

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Teil I: Kurzbericht

Verbundprojekt

WIR! - GRAVOmer – Verbundvorhaben: noFOUL

Teilprojekt

Erarbeitung der Präge- und Druckwerkzeuge für die gezielte Oberflächenfunktionalisierung

Förderkennzeichen

03WIR2013A

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt

Laufzeit

01.11.2022 - 31.01.2025

Zuwendungsempfänger

Sächsische Walzengravur GmbH
Badstraße 9
09669 Frankenberg



Projektleiter

Herr Michael Mäser

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt unter dem Förderkennzeichen 03WIR2013A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

1 Ursprüngliche Aufgabenstellung / wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Im Vorhaben „noFoul“ sollten neuartige Architektur-, Schwimmbad- und Schutzfolien mit einer effektiven Antifouling-Ausrüstung entwickelt werden. Diese soll über funktionale Oberflächenstrukturierungen erreicht werden, die in Kombination mit einer Materialadditivierung die mikrobiologische Bekeimung und nachfolgende Besiedlung nachhaltig hemmen und gleichzeitig die primär gewünschte Optik, Transparenz bzw. Funktionseigenschaften der Folie dauerhaft erhalten. Damit sollten eine umweltfreundliche Alternative zu den bioziden Beschichtungslösungen erarbeitet werden, welche heute immer noch den Standard für Antifouling-Oberflächen repräsentieren.

Die Sächsische Walzengravur GmbH verfolgte im Rahmen ihres Teilvorhabens das Ziel, Druck- und Prägwerkzeuge zu erarbeiten, mit denen sich sowohl die spezifisch funktionalisierten Beschichtungssysteme definieren als auch funktionale Prägestrukturen auf die Folienoberfläche übertragen lassen, die dort eine organische Besiedelung effektiv behindern. Dafür müssen einerseits neuartige Tiefdruckraster erarbeitet und andererseits Lasergravurprozesse für die Erzeugung neuartiger funktionaler Prägestrukturen erarbeitet werden.

2 Ablauf des Vorhabens

In diesem Teilvorhaben verfolgte SWG die Entwicklung innovativer Präge- und Druckformlösungen, mit denen sich mikrostruktur- sowie beschichtungsbasierte Antifoulingeffekte auf Folien abbilden lassen sollten. Hierfür waren in erster Linie geeignete Prägestrukturen und Druckraster bzw. die diesen zugrunde liegenden Lasergravurprozesse zu erarbeiten. Dafür waren innerhalb der 7 partnerübergreifenden Arbeitspakete 22 Arbeitsschritte zu bewältigen, welche ohne maßgebliche Abweichungen bearbeitet werden konnten, wobei die zwischenzeitlichen Ergebnisse hinsichtlich der zunächst unbefriedigenden Strukturierungseffekte und unzureichenden Lackfunktionalisierung zusätzliche Entwicklungsschleifen und entsprechende Verzögerungen zur Folge hatten. Vor diesem Hintergrund musste das Verbundvorhaben um 3 Monate kostenneutral verlängert werden, wodurch letztendlich aber ein positiver Projektabschluss sichergestellt werden konnte.

3 Wesentliche Ergebnisse

Während SWG bei der Erarbeitung der Druck- und Prägestrukturen von Beginn an sehr gute Fortschritte verzeichnen konnte, waren das Vorankommen im Verbundprojekt zwischenzeitlich durch unerwartete bzw. unbefriedigende Zwischenergebnisse beeinflusst. Dies betraf insbesondere die

- geringe antimikrobielle Wirksamkeit der mit verschiedenen Stoffen ausgerüsteten Lacksysteme und
- schlechte Prägbarkeit der in verschiedenen Stufen vorgelierten Folienbeschichtungen sowie

Vor diesem Hintergrund wurde die Erzeugung funktional strukturierter Folienbeschichtungen zunächst ausgeblendet, obwohl seitens SWG die hierfür erforderlichen Tiefdruckraster für den Auftrag sehr homogener, prägefähiger Lackschichten erfolgreich realisiert werden konnten. Im Kontext der erst sehr spät im Projekt herausgearbeiteten Mikrostrukturen, denen eine signifikante Antifoulingwirkung attestiert werden konnte, wurden jedoch die funktionalen Folienbeschichtungen noch einmal – ohne eine antimikrobielle Additivierung – bei SWG noch einmal aufgegriffen,

um die Möglichkeiten der Oberflächenfunktionalisierung mittels additiver Tiefdruckbeschichtung zu untersuchen. Dieser neu, erst im Zuge der Arbeiten entstandene Ansatz erforderte ein Tiefdruckraaster, welches die Mikrostrukturen im Dimensionsbereich von $<50\ \mu\text{m}$ bei extrem hohen Genauigkeitsanforderungen invers abbildet. Das dies gravurtechnisch möglich ist, konnte anhand von drei Strukturvarianten erfolgreich nachgewiesen werden, wobei die drucktechnische und funktionale Validierung zeitbedingt noch nicht abgeschlossen ist.

Im Hinblick auf die Erzeugung bewuchshemmender Folienoberflächen mittels funktionaler Prägungen waren in den ersten Projektschritten auch zunächst nur unbefriedigende Ergebnisse zu ermitteln. In mehreren Iterationen, in denen die Strukturvorgaben jeweils verändert wurden, konnten jedoch Mikrostrukturen identifiziert werden, auf deren Basis zunächst eine moderate und in der letzten Projektphase eine deutliche Antifoulingwirkung attestiert werden konnte. SWG gelang es dabei jeweils, die Gravurparameter für die funktionsgerechte Abbildung dieser Strukturen auf dem Prägwerkzeug zu erarbeiten und deren reprodaten- und lasertechnische Umsetzbarkeit anhand erster Prägeformen nachzuweisen.

Ein wichtiges Ergebnis war dabei insbesondere auch die erstmalige Strukturierung von Chromschichten, was zwar die grundlegende Neuerarbeitung des Gravurprozesses bedeutete, in der Konsequenz jedoch völlig neue Möglichkeiten für die Strukturgenauigkeiten und -auflösungen eröffnete, da – im Gegensatz zur Kupfergravur – die Strukturgeometrien nicht durch eine nachfolgende Beschichtung verfälscht werden. Aber nicht nur diesbezüglich bietet der neue Gravurprozess in Chrom Vorteile, sondern auch im Hinblick auf die Überlagerung von Makro- und Mikrostrukturen in der Prägegravur. Derartige hierarchische Prägestrukturen konnten im Projekt erfolgreich erzeugt werden.

In den Prägeversuchen wurde herausgearbeitet, dass das thermoplastische Fließverhalten die Prägegenauigkeit und -reproduzierbarkeit beeinträchtigt, wodurch die gewünschte Strukturabformung teilweise abgeschwächt wird. Im Vergleich hierzu verweisen erste Ergebnisse mit laserstrukturierten Folien auf eine deutlich verbesserte Detailgenauigkeit und eine höhere Reproduzierbarkeit der Mikrostrukturen. Daraus wurde die Erkenntnis abgeleitet, dass die präzise Abformung der mikroskopischen Funktionsstrukturen eine(n)

- rotativen Prägeprozess
- exakt gesteuerte Temperierung im Prägespalt sowie
- gezielten Einbau von „Geometriefehlern“ (z. B. Strukturüberhöhungen)

voraussetzt. Deren strukturspezifische Eingrenzung und Spezifikation erfordert zwar weiterführende Untersuchungen, diese werden jedoch unter Berücksichtigung der diesbezüglich bei SWG vorhandenen Erfahrungen als machbar eingeschätzt.

Im Rückblick können die Ergebnisse des Vorhabens trotz der zwischenzeitlichen Rückschläge positiv bewertet werden. Es liegen Prägestrukturen vor, die eine deutliche Antifoulingwirkung mitbringen und sich in einer Prägegravur auf zylindrischen Formen mit den vorhandenen Industrielasern umsetzen lassen. Gleichzeitig liegen Tiefdruckformen vor, mit denen sich grundsätzlich prägefähige Folienbeschichtungen erzeugen lassen, sobald dafür geeignete Lacksysteme vorliegen.

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Teil II: Ausführlicher Abschlussbericht

Verbundprojekt

WIR! - GRAVOmer – Verbundvorhaben: noFOUL

Teilprojekt

Erarbeitung der Präge- und Druckwerkzeuge für die gezielte Oberflächenfunktionalisierung

Förderkennzeichen

03WIR2013A

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt

Laufzeit

01.11.2022 - 31.01.2025

Zuwendungsempfänger

Sächsische Walzengravur GmbH
Badstraße 9
09669 Frankenberg



Projektleiter

Herr Michael Mäser

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt unter dem Förderkennzeichen 03WIR2013A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 Durchgeführte Arbeiten im Vergleich zur ursprünglichen Planung	1
2 Erzielte Ergebnisse	2
2.1 Auswahl der Funktionsstrukturen	2
2.2 Erarbeitung der werkzeugtechnischen Grundlagen	3
2.3 Erarbeitung der Grundlagen für die Erzeugung funktionaler Prägestrukturen mit einem industriellen Gravurlaser	4
2.4 Erarbeitung der Gravurparameter zur Erzeugung strömungsaktiver Lippenstrukturen	6
2.5 Erarbeitung der Gravurparameter zur Erzeugung von Anti-Fouling-Strukturen	8
2.6 Erarbeitung der Voraussetzungen für die Prägung von Antifoulingoberflächen	15
2.7 Erarbeitung der Tiefdruckraster für die Erzeugung prägefähiger Folienbeschichtungen	17
3 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	21
4 Notwendigkeit/Angemessenheit der geleisteten Arbeiten	21
5 Voraussichtlicher Nutzen / Verwertbarkeit der Ergebnisse	22
5.1 Abgeleitete Schutzrechte und Patentanmeldungen	22
5.2 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende	22
5.1 Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende	22
5.2 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit nach Projektende	23
6 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	23
7 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses	23

2 Erzielte Ergebnisse

2.1 Auswahl der Funktionsstrukturen

Im ersten Schritt wurden mit dem LMO potenziell geeignete Funktionsstrukturen analysiert und im Hinblick auf ihre lasertechnische Umsetzbarkeit hin bewertet. Im Mittelpunkt standen dabei vor allem mikroskopische Strukturgeometrien, die einerseits die Strömungseigenschaften an der Folienoberfläche beeinflussen und andererseits eine Anhaftung von organischen Partikeln und Algen erschweren können. Dabei wurden Schuppen-, Kegel-, Rippen- und Lippenstrukturen als vielversprechend eingegrenzt (vgl. Abbildung 2), welche dabei grundsätzlich auch in geometrischer und dimensionsspezifischer Hinsicht mit den bei SWG vorhandenen Gravurlasern umsetzbar erschienen.

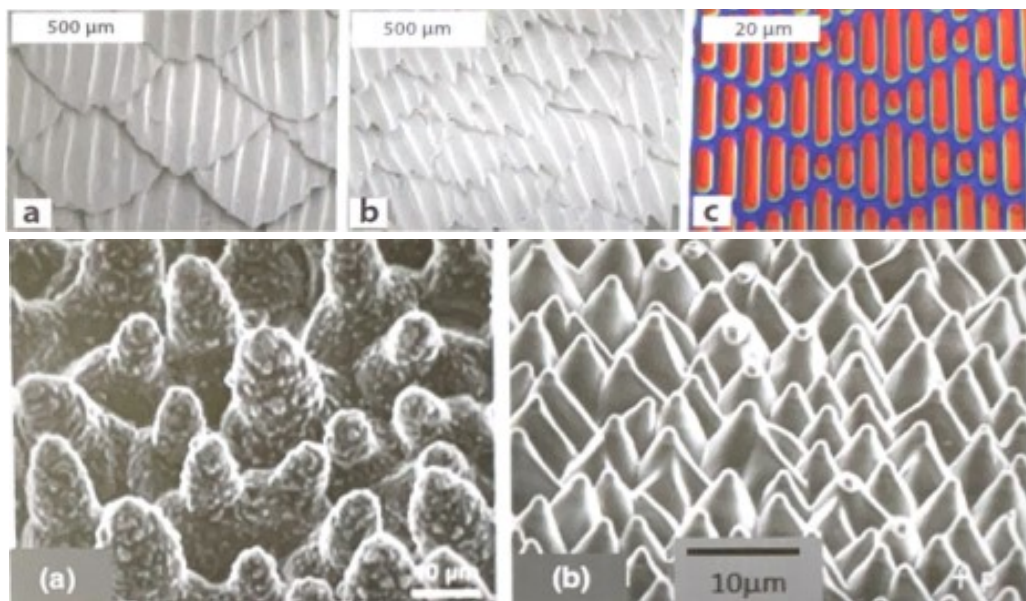


Abbildung 2: Ausgewählte Funktionsstrukturen, die im Projekt vertieft weiterbetrachtet werden sollen – oben: strömungsunterstützende Strukturen; unten: Antihafstrukturen (Quelle: LMO)

Aus diesen Strukturvorgaben wurden vereinfachte Prälegeometrien abgeleitet und in Prägeomustern umgesetzt, mit denen beim Partner Reisewitz erste Versuche durchführen konnte, um ein grundlegendes Verständnis für die Strukturabformung in Lackschichten erarbeiten zu können. Die Abstrahierung der Strukturvorgaben führte letztendlich zu einfachen Linien und Punktgeometrien mit unterschiedlichen Größen und Ausrichtungen (vgl. Abbildung 3).

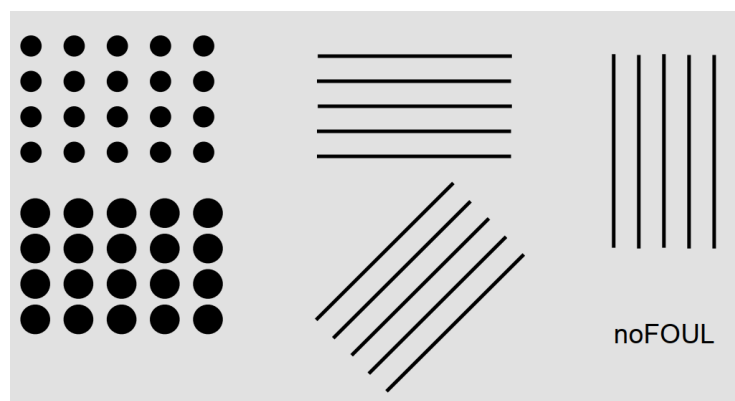


Abbildung 3: Auswahl der abstrahierten Prälegeometrien für die Vorversuche bei Reisewitz

2.2 Erarbeitung der werkzeugtechnischen Grundlagen

In der Diskussion mit den Partnern wurde deutlich, dass die Abformung der sehr feinen Struktur-geometrien mittels Kaltprägen oder indirekter Temperierung des Prägespalts wenig erfolgsversprechend ist. Vor diesem Hintergrund sollte eine Beheizung direkt in das Prägewerkzeug integriert werden, welche eine homogene und sehr genau einstellbare Temperaturverteilung während des Prägens ermöglicht. Diesbezüglich bekannte Lösungen nutzen erwärmtes Öl, welches zwischen einem Außen- und Innenzylinder eingefüllt wird. Diese Systeme hätten jedoch eine aufwändige, weder am FILK noch bei Reisewitz vorhandene Peripherie erforderlich gemacht und sind hinsichtlich ihrer Steuerbarkeit sehr träge.

