat im Rahmen der Projektlaufzeit AM Bauteile hergestellt und für die weitere Laserbearbeitung vorbereitet. Besonderer Fokus lag dabei auf der neuentwickelten, innovativen Aluminium Legierung mit der Bezeichnung ScanCromAl, welche im Rahmen der Projektlaufzeit entwickelt wurde, gelegt. Darüber hinaus war Airbus verantwortlich für verschiedene Charakterisierungsmethoden, wie beispielsweise die Ermittlung des Ermüdungsverhaltens an additiv hergestellten und laserbearbeiteten Substraten. Hierbei wurden additiv hergestellte Komponenten aus Scancromal im unbearbeiteten sowie im laserbearbeiteten (DLW-Glättung und DLW-Glättung + DLIP-Strukturierung) Zustand betrachtet und hinsichtlich der mechanischen Leistungsfähigkeit bewertet. Abbildung 21 veranschaulicht REM Aufnahmen der Oberflächenkonditionen, welche für die Untersuchungen herangezogen wurden.

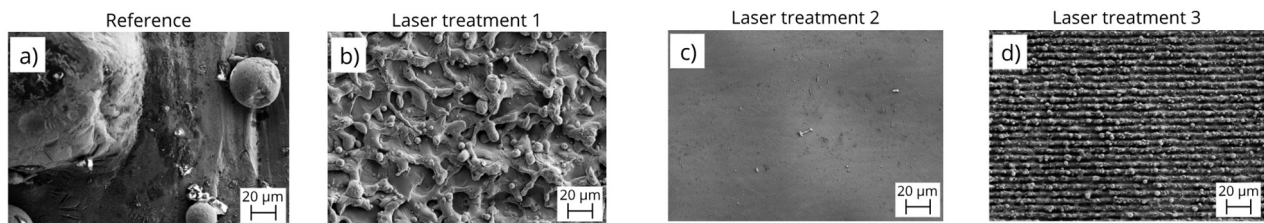


Abbildung 21: REM Aufnahmen von unbearbeiteten (a) und laserbearbeiteten (b-d) Oberflächen. Abbildungen (b) und (c) repräsentieren zwei geglättete Oberflächenkonditionen und Abbildung (d) veranschaulicht eine geglättete und nachträglich DLIP strukturierte Oberfläche.

Abbildung 22 veranschaulicht exemplarisch die additiv gefertigten (a) und exemplarische lasermodifizierten Probenkörper (b, c) vor der Bauteilprüfung. Dabei zeigt Abbildung 21(b) eine lasergeglättete Oberfläche und (c) eine geglättete und DLIP strukturierte Oberfläche. Die Laserbearbeitung erfolgte wie aus den Bildern ersichtlich an Stegbereich, um so einen Einfluss der Oberflächentopographie auf das Ermüdungsverhalten zu ermitteln. Im Detail konnte festgestellt werden, dass die Anzahl der erreichten Lastwechsel bis zum Materialversagen für die laserbearbeiteten Komponenten innerhalb der Spannweite der unbearbeiteten Komponenten lagen. Eine detaillierte Analyse der Untersuchungen kann im Abschlussbericht von Airbus nachgelesen werden.

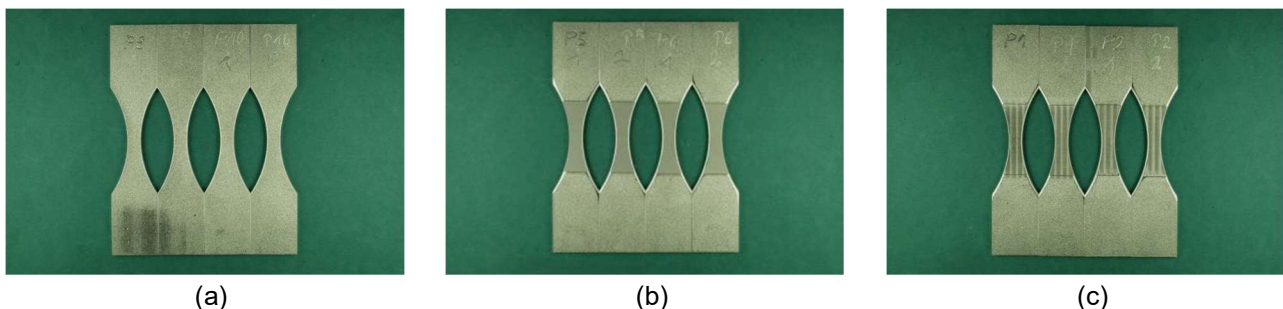


Abbildung 22: Flachzugproben-Prüfkörper im unbehandelten Zustand (a) und im DLW-geglätteten (b) bzw. DLIP-strukturierten Zustand (c).

