

# **ENTWICKLUNG EINER OPTIMIERTEN BEWUCHSSCHUTZ-BESCHICHTUNG FÜR DIE LASERINDUZIERTE REINIGUNG UND DEREN EVALUIERUNG MITTELS REALER FREILANDPRÜFUNGEN**

# Abschlussbericht

Förderkennzeichen: 03SX489B

Laufzeit: 01.08.2019 – 31.12.2022

**Dr. Dorothea Stübing**

**Tim Heusinger von Waldegge**

Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM  
Wiener Straße 12  
28359 Bremen

Datum: 08.06.2023

Projektpartner: Laserzentrum Hannover e.V. (LZH) & Laserline GmbH

# Inhalt

Zusammenfassung.....	5
Deutsch.....	5
English .....	6
<b>1 TEIL1: Kurzdarstellung.....</b>	<b>7</b>
1.1 Aufgabenstellung.....	7
1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.....	7
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens.....	8
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand.....	8
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	9
<b>2 Eingehende Darstellung.....</b>	<b>11</b>
2.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen....	11
2.1.1 Vorbemerkungen.....	11
2.1.2 Gesellschaftliche und förderpolitische Relevanz des Forschungsvorhabens...	11
2.1.3 Wissenschaftliche und technische Problemlösungsansätze.....	13
2.1.3.1 Einsatz von Reinigungsverfahren.....	13
2.1.3.2 Technische und umweltbezogene Herausforderungen.....	15
2.1.3.3 Laserstrahlung zur Entfernung/letalen Schädigung von marinem Bewuchs	16
2.1.4 Zielstellung der F/E-Projektarbeiten.....	18
2.2 Ergebnisse.....	19
2.2.1 AP1: Versuchsplanung, Logistik, Risikoanalyse.....	19
2.2.1.1 Versuchsplanung.....	19
2.2.1.2 Logistik.....	21
2.2.1.3 Risikoanalyse.....	23
2.2.2 AP 4 – Probenherstellung.....	26
2.2.2.1 Marine angewandte Feldtests für Laserbestrahlungsversuche.....	26
2.2.2.2 Unterschied zwischen statischen und dynamischen Testmethoden.....	27
2.2.3 AP5: Lackformulierung.....	35
2.2.3.1 Screening.....	35
2.2.3.2 Lackentwicklung.....	39
Interaktion zwischen Laserbestrahlung und Beschichtung.....	40
Kontaktwinkelmessungen.....	45
2.2.3.3 Optimierung.....	50
2.2.4 AP8 -Beeinflussung der Beschichtung.....	52
2.2.4.1 Absorptionsverhalten.....	52
2.2.4.2 Bestrahlungsversuche (an der Luft / im Wasser).....	56

2.2.4.3	Alterungseinflüsse der Beschichtung.....	58
2.2.5	Labormethoden zur Analyse der Alterung.....	58
2.2.6	Untersuchungen zur Freisetzung von anorganischen Verbindungen.....	59
2.2.7	AP9 – Parameterstudien.....	60
2.2.7.1	Einfluss der Laserparameter (IR).....	60
2.2.7.2	Einfluss der Laserparameter (Blauer Laser).....	60
2.2.7.3	Wasseranalyse.....	64
2.2.8	AP10 - Biologische Schädigung und Aktivität.....	66
2.2.9	Vitalitätsfärbung von Bakterien mit Fluoreszenzfarbstoffen.....	68
2.2.10	Mikrobiologische Anreicherungskulturen.....	71
2.2.11	Flow-Cell.....	75
2.2.12	AP11 – Vergleichsverfahren.....	88
2.2.13	Referenzverfahren.....	88
2.2.14	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.....	92
2.3	Fortschreibung des Verwertungsplans.....	94
2.4	Während der Projektlaufzeit bekannt gewordene Fortschritte auf dem Fachgebiet.....	96

**3**

<b>Danksagung.....</b>	<b>Fe</b>
<b>hler! Textmarke nicht definiert.</b>	

## Deutsch

Eingebettet in das Verbundprojekt »FouLLas« galt es in diesem Teilprojekt den Einfluss von U/W-Laserbestrahlung (IR- / Blauer- Laser) auf Beschichtungen in Abhängigkeit von multiplen Prozessparametern zu evaluieren. Aus den Ergebnissen zahlreicher Versuche wurde ein technisches Lastenheft abgeleitet, welches den Entwicklungskorridor für eine neuentwickelte, auf den laserbasierten Anwendungsfall zugeschnittene Beschichtung ebnet. In »FouLLas« lag der Fokus dabei auf der Verbesserung des Reinigungserfolges durch eine Optimierung der Reflexionseigenschaften. Auch die Beständigkeit gegenüber der Laserbestrahlung war Teil der Untersuchungen. Begleitend wurden Beschichtungen mit bewuchsvermindernden Eigenschaften getestet. Die unterschiedlichen Funktionalitäten wurden jedoch noch recht autark voneinander betrachtet. »FouLLas« diente als Machbarkeitsanalyse und lieferte ein vorselektiertes Konzept für die weitere Formulierungsarbeit, die mehrere Funktionsmechanismen miteinander vereinen soll.

Grundsätzlich stellt die Entwicklung von Beschichtungen mit mehreren Funktionsmechanismen eine Herausforderung dar, ohne dass die Leistung in einem Bereich auf Kosten eines anderen beeinträchtigt wird. Um diese Wechselwirkungen zu verstehen und falls unerwünscht, bestmöglich zu minimieren ist eine umfassende Begleitanalytik notwendig. So kann beispielsweise die Zugabe eines bestimmten Materials, zur Verbesserung des Bewuchsschutzes führen aber die Haftung der Beschichtung verringern. Die Wahl der richtigen Materialien für die Beschichtung ist entscheidend für deren Widerstandsfähigkeit gegenüber Laserstrahlung. Materialien mit hoher Absorption von Laserlicht sollten vermieden werden. Stattdessen kamen Materialien mit hoher Reflektivität und niedrigem Absorptionskoeffizienten zum Einsatz. Die Zugabe von Additiven wie z.B. Metalloxiden oder Nanopartikeln kann die Absorption von Laserstrahlung reduzieren und somit den Degradationsschutz erhöhen. Ferner kann die Struktur der Beschichtung einen Einfluss auf den Degradationsschutz haben. Veränderungen lassen sich durch die Art und Menge von Polymeradditiven und / oder metallische Füllstoffe erreichen.

Auch die Wärmeleitfähigkeit einer funktionellen Beschichtung kann auf verschiedene Arten verbessert werden. Durch Hinzufügen von Füllstoffen kann die Wärmeleitfähigkeit der Beschichtung erhöht werden. Auch die Schichtdicken der Beschichtung kann ebenfalls einen Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit haben. Eine dünnere Beschichtung kann in der Regel eine höhere Wärmeleitfähigkeit aufweisen als eine dickere Beschichtung. Eine raue Oberfläche kann die Wärmeübertragung behindern. Eine glatte Oberfläche hingegen kann die Wärmeübertragung verbessern. An diesen Beispielen zeigt sich bereits die hohe Komplexität bei der funktionsbasierten Materialauswahl. Hier konnte in »FouLLas« ein Grundstein für anschließende Forschungsarbeiten gelegt werden.

Ein weiteres Ziel des Teilvorhabens bestand darin, eine standardisierte biologische Bewertung des Reinigungserfolgs zu etablieren. Aufgrund rechtlicher Vorschriften ist es entscheidend, dass während und nach dem Reinigungsprozess keine lebensfähigen Organismen in die Meeresumwelt gelangen. Zudem muss das Biofouling entfernt werden, um den Anforderungen des Marktes gerecht zu werden, da verbliebener Bewuchs sich negativ auf den Treibstoffverbrauch und die Emissionswerte auswirkt. Um den Reinigungserfolg zu bewerten, entwickelte das IFAM standardisierte Prüfungen (u.a. eine

Flow-Cell zur Bewertung des Reinigungserfolges unter definierten, dynamischen Lasten), bei der auch marktübliche Reinigungsverfahren als Benchmark zum Einsatz kamen.

## English

Embedded in the joint project »FoulLas«, this subproject aimed to evaluate the influence of underwater laser irradiation (IR/blue laser) on coatings based on multiple process parameters. A technical specification was derived from the results of numerous experiments, which should pave the way for the development of a newly designed coating tailored to the laser-based application. In »FoulLas«, the focus was on improving the cleaning performance by optimizing the reflection properties. The resistance to laser irradiation was also part of the investigation. Coatings with anti-fouling properties were tested concurrently, although the different functionalities were still considered rather independently. »FoulLas« served as a feasibility analysis and provided a preselected concept for further formulation work that aims to integrate multiple functional mechanisms.

In general, developing coatings with multiple functional mechanisms poses a challenge, as enhancing performance in one aspect should not come at the expense of another. A comprehensive accompanying analysis is necessary to understand and, if undesired, minimize these interactions. For example, adding a specific material to improve biofouling protection may reduce the coating's adhesion. Selecting the appropriate materials for the coating is crucial for its resistance to laser radiation. Materials with high laser light absorption should be avoided, while those with high reflectivity and low absorption coefficients were employed. The addition of additives such as metal oxides or nanoparticles can reduce laser light absorption and thus enhance degradation protection. Additionally, the structure of the coating can influence degradation protection, which can be achieved by adjusting the type and amount of polymer additives and/or metallic fillers.

The thermal conductivity of a functional coating can also be improved in various ways. Adding fillers can increase the coating's thermal conductivity. The thickness of the coating can also impact thermal conductivity, with thinner coatings generally exhibiting higher thermal conductivity compared to thicker ones. A rough surface can impede heat transfer, while a smooth surface can enhance it. These examples demonstrate the high complexity involved in selecting functional materials. »FoulLas« " laid the groundwork for subsequent research in this area.

Another objective of the subproject was to establish a standardized biological assessment of the cleaning performance. Due to regulatory requirements, it is crucial to prevent viable organisms from entering the marine environment during and after the cleaning process. Furthermore, biofouling must be removed to meet market demands, as residual fouling negatively impacts fuel consumption and emission levels. To evaluate the cleaning performance, IFAM developed standardized tests (including a flow cell for assessing cleaning performance under defined dynamic loads), where common cleaning methods served as benchmarks.

## 1.1 Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung umfasst im Einzelnen:

Die Entwicklung und Prüfung von Beschichtungen sowie die biologische Bewertung des Reinigungszustandes.

Dazu gehört die Betrachtung:

- der laserinduzierten Schädigung von Mikroorganismen und Zellverbänden durch die Laserbestrahlung mit wechselnden Parametern.
- die Untersuchung zur Reinigungswirkung unter dynamischen Strömungsbedingungen.
- der Ausschluss nachteiliger Effekte auf unterschiedliche, branchentypische Beschichtungstechnologien.
- Entwicklung auf den Reinigungsprozess optimierter, biozidfreier Bewuchsschutzbeschichtungen

Das Projekt zielt darauf ab, eine nicht abrasive laserbasierte Methode zur effektiven Bewuchsentfernung von Schiffsrümpfen zu entwickeln. Diese Methode soll den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik nachhaltig verbessern und den Anforderungen nach Ressourceneffizienz, Emissionsreduzierung und Kosteneinsparungen gerecht werden. Das Fraunhofer Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM verfügt über umfangreiche Prüfmethode und Fachpersonal, um den Reinigungserfolg materialwissenschaftlich und biologisch zu bewerten. Die optimale Abstimmung von Laser- und Beschichtungstechnologie ist entscheidend, um maximale Reinigungseffizienz zu erzielen, ohne den Korrosions- und Bewuchsschutz zu beeinträchtigen.

## 1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das F/E-Vorhaben wurde am Fraunhofer IFAM im Institutsteil »Klebtechnik und Oberflächen«, Abteilung »Lacktechnik«, Arbeitsgruppe »Antimikrobielle Beschichtungen und Bewuchsschutz« durchgeführt. Die Beschichtungsentwicklung erfolgte am Hauptstandort des IFAM in Bremen, während die Reinigungsevaluierung, die Feldprüfungen und die Demonstrationsversuche am IFAM-»Testzentrum für Maritime Technologien« auf der Nordseeinsel Helgoland stattfanden. Anwendungsnahe Tests unter realen biologischen Bedingungen wurden dort durchgeführt. Laboruntersuchungen im mikrobiologischen S2-Labor des IFAM unterstützen die Freilandtests.