Vor diesem Hintergrund wurde ein eigenes Konzept für einen beheizbaren Luftzylinder entwickelt, bei dem eine spiralförmige Wasserleitung zwischen Außen- und Innenzylinder integriert wurde. Dies lässt die Durchleitung von aufgeheiztem Wasser und somit die Temperierung des Luftzylinders zu. Über die Einstellung der Vorlauftemperatur und die Strömungsgeschwindigkeit des Wassers kann die Oberflächentemperatur sehr genau ausgeregelt werden, wobei eine spezifisch ausgelegte Spiralführung gleichzeitig eine homogene Temperaturverteilung über die gesamte Zylinder- sowie Sleeveoberfläche gewährleistet. Gleichzeitig brachte diese Variante den Vorteil mit, dass beide Partner die bei ihnen etablierten Luftzylinder-Sleeve-Systeme ohne Einschränkungen nutzen konnten.

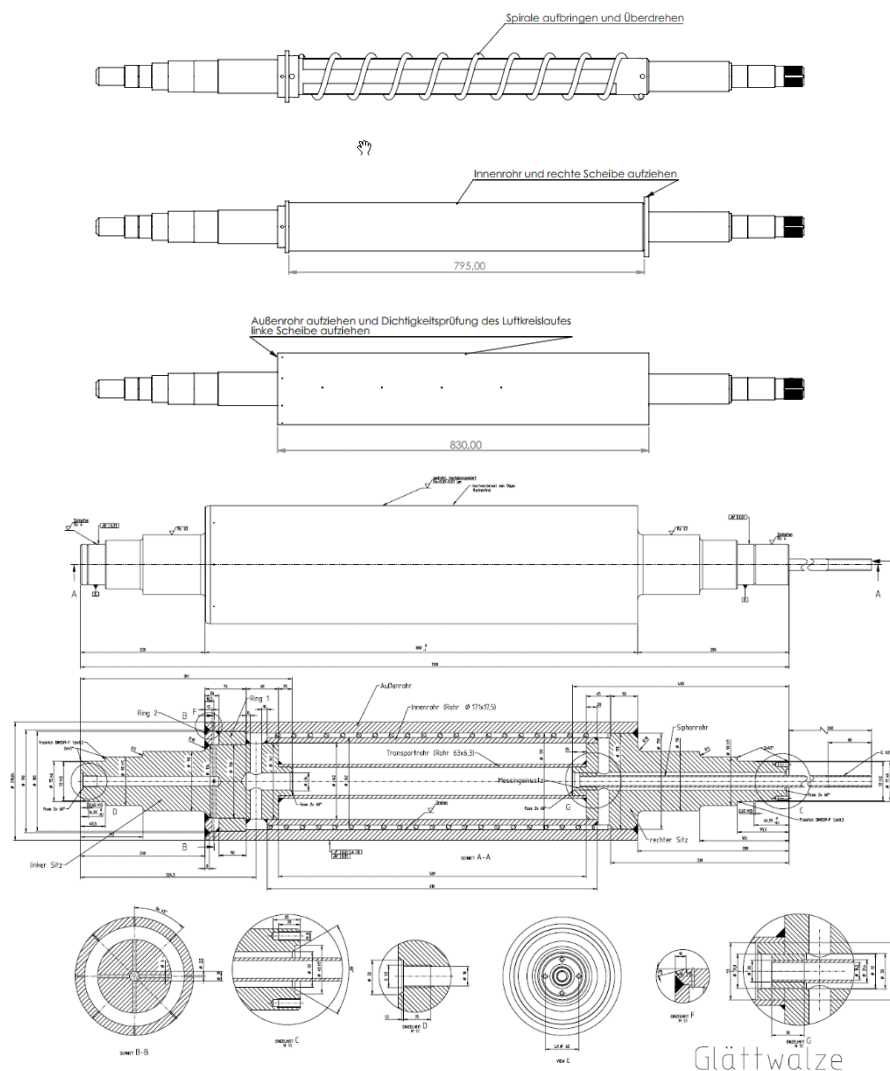


Abbildung 4: Neu entwickelte, beheizbares Luftzylinderkonstruktion für die gezielte Temperierung des Prägespaltes

Für die ersten Prägetests bei Reisewitz wurde darüber hinaus ein Luftzylinder erarbeitet, der zunächst den geometrischen Anforderungen der dortigen Versuchsanlage gerecht werden sollte. Diese weist eine Bahnbreite von ca. 350 mm auf und sollte speziell für die Grundlagenversuche zur Strukturabformung in nassen bzw. vorgelagerten Lackschichten genutzt werden.

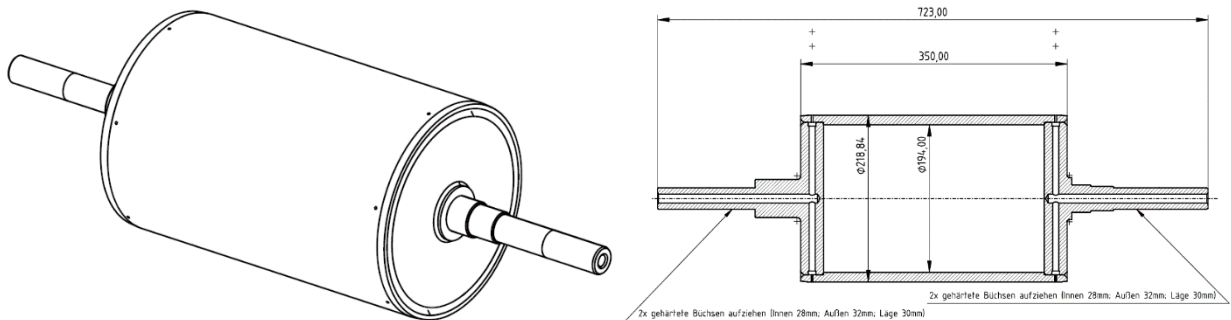


Abbildung 5: Luftzylinderkonstruktion für die Versuchsanlage bei Reisewitz

2.3 Erarbeitung der Grundlagen für die Erzeugung funktionaler Prägestrukturen mit einem industriellen Gravurlaser

Während mit Hilfe der DLIP-Strukturierung periodische Mikrostrukturen von $\leq 10 \mu\text{m}$ adressiert werden können, wurden in den ersten Gravurversuchen umfangreiche Untersuchungen durchgeführt, um die diesbezüglich bestimmenden Auflösungsgrenzen und Strukturierungsparameter des im eigenen Haus nutzbaren Lasersystems einzugrenzen. Hierzu wurden zunächst Versuche in Kupfer durchgeführt, die sich bei gezielt variierten Prozessvorgaben den eingangs dargestellten Strukturen annähern sollten werden sollte. Die Kupfergravuren wurden dabei nur als Zwischenstufe betrachtet, da in dieser klassischen Gravurschicht viele Einflussgrößen klar definiert und gut kontrolliert werden konnten.

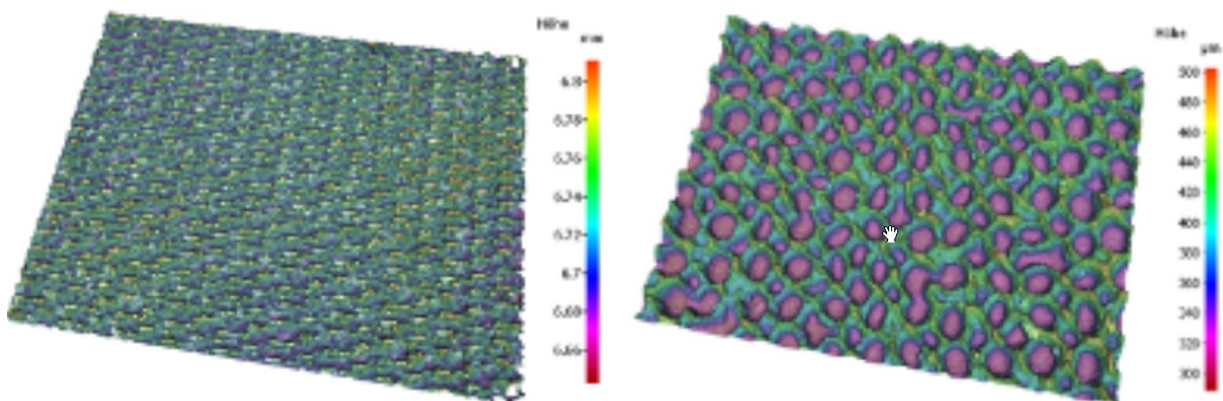


Abbildung 6: Gravurversuche zur Erzeugung hochauflöser Punktgeometrien

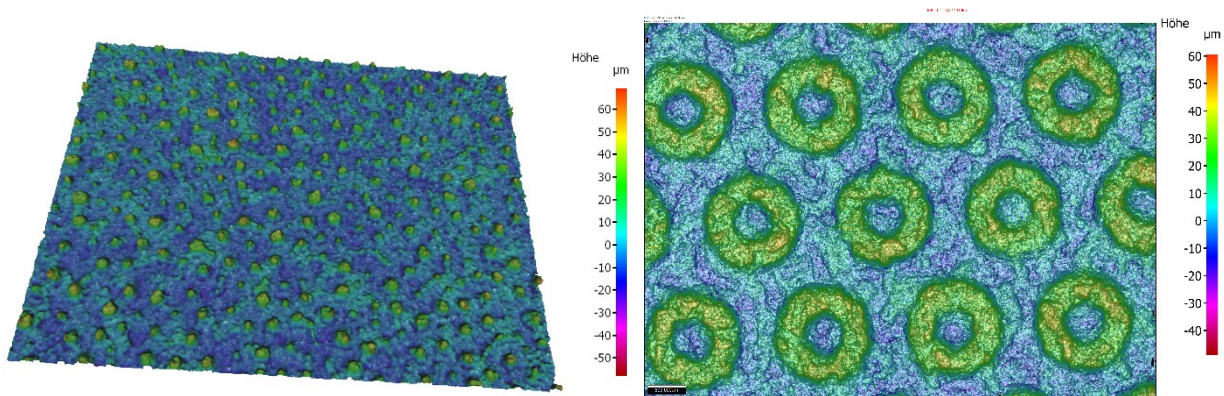


Abbildung 7: Gravurversuche zur Erzeugung hochaufgelöster Punktgeometrien in weiteren Varianten

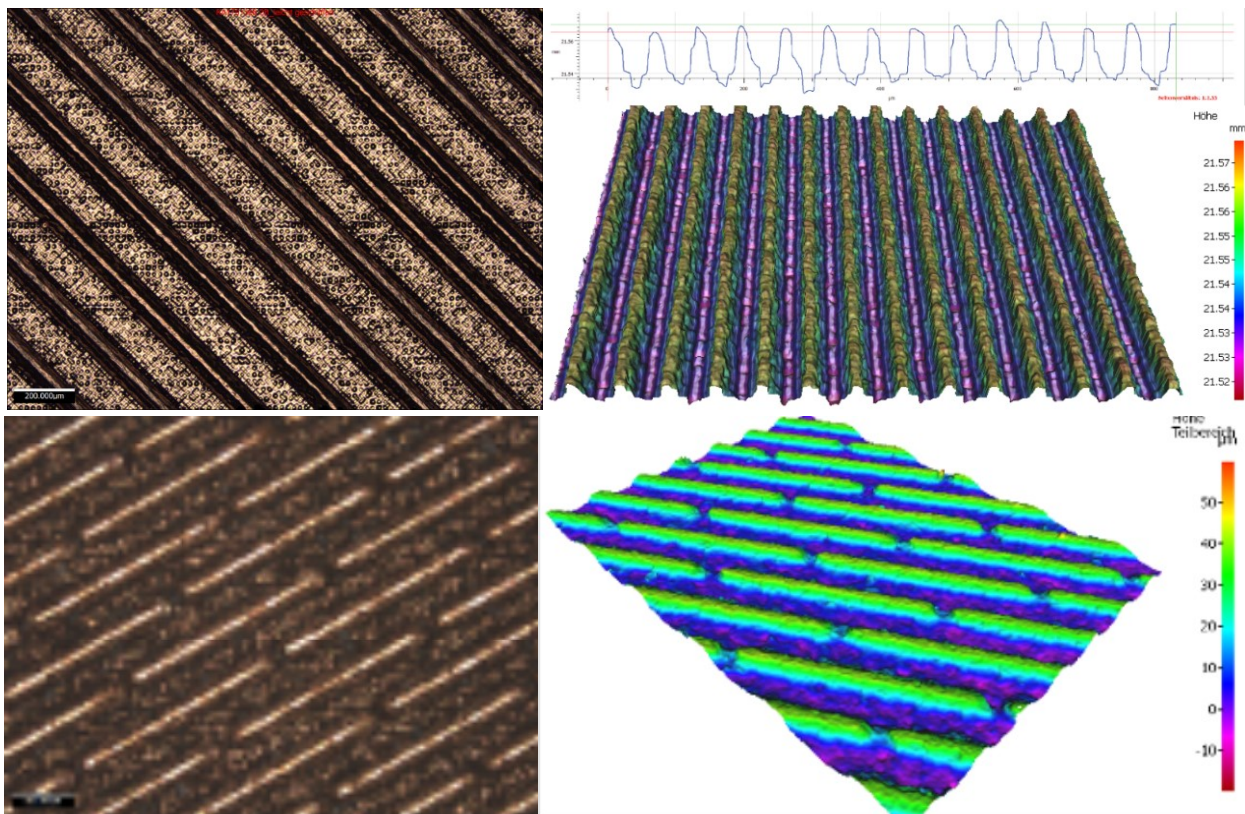


Abbildung 8: Gravurversuche zur Erzeugung hochaufgelöster Liniengeometrien

Im Ergebnis dieser Versuche wurde deutlich, dass sich die zuvor herausgearbeiteten Grundgeometrien und Strukturgrößen mit dem Cellaxy bereits sehr gut umsetzen ließen und die erzeugten Muster bereits gute Strukturqualitäten (vgl. Abbildung 9) mitbrachten, was insbesondere anhand der homogenen Strukturprofile, gleichmäßigen Flankenverläufe sowie sehr geringen Tiefenschwankungen deutlich wurde.