Pulsar Photonics GmbH: Pulsar Photonics hat im Rahmen der Projektlaufzeit unbehandelte und lasermodierte AM Bauteilemittel mittels eines entwickelten Topographie-Messsystems analysiert und CAM-Verfahrensabläufe zur Wegplanung entwickelt. Im Laufe des Berichtszeitraums wurden mehrfach Messungen für die TU Dresden durchgeführt. Dafür wurden die zwei am Anfang definierten Weißlichtinterferometer (WLI) genutzt. Ziel war es die topographische Oberfläche präzise zu erfassen und das Messsystem ideal für die Verwendung von großen dreidimensionalen Oberflächen anzupassen. Darüber hinaus gab es einen engen Austausch über Anforderungen bzgl. des Topographie-Messsystems und den Oberflächeneigenschaften der laserbearbeiteten Komponenten. Im Rahmen der Projektlaufzeit sind Konzeptideen entwickelt und bewertet worden, welche sich mit der Lagerung der zu bearbeiteten Werkstücke und der Zustellung des Prozesskopfes für eine 3D Bearbeitung der Zieloberflächen beschäftigen. Pulsar Photonics entwickelte Konzeptvarianten für eine A-MELIUS Bearbeitungsmaschine und bewertete diese anhand verschiedener Bewertungskriterien, wie z.B. die Dimensionierung, das Anlagengewicht, die Bearbeitungseffizienz, die Wartungsmöglichkeit sowie die Bearbeitungsmöglichkeiten für verschiedene Werkstücke. Abbildung 23 veranschaulicht drei entwickelte Konzeptvarianten zur großflächigen Bearbeitung und Topographie-Messung komplexer Bauteilgeometrien.

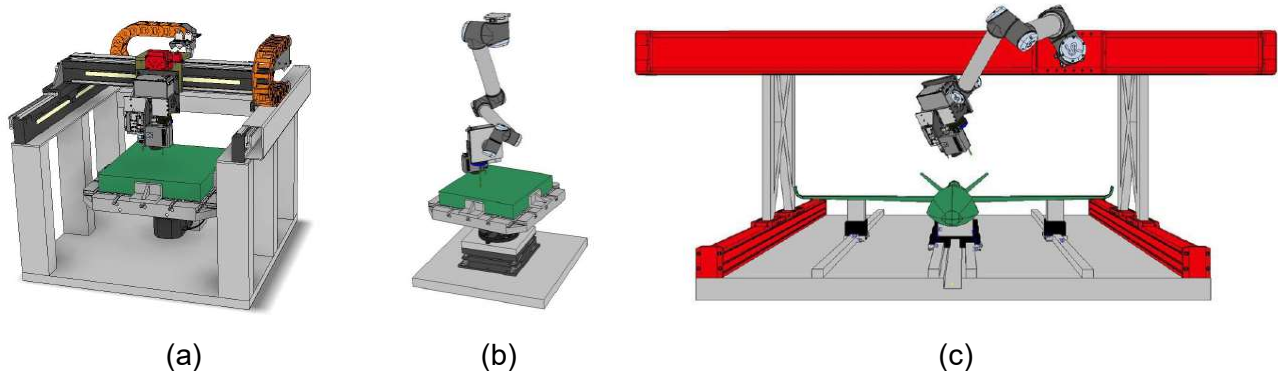
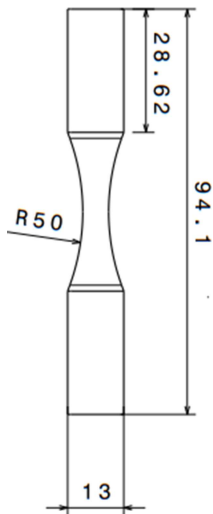


Abbildung 23: Konzeptvarianten bestehend aus katesischem 3-Achs-System mit integrierter Dreh-Schwenkeinheit (a), eines Hexapod Probenhalterung mit 5-Achs-Roboterarm (b) sowie eines Portalsystems mit Gantryführung und geführtem 5-Achs-Roboter zur Führung des Prozesskopfes (c).