Um den Reinigungserfolg im Vergleich zum aktuellen Stand der Technik zu bewerten, wurden umfangreiche Benchmarktests durchgeführt.

Das Teilvorhaben war Bestandteil des Gesamtvorhabens »FouLas«, welches gemeinsam mit den Konsortialpartnern Laserzentrum Hannover e.V. und der Laserline GmbH bearbeitet wurde. Die Laufzeit erstreckte sich vom 01.08.2019 bis 31.12.2022.

An der Lösung der umfangreichen Aufgabenstellung waren mehrere Wissenschaftler:Innen, Techniker:Innen und studentische Hilfskräfte beteiligt.

Die Kostenplanung und die vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz sowie dem Projektträger Jülich zur Verfügung gestellten finanziellen Mittel erlaubten die Sicherung von ausgewählt wichtigen F/E-Ergebnisse.

### 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die für ursprünglich 36 Monate geplante Laufzeit des F/E-Vorhabens wurde im Zug eines Verlängerungsantrages kostenneutral auf insgesamt 41 Monate ausgeweitet. Die Bearbeitung des Vorhabens erfolgte ohne Unterbrechung und Wechsel in der personellen Kapazität. Die im Balkenplan vorgegebenen Fristen und Zielstellungen wurden trotz den großen Herausforderungen durch die Corona-Pandemie, die teilweise auch eine Sperrung der Insel Helgoland nach sich zog, zum überwiegenden Anteil realisiert.

### 1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde, insbesondere:

- Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden

Das Fraunhofer IFAM, Teil des Fraunhofer Verbunds »MATERIALS«, besitzt mehr als 50 Jahre Expertise in den Bereichen Kleb- und Oberflächentechnik. Im Geschäftsfeld »Maritime Technologien« werden verschiedene Arbeitsschwerpunkte des IFAMs synergetisch verknüpft. Das Institut hat bereits erfolgreich nationale, bilaterale und internationale Projekte im maritimen Bereich durchgeführt. Zu den relevanten Projekten gehören u.a. »HAI-TECH« (Strömungsgünstige Oberflächen durch Lacksysteme), »BIONA« (Biomimetisch-chemische Abschreckung von Fouling-Organismen), »FoulProtect« (Bewuchsschutz und Vermeidung von Biokorrosion in der Maritimen Technik) und »SEAFRONT« (Synergistic Fouling Control Technologies). Das IFAM verfügt über maritime Prüfstände, um Korrosions- und Bewuchsschutzuntersuchungen unter realitätsnahen Bedingungen durchzuführen. In einem interdisziplinären Team aus Biologen, Chemikern und Lackingenieuren werden die Forschungsfragen bearbeitet. Am Fraunhofer IFAM war sowohl ein interdisziplinäres Fachpersonal als auch die versuchstechnischen Ausrüstungen vorhanden, um die in der Aufgabenstellung festgelegten Probleme zu lösen. Für darüber hinausgehende, projektspezifische Fragestellungen wurden neue Prüfmethode konzipiert und realisiert (z.B. Flow-Cell). Die Arbeitsgruppe »Antimikrobielle Beschichtungen und Bewuchsschutz« beschäftigte sich zum Zeitpunkt des Projektbeginns bereits seit mehr als 10 Jahren mit vielfältigen, insbesondere praxisorientierten Fragestellungen und um die Formulierung, Applikation, Prüfung, Optimierung von marinen Bewuchsschutzbeschichtungen. Ein enges und vertrauensvolles Zusammenarbeiten mit Stakeholdern aus dem Anwendungsbereich, insbesondere aus dem Kreis der assoziierten Projektpartner, waren für den erfolgreichen F/E-Verlauf sehr förderlich.

- Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste

Die Literaturquellen, die im F/E-Bericht benannt und ausgewertet sind, wurden in öffentlich zugänglichen Quellen, aus ISO/EC-, ASTM – Standards und aus wissenschaftliche peer-reviewed Journalen entnommen.

Die Patentrecherchen wurden über die Webseite des »Europäischen Patentamtes« durchgeführt<sup>1</sup>.

Zudem wurden Softwarelösungen zur kollaborative Dokumentenbearbeitung, unter Wahrung vertraulicher und datenschutzrechtlicher Vorgaben, genutzt (Microsoft Office 365). Für die projektinterne Datensicherung beziehungsweise für den Austausch von Forschungsdaten innerhalb des Konsortiums stand ein geschützter Datenserver zur Verfügung, den das LZH gehostet hat. Ein Großteil der Kommunikation und Teamkollaboration, insbesondere während der Lockdown-Perioden, wurde über Microsoft Teams bewerkstelligt.

## 1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Teilvorhaben war insbesondere durch eine sehr enge Zusammenarbeit mit den Kolleg:Innen vom Laserzentrum Hannover e.V. geprägt. Zahlreiche Versuchskampagnen am Helgoländer Standort wurden stets gemeinschaftlich durchgeführt, um Interaktion zwischen Laser, Bewuchs und Beschichtung direkt und ohne zeitlichen Verzug wissenschaftlich evaluieren zu können.

Die erfolgreiche Zusammenarbeit mit verschiedenen Stellen, darunter global agierende Beschichtungshersteller (Bemusterung mit Benchmark-Beschichtungen), Applikateure, Behörden und andere wissenschaftliche Einrichtungen aus dem Inland sowie dem europäischen und außereuropäischen Ausland, hat einen bedeutenden Beitrag zu diesem F/E-Vorhaben geleistet.

Durch die enge Kooperation mit global agierenden Beschichtungsherstellern konnte auf ein umfangreiches Fachwissen und bereits etablierte, kommerziell erprobte Technologien zurückgegriffen werden.

Die Zusammenarbeit mit erfahrenen Applikateuren war entscheidend für die erfolgreiche praktische Umsetzung. Durch ihre technischen Fähigkeiten und Erfahrungen bei der Applikation und Installation konnten die Spezifikationen auf Grundlage von realen Einsatzszenarien erhoben werden. Die Rückmeldungen und Erkenntnisse der Applikateure waren wertvoll, um etwaige Verbesserungen vorzunehmen und die Leistungsfähigkeit der Beschichtungen weiter zu optimieren.

Die Zusammenarbeit mit Behörden war von großer Bedeutung, um sicherzustellen, dass die entwickelten Technologien den gesetzlichen Bestimmungen und Umweltauflagen entsprechen. Der Austausch von Informationen mit den Behörden ermöglichte es, die Einhaltung der Vorschriften zu gewährleisten und umweltverträgliche Lösungen zu entwickeln.

---

<sup>1</sup>[https://www.epo.org/searching-for-patents\\_de.html](https://www.epo.org/searching-for-patents_de.html)

Auch die enge Kooperation mit anderen wissenschaftlichen Einrichtungen sowohl im Inland als auch im europäischen und außereuropäischen Ausland brachte wertvolle Erkenntnisse und Synergien. Der Austausch von Fachwissen, die gemeinsame Nutzung von Ressourcen und die Zusammenarbeit bei Forschungsprojekten ermöglichten es uns, unsere Forschungsergebnisse weiter zu vertiefen und zu validieren.

Insgesamt hat die Zusammenarbeit mit diesen verschiedenen Stellen zu einer vielseitigen Expertise, einem breiten Netzwerk und einer gemeinsamen Anstrengung geführt, um Fortschritte in der Beschichtungstechnologie zu erzielen. Die gemeinsamen Bemühungen haben es ermöglicht, innovative Lösungen zu entwickeln, die sowohl den Bedürfnissen der Industrie als auch den gesetzlichen Anforderungen gerecht werden können.

Eine Zusammenstellung der Interessent:Innen, die im Laufe der Projektbearbeitungszeit Informationen zu den F/E-Projektarbeiten anforderten, kann bei Bedarf nachgereicht werden.

## 2 Eingehende Darstellung

### 2.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

#### 2.1.1 Vorbemerkungen

Die vorliegende Zusammenfassung der wissenschaftlich-technischen Ergebnisse, welche im Rahmen des F/E-Projekts erzielt wurden, basiert auf den öffentlichen, nicht als vertraulich klassifizierten Informationen. Zur Wahrung geistigen Eigentums enthält der Bericht keine Details zu einzelnen Formulierungen. Weitere Informationen zu den im Bericht dargestellten wissenschaftlich-technischen Sachverhalten, Rezepturen, Prüfwerten und technologischen Vorschriften können auf Anfrage direkt von den Projektbearbeitern oder aus den internen F/E-Berichten bezogen werden.

#### 2.1.2 Gesellschaftliche und förderpolitische Relevanz des Forschungsvorhabens

Biofouling ist ein globaler Faktor für die maritime Industrie, insbesondere jedoch für die Handelsschifffahrt. Per Definition bezeichnet der Begriff Biofouling den unerwünschten Bewuchs in marinen/aquatischen Umgebungen, bei dem Organismen die Oberflächen von Schiffen, Brückenpfeilern, Bojen und anderen natürlichen und artifiziellen Strukturen besiedeln. Es handelt sich dabei um einen komplexen Prozess, der sowohl ökologische als auch wirtschaftliche Auswirkungen hat.

Biofouling tritt aufgrund einer Reihe von Faktoren auf, die Organismen anziehen und das Besiedlungspotenzial erhöhen. Hierzu zählen unter anderem die Verfügbarkeit von Nährstoffen, geeignete Siedlungssubstrate und optimale Temperaturbereiche. Der Prozess ist einer zeitlichen Sukzession unterworfen, der initial mit der Konditionierung der Oberfläche durch die Anhaftung von biologischen Makromolekülen beginnt. In der Folge siedeln sich Biofilmbildnern an, ein Prozess der bereits wenige Minuten nach der Exposition der Oberfläche in marinen/aquatischen Ökosystem beginnt (Egan, 1987<sup>2</sup>). Biofilme, bestehend aus einer Schleimschicht (Exopolymere-Matrix) und mikrobiellen Gemeinschaften. Mikrofouling wird insbesondere von Bakterien und Kieselalgen erzeugt. Im Gegensatz dazu bezeichnet Makrofouling mehrzellige Organismen, die für das menschliche Auge sichtbar ist, wie z. B. Seepocken, Röhrenwürmer oder Makroalgen. Weltweit gibt es mehr als 4000 Tier- und Pflanzenarten, die weltweit als Biofouling eingestuft werden (IMO, 2011<sup>3</sup>; Bertram, 2000<sup>4</sup>).

---

<sup>2</sup>Egan, B.; (1987), *Marine microbial adhesion and its consequences*, In *Microbes in the Sea* (MA Sleight Ed. Ellis Horwood Ltd)

---

<sup>3</sup>IMO (2011), *Guidelines for The Control and Management of Ships, Biofouling MEPC.207 (62)*

<sup>4</sup>BERTRAM, V.; (2000), Past, present and prospects of antifouling, 32nd WEGEMT School on Marine Coatings (Plymouth) 85-97

Organismen nutzen verschiedene Strategien, um maritime Oberflächen zu besiedeln. Mikroorganismen können sich mittels Adhäsionsmechanismen, wie der Produktion von Adhäsionsproteinen oder -polysacchariden, an die Oberflächen binden. Makroorganismen wie Algen, Muscheln und Seepocken besitzen spezialisierte Strukturen, zum Beispiel Haftorgane und Byssusfäden, um an den Oberflächen zu haften. Zahlreiche Organismen nutzen auch Schwimmstadien oder Larven, um von anderen Standorten zu neuen, besiedelbaren Oberflächen zu gelangen.