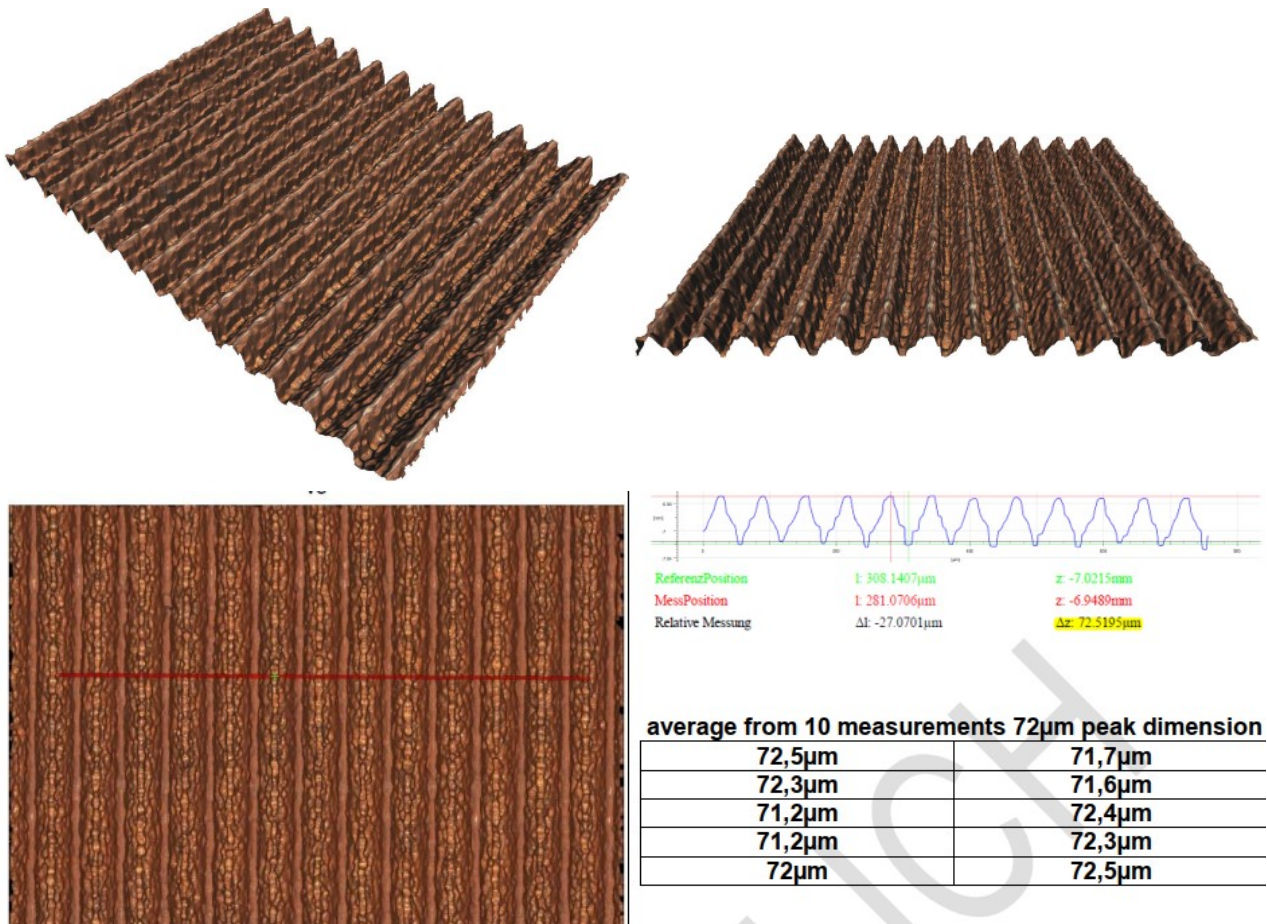


Abbildung 9: Analyse und Bewertung der erzeugten Strukturen

2.4 Erarbeitung der Gravurparameter zur Erzeugung strömungsaktiver Lippenstrukturen

Aus den o. g. Untersuchungen zur Erzeugung von Liniengeometrien wurden auch verschiedene Varianten der anvisierten Lippenstrukturen abgeleitet und strukturierungsspezifisch intensiv beleuchtet. Mit diesen sollten strömungsaktive Elemente in die strukturierte Oberfläche eingebaut werden, welche sich mit der Wasserströmung bewegen und dadurch den Algenbewuchs erschweren. Die hierfür untersuchten Strukturgeometrien bewegten sich sowohl im Makro- als auch Mikrobereich, zumal sich die Linien vom Fuß zum Scheitel verjüngen.

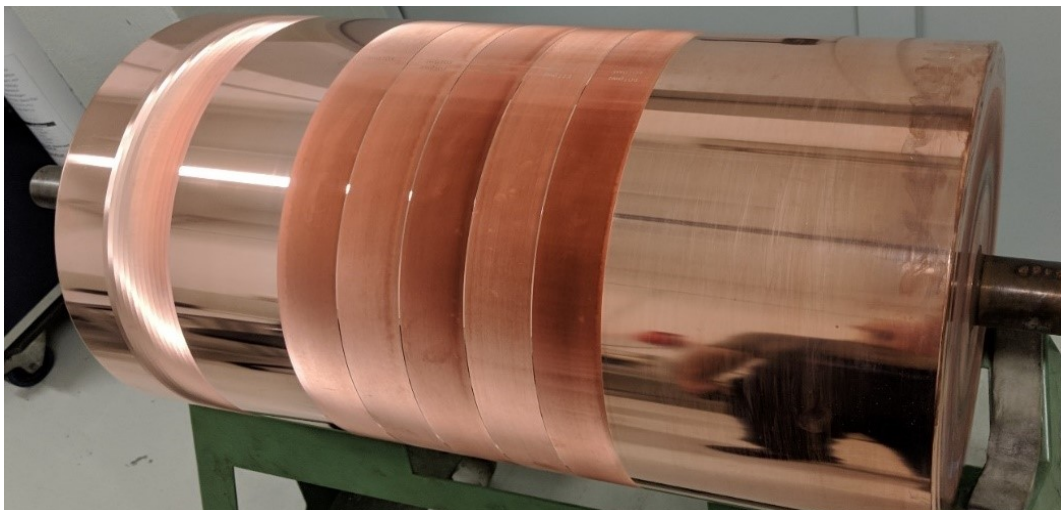


Abbildung 10: Mit unterschiedlichen Lippenstrukturen gravierter Versuchszyylinder

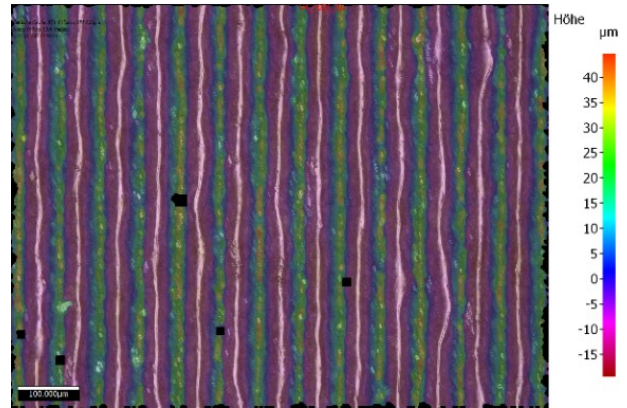
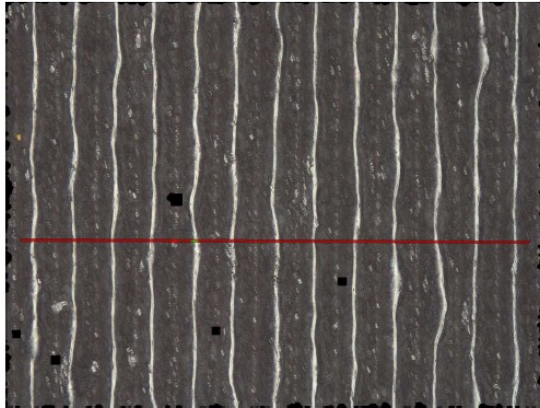
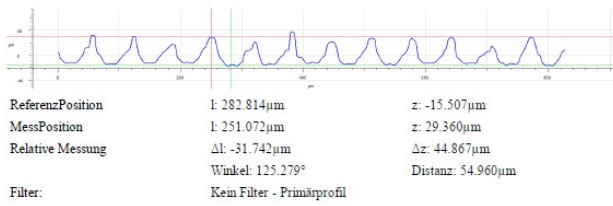


Abbildung 11: Erste Versuche zur Erzeugung von Gravuren für strömungsaktive Lippenstrukturen

In den aus dieser Basis weitergeführten Gravurversuchen konnten schrittweise sowohl die Flankenwinkel variiert als auch die Lippenabstände auf eine Periodizität von bis zu ca. 200 µm verringern werden. Angesichts der in dieser Struktur bewusst „eingebauten“ Instabilität war es wichtig, möglichst geradlinige Strukturverläufe abbilden zu können, denn aufgrund die im Längsverlauf noch relativ starken Linienschwankungen hatten zunächst noch eine unerwünschte Stabilisierungswirkung für die Lippenstrukturen. Dieser konnte jedoch mit der Realisierung im Längsverlauf homogenerer Flankenprofile, steilerer Flankenwinkel sowie größerer Strukturturen schrittweise erfolgreich begegnet werden. Abbildung 12 zeigt Aufnahmen von in den Versuchen erzeugten Lippenstrukturen, welche den Zielvorgaben weitestgehend gerecht wurden.

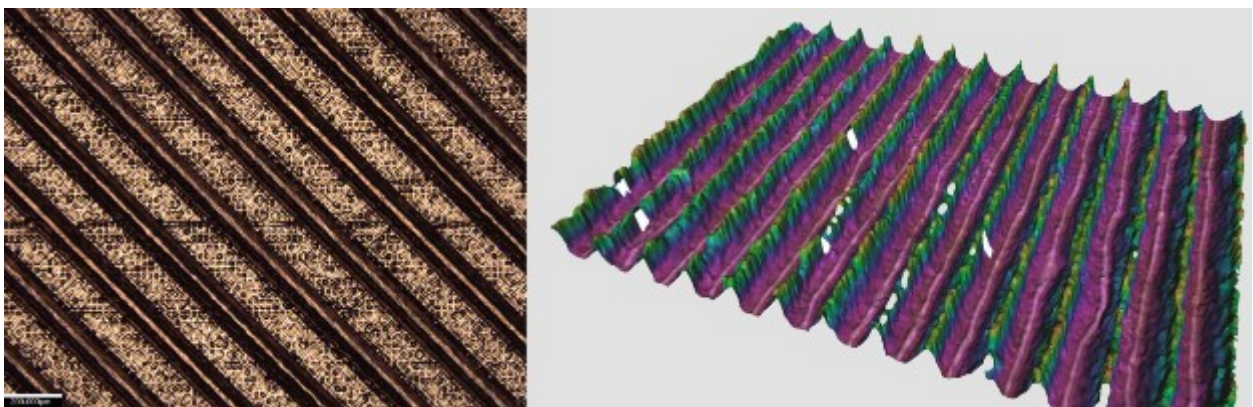


Abbildung 12: Gravurversuche zur Herstellung „strömungsaktiver“ Lippenstrukturen

Die gravurtechnisch erzeugten Lippenstrukturen konnten in den anschließenden Prägeversuchen in unterschiedlichen Foliensubstraten sehr gut abgeformt werden (vgl. Abschnitt 2.6). Wichtig war dabei die Einhaltung definierter Temperierungsprofile, um die Fließfähigkeit des Polymers und somit die geometriegerechte Strukturabbildung gerade in den stark verjüngten Bereichen sicherstellen zu können. Vereinfachte Handversuche bestätigten zudem die grundsätzliche

Beweglichkeit der Lippen unter bestimmten Strömungsbedingungen, so dass ihnen prinzipiell eine unterstützende Wirkung gegenüber der Primäranlagerung von „größeren“ biologischen Komplexen zugesprochen werden kann. Ein fundierter, quantifizierter Nachweis hierfür konnte jedoch in den Versuchsaquarien des FILK nicht erbracht werden, da die dafür zu adressierenden Strömungsszenarien dort nicht abzubilden waren. Dies wird jedoch ein Inhalt der weiterführenden Untersuchungen nach Projektende sein.

2.5 Erarbeitung der Gravurparameter zur Erzeugung von Anti-Fouling-Strukturen

Neben den geringen Strukturgrößen brachten die im Projekt betrachteten Funktionsstrukturen die Herausforderung mit, dass sie nicht in der gravurtechnisch „gut bekannten“ Gravurschicht aus Kupfer graviert werden konnten, um nicht durch die abschließend aufgebrachte Verschleißschutzschicht aus Chrom geometrisch verfälscht oder gar weitgehend nivelliert zu werden. Insofern mussten sie in diese Chromschicht direkt eingebracht werden, welche jedoch völlig neue Voraussetzungen für die Lasergravur mitbrachte.

Vor diesem Hintergrund zielten die ersten Arbeiten darauf ab, die Gravureigenschaften des Chroms zunächst erst einmal grundsätzlich zu untersuchen und zu bewerten. Dies erfolgte in einer Vielzahl an Versuchen anhand der prädefinierten Makro- und Mikrostrukturen sowie sehr fein angestuften Matt-Glanz-Gravuren, deren Strukturqualitäten und Tiefenauflösung sich sehr gut in der optischen Analyse quantifizieren ließen.

In diesen Untersuchungen wurde deutlich, dass sich die Parametersätze für die hochaufgelöste Chromgravur zum Teil deutlich denen aus der Kupferstrukturierung unterschieden. Dementsprechend mussten mehrere Versuchsreihen bei einer dezidiert abgestimmten Variation der Laser- bzw. Gravurparameter durchlaufen werden, um zunächst erst einmal die Vorgaben für einen reproduzierbaren Materialabtrag eingrenzen zu können. Darauf aufbauend konnte dann schrittweise nachgewiesen werden, dass die Lasergravur im Chrom nicht nur grundsätzlich möglich ist, sondern bei Wahl des richtigen Setups sehr gut kontrolliert und sehr präzise gesteuert werden kann (Abbildung 14).