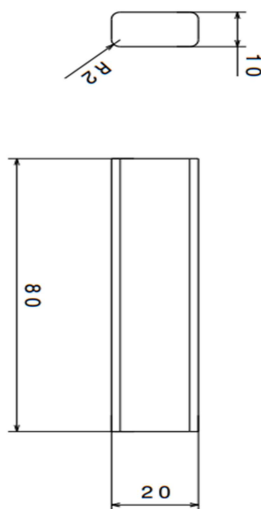
Die drei Konzeptvarianten unterscheiden sich maßgeblich in der Art der Beweglichkeit sowie der Anordnung der Bewegungssysteme. Hierbei wird zwischen einer Bewegung des Bearbeitungskopfes und einer Bewegung des Werkstückes unterschieden. Weiterführende Informationen sind im Abschlussbericht von Pulsar Photonics dargelegt.

FADA-CATEC: Fada-Catec hat im Rahmen der Projektlaufzeit vorwiegend die Fertigung additiv gefertigter Komponenten organisiert und durchgeführt. Insbesondere hat Fada-Catec Substrate aus Scalmalloy und Titan64 erzeugt und der TU Dresden zur Verfügung gestellt. Besonderer Schwerpunkt lag hierbei auf der Herstellung AM Substrate zur Parameterfindung kritischer Laserbearbeitungsparameter sowie komplexe AM Substrate zur Bewertung des Benetzungsverhaltens und der mechanischen Eigenschaften. In diesem Fall wurden Prüfkörper der TU Dresden zur Verfügung gestellt mit dem Ziel die Benetzungseigenschaften zu analysieren, welche im Rahmen der Laserbearbeitung mittel DLW und DLIP-Methoden bearbeitet wurden (Ergebnisse: siehe Abschlussbericht TU Dresden). Zusätzlich wurden verschiedene Probengeometrien von Fada-Catec erzeugt um die mechanische Leistungsfähigkeit zu charakterisieren. Abbildung 24 veranschaulicht die Probengeometrien, welche für die Zugversuche, axiale Ermüdung und Biegeversuche verwendet wurden.

Axial Fatigue Samples



Bending Fatigue Samples



Tensile Samples

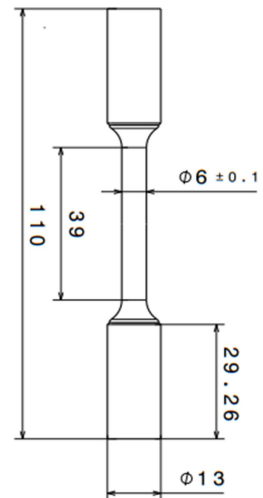


Abbildung 24: Probengeometrie mechanische Bauteilprüfung für axiale Ermüdungsexperimente (a), Biegeversuche (b) und Zugversuche (c).

Abbildung 20 veranschaulicht die Bearbeitung der Probenkörper unter Anwendung des Direct Laser Writings (DLW) und des Direct Laser Interference Patterning (DLIP). Die Parameter wurden entsprechend der experimentellen Untersuchungen aus Arbeitspaket 5.1 und 5.2 gewählt.

CT Ingenieros: CT Ingenieros hat im Rahmen der Projektlaufzeit Simulationsanalysen der Oberflächenbehandlung durchgeführt. Dafür wurden experimentelle Untersuchungen an der TU Dresden durchgeführt und die resultierenden Ergebnisse mit CT Ingenieros geteilt.

6. Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Wie geplant konnten wir mit unserer Forschung die laserbasierte Oberflächenbearbeitung additiv gefertigter Bauteile vorantreiben. Besonderer Fokus lag auf der Verbesserung der Oberflächenqualität (Reduzierung der Rauheit) und der Oberflächenfunktionalisierung (Erzeugung von Mikrostrukturen) zur Erzeugung wasser- und eisabweisender Oberflächen. Infolge dessen wurde die Grundlage für viele neue und fortschrittliche Anwendungen der additiven Fertigung geschaffen. Ein Großteil unserer Ergebnisse wurde publiziert und ist der Allgemeinheit zugänglich, wodurch unser Forschungsvorhaben einen fundierten Beitrag zur wirtschaftlichen Umsetzung darstellen wird.