Die vollständige Vermeidung von Biofouling ist eine große Herausforderung. Dies liegt vor allem darin begründet, dass der biologische Bewuchs ein natürlicher Prozess ist und marine Organismen evolutiv angepasst sind, um maritime und aquatische Hartsubstrate zu besiedeln. Selbst moderne Beschichtungen und Technologien, die entwickelt wurden, um Biofouling zu verhindern, sind nicht zu 100% effektiv. So sind Organismen in der Lage kleine Risse oder Defekte in Beschichtungen zu nutzen, um zu haften und in der Folge zu wachsen. Darüber hinaus können sich bestimmte Organismen durch Biofilmbildung vor den schützenden Wirkungen von Beschichtungen schützen.

So ist es nicht verwunderlich, dass Biofouling erhebliche ökologische und wirtschaftliche Auswirkungen hat. Die Besiedlung mariner Oberflächen führt zur Veränderung von Ökosystemen und kann zur Ausbreitung invasiver Arten führen. Es kann auch die Effizienz von Wärmetauschern und Kühlern beeinträchtigen und die Lebensdauer von maritimen Infrastrukturen verkürzen. Vor allem für die globale Schifffahrtindustrie sind die Auswirkungen besonders bedeutend. Der Bewuchs von Schiffsrümpfen führt zu einer Erhöhung des hydrodynamischen Widerstands, was wiederum zu einem erhöhten Treibstoffverbrauch und einer verminderten Geschwindigkeit führt. Dies hat nicht nur wirtschaftliche Konsequenzen, sondern auch negative Auswirkungen auf die Umwelt durch erhöhte Emissionen von Treibhausgasen. Nachgewiesenermaßen erhöhen selbst dünne Schichten schleimiger Biofilme den Reibungswiderstand derart, dass mehr Treibstoff verbraucht und damit mehr schädliche Treibhausgase in die Atmosphäre abgegeben werden (Townsin, 2003<sup>5</sup>, Schultz et al., 2011<sup>6</sup>, Bressy und Lejars, 2014<sup>7</sup>).

Darüber hinaus kann Biofouling auch die Sicherheit von Schiffen beeinträchtigen. Ein starker Bewuchs von Organismen auf dem Schiffsrumpf oder in Nischen kann zu strukturellen Schäden führen und die Manövrierfähigkeit beeinträchtigen. Dies stellt insbesondere für Schiffe in kritischen Situationen wie Notfallmanövern oder bei der Annäherung an Hafenanlagen eine Gefahr dar.

In einer Zeit, in der viele Ökosysteme bereits mit dem Artensterben aufgrund einer zu intensiven Nutzung der Meeresressourcen, der Zerstörung von Lebensräumen, der Verschmutzung und den Folgen des Klimawandels konfrontiert sind, gewinnt auch der Faktor der ungewollten Verbreitung von invasiven Spezies immer mehr an Bedeutung und hat Länder wie Australien und Neuseeland bereits dazu veranlasst, strenge Vorschriften

---

<sup>5</sup>TOWNSIN, R.L. (2003), *The ship hull fouling penalty*, *Biofouling* 19(S1), pp. 9-15

<sup>6</sup>SCHULTZ, M.P.; BENDICK, J.A.; HOLM, E.R.; HERTEL, W.M. (2011), *Economic impact of biofouling on a naval surface ship*, *Biofouling* 27 (1), pp. 87-98

<sup>7</sup>BRESSY, C.; LEJARS, M. (2014), *Marine fouling: An overview*, *J. Ocean Technology* 9 (4), pp.19-28

für das Bewuchsmanagement einzuführen (Tyrrell und Byers, 2007<sup>8</sup>, Fernandes *et al.* 2016<sup>9</sup>, Coutts und Taylor, 2004<sup>10</sup>, Hewitt *et al.*, 2011<sup>11</sup>).

An dieser Stelle kann demnach konstatiert werden, dass Biofouling ist ein komplexes Phänomen ist, das durch verschiedene Mechanismen verursacht wird. Die Besiedlung mariner Oberflächen durch Organismen ist eine natürliche Reaktion auf die Umgebung und kann nur schwer vollständig vermieden werden. Die Entwicklung wirksamer Strategien zur Reduzierung von Biofouling ist von großer Bedeutung, um die ökologischen Auswirkungen zu verringern und die Effizienz maritimer Aktivitäten zu verbessern.

### 2.1.3 Wissenschaftliche und technische Problemlösungsansätze

Die wissenschaftliche Gemeinschaft und die Schifffahrtindustrie haben verschiedene Ansätze entwickelt, um das Biofouling-Problem anzugehen. Einer dieser Ansätze besteht in der Entwicklung und Anwendung von Antifouling-Beschichtungen auf Schiffsrümpfen. Antifouling-Beschichtungen enthalten Substanzen, die das Anhaften von Organismen verhindern oder deren Wachstum hemmen. Dabei kommen sowohl chemische als auch biologische Substanzen zum Einsatz. Trotz der Fortschritte in der Antifouling-Technologie stehen jedoch noch Herausforderungen wie die Langzeitwirksamkeit und die Umweltverträglichkeit einiger chemischer Substanzen im Vordergrund.

Ein weiterer vielversprechender Ansatz ist der Einsatz von Ultraschall- und elektrochemischen Systemen zur Bekämpfung von Biofouling. Diese Technologien zielen darauf ab, den Bewuchs von Schiffsrümpfen durch die Anwendung von Ultraschallwellen oder elektrischen Impulsen zu reduzieren. Obwohl diese Ansätze vielversprechend sind, sind weitere Untersuchungen und Optimierungen erforderlich, um ihre Wirksamkeit unter verschiedenen Bedingungen und auf unterschiedlichen Schiffstypen zu bestätigen. Immerhin handelt es sich um eine extrem große Oberfläche, die es effektiv zu schützen gilt.

#### 2.1.3.1 Einsatz von Reinigungsverfahren

In den vergangenen Jahren spielte der Einsatz von Reinigungsverfahren eine zunehmende Rolle bei der Bekämpfung von Biofouling auf Schiffsrümpfen. Es gibt verschiedene Methoden zur Entfernung von Fouling, von denen jede spezifische Vor- und Nachteile aufweist. Die mechanische Reinigung beinhaltet das physische Entfernen von Biofouling durch Abkratzen, Bürsten oder Schleifen. Diese Methode ist relativ einfach und erfordert wenig spezialisierte Ausrüstung oder Chemikalien. Sie kann sowohl trocken als auch unter Wasser durchgeführt werden. Mechanische Reinigungsmethoden sind effektiv bei der Entfernung von hartschaligem Fouling, wie Muscheln oder Seepocken, und ermöglichen so in der Folge die Inspektion des Schiffsrumpfs auf mögliche strukturelle

<sup>8</sup>TYRELL, M.C.; BYERS, J.E. (2007), *Do artificial substrates favor nonindigenous fouling species over native species?*, J. Experimental Marine Biology and Ecology 342(1), pp. 54-60

<sup>9</sup>FERNANDES, J.A.; SANTOS, L.; VANCE, T.; FILEMAN, T.; SMITH, D.; BISHOP, J.D.D.; VIARD, F.; QUEIRÓS, A.M.; MERINO, G.; BUISMAN, E.; AUSTEN, M.C. (2016), *Costs and benefits to European shipping of ballast-water and hull-fouling treatment: Impacts of native and non-indigenous species*, Marine Policy 64, pp.148-155

<sup>10</sup>COUTTS, A.D.; TAYLOR, M.D. (2004), *A preliminary investigation of biosecurity risks associated with biofouling on merchant vessels in New Zealand*, New Zealand J. Marine and Freshwater Research 38(2), pp.215-229

<sup>11</sup>HEWITT, C.L.; CAMPBELL, M.L.; COUTTS, A.D.M.; DAHLSTROM, A.; VALENTINE, J.; SHIELD, D. (2011), *Species biofouling risk assessment*, Dept. Agriculture, Fisheries and Forestry (DAFF)

Schäden. Allerdings kann diese Methode zeitaufwendig sein und ist zudem abrasiv, was insbesondere in Bezug auf (biozidhaltige) Beschichtungen problematisch sein kann.

Auch chemische Reinigungsmethoden sind am Markt verfügbar. Diese Reinigungsmittel enthalten oft saure oder alkalische Verbindungen, die den Biofoulingbelag auflösen. Chemische Reinigungsmethoden werden sowohl auf trockenen als auch auf nassen Schiffsrümpfen angewendet. Sie sind effektiv bei der Entfernung von dünnen Biofouling-Schichten und kommen vor allem in schwer zugänglichen Bereichen (Nischen) zum Einsatz. Auch die Anwendung von chemischen Reinigungsmitteln stellt oftmals eine potenzielle Umweltbelastung dar und erfordert eine sachgemäße Anwendung und Entsorgung, um mögliche Schäden für das marine Ökosystem zu vermeiden. Zudem können aggressive Reinigungsmittel die Beschichtung des Schiffsrumpfs beschädigen und die Lebensdauer der Antifouling-Beschichtung verringern. Arbeitsschutz ist ein weiterer wichtiger Aspekt bei dieser Reinigungsmethode.

Das Hochdruckwasserstrahlen stellt eine weitere effektive Methode zur Entfernung von Biofouling dar. Dabei wird Wasser mit hohem Druck auf den Schiffsrumpf gespritzt, um den Bewuchs abzulösen. Diese Methode erfordert spezielle Hochdruckwasserstrahlgeräte und geschultes Personal. Hochdruckwasserstrahler sind effektiv bei der Entfernung von dickeren Fouling-Schichten und können auch in schwer zugänglichen Bereichen eingesetzt werden. Die Technik ist vergleichsweise umweltfreundlich, da in der Regel keine aggressiven Chemikalien zugesetzt werden. Allerdings besteht bei unsachgemäßer Anwendung die Gefahr, dass die Beschichtung des Schiffsrumpfs beschädigt wird oder der Bewuchs in vitalem Zustand in (fremde) Ökosysteme gelangt.

Es ist wichtig zu beachten, dass für die Anwendung von Reinigungsverfahren zur Entfernung von Biofouling bestimmte Infrastrukturen und Einrichtungen erforderlich sind. Beispielsweise erfordert das Hochdruckwasserstrahlen den Zugang zu ausreichendem Wasserdruck und weiterer, spezialisierte Ausrüstung. Auch die Prozesswasserbehandlung (Filterung, Lagerung und Entsorgung) sind zentrale Vorbedingungen für die Anwendung des Verfahrens. Auch eine chemische Reinigungsmethode erfordert die Lagerung und Handhabung von Reinigungsmitteln gemäß den geltenden Vorschriften und Standards. Darüber hinaus gibt es Regularien und Standards, die die Reinigung von Schiffsrümpfen regeln. Die International Maritime Organization (IMO) hat beispielsweise Richtlinien für das Management von Biofouling veröffentlicht, um die Verbreitung invasiver Arten durch Biofouling zu minimieren. Diese Richtlinien legen Maßnahmen für die Reinigung und Wartung von Schiffsrümpfen fest und betonen die Bedeutung der Einhaltung umweltverträglicher Verfahren.

Die Wahl des geeigneten Reinigungsverfahrens hängt von verschiedenen Faktoren ab, darunter der Art und Ausprägung des Biofoulings, dem Zustand des Schiffsrumpfs, den Kosten und Umweltauswirkungen. Gerade letztere spielen bei der Reinigung von Schiffsrümpfen mit biozidhaltigen Schiffsanstrichen eine entscheidende Rolle, denn biozidhaltige Schiffsanstriche enthalten chemische Verbindungen, die darauf abzielen, das Wachstum von Biofouling zu verhindern. Diese Biozide können jedoch in die Umwelt freigesetzt werden, insbesondere während der Reinigung des Schiffsrumpfs. Wenn das abgetragene Biofouling mit den biozidhaltigen Anstrichen in das Wasser gelangt, können die enthaltenen Chemikalien in das marine Ökosystem gelangen und potenziell schädliche Auswirkungen auf Meeresorganismen haben. Dies kann sowohl lokale Ökosysteme als auch die Biodiversität in größeren Meeresgebieten beeinträchtigen.