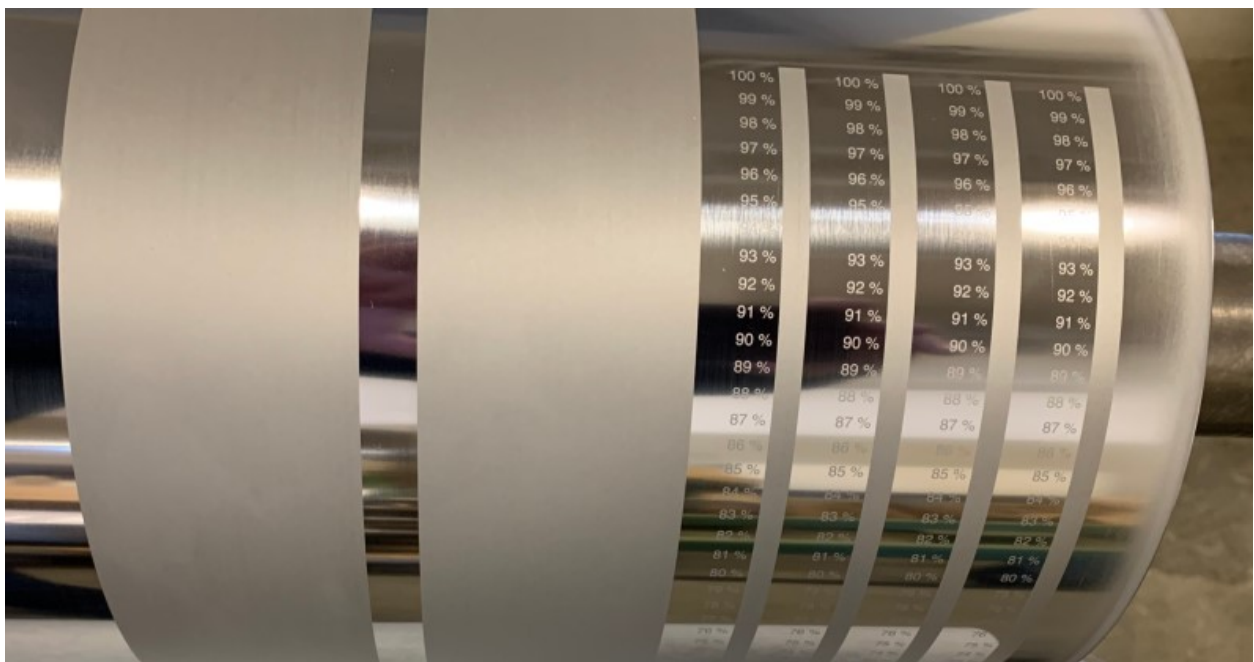


Abbildung 13: Versuchszyylinder mit Testgravuren in der Chromschicht

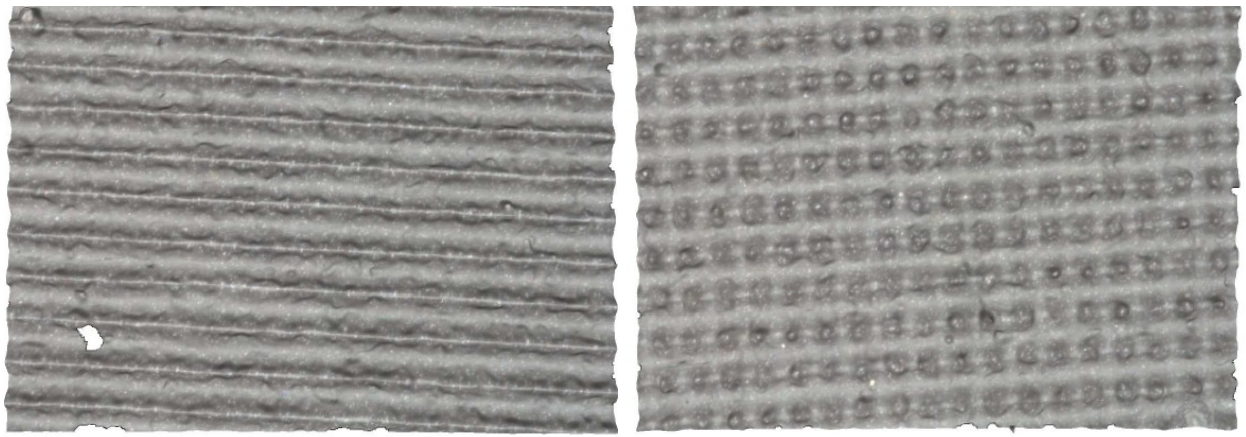
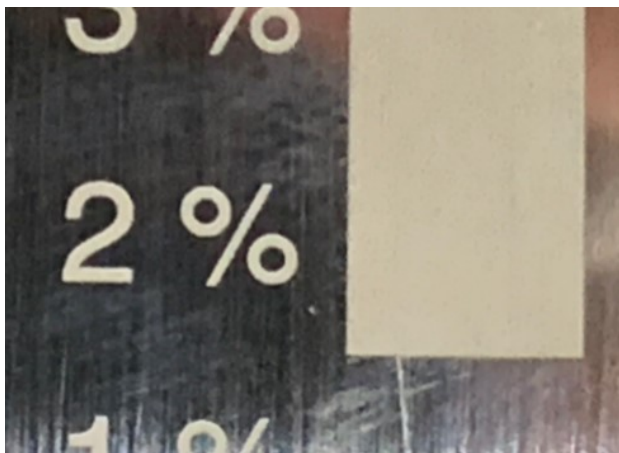
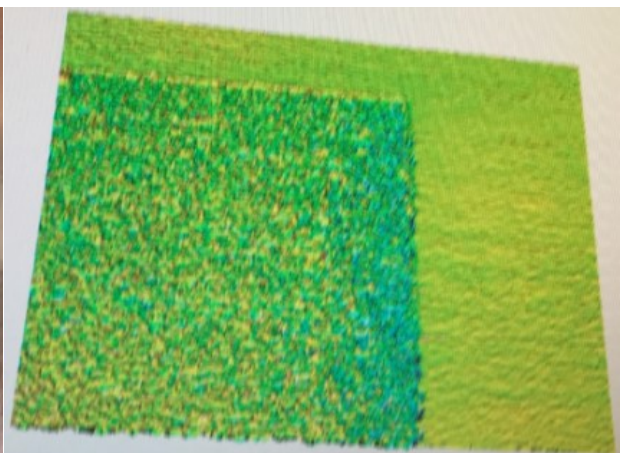


Abbildung 14: Eingrenzung der Gravurvorgaben für die Strukturierung von Chromoberflächen anhand definierter Linien- (links) und Punktgeometrien (rechts)

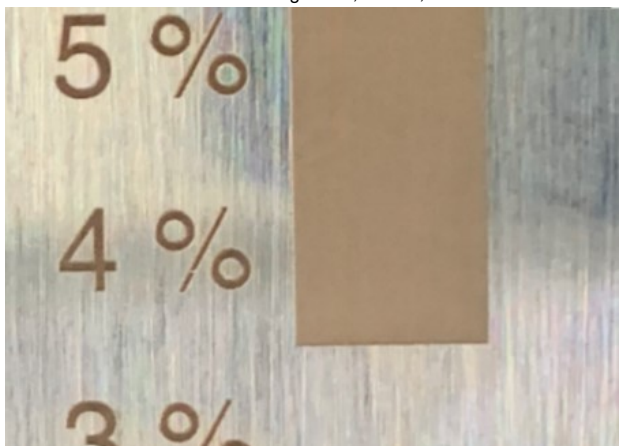
Die erzeugten Gravurmuster wurden jeweils mittels 3D-Mikroskop untersucht. Dabei konnten immer bessere Abbildungsgenauigkeiten attestiert werden. Auch die Homogenität des Materialabtrags konnte im Ergebnis der sukzessive abgestimmten Fokusregelung und Schaltprofile (on/off-Pattern) deutlich verbessert werden, so dass letztendlich Gravurqualitäten nachweisbar waren, welche sich im gesamten Strukturprofil durch nur sehr geringe Schwankungen des Abtragsniveaus auszeichneten (vgl. Abbildung 15). Vor diesem Hintergrund konnten in der Chromschicht erstmals Strukturqualitäten nachgewiesen werden, wie sie bis dato ausschließlich von der Kupfergravur bekannt waren.



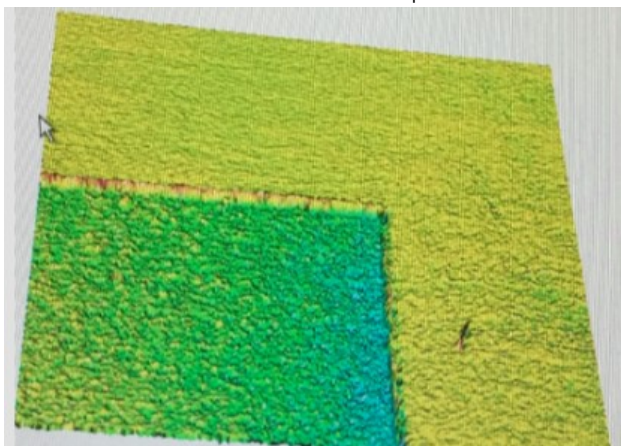
800 x 800 L SingleShot; 15 m/s; 80 W



2 % Grauton = Tiefe ca. 2 µm



160_1000_1000 SingleShot; 13 m/s; 100 W



4 % Grauton = Tiefe ca. 6 µm

Abbildung 15: Erarbeitung der Parameterabhängigkeiten bei der Laserstrukturierung von Chrom

Auf Basis dieser Ergebnisse konnten hier auch hierarchische Strukturmuster betrachtet werden, bei denen eine in Kupfer gravierte Makrostruktur verchromt und mikrostrukturiert wurde. Die Überlagerung beider Strukturebenen konnte erstmals exemplarisch anhand einer Holztextur mit unterschiedlichen Mattierungseffekten realisiert werden. Dabei wurden auch verschiedene Parametervariationen, wie z. B. der Wechsel von fixer Graustufendefinition auf einen Graustufenverlauf, untersucht (vgl. Abbildung 16).

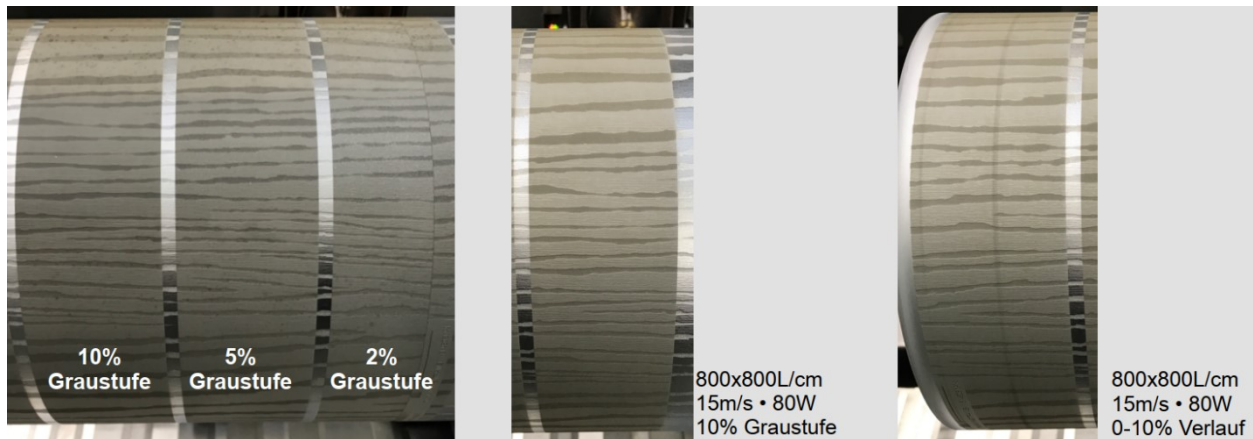


Abbildung 16: Versuche zur Erzeugung hierarchischer Prägegravuren

Bei der Gravur der Chromschicht konnte für den Laser zwar einen tiefen Gravurbereich und eine gegenüber Kupfer deutlich verbesserte Lasereinkopplung festgestellt werden, gleichzeitig wurde jedoch auch ein Problem deutlich, welches in den Versuchen in Kupfer nicht bekannt war. In Abbildung 17 ist dieses in Form von undefiniert angeordnete, mikroskopische Materialablagerungen bzw. Debris auf der Oberfläche sichtbar, die je nach Auflösung die Strukturierungsqualitäten durchaus beeinträchtigen können. Zunächst ließen sie sich nicht erklären, konnten jedoch schrittweise auf die infolge der besseren Lasereinkopplung entstehenden Verdampfungs- sowie nachfolgenden Abkühlungsverläufe im Laserfokus zurückgeführt werden. Durch die spezifische Abstimmung der Leistungsschaltung und Vorschubgeschwindigkeit des Lasers ließen sich diese – ggf. struktuverfälschenden – Ablagerungen jedoch schrittweise soweit minimieren, dass sich daraus keine grundsätzliche Problemstellung für den Strukturierungsprozess mehr ableitet.

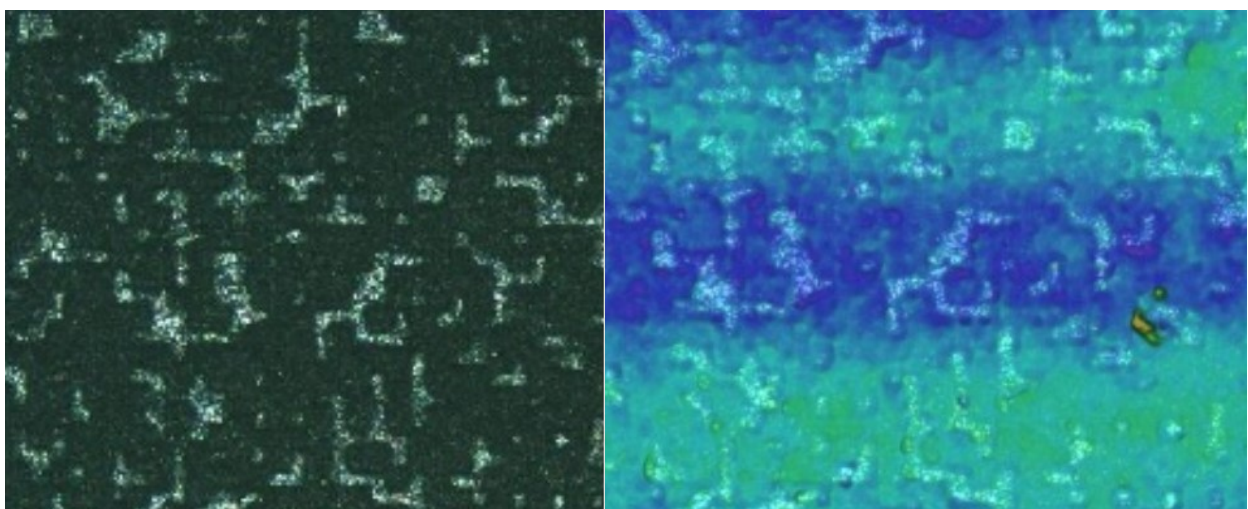


Abbildung 17: Unerwünschte Materialablagerungen auf der strukturierten Chromoberfläche

Weiterführend sollten die Gravurparameter zur Umsetzung der eingangs eingegrenzten

Funktionsstrukturen schrittweise erarbeitet werden. Der Fokus lagen dabei zunächst Hai- fischschuppen-ähnliche Strukturen, für die zuvor am LMO deutlich vergrößerte Kontaktwinkel und damit signifikante hydrophobe Effekte nachgewiesen werden konnten, sowie linienbestimmte Texturen, welche durch strömungsspezifische Effekte charakterisiert waren. In umfangreichen Gravurversuchen konnten hierfür die Gravurvorgaben herausgearbeitet und letztendlich auch sehr gute Gravurqualitäten erreicht werden (vgl. Abbildung 18). Die entsprechend hergestellten Musterprägeformen wurden dem FILK für die anschließenden Prägeversuche zur Verfügung gestellt.