7. Darstellung des während des Vorhabens bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen

Während der Laufzeit des Projektes wurden keine Fortschritte bei anderen Stellen auf dem Gebiet der direkten, einstufigen laserbasierten Oberflächenfunktionalisierung additiv gefertigter Metallkomponenten bekannt. Während der Durchführung des Vorhabens sind Veröffentlichungen zum Laserpolieren von additiv gefertigten Komponenten erschienen [7]. Darüber hinaus wurden an anderen Materialien mehrstufige Prozesse zur Oberflächenfunktionalisierung veröffentlicht [8].

8. Veröffentlichungen, Vorträge, Referate, etc.

Maßnahme	Ziel	Rahmen / Zeitraum
Projektbericht	Dokumentation, Transfer	<ul style="list-style-type: none"> Zwischenbericht des Haushaltsjahres 2019 Zwischenbericht des Haushaltsjahres 2020 Zwischenbericht des Haushaltsjahres 2021
Bekanntmachung auf der Homepage des Forschungsinstitutes	Bekanntmachung des Projektes in der Anwenderbranche	<ul style="list-style-type: none"> https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/if/lmo/forschung/forschungsprojekte/aktuelle-projekte/additive-manufacturing-of-functional-and-effective-light-use-cases-amelius
Veröffentlichungen in Fachzeitschriften	Dokumentation, Transfer, Verbreitung der Ergebnisse	<ul style="list-style-type: none"> F. Kuisat, F. Lasagni, A. F. Lasagni: Smoothing additive manufactured parts using ns-pulsed laser radiation, <i>Progress in Additive Manufacturing</i>, 245 (2020), 183-187. https://doi.org/10.1007/s40964-021-00168-4 F. Kuisat, F. Ränke, F. Lasagni, A.F. Lasagni (2021): Simultaneous Micro-Structuring and Surface Smoothing of Additive Manufactured Parts Using DLIP Technique and Its Influence on the Wetting Behaviour. <i>Materials</i>, 14(10), 2563. https://doi.org/10.3390/ma14102563 F. Kuisat, F. Ränke, R. Baumann, F. Lasagni, A.F. Lasagni, (2022): Fabrication of Water- and Ice-Repellent Surfaces on Additive-Manufactured Components Using Laser-Based Microstructuring Methods. <i>Adv. Eng. Mater.</i>, 24: 2101624. https://doi.org/10.1002/adem.202101624
Publikation auf Konferenzen	Branchenübergreifende Verbreitung der Ergebnisse	<ul style="list-style-type: none"> F. Kuisat, F. Lasagni, A.F. Lasagni, Smoothing of additive manufactured parts using ns-pulsed laser source, <i>Materials Science & Engineering</i>, September 2020, online-conference, September 2020, Germany. F. Kuisat, F. Ränke, F. Lasagni, A.F. Lasagni, Surface macro-smoothing and micro-structuring of additive manufactured components by using DLIP technique for controlling wetting characteristics, <i>Materials Science & Engineering</i>, September 2020, online-conference, September 2020, Germany. F. Kuisat, F. Lasagni, A.F. Lasagni (2021): Surface roughness reduction of additive manufactured components by nanosecond pulsed laser treatment, June 2021, The 22nd International