Der Einsatz von biozidhaltigen Schiffsanstrichen unterliegt weltweit strengen regulatorischen Anforderungen. Viele Länder haben Vorschriften erlassen, die den Gehalt an Bioziden in Schiffsanstrichen begrenzen und den Umgang mit entferntem Biofouling regeln (z.B. EU<sup>12</sup>, Neuseeland<sup>13</sup>, Australien<sup>14</sup>). In der Praxis bedeutet dies, dass Schiffsbetreiber zusätzliche Maßnahmen ergreifen müssen, um den gesetzlichen Anforderungen gerecht zu werden, wie beispielsweise die richtige Entsorgung von entferntem Biofouling oder von Prozesswasser.

Biozidhaltige Schiffsanstriche können auch langfristig zu höheren Kosten führen. Aufgrund der potenziellen Umweltauswirkungen und einer möglichen Biozidresistenz kann es erforderlich sein, häufiger Reinigungsmaßnahmen durchzuführen oder die Schiffsanstriche öfter zu erneuern. Dies führt zu zusätzlichen Ausgaben für den Schiffsbetreiber. Aufgrund dieser Probleme wird in der Schifffahrtsindustrie vermehrt nach umweltfreundlichen Alternativen zu biozidhaltigen Schiffsanstrichen gesucht. Dazu gehören zum Beispiel selbstreinigende Oberflächen, die den Bewuchs von Biofouling reduzieren, ohne den Einsatz von Bioziden zu erfordern. Solche Entwicklungen zielen darauf ab, die Umweltauswirkungen zu minimieren und gleichzeitig die Effektivität der Biofouling-Bekämpfung zu gewährleisten.

Eine umfassende Bewertung dieser Faktoren sowie eine regelmäßige Inspektion und Wartung des Schiffsrumpfs sind entscheidend, um die Effizienz und Sicherheit der Schiffe zu gewährleisten und gleichzeitig die Umweltbelastung zu minimieren.

### 2.1.3.2 Technische und umweltbezogene Herausforderungen

Trotz der zuvor benannten Vorteile von Reinigungsverfahren zur Entfernung von Biofouling bestehen aktuell noch einige technische und umweltbezogene Herausforderungen. Ein technisches Problem besteht darin, dass einige Reinigungsmethoden die Schiffsbeschichtungen beschädigen oder zu deren vorzeitiger Alterung beitragen können. Insbesondere bei aggressiven Reinigungstechniken, wie dem Hochdruckwasserstrahlen oder der Bürstenreinigung, besteht das Risiko eine ungewollte Degradation hervorzurufen. Dies kann zu Korrosion führen und die Lebensdauer der Beschichtung verringern, was zu kürzeren, kostenintensiven Wartungsintervallen führt.

Eine weitere Herausforderung ist die Entsorgung der entfernten Biofouling-Rückstände. Der Bewuchs, der während der Reinigung entfernt wird, kann schädliche Substanzen enthalten, darunter giftige Chemikalien. Eine unsachgemäße Entsorgung dieser Rückstände kann zu Umweltverschmutzung. Die Suche nach neuen, effektiven und zugleich umweltfreundlichen Reinigungsverfahren erfordert daher eine multidisziplinäre Herangehensweise, die in der Folge eine ganzheitliche Betrachtungsweise ermöglicht.

---

<sup>12</sup>[https://echa.europa.eu/documents/10162/2672387/tg\\_efficacy\\_pt21\\_superseded\\_en.pdf/d5409a80-a143-28fa-3f93-5b9109354cd5](https://echa.europa.eu/documents/10162/2672387/tg_efficacy_pt21_superseded_en.pdf/d5409a80-a143-28fa-3f93-5b9109354cd5)

---

<sup>13</sup><https://www.mpi.govt.nz/import/border-clearance/ships-and-boats-border-clearance/biofouling/>

---

<sup>14</sup><https://www.agriculture.gov.au/biosecurity-trade/aircraft-vessels-military/vessels>

### 2.1.3.3 Laserstrahlung zur Entfernung/letalen Schädigung von marinem Bewuchs

Der Einsatz von Infrarot (IR)- und blauer Laserstrahlung zur Entfernung von Biofouling beziehungsweise zur letalen Schädigung von Organismen, der in Verbundprojekt »Foul-Las« prozesstechnisch entwickelt und evaluiert wurde, stellt einen vielversprechenden Ansatz dar, um den geschilderten Herausforderungen wirkungsvoll begegnen zu können. Der gezielte Einsatz von Laser bietet grundsätzliche Vorteile, die eine Anwendung als neuartige Reinigungsmethode erfolgversprechend erscheinen lassen. Verschiedene Studien haben bereits die schädlichen Auswirkungen von Laserstrahlung auf Organismen in der aquatischen Umwelt nachgewiesen. Die Studien konzentrierten sich auf die sub-letale/letale Wirkung verschiedener Laserstrahlungen (ultraviolette Strahlung, sichtbare Strahlung und Nahinfrarotstrahlung) auf Mikroorganismen wie Bakterien, Cyanobakterien, Kieselalgen und Dinoflagellaten sowie hartschaligen Organismen (hauptsächlich Seepocken) (Nandakumar *et al.*, 2009<sup>15</sup>, Li *et al.*, 2016<sup>16</sup>). In vielen Fällen wurde gepulste Laserstrahlung mit langen Bestrahlungsdauern verwendet und in erster Linie eine grundlegende Wirkung der Strahlung auf die Organismen beschrieben. Bisherige Ansätze konzentrierten sich auf die grundsätzliche Schädigung von Organismen in aquatischer Umgebung, berücksichtigten aber nicht eine Kombination aus der Wirksamkeit von Hochleistungslasern (Flächenleistung) ohne Beeinträchtigung der Integrität bestehender Materialschuttschichten (Nachhaltigkeit), was für industrielle Anwendungen von besonderem Interesse ist. Im Vergleich zu UV-Strahlern haben Laser den Vorteil, dass sie eine wesentlich höhere Bestrahlungsintensität liefern.

Im Projekt wurde Infrarot- und Blaue-Laserstrahlung verwendet, um Biofouling-Organismen letal zu schädigen, indem sie basierend auf spezifischen Prozessparametern bestrahlt wurden. Der Laserstrahl erzeugt Wärme, die die Zellen der Organismen abtötet und im Idealfall deren Haftung zur Oberfläche reduziert. Dazu später mehr im Ergebnis-Abschnitt. Die Verwendung von Laserstrahlung bietet mehrere Vorteile. Zum einen kann die Behandlung präzise gesteuert werden, um nur das Biofouling zu entfernen, ohne die Schiffsbeschichtung oder die strukturelle Integrität des Schiffsrumpfes zu beschädigen. Zum anderen wird die Notwendigkeit von Chemikalien oder abrasiven Methoden zur Reinigung substituiert. Die genaue Einstellung der Laserparameter, deren Aufschlüsselung eines der maßgeblichen Ziele des Verbundprojektes war, ist wichtig, um sowohl die Effektivität der Reinigung bzw. der letalen Schädigung als auch die Sicherheit zu gewährleisten. Es ist wichtig zu beachten, dass der Einsatz von Laserstrahlung zur Biofouling-Entfernung und Organismenabtötung noch in der Entwicklung ist und weitere Forschung und Optimierung erfordert. Es gibt noch technische Herausforderungen zu bewältigen, wie zum Beispiel die Skalierbarkeit der Technologie für den Einsatz in der maritimen Industrie und die Gewährleistung der Sicherheit für Mensch und Umwelt. Darüber hinaus müssen auch regulatorische Aspekte berücksichtigt werden, um den Einsatz von Lasertechnologien in der Schifffahrtsindustrie zu ermöglichen.

---

<sup>15</sup>NANDAKUMAR, K.; OBIKA, H.; SREEKUMARI, K.; UTSUMI, A.; OOIE, T.; YANO, T. (2009), *Laser damage to marine plankton and its application to checking biofouling and invasion by aquatic species: a laboratory study*, Biofouling, pp. 95-98.

<sup>16</sup>LI, T.; BI, Y.; LIU, J.; WU, C. (2016), *Effects of laser irradiation on a bloom forming cyanobacterium *Microcystis aeruginosa**, Environ. Sci. Pollut. Res., pp. 20297–306.

Die industrielle Nutzung von blauen Diodenlasern ist vergleichsweise neu und die Leistung hat noch nicht die Sphären erreicht, die heutige IR-Laser aufweisen. Dieser Umstand ist in erster Linie darauf zurückzuführen, dass sie in der Herstellung wesentlich komplexer sind. Infrarotlaser können auf Galliumarsenid (GaAs)-Halbleitern gebaut werden, auf denen ein Dutzend Schichten von Atomen angeordnet sind, um den Teil des Lasers zu bilden, der Licht aus Quantentöpfen erzeugt. Das Substrat kann versetzungsfrei gebaut und die Atome so angeordnet werden, dass der Abstand zwischen den Atomen, die den Boden bilden, und den Atomen, die die Quantenmulden bilden, gleich ist. Für blaue Laser eignen sich jedoch am besten Galliumnitridkristalle (GaN), die viel schwieriger herzustellen sind und höhere Drücke und Temperaturen erfordern. Eine Reihe von Weiterentwicklungen führte zu einer immer stärkeren Reduzierung der Versetzungen und brachte schließlich den Durchbruch mit der heute verwendeten Saphiroberfläche, die mit einer Galliumnitridschicht überzogen ist. Schnell stiegen die Ausgangsleistungen für fasergekoppelte Diodenlaser von einigen hundert Watt Anfang 2018 (Balck *et al.*, 2018<sup>17</sup>) auf 1000 W im Jahr 2019 (Baumann *et al.*, 2019<sup>18</sup>) und sogar 2000 W im Jahr 2020 (Webseite Laserline). So war es auch ein erklärtes Ziel des Konsortialpartners Laserline GmbH, die Laserleistung des blauen Lasers in diesem Projekt zu erhöhen. Inzwischen ist es gelungen, einen 4XX nm Diodenlaser jenseits von 2 kW Ausgangsleistung zu entwickeln (Baumann *et al.*, 2022<sup>19</sup>). Näheres dazu enthält der Abschlussbericht zum Verbundvorhaben sowie der Bericht zum Teilvorhaben der Laserline GmbH.

---

<sup>17</sup>BALCK, A.; BAUMANN, M.; MALCHUS, J.; CHACKO, R.V.; MARFELS, S.; WITTE, U.; DINAKARAN, S.; OCYLOK, S.; WEINBACH, M.; BACHERT, C.; KÖSTERS, A.; KRAUSE, V.; KÖNIG, H.; LELL, A.; STOJETZ, A.; LÖFFLER, U.; STRAUSS, U. (2018), 700 W blue fiber-coupled diode-laser emitting at 450 nm, SPIE 10514, High-Power Diode Laser Technology XVI

---

<sup>18</sup>BAUMANN, M.; BALCK, A.; MALCHUS, J.; CHACKO, R.V.; MARFELS, S.; WITTE, U.; DINAKARAN, D.; OCYLOK, S.; WEINBACH, M.; BACHERT, C.; KÖSTERS, A.; KRAUSE, V.; KÖNIG, H.; LELL, A.; STOJETZ, B.; ALI, M.; STRAUSS, U. (2019), 1000 W blue fiber-coupled diode-laser emitting at 450 nm, SPIE 10900, High-Power Diode Laser Technology XVII

---

<sup>19</sup>BAUMANN, M.; ACKERMANN, M.; BALCK, A.; BONHOFF, T.; BOTTER, O.; LANGE, R.; MARFELS, S.; DINAKARAN, D.; KÖSTERS, A.; KRAUSE, V.; EMDE, B.; ZIMBELMANN, S.; HERMSDORF, J.; KAIERLE, S.; HEUSINGER VON WALDEGGE, T. (2022), 4XX nm diode-laser beyond 2 kW of output power, Proceedings Volume 11983, High-Power Diode Laser Technology XX; 1198300

### 2.1.4 Zielstellung der F/E-Projektarbeiten

Die Unterwasserreinigung von Schiffen stellt sich vor vielfältige Herausforderungen in den Bereichen Recht, Ökologie und Wirtschaft. Herkömmliche mechanisch abrasive Reinigungsverfahren wie Hochdruckwasserstrahlen und Bürstenreinigung erfüllen die gesetzlichen und ökologischen Anforderungen lediglich eingeschränkt oder unter strengen Auflagen. Dennoch spielt die Reinigung des Unterwasserschiffs eine wichtige Rolle bei der Minimierung des Bewuchses, was wiederum die Ausbreitung von Arten und erhöhte Treibhausgasemissionen verhindert.