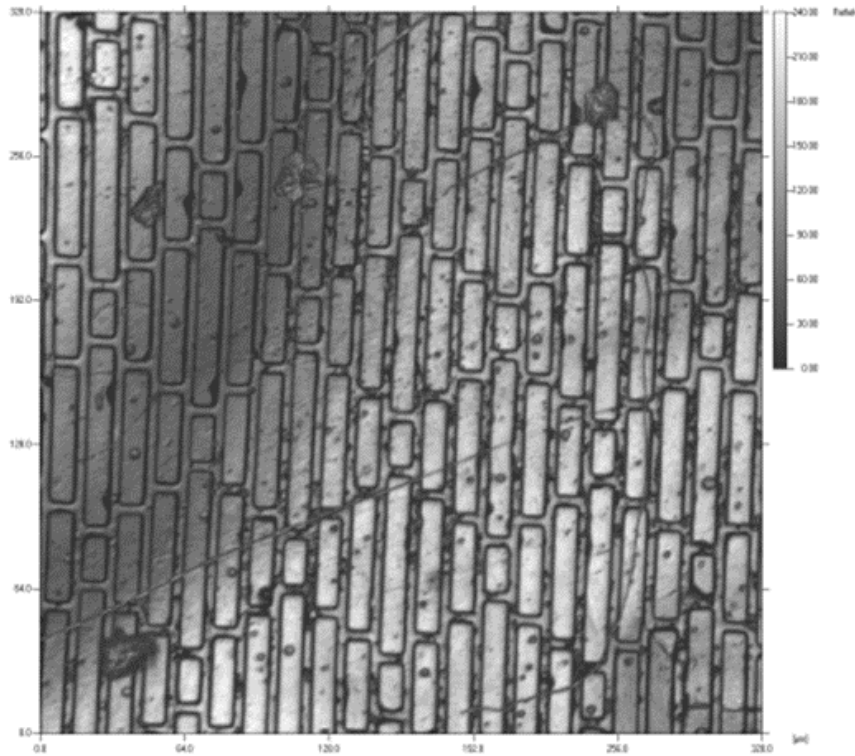


Abbildung 18: Beispiel einer auf einem Versuchszylinder erzeugten Funktionsstruktur

Anschließend wurden auch alternative periodische Punkt- und Linienstrukturen, die gerade im Hinblick auf das funktionale Zusammenspiel mit den makroskopischen Lippenstrukturen wirksame Effekte vermuten ließen, weiterführend untersucht. Anhand dieser Versuche konnte neben der gravurtechnischen Umsetzbarkeit erfolgreich nachgewiesen werden, dass sich die Mikrostrukturebene selbst in eine sehr inhomogene Oberflächentextur mit sehr guter Qualität integrieren lässt (vgl. Abbildung 19), nachdem jedoch hierfür zunächst umfangreiche Abstimmungen der Repräsentationsaufbereitung erforderlich waren.

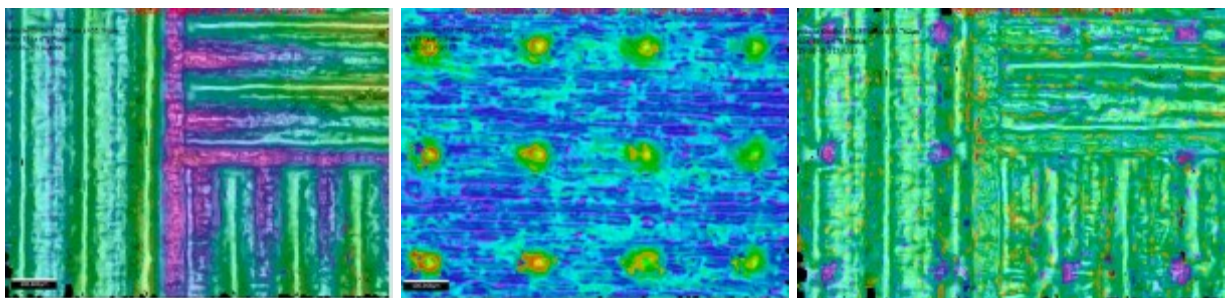


Abbildung 19: Überlagerung der gravierten Mikro- und Makrostrukturen – 3D-Mikroskopie am Beispiel eines Gravurmusters; links: Makrostruktur, Mitte: Funktionsstruktur, rechts: Integrierte Prägestruktur

Den am FILK anhand der erstellten Prägemuster in Versuchsaquarien durchgeführten Besiedelungsversuche konnten trotz der zuvor bereits in LMO-Studien für die bis dato untersuchten Mikrostrukturen bestätigten Antifoulingtendenzen in den ersten Schritten keine adäquaten Effekte attestiert werden. Dies galt entgegen den Erwartungen vor allem auch für die haifischhautähnlichen Folienprägungen, welche z. T. sogar höhere Bewuchsraten aufwiesen, als die nicht geprägten Referenzproben. Diese Ergebnisse ließen sich zunächst nur schwer erklären, wurden später jedoch darauf zurückgeführt, dass substratimmanente Hilfsstoffe durch den Prägeprozess im Folienmaterial fixiert werden, während sie an den unbearbeiteten Folienoberflächen teilweise migrieren und dadurch eine bewuchshemmende Wirkung mitbringen. Im Gegenzug wurden einigen Prägemustern sogar bewuchsfördernde Strukturierungseffekte nachgewiesen, was zwar nicht der Grundintension des Vorhabens entsprach, im Hinblick auf die Herstellung von schnell begründenden Materialien jedoch völlig neue, zwingend weiterzuverfolgende Perspektiven eröffnet.

Mit geänderten Prägestrukturen konnten in einer zweiten Stufe erste Erfolge erzielt werden, wobei hierbei deutlich wurde, dass sich die Antifoulingeffekte bei den kontinuierlich – also mittels Prägezyylinder – geprägten Folienmustern deutlicher ausbildeten als bei den diskontinuierlichen Flachprägungen (siehe auch 2.6). Dies ist nach Einschätzung der Ergebnisse vor allem auf die konzentriertere Druckverteilung im Prägespalt und die dadurch verbesserte Strukturabformung zurückzuführen. Im Ergebnis dieser 2. Evaluierungsstufe konnte letztendlich eine Bewuchshemmung von bis zu 42 % bzw. 64 % nachgewiesen werden (→ vgl. Abschlussbericht FILK).

Angesichts der zwischenzeitlich unbefriedigenden Ergebnisse zur nachweisbaren Antifoulingwirkung der strukturierten Oberflächen wurden die betrachteten Funktionsstrukturen noch einmal grundlegend betrachtet. Dies führte dazu, dass das LMO nochmals neue Strukturgeometrien herausstellte, die in einer dritten Stufe auf ihre technische Umsetzbarkeit und mikrobielle Wirksamkeit bewertet werden sollten. Dabei handelte es sich nicht mehr um die zunächst favorisierten Linien- bzw. Schuppentexturen, sondern um säulenförmige Mikrostrukturen mit Strukturhöhen unter 20 µm sowie Strukturdurchmessern zwischen 10 µm und 50 µm (Abbildung 20).

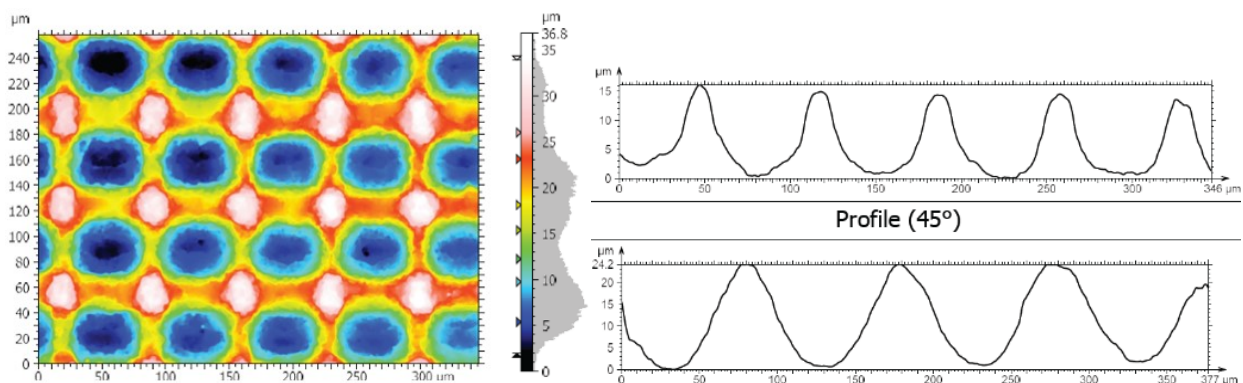


Abbildung 20: Beispiel einer für die finalen Funktionsversuche herausgearbeiteten Mikrostruktur

Für die neuen Strukturgeometrien musste wiederum ermittelt werden, ob und unter welchem Parameterangaben sich diese Strukturen gravurtechnisch umsetzen lassen. Dafür wurden bei SWG nochmals mehrere Versuchsreihen unter Berücksichtigung verschiedener Geometrievariationen durchgeführt. Im Ergebnis gelang es trotz der sehr anspruchsvollen Strukturvorgaben, auf dieser Basis Prägegravuren mit sehr hoher Geometriegenauigkeit und Strukturqualitäten zu realisieren (vgl. Abbildung 21).

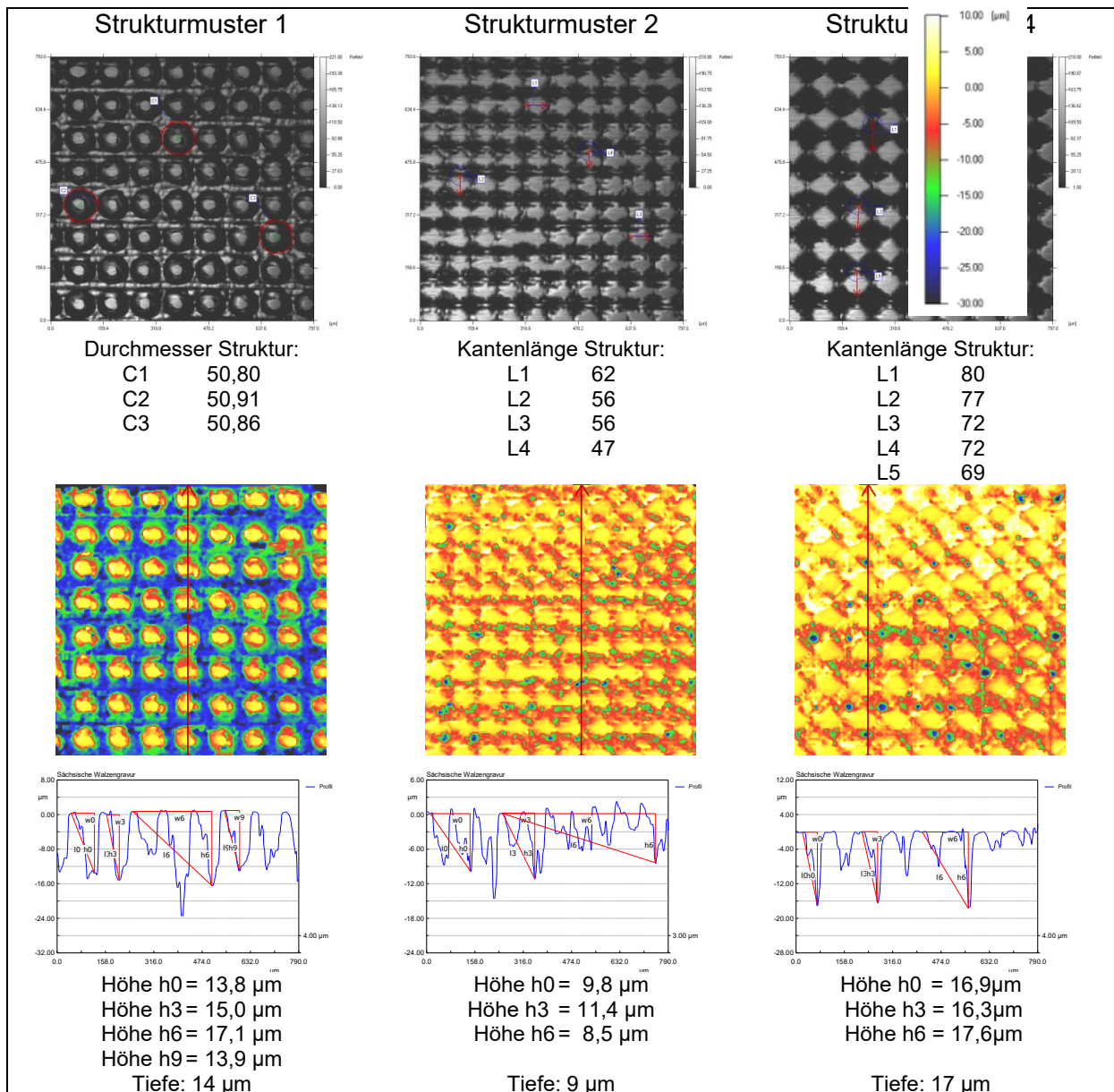


Abbildung 21: 3D-mikroskopische Messung der für die neuen Funktionsstrukturen erzeugten Prägegravuren

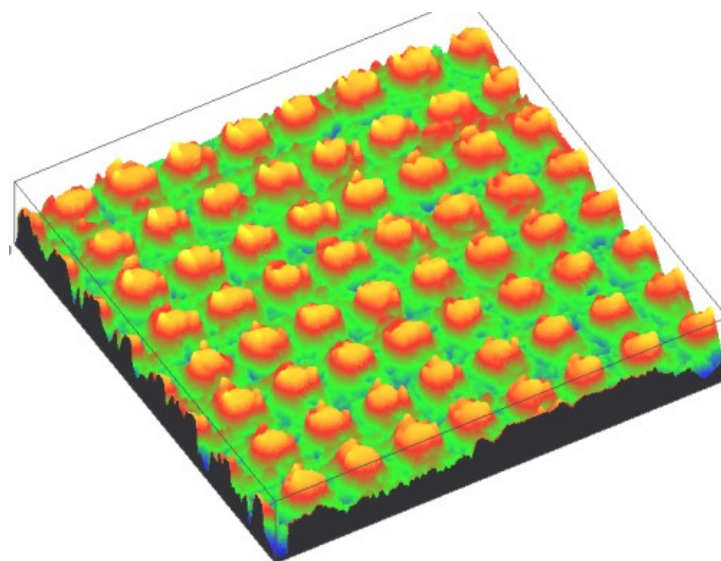


Abbildung 22: 3D-Mikroskopie einer Versuchsgravur einer Säulenstruktur

Aufgrund der zu diesem Zeitpunkt bereits fortgeschrittenen Projektlaufzeit konnten keine Prägeversuche mit diesen Versuchszylindern mehr durchgeführt werden, zumal die neuen Strukturvoraussetzungen voraussichtlich umfangreiche Abstimmungen der Prägeparameter zur Folge gehabt hätten. Um dennoch kurzfristig eine mikrobiologische Einschätzung entsprechend mikrostrukturierter Folienmuster vornehmen zu können, wurden diese direkt laserstrukturiert und in den Aquarien am FILK eingelagert.