		<p>Symposium on Laser Precision Microfabrication, Virtual Conference.</p> <ul style="list-style-type: none"> • F. Kuisat, F. Ränke, F. Lasagni, A.F. Lasagni (2021): Surface modification of additive manufactured specimens by nanosecond direct laser interference patterning, June 2021, The 22nd International Symposium on Laser Precision Microfabrication, Virtual Conference. • F. Kuisat, F. Ränke, F. Lasagni, A.F. Lasagni (2021): Laserbasierte Oberflächenmodifikation von additiv gefertigtem Ti64 und deren Auswirkungen auf die Topographie und das Benetzungsverhalten, November 2021, DGM Workshop on „Funktionalisierung von Oberflächen mittels Mikro-/Nano-Strukturierungsverfahren und Biomaterialien“, Virtual Workshop. • F. Kuisat, F. Ränke, R. Baumann, F. Lasagni, A.F. Lasagni, Fabrication of water and ice-repellent surfaces on additive manufactured parts using laser-based microstructuring methods, Lasersymposium 2021, November 2021, online-conference, Germany. • F. Kuisat, F. Ränke, F. Lasagni, A.F. Lasagni (2022): Laserbased surface modification and its influence on the topography and wettability of a new additive manufactured aluminumbased alloy, Proc. SPIE 11989, Laser-based Micro- and Nanoprocessing XVI, 119890W (January 2022), San Francisco, USA. • F. Kuisat, F. Ränke, R. Baumann, F. Lasagni, A.F. Lasagni (2022): Laser-based surface smoothing and subsequently interference patterning of additive manufactured materials to influence their wetting behavior, Proc. SPIE 11989, Laser-based Micro- and Nanoprocessing XVI, 119890X (January 2022), San Francisco, USA.
<p>Betreute Studienarbeiten</p>	<p>Verbreitung der Ergebnisse</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Fabian Ränke (Forschungspraktikum): <i>“Laserbasierte Oberflächenmodifikation von additive gefertigten Bauteilen aus Ti-6Al-4V und Scalmalloy® zur Beeinflussung des Benetzungsverhaltens”</i> (2020) • Charlotte Reichel (Forschungsseminar): <i>“Modification of additively manufactured components for integration of properties and surface post-processing by laser radiation”</i> (2020) • Charlotte Reichel (Forschungsseminar): <i>“Topography characterization and statistical analysis of laser textured surfaces for homogeneity estimation”</i> (2021) • Fabian Ränke (Diplomarbeit): <i>“Laserbasierte Oberflächenmodifikation von additive gefertigten Bauteilen aus Ti64 und Scalmalloy® zur Beeinflussung des Benetzungsverhaltens”</i> (2021) • Florian Kuisat (Dissertation): <i>“Functionalisation of additively manufactured components using laser-based techniques“</i> (2022)

Literatur

- [1] P. Li, D.H. Warner, A. Fatemi, N. Phan. "On the Fatigue Performance of Additively Manufactured Ti -6Al-4V to Enable Rapid Qualification for Aerospace Applications". AIAA SciTech. 57th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. 4-8 January 2016, San Diego, California, USA.
- [2] L. B. Boinovich, Alexandre M. Emelyanenko, Alexander D. Modestov, Alexandr G. Domantovsky, and Kirill A. Emelyanenko ACS Applied Materials & Interfaces 2015 7 (34), 19500-19508 DOI: 10.1021/acsami.5b06217
- [3] A. Mussatto, R. Groarke, A. O'Neill, M. A. Obeidi, Y. Delaure, D. Brabazon, Influences of powder morphology and spreading parameters on the powder bed topography uniformity in powder bed fusion metal additive manufacturing, Additive Manufacturing, Volume 38, 2021, 101807, ISSN 2214-8604, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101807>.
- [4] E.J. Gonzalez, J.E. Bonevich, G.R. Stafford, G. White, D. Josell, Thermal Transport through Thin Films: Mirage Technique Measurements on Aluminum/Titanium Multilayers. Journal of Materials Research 2000, 15 (3), 764–771.
- [5] Z. Yang, C. Zhu, N. Zheng, D. Le, J. Zhou, Superhydrophobic Surface Preparation and Wettability Transition of Titanium Alloy with Micro/Nano Hierarchical Texture. Materials 2018, 11, 2210. <https://doi.org/10.3390/ma11112210>
- [6] F. Kuisat, F. Ränke, R. Baumann, F. Lasagni, A.F. Lasagni, (2022): Fabrication of Water- and Ice-Repellent Surfaces on Additive-Manufactured Components Using Laser-Based Microstructuring Methods. Adv. Eng. Mater., 24: 2101624. <https://doi.org/10.1002/adem.202101624>
- [7] S. Nesli, O. Yilmaz, Surface characteristics of laser polished Ti-6Al-4V parts produced by electron beam melting additive manufacturing process. Int J Adv Manuf Technol 114, 271–289 (2021). <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06861-6>
- [8] J.S. Solheid, T. Wunsch, V. Trouillet, S. Weigel, T. Scharnweber, H.J. Seifert, W. Pfleging, Two-Step Laser Post-Processing for the Surface Functionalization of Additively Manufactured Ti-6Al-4V Parts. Materials 2020, 13, 4872. <https://doi.org/10.3390/ma13214872>

Dresden, 22.11.2022

Prof. Dr.-Ing. Andrés Fabián Lasagni

Ort und Datum

Stempel, rechtsverbindliche Unterschrift