Das Forschungsprojekt »Foullas« hat sich zum Ziel gesetzt, die bestehenden Einschränkungen mithilfe eines neuartigen laserbasierten Reinigungsansatzes zu überwinden. Hierfür wurde am Fraunhofer-Testzentrum auf der deutschen Hochseeinsel Helgoland eine Versuchsanlage aufgebaut, in der ausgelagerte und bewachsene Beschichtungsproben (handelsübliche SPC-, FRC- und Hartbeschichtungen) mit Infrarot- oder blauem Laser bei einstellbaren Intensitäten bestrahlt wurden. Dabei lag der Fokus darauf, dass die Laserbestrahlung weder die Beschichtung beschädigt noch die Freisetzung von Bioziden und anderen Substanzen in das umgebende Wasser verursacht. Das übergeordnete Ziel des Gesamtprojektes bestand darin, die Bewuchsorganismen tödlich zu schädigen, so dass sie sich spätestens beim erneuten Fahrtantritt des Schiffes vom Rumpf ablösen.

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurden verschiedene Ziele verfolgt, um eine optimale Beschichtungslösung für den laserinduzierten Reinigungsprozess zu entwickeln. Eine zentrale Zielsetzung bestand darin, die Applizierbarkeit der Beschichtung auf typischen Substraten wie Stahl und bestehenden Beschichtungen sicherzustellen. Dabei war es von entscheidender Bedeutung, dass die Beschichtung unter maritimen Bedingungen eine hohe Haltbarkeit aufweist. Der kommerzielle Maßstab für die durchschnittliche Anwendungsdauer von marinen Schiffbeschichtungen, bevor ein Trockendockintervall erforderlich ist, liegt im Bereich von 5 bis 10 Jahren, abhängig von verschiedenen Faktoren wie der Beschichtungsart, den Umgebungsbedingungen und dem Einsatzprofil des Schiffes.

Um einen effektiven Bewuchsschutz zu gewährleisten, lag der Fokus der Entwicklungsarbeiten darauf, die Beschichtung mit Eigenschaften auszustatten, die das Anhaften von Organismen verhindern. Dabei galt es, wirtschaftliche und kosteneffiziente Lösungen zu finden. Zur Unterstützung der Laserreinigung war es von Bedeutung, dass die Beschichtung spezifische Merkmale aufweist, wie beispielsweise eine optimierte Reflexion, eine effiziente Wärmeleitung und geeignete Oberflächeneigenschaften.

Zur Charakterisierung der Beschichtungen und zur Bewertung ihrer Eigenschaften wurden Laborverfahren eingesetzt, die allgemeine Lackeigenschaften erfassten. Ein weiteres wichtiges Ziel bestand darin, sicherzustellen, dass die Beschichtung auch nach wiederholter Laserreinigung keine nachteiligen Auswirkungen zeigt.

Zur Beurteilung des Bewuchsabtrags und der Effektivität der Reinigungsmethode wurden standardisierte aber auch neuentwickelte Prüfverfahren eingesetzt. Diese Prüfungen ermöglichten die Bewertung des Entfernungsgrads des Biofoulings und die Beurteilung der Letalität der angewandten Reinigungsmethode. Dadurch konnte die Wirksamkeit des laserbasierten Reinigungsansatzes objektiv bewertet werden.

Die Forschungsarbeiten im Rahmen des Verbundprojekts »FoulLas« haben für das Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM) zu synergetischen Teilergebnissen geführt. Diese Ergebnisse umfassen neue Erkenntnisse und Methoden zur Entwicklung von Beschichtungen mit verbesserten Eigenschaften für die laserinduzierte Reinigung von Schiffsrümpfen. Die gewonnenen Erkenntnisse sind von großem Interesse für die maritim-industrielle Anwendung und tragen zur Bewältigung der rechtlichen, ökologischen und wirtschaftlichen Probleme bei der Unterwasserreinigung von Schiffen bei.

## 2.2 Ergebnisse

### 2.2.1 AP1: Versuchsplanung, Logistik, Risikoanalyse

#### 2.2.1.1 Versuchsplanung

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurde über die gesamte Projektlaufzeit detaillierte Versuchspläne entwickelt. In Zusammenarbeit mit den Verbundpartnern wurden geeignete Proben ausgewählt, um sinnvolle Parameter für das Versuchsdesign zu ermitteln. Das Ziel war es, die Hauptzielgrößen der Beschichtung, einschließlich der letalen Schädigung und der Unversehrtheit der Beschichtung, zu analysieren und zu optimieren.

Das IFAM hat Proben entwickelt, die verschiedene Lackaufbauten aufweisen. Zusätzlich wurden Proben mit unterschiedlichen Bewuchsstadien berücksichtigt. Gemeinsam mit dem Laser Zentrum Hannover (LZH) wurden geeignete Geometrien identifiziert, um einen optimierten Workflow sicherzustellen. Die entwickelten Versuchspläne umfassten Zeitintervalle und Probenparameter, wie das Beschichtungssystem, die letale Schädigung und die Unversehrtheit der Beschichtung. Die interdisziplinären Anforderungen der Arbeiten auf Helgoland, einschließlich laserspezifischer, materialspezifischer und biologischer Fragestellungen, wurden erfolgreich in den Versuchsplan integriert.

Die detaillierte Versuchsplanung ab dem ersten Projektjahr legte den Grundstein für weitere Forschungsarbeiten (s. exemplarisch **Abbildung 1**).

The screenshot shows an Excel spreadsheet titled 'FoulLas Versuchsplanung für Helgoland in der Zeit vom 31.3.2020 bis 29.10.2020'. The columns represent 12 terms (1. Termin to 12. Termin) with corresponding dates and time intervals. The rows represent different experimental parameters and dates. Key data points include the number of trials and utilization rates for each parameter across the terms. For example, 'Kleine Proben' and 'Große Proben' show utilization rates of 24, 24, 24, 24, 24, 24, 24, 24, 24, 24, 24, and 24 respectively across the terms. The 'Anzahl Versuche / Auslastung' row shows utilization rates of 144, 48, 16, 64, 24, 24, 72, 236, 20, 88, 7.7, 64, 24, 48, 104, 48, 16, 32, 24, 24, and 24 across the terms.

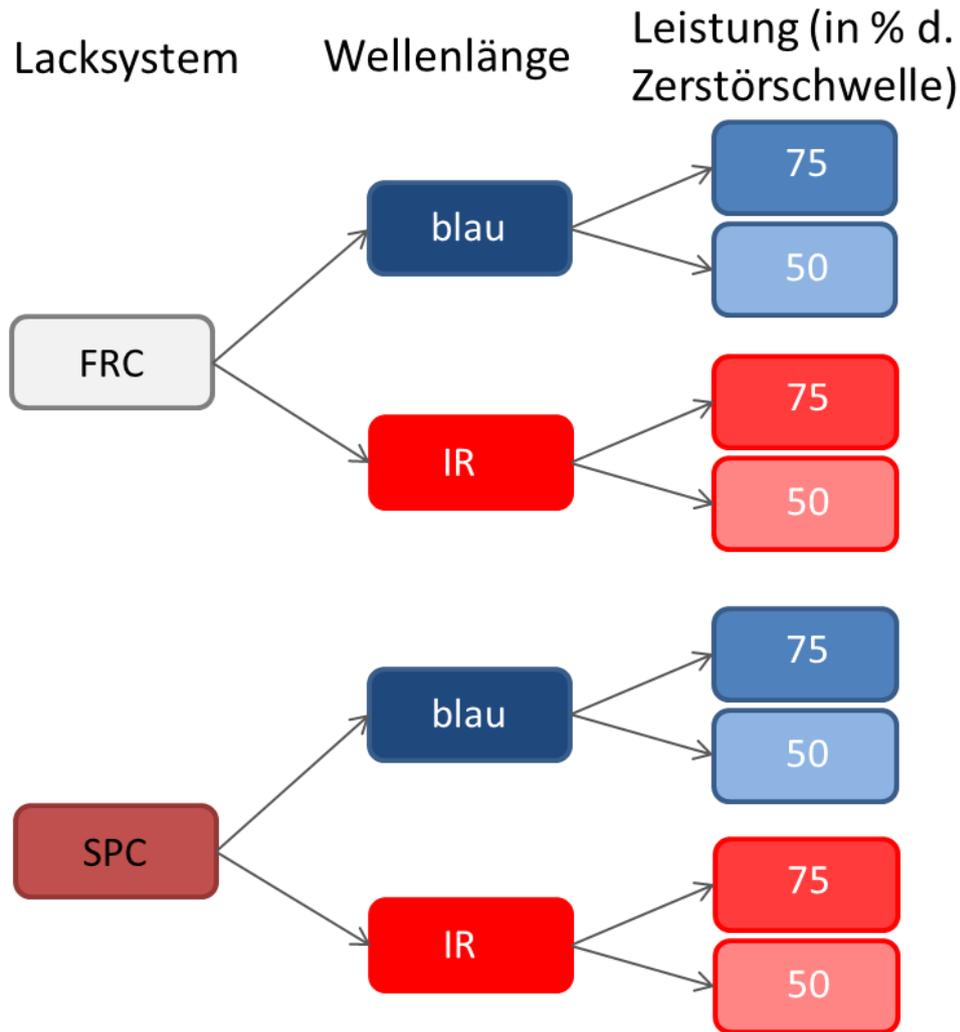
**Abbildung 1:** Ausschnitt aus der »FoulLas« Versuchsplanung vom 31.03.2020 bis 29.10.2020 in Microsoft Excel.

Der dargestellte, exemplarische Probenplan, umfasste neben der Probenanzahl mehrere Analysemethoden, Probengruppen und Versuchsparameter. Es wurden sowohl zerstörungsfreie als auch zerstörende Prüfverfahren berücksichtigt. Entsprechend den spezifischen Prüfanforderungen wurde die Anzahl der Versuchsreplikate festgelegt. Die Probenplanung erforderte eine hohe Genauigkeit, da zerstörte Proben nicht mehr für weiterführende Analysen verwendet werden konnten.

Im Probenplan waren verschiedene Analysetechniken vorgesehen, darunter Mikroskopie (zerstörungsfrei), Lebend/Tot Färbung (zerstörend), Biofouling-Adhäsion (zerstörend) und Raman-Spektroskopie (zerstörungsfrei). Proben, deren Analyse nicht zerstörend war, wurden für weiterführende Experimente zur Alterung und zur Untersuchung der Biofouling-Neubildung nach Laserbestrahlung eingesetzt.

Die vorgeschlagenen Analysemethoden ermöglichten eine umfassende Charakterisierung der Beschichtungseigenschaften und deren Wechselwirkungen mit dem Bewuchs. Die zerstörenden Prüfverfahren, wie die Lebend/Tot Färbung und die Biofouling-Adhäsion (z.B. in der Flow-Cell), erfordern eine höhere Anzahl von Versuchsreplikaten. Der Probenplan stellt sicher, dass alle relevanten Aspekte der Beschichtung analysiert werden konnten, und ermöglichte es, die Auswirkungen der Laserbestrahlung auf den Bewuchs und die Beschichtungseigenschaften zu bewerten (vgl. **Abbildung 2**).