Dabei konnten nunmehr signifikante Antifoulingeffekte nachgewiesen werden, die sich sehr deutlich auf die Oberflächenstrukturierung der Folien zurückführen ließen. Insbesondere bei den säulenähnlichen Strukturen wurde nach den 14tägigen Versuchen ein um 86 % reduzierter Bewuchs gegenüber der unstrukturierten Referenzfolie ermittelt. Die anderen Strukturmuster wiesen hier eine Bewuchsreduzierung zwischen 62 % und 77 % auf. Dies galt zwar für das Testaquarium mit geringerer Algenkonzentration, welches jedoch die für die Anwendung repräsentativere Umgebung darstellte. Aber auch im Aquarium mit einer sehr hohen Algenkonzentration konnte bei drei von vier Strukturen ein signifikanter Hemmeffekt nachgewiesen werden, der hier jedoch nur zwischen 13 % und 24 % betrug, die bei derartigen Bedingungen jedoch maßgebenden strömungsbedingten Einflüsse jedoch komplett vernachlässigt.

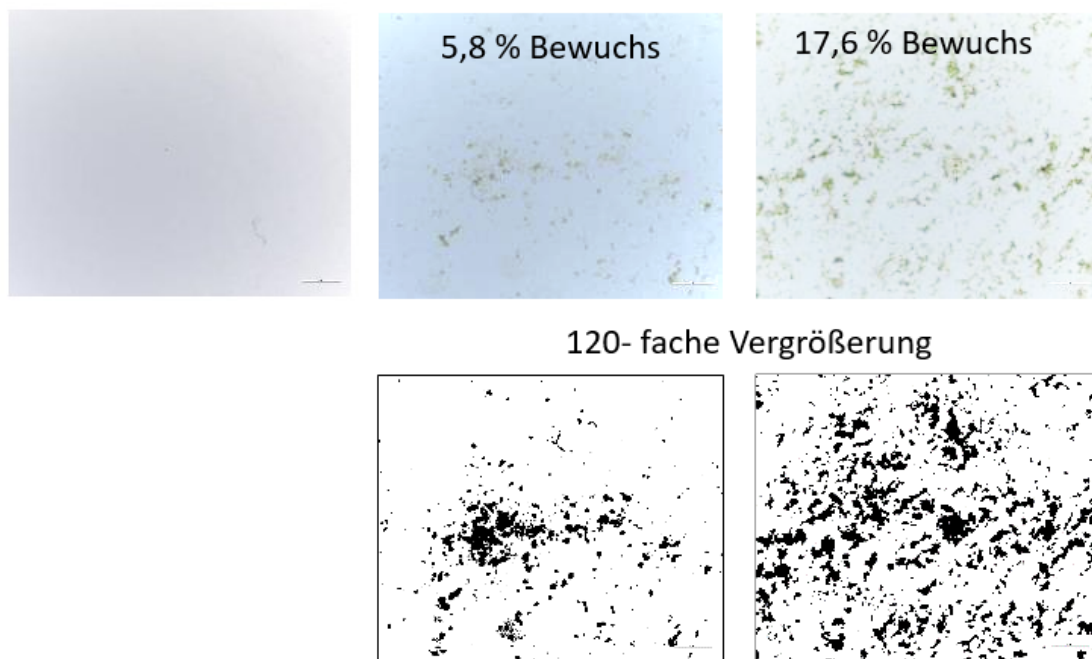


Abbildung 23: Beispiel des Bewuchsverlaufs in den Aquariumversuchen auf einer mikrostrukturierten Folienprobe (D435)

Insbesondere in der Konsequenz dieser Versuche lassen sich aus dem Vorhaben sehr vielversprechende Ergebnisse mitnehmen. Einerseits konnten Mikrostrukturen herausgearbeitet werden, die eine reproduzierbare und signifikante Antifoulingwirkung mitbringen, andererseits konnte für sie auch nachgewiesen werden, dass sie sich auf einem Prägewerkzeug mit den erforderlichen Genauigkeiten gravieren lassen. Damit konnte eine sehr gute Grundlage geschaffen werden, um nun weiterführend die wirkoptimalen Strukturkombinationen in Verbindung mit aktiven Lippen- und effektiven Schutzstrukturen sowie einen abgestimmten und skalierbaren Replikationsprozess erarbeiten sowie flexiblere Testanordnungen entwickeln zu können.

2.6 Erarbeitung der Voraussetzungen für die Prägung von Antifoulingoberflächen

Die gravierten Prägemuster wurden jeweils zunächst an der eigenen Anprägestation vorevaluiert (Abbildung 24). Insbesondere für die Abformung der Funktionsstrukturen mussten dort der Walzenabstand bzw. Anpressdruck sowie Umdrehungsgeschwindigkeit ermittelt werden, wobei eine optimale Abformung ohne exakt gesteuerte Temperierung der Prägewalzen nicht zu erreichen war. Dennoch konnten hier erste Rückschlüsse über die prinzipiellen Prägeeigenschaften der erzeugten Strukturen ermittelt werden.

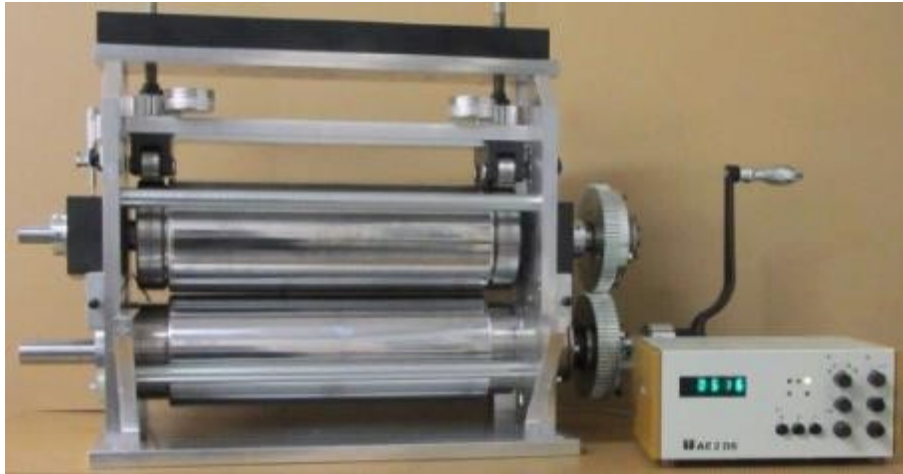


Abbildung 24: Anprägestation bei SWG mit gravierten Versuchsprägeformen

Im Mittelpunkt der Betrachtungen zur Strukturabformung standen jedoch die am FILK durchgeführten rotativen Prägeversuche, welche weitgehend von SWG begleitet und ausgewertet wurden. Hierfür wurden Prägesleeves mit den jeweils spezifizierten Funktionsstrukturierungen hergestellt (vgl. Abbildung 25).

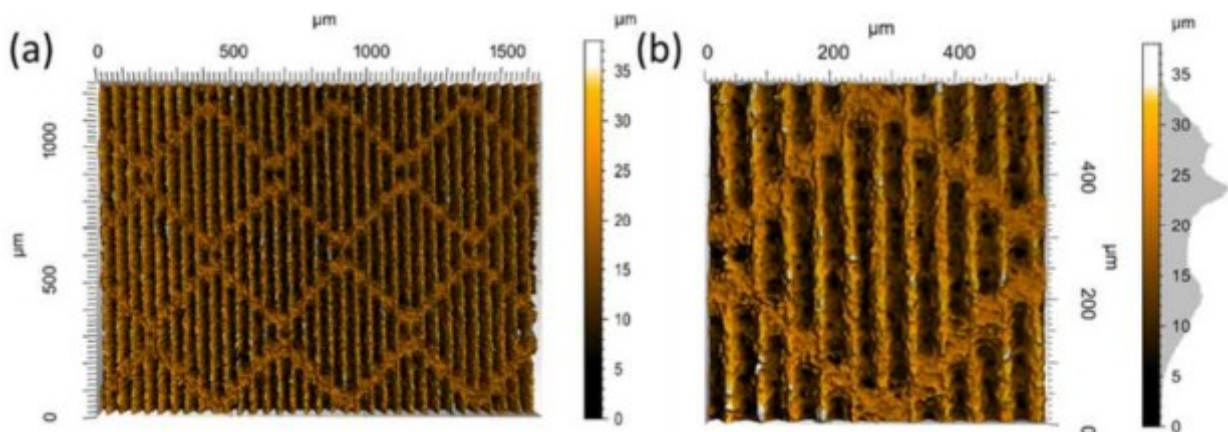


Abbildung 25: Beispiel einer Prägestruktur auf einem Prägesleeve für die kontinuierlichen Prägeversuche am FILK

In den Rotationsprägeversuchen wurde – wie bereits oben angedeutet - deutlich, dass beim kontinuierlichen Prägen die Soll-Ist-Abweichungen zwischen Geometrie des Prägewerkzeuges und Pragemuster Folie wesentlich geringer ausfielen als bei den planaren Pragemustern. Dies war hauptsächlich damit zu begründen, dass der Druck in Form einer Linienlast deutlich gleichmäßi-

ger einwirkt und Schwankungen in der Temperatur, Oberflächenqualität und Materialverformbarkeit im kontinuierlichen Prozess ausgeglichen werden.

Darüber hinaus konnte ermittelt werden, dass die horizontal geprägten Strukturen zwar die geringste Strukturtiefe mitbrachten, dafür aber eine sehr große Symmetrie und Periodizität auswiesen. Die Erhöhung des Anpressdruckes machte dabei größere Strukturturen problemlos möglich, wobei sich in diesem Zuge jedoch die Homogenität der geprägten Struktur verschlechterte. Strukturen, die hingegen in einem Winkel von 45° oder in Bahnrichtung abgeformt wurden, wiesen einen Drift der Wellenstruktur entlang der Nulllinie auf, was hauptsächlich auf Druckschwankungen zurückgeführt werden musste (vgl. Abbildung 26). In der Auswertung aller Prägeversuche wurde deutlich, dass 45° -orientierte Strukturen die schlechteste Prägequalität mitbrachten, was sich auch durch die Erhöhung des Anpressdruckes nicht signifikant verändern ließ, jedoch im Hinblick auf die Erzeugung der Prägegravur nachfolgend problemlos berücksichtigt werden konnte.

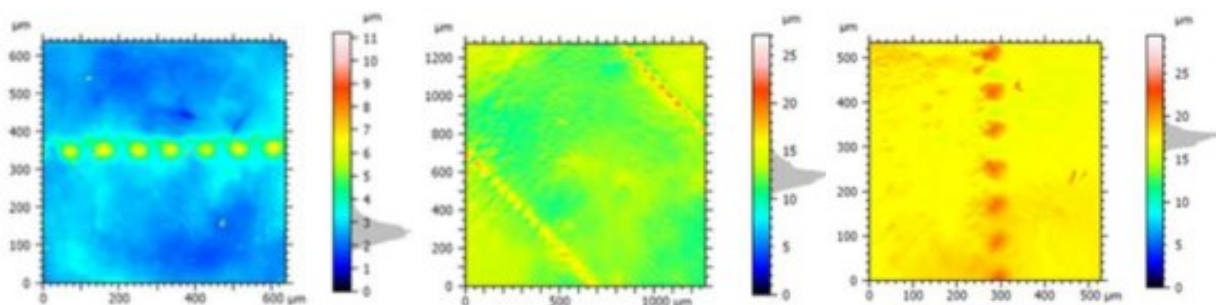


Abbildung 26: Richtungsabhängige Ausbildung der Prägegeometrien

In weiterführenden Prägeversuchen wurden die haifischschuppen-ähnlichen Strukturen in zwei verschiedenen Varianten auf einer kalandrierte PVC-Folie unter Variation des Anpressdruckes abgeformt. Im Vergleich zum diskontinuierlichen Prägen konnte erneut die höhere Auflösung und Gleichmäßigkeit der Abformung im rotativen Prägeprozess bestätigt werden. Die Detailanalyse ergab, dass die Verteilung der Strukturhöhen in z-Richtung für die Variante 1 signifikant enger sowie homogener ausfiel, was auf eine gleichmäßigere Prägung der Oberfläche hinwies. Durch die stetige Druckerhöhung um bis zu 40 bar konnten weitere Verbesserungen des Prägebilds erzielt werden.

Auch die Prägeversuche zur Abformung der o. g. Lamellen- bzw. Lippenstrukturen konnten mit guten Ergebnissen durchgeführt werden. Zwar mussten die Struktur- und Prägeparameter auch hierfür mehrfach nachjustiert werden, es gelang jedoch letztendlich diese Funktionsstrukturen mit guten Qualitäten in das Foliensubstrat einzubringen. Dies bezog sich nicht nur auf die hohe Abbildungsgenauigkeit der Gravur, sondern insbesondere auch auf die sehr homogene Ausprägung der Lippenoberflächen und Flanken, Letztere selbst bei unterschiedlichen Winkeln (vgl. Abbildung 27).

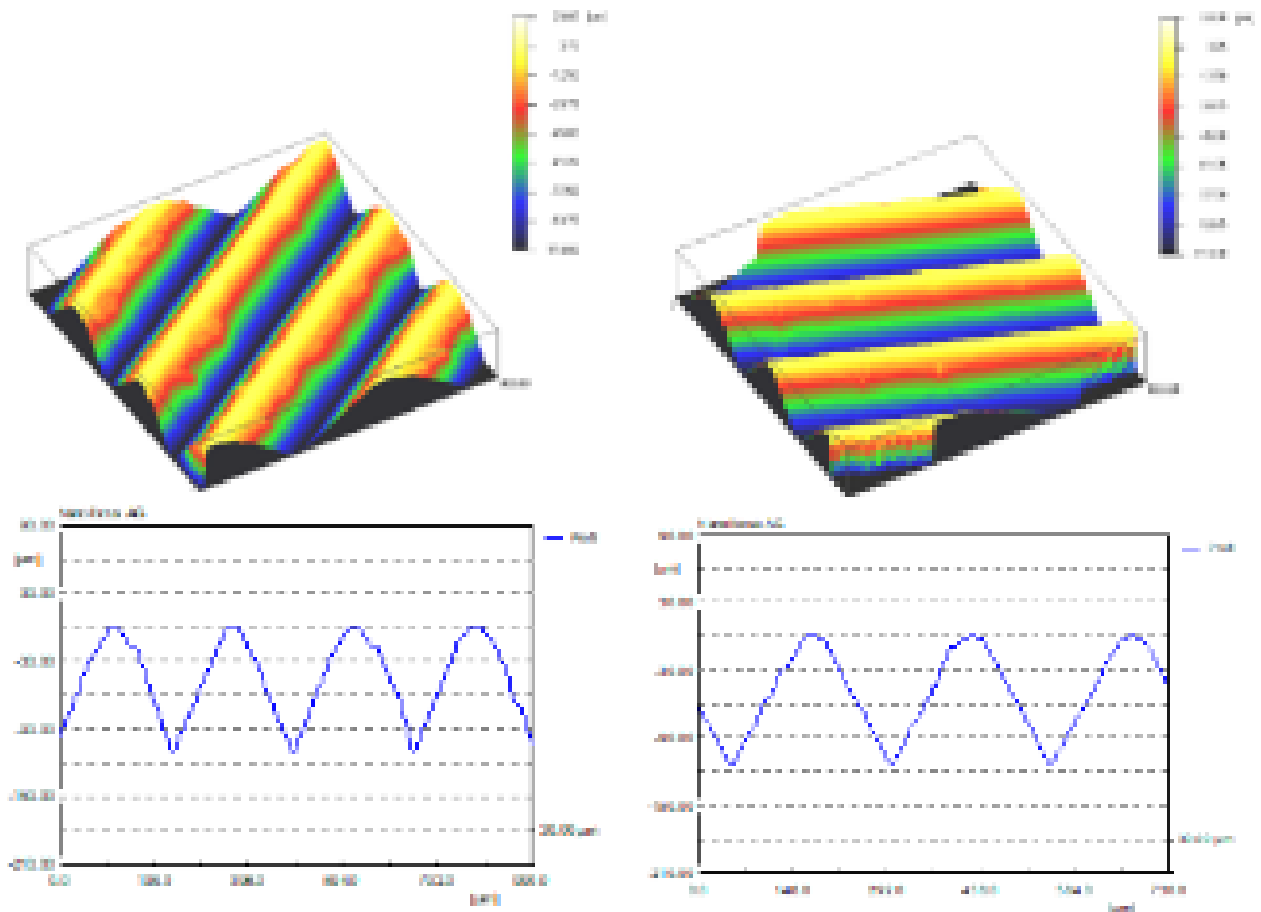
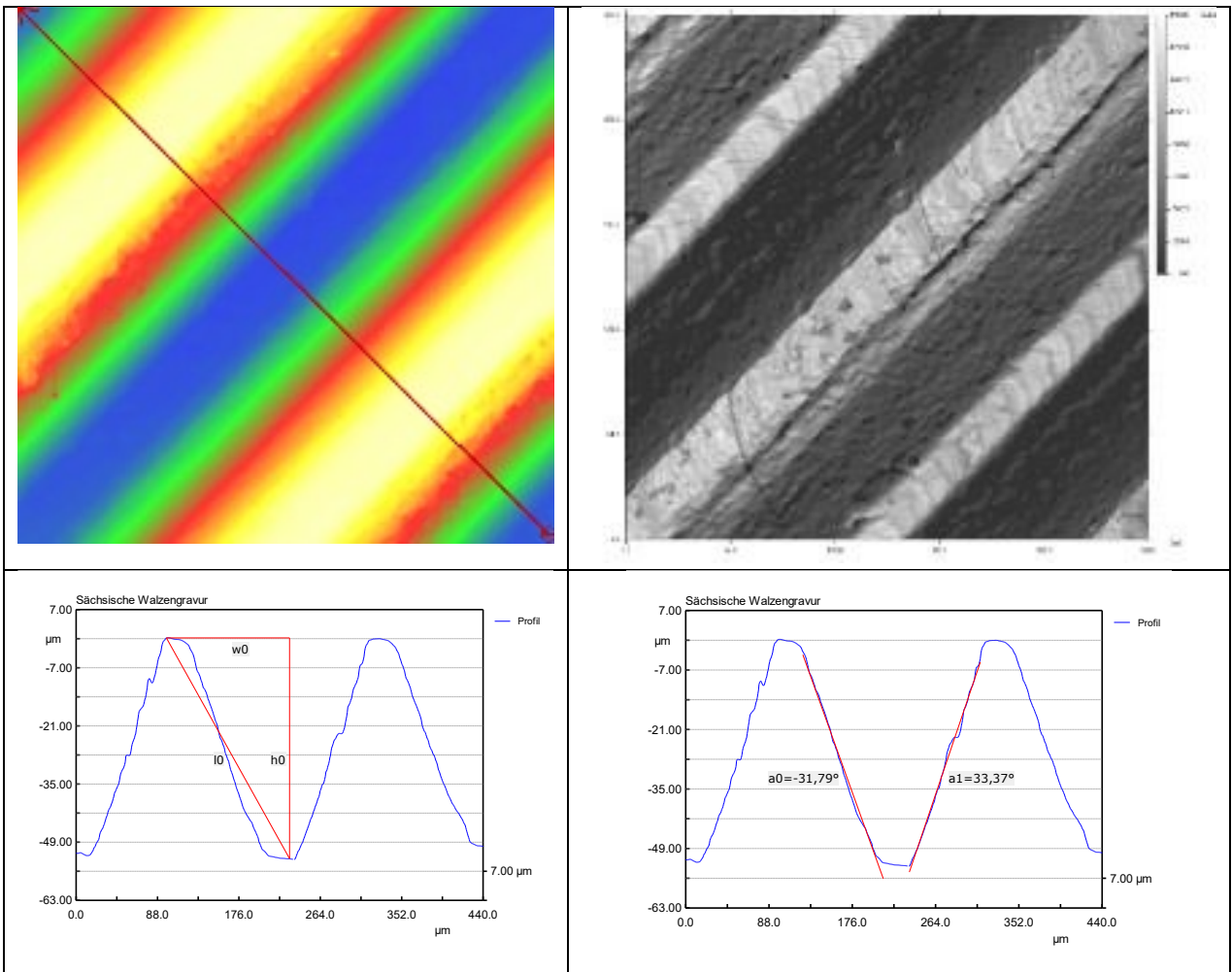


Abbildung 27: Optische 3D-Analysen von geprägten Lippenstrukturen

2.7 Erarbeitung der Tiefdruckraster für die Erzeugung prägefähiger Folienbeschichtungen

Dieser Arbeitsschwerpunkt zielte darauf ab, die Drucktechnischen Voraussetzungen für die Erzeugung funktional strukturierter Folienbeschichtungen zu erarbeiten. Hierbei stand primär ein vergleichsweise dicker und gleichzeitig sehr homogener Lackauftrag im Vordergrund, welcher beim Partner Reisewitz mittels Prägung strukturiert werden sollte. Die Folienbeschichtung sollte im Tiefdruckverfahren erfolgen, so dass hierfür geeignete Tiefdruckraster entwickelt werden mussten.

Die besondere technische Herausforderung bestand darin, drucktechnisch extrem homogene Beschichtungen zu erzeugen, um geeignete Voraussetzungen für eine exakte Strukturabformung zu schaffen. In Abstimmung mit Reisewitz wurden hierfür zunächst die relevanten Beschichtungssysteme analysiert. Ziel der Arbeiten war es, Raster- bzw. Strukturgeometrien herauszuarbeiten, welche den Farbübertrag bzw. geometrisch das Entleerungsverhalten unterstützen. Entsprechend wurden umfangreiche Untersuchungen durchgeführt, in denen verschiedenste Struktur- bzw. Geometrievarianten graviert und in der Andruckstation vorbewertet wurden. Auf diesem Weg konnten schrittweise Linienstrukturen eingegrenzt und realisiert werden, welche diese Anforderungen sehr gut erfüllten (vgl. Abbildung 28).



Höhe $h_0 = 53,134 \mu\text{m}$

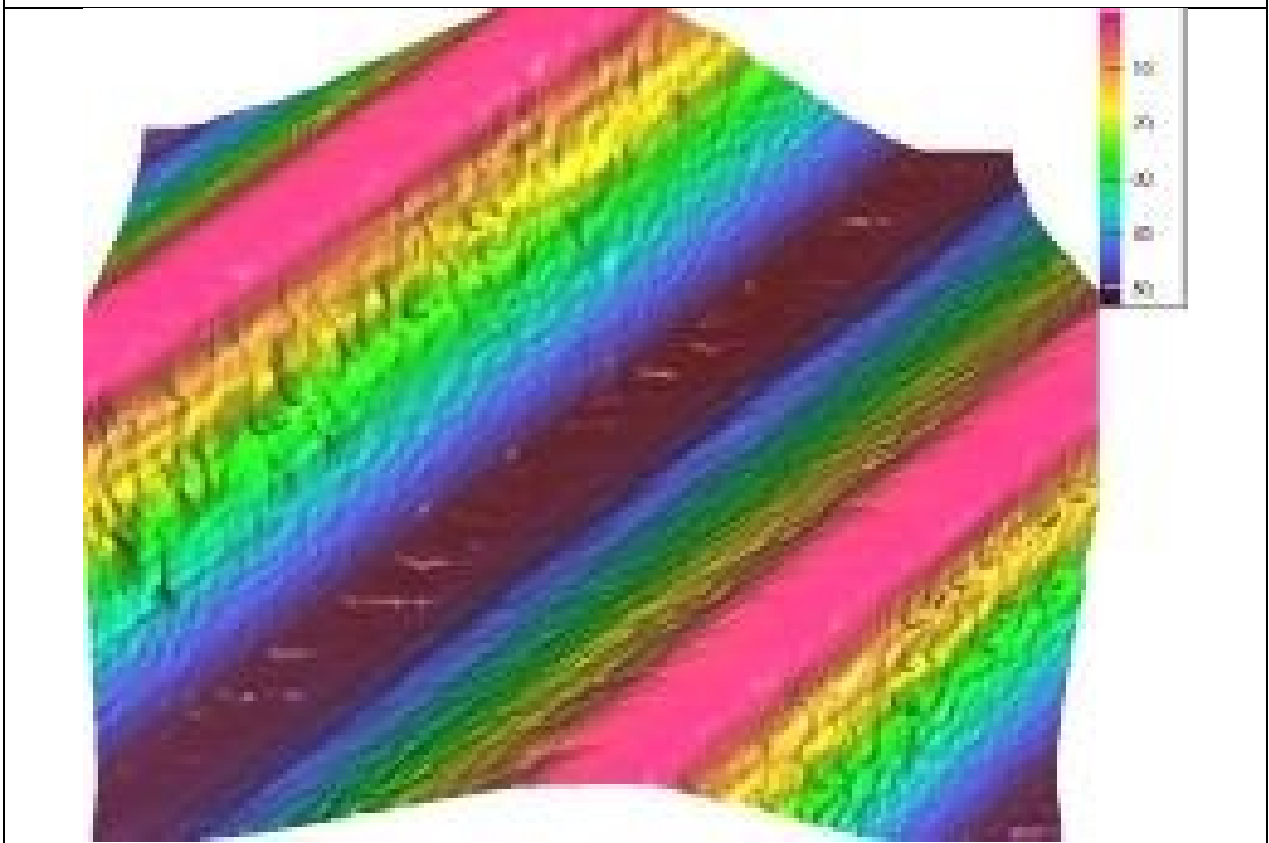


Abbildung 28: Strukturgeometrien für einen verbesserten Farbübertrag zur homogenen Folienbeschichtung

Aufbauend darauf wurde ein Werkzeug erarbeitet (Abbildung 29), welches erstmals die theoretische Bestimmung der Übertragungsvolumina dieser Strukturen in unterschiedlichen geometrischen Auslegungen und der Ermittlung der Tonwerte für die Erstellung der Reprodaten in Abhängigkeit von Tiefe, Stegbreite, Flankenwinkel und Haschurwinkel ermöglichte (Abbildung 30).

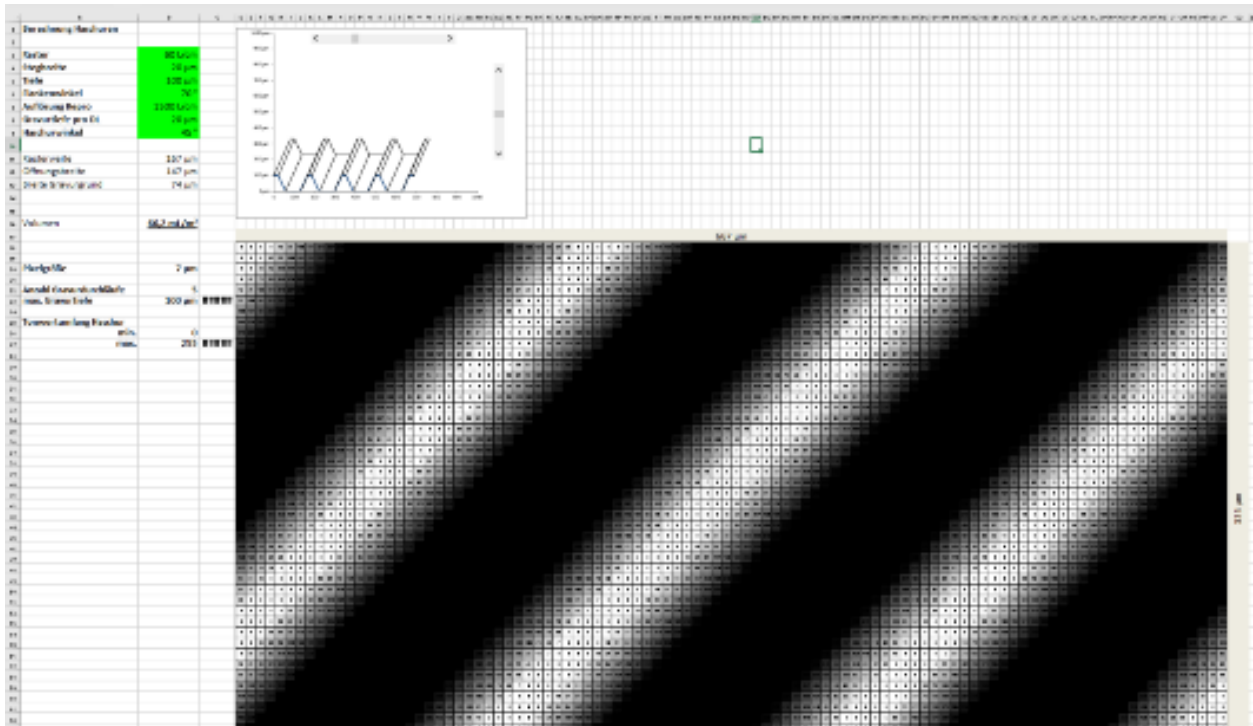


Abbildung 29: Berechnungstool zur Ermittlung des strukturspezifischen Übertragungsvolumens