Aufgrund der dynamischen Situation durch zahlreiche Einflussfaktoren (u.a. Corona-Pandemie, Lieferengpässe, Wettereinflüsse, etc.) wurden während der Projektlaufzeit kontinuierlich Anpassungen an der Versuchsplanung vorgenommen. Zudem wurden aufgrund erster Ergebnisse sinnvolle Erweiterungen der ursprünglichen Versuchsplanung, wie z.B. die Mikroschadstoffanalytik, vorgenommen (vgl. Abschnitt 1.8). Der Schwerpunkt lag jedoch vor allem auf dem messbaren Nachweis der letalen Schädigung des biologischen Bewuchses, da dies eine wesentliche Grundlage für die weitere Versuchsplanung bildete. Dafür wurden verschiedene Versuchsszenarien geplant und verschiedene spezifische Analysetechniken eingesetzt. Bei kurzfristigem Bedarf wurden zusätzliche Beschichtungsproben hergestellt, insbesondere für die Systeme, die auf Objektträgern appliziert wurden, um einen hohen Durchsatz an Versuchen zu ermöglichen.



**Abbildung 2:** Untersuchungsparameter für die Versuchsplanung: Lacksystem Foul-release-Coating und Self-polishing Coating, Wellenlänge der Strahlquelle, Laserleistung in % der Zerstörschwelle.

Neben den zuvor beschriebenen Planungsschritten wurde der Dimensionierung der Probenkörper besondere Aufmerksamkeit geschenkt. Es war erforderlich, die hohe Anzahl von Replikaten gemäß dem Versuchsplan zu berücksichtigen und die bauliche Integration der Proben in den Bestrahlungsprozess zu gewährleisten. Dazu gehörten Aspekte wie Probenhalter, Prozesssteuerung, Abstand und Linienbreite, die für ein realistisches Bewuchsbild unerlässlich waren. In enger Zusammenarbeit mit dem Projektpartner LZH wurden geeignete Geometrien identifiziert und für die spätere experimentelle Bestimmung definiert (vgl. AP4).

### 2.2.1.2 Logistik

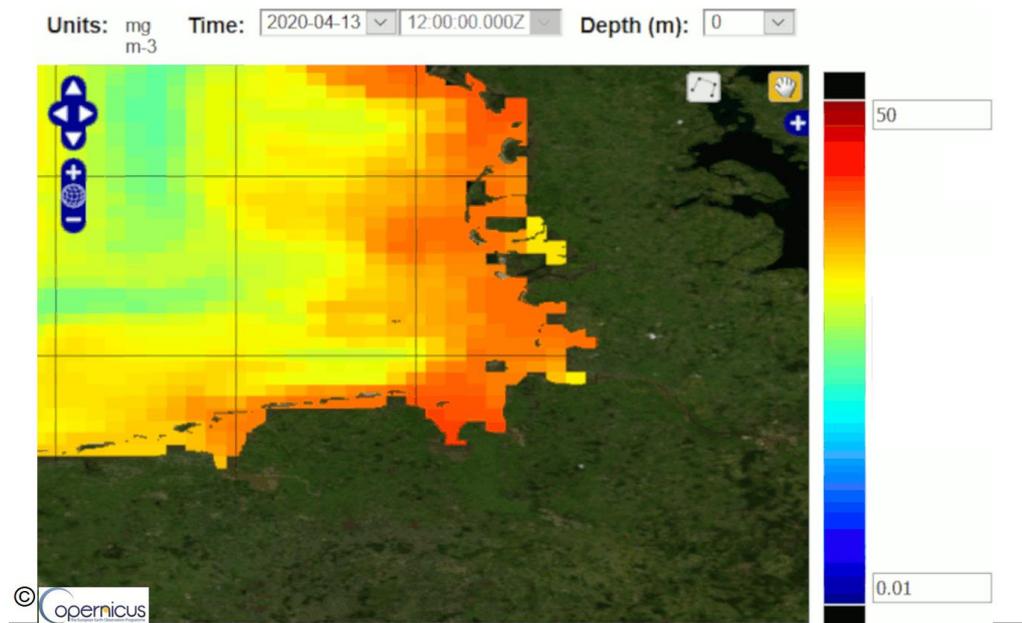
Auf Grundlage der Online-Messdaten des E.U. Copernicus Marine Service Information wurde bereits zu Beginn eines jeden Projektjahres eine tägliche Bewertung der Chlorophyll a-Konzentration ( $\text{mg/m}^3$ ) im Oberflächenwasser der Deutschen Bucht durchgeführt (vgl. Abb. 3). Der Chlorophyll-a-Gehalt im Meerwasser spielt eine zentrale Rolle bei der Erkennung von Phytoplanktonblüten im marinen Ökosystem. Phytoplanktonblüten sind episodische Ereignisse, bei denen es zu einer rasanten Zunahme der

Phytoplanktonpopulationen kommt. Chlorophyll-a ist ein entscheidendes Pigment in den Chloroplasten der Phytoplanktonzellen, das für die Photosynthese verantwortlich ist.

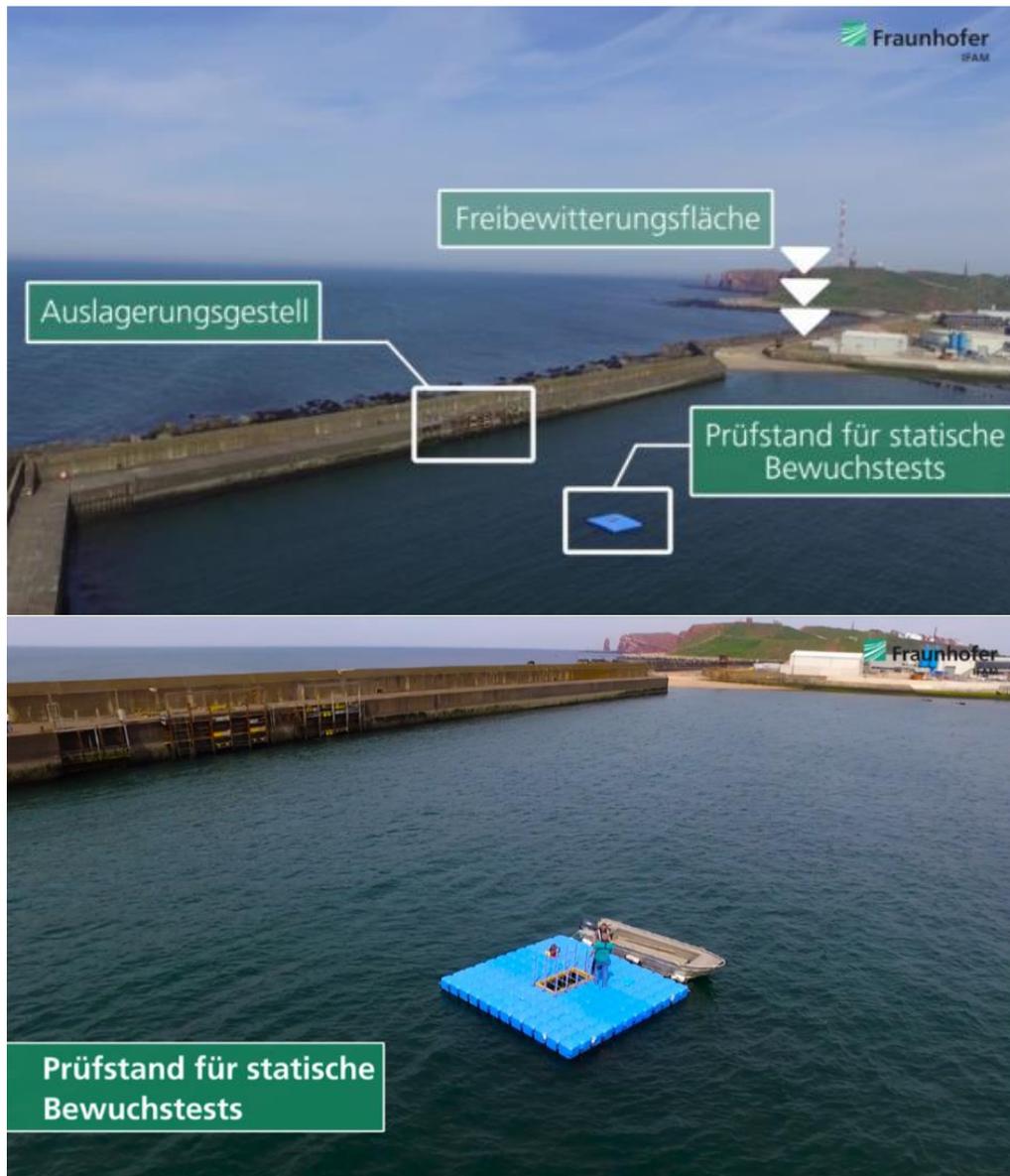
Die Phytoplanktonblüte wird durch verschiedene Faktoren beeinflusst, einschließlich der Verfügbarkeit von Licht und Nährstoffen wie Stickstoff und Phosphor. Wenn die Umweltbedingungen günstig sind, steigt der Chlorophyll-a-Gehalt im Meerwasser an, was auf eine erhöhte Phytoplanktonkonzentration hinweist.

Der Larvenfall in gemäßigten Breiten ist eng mit der Phytoplanktonblüte und dem Chlorophyll-a-Gehalt verbunden. Die Larven zahlreicher mariner Organismen, wie Fische, Crustaceen und Mollusken, sind auf Phytoplankton als primäre Nahrungsquelle angewiesen. Während der Phytoplanktonblüte kommt es zu einem verstärkten Nahrungsangebot für die Larven, was zu einem erhöhten Larvenfall führt. Die zeitliche Übereinstimmung zwischen Phytoplanktonblüte und Larvenfall ist für das Wachstum und die Entwicklung der Larven von entscheidender Bedeutung.

In Bezug auf die Terminierung von Feldversuchen ist es wichtig, die saisonalen Schwankungen des Chlorophyll-a-Gehalts und der Phytoplanktonblüte zu berücksichtigen. Feldversuche sollten daher so geplant werden, dass sie mit dem Höhepunkt der Phytoplanktonblüte zusammenfallen. Dies gewährleistet eine realistische Erfassung des tatsächlichen Bewuchsdrukkes in den gemäßigten Breiten und verbessert die Validität der Versuchsergebnisse.



**Abbildung 3:** Chlorophyll a Konzentration in  $\text{mg/m}^3$  in einem Ausschnitt der deutschen Bucht am 13.04.2020. Die Farbskala zeigt einen Wertebereich von  $0.01\text{mg/m}^3$  bis  $50\text{mg/m}^3$ .



**Abbildung 4:** Übersicht der Prüfstände des »Fraunhofer IFAM« im Südhafen der Insel Helgoland.

Zahlreiche Proben, eigens konzipierte Auslagerungsrahmen und weiteres Material musste zu Beginn jeder Freilandsaison termingerecht als Fracht nach Helgoland verschickt und vor Ort endmontiert werden.

Zudem mussten die Wettervorhersagen für Helgoland sorgfältig bewertet werden, um vor Ort arbeitsfähig zu sein, insbesondere bei den Freilandarbeiten, die in einem engen 14-tägigen Rhythmus auf der Insel Helgoland durchgeführt wurden. Es war wichtig, dass das erforderliche Versuchsmaterial immer verfügbar war, da vor Ort in der Regel kein Ersatz beschafft werden konnte. Dies erforderte eine kontinuierliche Anpassung des Planungs- und Bestellprozesses, um den sich ständig ändernden Bedingungen gerecht zu werden.

### 2.2.1.3 Risikoanalyse

Die engl. »Failure Mode and Effects Analysis« (kurz FMEA) genannte Methode dient der systematischen Risikoanalyse, um potenzielle Fehler und deren Auswirkungen auf

ein System zu identifizieren und folglich zu bewerten. Im Folgenden ist eine fundierte FMEA-Risikoanalyse bezüglich der genannten Ziele der Beschichtungsentwicklung und Reinigungsvaluierung aufgeführt.

Ziel: Entwicklung und Prüfung von Beschichtungen
Potenzielle Fehlerquellen:
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Unzureichende Haftung der Beschichtung auf dem Substrat</li> <li>■ Mangelhafte Beständigkeit gegenüber Umwelteinflüssen (z. B. Salzwasser, UV-Strahlung)</li> <li>■ Schwierigkeiten bei der Skalierung der Beschichtungsprozesse auf industriellen Maßstab</li> <li>■ Probleme bei der Reproduzierbarkeit der Beschichtungseigenschaften</li> </ul>
Auswirkungen:
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Reduzierte Effektivität der Beschichtung beim Schutz vor Bewuchs und Korrosion</li> <li>■ Hohe Kosten aufgrund von Beschichtungsfehlern und Wiederholungen des Beschichtungsprozesses</li> <li>■ Beeinträchtigung der Zuverlässigkeit und Langlebigkeit der beschichteten Materialien</li> </ul>

Ziel: (biologische) Bewertung des Reinigungszustandes
Potenzielle Fehlerquellen:
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Unzureichende Reinigungsleistung des Laserprozesses</li> <li>■ Beschädigung der Beschichtungen während des Reinigungsprozesses</li> <li>■ Unvorhergesehene Nebeneffekte der Laserstrahlung auf die umgebende Umwelt</li> <li>■ Schwierigkeiten bei der Übertragung der im Labor erzielten Ergebnisse auf reale Bedingungen</li> </ul>
Auswirkungen:
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Unzureichende Entfernung des Bewuchses und damit verbundene Beeinträchtigung der Flächenreinigung</li> <li>■ Beschädigung der Beschichtungen führt zu einer verringerten Lebensdauer und Wirksamkeit</li> <li>■ Umweltauswirkungen auf marine Ökosysteme durch unkontrollierte Nebeneffekte des Laserprozesses</li> <li>■ Unzuverlässige Übertragung der im Labor erzielten Ergebnisse auf praktische Anwendungen</li> </ul>

Die Risiken wurden fortwährend anhand von Kriterien wie Eintrittswahrscheinlichkeit, Schweregrad der Auswirkungen und Entdeckungswahrscheinlichkeit bewertet. Risiken die mit schwerwiegenden Auswirkungen und hoher Eintrittswahrscheinlichkeit aufwiesen erlangten Priorität bei der Entwicklung von Maßnahmen zur Risikominderung. Mögliche Maßnahmen umfassen die Optimierung der Beschichtungsformulierung, die Durchführung umfangreicher Tests unter realen Bedingungen, die Anpassung des Laserprozesses zur Minimierung von Nebeneffekten und die Verbesserung der Qualitätssicherung während des Beschichtungs- und Reinigungsprozesses.

Eine besondere Rolle spielte die Corona-Pandemie, führte sie doch zu maßgeblichen, externen Risiken für den gesamten Projektverlauf. Auch hierfür galt es prioritär und stetig eine FMEA zu erstellen.

Ziel: Minimierung der Pandemie-Folgen für das Projektgeschehen
Potenzielle Einflussgrößen
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Engpässe in der Lieferkette aufgrund von Schließungen von Produktionsstätten oder Einschränkungen des internationalen Handels</li> <li>■ Störungen im Transportwesen, die zu verzögerten Lieferungen von Materialien und Komponenten führen können</li> <li>■ Personalengpässe oder Arbeitsunterbrechungen aufgrund von Quarantänemaßnahmen oder Ausgangssperren</li> <li>■ Veränderungen der Nachfrage und Marktsituation, die zu Schwankungen in den Absatzmengen führen können</li> </ul>
Auswirkungen:
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Verzögerungen bei der Beschaffung von Materialien und Komponenten können zu Verzögerungen im Entwicklungsprozess führen.</li> <li>■ Mangelnde Verfügbarkeit von Labor- und Testkapazitäten aufgrund von Einschränkungen oder Umstrukturierungen</li> <li>■ Einschränkungen bei der Durchführung von Freilandtests oder Feldversuchen aufgrund von Reisebeschränkungen oder begrenztem Zugang zu Teststandorten</li> <li>■ Unsicherheit in Bezug auf die Marktnachfrage und die wirtschaftliche Rentabilität des Projekts.</li> </ul>

Die eingeleiteten Maßnahmen umfassten u.a. die Identifizierung alternativer Lieferanten, die Diversifizierung der Lieferketten, den Aufbau von Partnerschaften zur Sicherstellung der Materialversorgung, die Anpassung von Versuchsplänen und die Implementierung von Flexibilität in den Prozessen.

Sehr regelmäßige Überprüfungen und Aktualisierungen der Risikoanalyse wurden vorgenommen, um auf sich ändernde Bedingungen und Herausforderungen zu reagieren. Ein enger Austausch mit Projektpartnern, Lieferanten und Stakeholdern wurde etabliert.

### 2.2.2.1 Marine angewandte Feldtests für Laserbestrahlungsversuche

Die Durchführung von Feldtests im marinen Umfeld ist von großer Bedeutung, um Laserbestrahlungsversuche an realistischen, natürlichen Bewuchsszenarien durchführen zu können. Solche Tests ermöglichen es, die Leistung und Wirksamkeit von Laseranwendungen zur Biofouling-Kontrolle unter tatsächlichen Bedingungen in großem Umfang testen zu können. Als maritimer Teststandort diente in diesem Projekt das »Testzentrum für Maritime Technologien« des IFAM auf der deutschen Hochseeinsel Helgoland, die etwa 70 Kilometer von der Nordseeküste entfernt liegt. Sie besteht aus zwei Hauptinseln, Helgoland und der etwas kleineren Düne. Die geographischen Besonderheiten von Helgoland machen sie zu einem einzigartigen Ort. Der Helgoländer Felssockel ist eine markante geologische Formation, die sich unter Wasser erstreckt und eine wichtige Rolle für das marine Ökosystem der Insel spielt. Er besteht aus Kalkstein und ragt steil aus dem Meer auf. Dieser Felssockel bietet einen Lebensraum für eine vielfältige Meeresfauna und -flora. Das marine Ökosystem des Helgoländer Felssockels zeichnet sich durch eine hohe Artenvielfalt aus. Es gibt eine große Anzahl von Fischarten, darunter Kabeljau, Hering und Scholle, die in den Felsriffen und den umliegenden Gewässern leben. Zudem sind verschiedene Arten von Seepocken, Muscheln, Krebstieren und Seesternen zu finden. Ein weiteres Merkmal des Helgoländer Felssockels ist das Vorkommen von Kaltwasserkorallen. Diese empfindlichen Korallenarten wachsen in den tieferen Bereichen des Felssockels und bieten einen Lebensraum für viele andere Organismen. Die geographischen Besonderheiten von Helgoland und insbesondere der Helgoländer Felssockel machen die Insel zu einem wichtigen Hotspot für die Meeresforschung. Aufgrund der hohen Biodiversität und der für die Nordsee untypischen, hohen Verfügbarkeit an Hartsubstrat (Buntsandstein) ist Helgoland insbesondere perfekt geeignet, um Tests, Prüfungen und Experimente zu marinem Bewuchs durchzuführen.

Für die Feldversuche ist die Berücksichtigung von Faktoren wie Wassertemperatur, Salzgehalt, Strömungsgeschwindigkeit und der Artenvielfalt des Bewuchses essenziell. Ein Monitoring der Begleitparameter verleiht den Daten eine Aussagekraft und erleichtert später die Übertragbarkeit auf andere Standorte und Anwendungsszenarien.

Während der Laser-Demonstrationsversuche auf Helgoland, die einen sehr großen Anteil am Projekt »Foullas« ausgemacht haben, sollten verschiedene Parameter kontinuierlich überwacht und gemessen werden, um die Leistung der Laseranwendung als Reinigungsmethode zur Entfernung von Biofouling zu bewerten. Dazu gehören die Leistung und die Wellenlänge des Laserstrahls, die Bestrahlungsdauer, die Bewuchsart und -dichte vor und nach der Behandlung, die Reaktion der Organismen auf die Bestrahlung sowie mögliche Veränderungen der Beschichtung und der Wasserqualität (z.B. die Freisetzung von Bioziden). Die Ergebnisse dieser Messungen dienen dazu, die Effektivität der Laserbehandlung zu bewerten.

Insgesamt ermöglichten die marinen angewandte Feldtests eine realitätsnahe Bewertung der Laseranwendungen zur Biofouling-Kontrolle. Sie boten die Möglichkeit, die Leistung der Laserbehandlung unter tatsächlichen Bedingungen zu beurteilen und die Wirksamkeit, Effizienz sukzessiv zu verbessern. Zudem konnte die Wirksamkeit und zweier Strahlquellen (IR-Laser und Blauer Laser) vergleichend getestet werden. Die gewonnenen Erkenntnisse aus solchen Feldtests trugen zur Weiterentwicklung der Laser gestützten

Biofouling-Kontrolle bei und unterstützen somit die Entwicklung von effektiven und umweltverträglichen Methoden zur Bekämpfung von marinem Bewuchs.

### 2.2.2.2 Unterschied zwischen statischen und dynamischen Testmethoden

Bei der Bewertung von Bewuchsschutzbeschichtungen spielen sowohl statische als auch dynamische Beschichtungstests eine wichtige Rolle. Diese Tests dienen dazu, die Leistungsfähigkeit und Effektivität der Beschichtungen und der Laserreinigung unter verschiedenen hydrodynamischen Zuständen zu bewerten. Statische, marine Bewuchstests wurden auf einem am Meeresboden verankerten Pontons im Südhafen, in der Nähe der Westmole, auf der Insel Helgoland durchgeführt. Dabei werden beschichtete Testpaneele oder -proben für eine bestimmte Zeitdauer im Wasser belassen. Während dieser Zeit wirken nur die natürlichen hydrodynamischen Kräfte (Strömung, Wellenkraft). Während des Testzeitraums wurde der Bewuchs auf den Proben, während der Bewuchssaison von März/April bis Oktober im 14-Tages-Rhythmus überwacht und analysiert. Für spezifische Proben wurde unter anderem über ein bestimmtes Zeitintervall eine Unterwasserkamera eingesetzt. Dieser Testansatz ermöglicht es, die Bewuchsentwicklung und -dichte zu beobachten und die Langzeitleistung der Beschichtungen zu bewerten. Statische Tests liefern wichtige Informationen über die Biofouling-Resistenz einer Beschichtung unter ruhigen, nicht-strömenden Bedingungen.

Im Gegensatz dazu simulieren dynamische Beschichtungstests die Strömungsbedingungen, denen die Beschichtungen im Schiffseinsatz bei spezifischen Geschwindigkeiten ausgesetzt sind. Hierbei werden die beschichteten Proben in Strömungskanälen platziert, in denen Wasser mit einer veränderbaren, spezifischen Geschwindigkeit über die Oberflächen fließt. Während des Tests wird der Bewuchs auf den Proben überwacht und analysiert. Dynamische Tests ermöglichen es, die Reaktion des Bewuchses auf Strömung und hydrodynamische Belastungen in Abhängigkeit von der Beschichtung und den Reinigungsparametern (gereinigt/nicht gereinigt) zu beurteilen.