Struktur 1		Struktur 2			Struktur 3	
Probe 1 20x	Probe 2 10x	Probe 1 20x	Probe 2 10x	Probe 3 10x	Probe 1 20x	Probe 2 10x
Tiefe Soll 45µm		Tiefe Soll 37µm			Tiefe Soll 30µm	
IST 46,4µm	45,7µm	IST 37,4µm	37,2µm	37,2µm	IST 33,8µm	27,6µm
Volumen Soll 35-38ml/m²		Volumen Soll 27-30 ml/m²			Volumen Soll 20-22ml/m²	
IST 36,4 ml/m²	35,7ml/m²	IST 27,5 ml/m²	27,9ml/m²	27,9ml/m²	IST 21,1ml/m²	18,9ml/m²
Dimension		Dimension			Dimension	
Linien l [µm]	Linien l [µm]	Linien l [µm]	Linien l [µm]	Linien l [µm]	Linien l [µm]	Linien l [µm]
L1 15	L1 22	L1 15	L1 17	L1 15	L1 13	L1 17
SOLL 25	L2 274	SOLL 22	L2 226	L2 209	SOLL 12	L2 142
L2 262	L3 255	L2 203	L3 198	L3 194	L2 128	L3 131
SOLL 253	L4 146 ²	SOLL 197	L4 127	L4 135	SOLL 126	L4 69
L3 276		L3 221			L3 142	
SOLL 285		SOLL 222			SOLL 143	
L4 167		L4 137			L4 54	
SOLL 196		SOLL 150			SOLL 90	

Abbildung 30: Berechnung der Volumina bei verschiedenen Strukturvariationen

Grundsätzlich konnten auf dieser Basis die druckformseitigen Voraussetzungen geschaffen werden, um prägefähige Lackschichten auf der Folienbahn zu applizieren. Dieser Ansatz konnte jedoch später bei Reisewitz nur eingeschränkt weiterverfolgt werden, da die Prägung der nassen oder auch vorgelierten Lackschichten nur bei einzelnen Lackvarianten überhaupt umsetzbar war und sich die funktionsspezifisch adressierten Strukturauflösungen bzw. dafür erforderlichen Abformgenauigkeiten bislang nicht (reproduzierbar) abbilden ließen. Zudem konnte den bei se.ma antimikrobiell ausgerüsteten Lacksystemen trotz vielfältiger Entwicklungsvarianten lange Zeit keine ausreichende Antifoulingwirkung attestiert werden, so dass sich die Arbeiten im späteren Projektverlauf auf die zwischenzeitlich als erfolgsversprechender eingeschätzte Eingrenzung wirksamer Mikrostrukturen und deren direkte Abformung im Foliensubstrat konzentrierten. Vor diesem Hintergrund konnten auch für die – zu diesem Zeitpunkt jedoch bereits weitestgehend erfolgreich bewältigte – Entwicklung der Druckformraster keine weiteren Optimierungsschritte verfolgt werden.

Auf Basis der in den letzten Projektschritten herausgearbeiteten Antifoulingstrukturen wurde im Hinblick auf die Strukturierung von Folienbeschichtungen die neue Idee entwickelt, diese additiv über das Tiefdruckverfahren auf der Foliensoberfläche zu erzeugen. Entsprechend wurde bei SWG ein Mustersleeve mit den inversen Prägestrukturen graviert (Abbildung 31), welche Reisewitz für die abschließenden Drucktests zur Verfügung gestellt wurde.



Abbildung 31: Versuchsdruckform zur additiven Erzeugung der Antifoulingstrukturen im Tiefdruckverfahren

Da dieser Ansatz erst kurz vor Projektende diskutiert und konkretisiert wurde, kann er aktuell noch nicht abschließend beurteilt werden. Die grundsätzliche technische Machbarkeit scheint auf

Basis der ersten Versuchsergebnisse gegeben zu sein, wobei diese weder eine weiterführende Abstimmung der Druck- und Lackparameter noch die mikrobiologische Bewertung der damit erzielbaren Oberflächenfunktionalisierung erlauben. Dies soll in den weiterführenden Betrachtungen beleuchtet werden. Grundsätzlich bietet additive Folienstrukturierung mittels Tiefdruckverfahren angesichts der damit gut abbildbaren Auflösungen und Strukturgrößen jedoch durchaus einen interessanten Ansatz, gerade im Bereich der Architekturfolien.

3 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der Schwerpunkt der bewilligten Ausgaben lag mit 83 % bei der reinen Entwicklungsleistung in Form der Personalkosten. Nachkalkulatorisch hat sich diese Quote auf 90 % der insgesamt angefallenen Projektkosten erhöht. Grund hierfür waren u. a. die Mehraufwände, die durch die zusätzlichen Iterationen zur Eingrenzung funktional geeigneter Mikrostrukturen aber auch im Zuge der geometrisch exakten Strukturabbildung mit einem industriellen Gravurlaser entstanden sind.

Die bewilligten Sachmittel setzten sich aus Ausgaben für Material und sonstigen unmittelbare Vorhabenkosten zusammen. Während sich bei den Materialkosten gegenüber der Planung nur leichte Minderausgaben ergeben haben, konnte aufgrund der weitreichenden Vorarbeiten am LMO bei den sonstigen unmittelbaren Vorhabenkosten auf die vorgesehenen Versuche zur DLIP-Strukturierung komplett verzichtet werden, so dass hier nur die Nutzungsgebühren für den Gravurlaser zu Buche schlagen.

Die erzielten Einsparungen bei den Sachmitteln wurden zur teilweisen Deckung der Mehrausgaben bei den Personalkosten herangezogen.

4 Notwendigkeit/Angemessenheit der geleisteten Arbeiten

Im Rückblick zeigte sich, dass die für das Vorhaben formulierten Zielstellungen eine sehr hohe Komplexität und mehrschichtige Abhängigkeiten für die Werkzeugentwicklung mit sich brachten. Diese konnten zwar im Ergebnis erfolgreich gemeistert werden, erforderten im Gegenzug jedoch zusätzliche Entwicklungsschleifen und entsprechende Mehraufwände, um z. B. die funktionalen Strukturen in der richtigen Auflösung und Geometrie auf der Präge- bzw. Werkzeugform abbilden zu können. Die hohe „FuE-Intensität“ des Vorhabens rechtfertigt sich jedoch angesichts der nunmehr erstmals auf der Basis von Mikrostrukturen technisch realisierbar erscheinenden Antifouling-Effekte, die sich über entsprechende Folienstrukturierungen im Hinblick auf die Vermeidung von Biofilmen in Schwimmteichen, Foliendächern o. ä. bieten. Dieser Status wäre für SWG ohne dieses Forschungsprojekt bis heute nicht erreichbar gewesen.

Auch wenn bis zur Marktreife noch einige Herausforderungen zu bewältigen sind, sind die Projektergebnisse als großer Erfolg zu werten. Neben den gewonnenen Erfahrungen hinsichtlich der konkreten Antifouling-Wirkung von Mikrostrukturen, deren Gravier- und Abformbarkeit konnte SWG hier viele neue Erfahrungen gewinnen, die dem Unternehmen nicht nur einen deutlichen Kompetenz- und Wettbewerbsvorsprung einräumen, sondern sich auch für weiterführende Anwendungen – v. a. für funktionale Oberflächenstrukturierungen – nutzen lassen. Diese Expertise hätte sich SWG ohne Unterstützung des BMBF nicht erarbeiten bzw. finanzieren können.

5 Voraussichtlicher Nutzen / Verwertbarkeit der Ergebnisse

5.1 Abgeleitete Schutzrechte und Patentanmeldungen

Aus den bei SWG durchgeführten Arbeiten sind keine Ergebnisse hervorgegangen, die die Anmeldung eigener Schutzrechte ermöglichen. Demgegenüber sind jedoch auch weiterhin keine Schutzrechtsanmeldungen Dritter bekannt geworden, die der Verwertung der Projektergebnisse entgegenstehen.

5.2 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

Im Projekt konnte gezeigt werden, dass sich die Bildung von Biofilmen auf Folienoberflächen durch deren geeignete Mikrostrukturierung signifikant verlangsamen lässt und diese Funktionsstrukturen auf Präge- bzw. teilweise auch Druckzylindern geometrisch exakt lasergraviert werden können. Damit konnten die entscheidenden Voraussetzungen für die biozidfreie Antifoulingausrüstung von Schwimmbad-, Schutz-, und Architekturfolien sowie Leitungsauskleidungen und Membranfolien erarbeitet werden, die nun in die Produktherstellung übertragen werden müssen.

Mit der im Vorhaben hinzu gewonnenen Expertise will sich SWG zukünftig als Hersteller der für die Produktion von Antifoulingfolien benötigten Druck- und Prägeformen in Position bringen und somit einen zentralen Teil der damit adressierbaren Wertschöpfungsketten besetzen. Dafür ist es nun jedoch erforderlich, die dafür erarbeiteten Gravur-, Druck- und Prägeprozesse in ein industriereifes Stadium zu überführen. Gelingt dies wie angestrebt innerhalb der kommenden 1 – 2 Jahre, dann eröffnen sich SWG angesichts der vielfältigen Applikationsmöglichkeiten und immensen Bedarfsmengen sehr gute Umsatz- und Wachstumsperspektiven.

Die Hauptgründe für die nach wie vor sehr zuversichtliche Einschätzung liegen trotz der aktuell eher problematischen Marktsituation in der neuartigen Folienfunktionalisierung selbst, denn die immanente Antifoulingausrüstung Folien lässt sich in kostengünstigen R2R-Prozessen, welche in der Folienveredelung etabliert sind, umsetzen und sie ermöglichen in der Anwendung erhebliche Umwelt- bzw. Einspareffekte, z. B. durch den Wegfall der Chlorierung oder verlängerte Reinigungszyklen bzw. Standzeiten. Vor diesem Hintergrund bringen zukünftige Antifoulingfolien nicht nur bessere Gebrauchseigenschaften, sondern insbesondere auch einen echten Mehrwert mit. Dies öffnet auch Türen zu den preissensitiven Märkten.

Auf dieser Basis bieten die entsprechenden Präge- und Druckformen SWG sehr positive Zukunftsaussichten. Die ersten Adressaten werden die Anwendungsprojektspartner Elbtalplastics, Reisewitz und Wendisch sein, welche die Marktzugänge für Schwimmteich-, Architektur-, Dichtungs- und Bootschutzfolien mitbringen. Darüber hinaus zeichnet sich aktuell ein stark wachsender Bedarf im Bereich der Kanal- bzw. Leitungssanierung ab, für zukünftig verstärkt Dichtfolien zum Einsatz kommen sollen, auf denen sich keine Biofilme bilden. Gerade in trinkwasserführenden Systemen könnten die mikrostrukturierten Folien erstmals eine geeignete Lösung bieten, da hier biozide Funktionszusätze und fluorbasierte Substrate ausgeschlossen sein werden. Die ersten marktreifen Produkte sind jedoch ausgehend vom aktuellen Entwicklungsstand frühestens 2027 zu erwarten.

5.1 Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende

Zum Abschluss des Projektes konnten erste Präge- und Druckformdemonstratoren präsentiert werden, welche die wirkspezifisch bestätigten Antifoulingstrukturen mitbringen. Hierfür wurden bei SWG die Voraussetzungen für die anforderungsgerechte Werkzeugstrukturierung erarbeitet.

Auf dieser Basis müssen nun weiterführende Entwicklungsschritte absolviert werden, um möglichst innerhalb der nächsten 2 Jahre produktionsreife Werkzeuge bereitstellen zu können. Damit verbinden sich noch mehrere Aufgabenstellungen, die z. B. auf die effiziente und nahtfreie Strukturierung großer Zylinder, die effekt- und abformoptimierte Auslegung der Funktionsstrukturen sowie die Integration des Präge- bzw. Druckprozesses in die bestehenden Produktionsprozesse abzielen werden. Daraus leiten sich nochmals erhebliche Entwicklungsaufwände und -kosten ab, denen man auf Basis des bereits Erreichten und im Hinblick auf die Vermarktungspotenziale stellen will.

5.2 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit nach Projektende

Primär geht es um die Bewältigung der Herausforderungen auf dem Weg zur Serienreife. Darüber hinaus bieten sich aus dem Projekt heraus aber auch weiterführende Anschlussmöglichkeiten, welche sich z. B. mit der Erweiterung des Substratspektrums, die substratspezifische Auslegung der Prägestrukturen, die Untersuchung hochauflösender UV-Imprint-Prozesse für die Strukturierung von Folienbeschichtungen sowie die weitestgehend „unsichtbare“ Integration effektiver Schutzstrukturen in die Funktionsoberflächen auseinandersetzen könne oder auch müssen.

Aber auch die hier erarbeiteten Funktionsstrukturen bieten verschiedene Ansätze für aufbauende Forschungsarbeiten. Dies betrifft aus heutiger Sicht z. B. die Weiterverfolgung der strukturbedingten und hier zwischenzeitlich ernüchert wahrgenommenen „Wachstumsbeschleunigungseffekte“. Diese bieten im Hinblick auf Architekturfolien und ihren Einsatz für die gezielte Begrünung von Gebäudeoberflächen oder Beschattungselementen völlig neue Optionen, welche mit entsprechenden Partner intensiv diskutiert und weiterverfolgt werden sollen.

6 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Im Projektverlauf sind keine Arbeiten oder Ergebnisse Dritter bekannt geworden, die über den bereits im Antrag dargestellten Stand der Technik hinausgehen oder die hier ermittelten Erkenntnisse infrage stellen.

7 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Die Projektergebnisse bzw. -fortschritte wurden bislang auf den öffentlichen Veranstaltungen des GRAVOMer-Bündnisses präsentiert. Dazu gehörten insbesondere:

- GRAVONET, 20.06.2023 in Leipzig
- 1. Oberflächenforum Mitteldeutschland, 27.09.2023 in Leipzig
- GRAVONET, 13.06.2024 in Leipzig
- GRAVOMER-Projektwerkstatt; 29.10.2024 in Freiberg
- GRAVONET, 22.05.2025 in Halle

Darüber hinaus wurde mit den Partnern eine Posterpräsentation auf der Fachtagung Technomer angemeldet, die am 6./7.11.2025 stattfinden wird. Weiterführende Veröffentlichungen haben sich aufgrund der erst späten positiven Resultate verzögert, werden jedoch auf dieser Basis nun neu mit den Partnern diskutiert. Ziel ist es, diese bis Ende 2025 in einer Fachzeitschrift zu präsentieren.