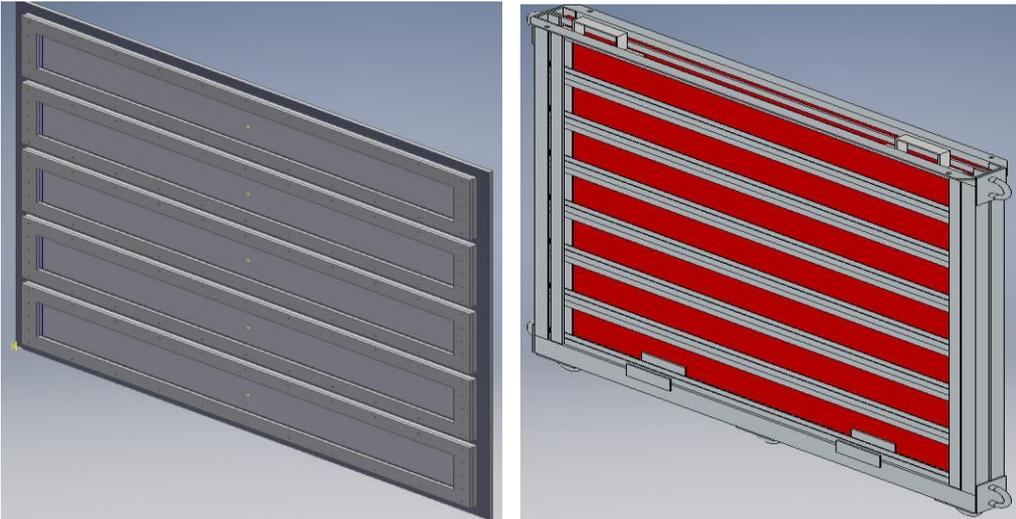
Die Unterscheidung zwischen statischen und dynamischen Beschichtungstests ist wichtig, da sich das Verhalten des biologischen Bewuchses je nach den Umgebungsbedingungen unterscheiden kann. Statische Tests zeigen, wie sich der Bewuchs unter ruhigen Bedingungen entwickelt („Hafenszenario“), während dynamische Tests („Schiff in Fahrt“-Szenario) die Auswirkungen von Strömung, Scherkräften und hydrodynamischen Bedingungen auf den Bewuchs berücksichtigen. Die Reynolds-Zahl spielt eine entscheidende Rolle bei der Bewertung dynamischer Beschichtungstests. Die Reynolds-Zahl ist ein dimensionsloser Parameter, der das Verhältnis von Trägheitskräften zu Viskositätskräften in einer Strömung angibt. Sie charakterisiert die Art der Strömung, ob laminar oder turbulent. In dynamischen Tests ermöglicht die Variation der Reynolds-Zahl die Untersuchung verschiedener Strömungsbedingungen und die Beurteilung des Einflusses von Strömungsgeschwindigkeit und Strömungsregime auf den Bewuchs. Je nach Reynolds-Zahl können sich die Bewuchsmuster und die Bewuchsrate erheblich unterscheiden.

Die Kombination von statischen und dynamischen Beschichtungstests ermöglichte in »FoulLas« eine umfassende Bewertung der Leistung von Beschichtungen und der im Projekt untersuchten Laserreinigung. Statische Tests liefern Informationen über die Langzeitleistung und Biofouling-Resistenz unter ruhigen Bedingungen, während dynamische Tests in einer eigens konzipierten und gefertigten »Flow-Cell« die Reaktion auf Strömung und hydrodynamische Belastungen simulierten und eine anwendungsnahe Einschätzung der Reinigungsfähigkeit ermöglichte. Zusammen boten diese Tests wertvolle

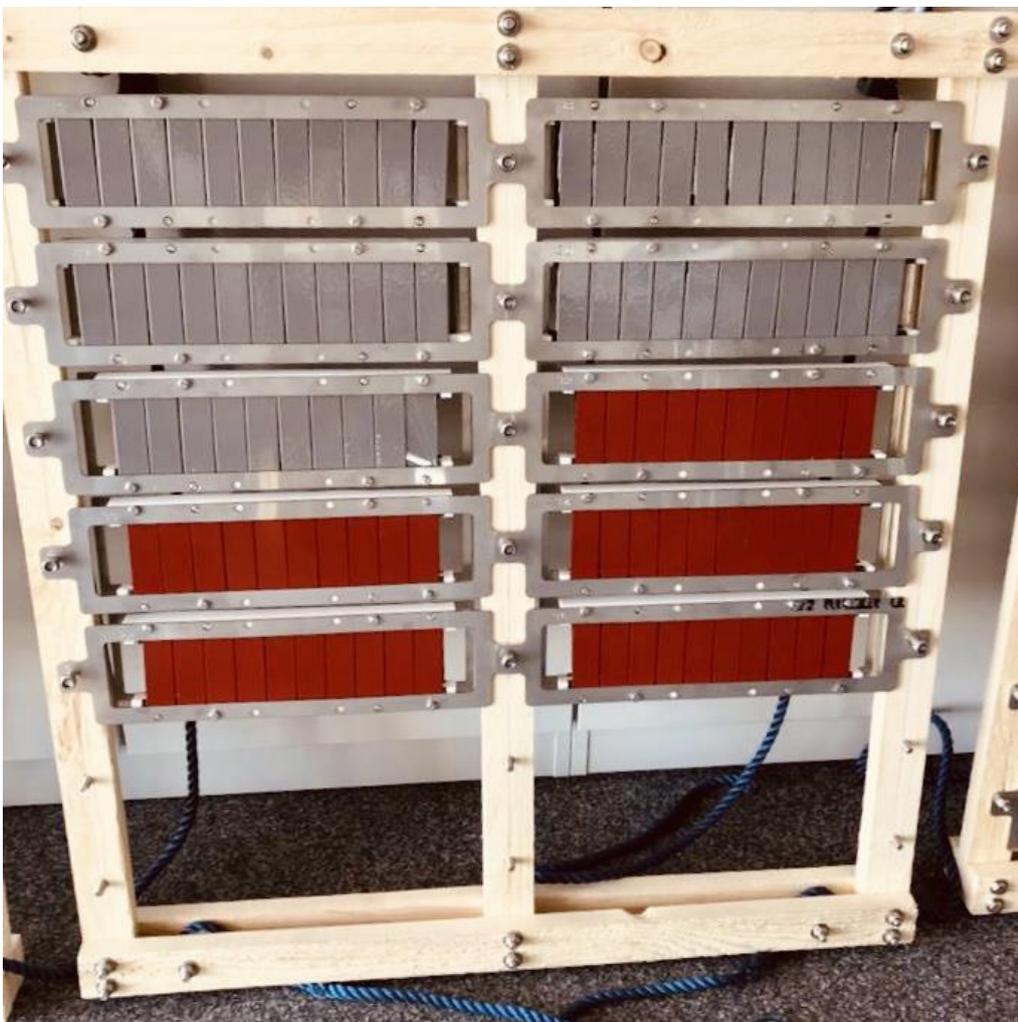
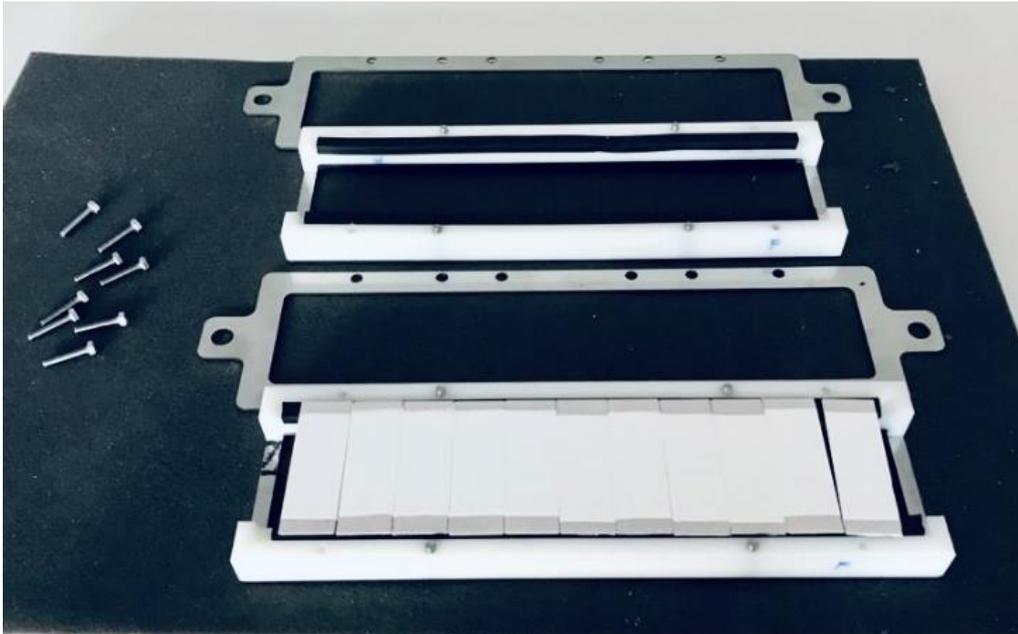
Erkenntnisse für die Optimierung von effektiven Beschichtungen zur Kontrolle des marinen Bewuchses.

Im Rahmen von AP4 wurden die Probenkörper, bestehend aus beschichteten Metallplatten, in geeigneten Abmessungen und Geometrien (eben, konkav und konvex), gefertigt und in einer statistisch abgesicherten Anordnung auf den Auslagerungsrahmen angebracht.

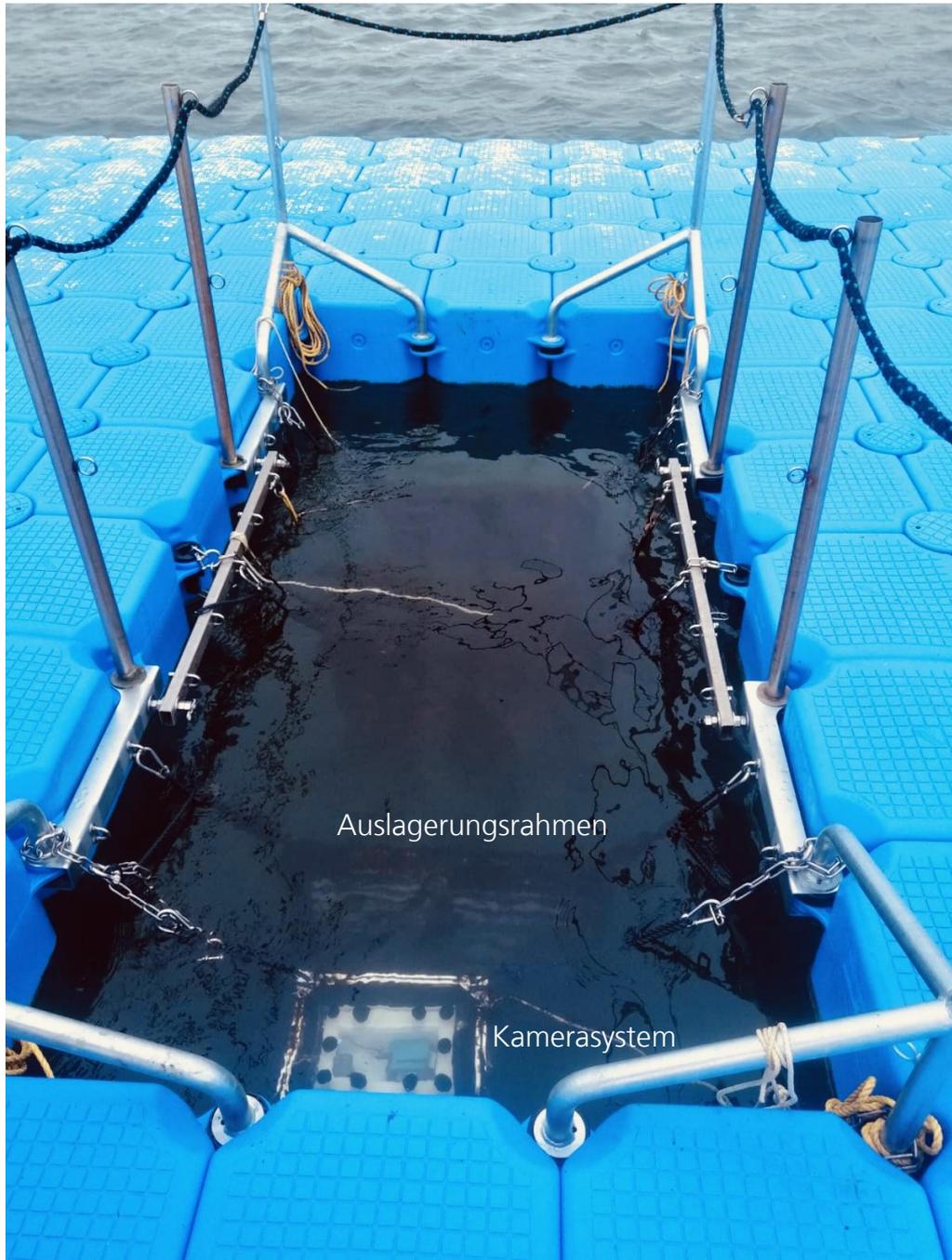
Wie bereits in Abschnitt 1.2 "Versuchsplanung" dargestellt, erfolgte die Herstellung der Proben am »IFAM« entsprechend dem fortlaufend aktualisierten Versuchsplan. Ein zahlenmäßig geringerer Anteil der Proben bestand aus 2 mm starkem S355 MC 1.0976 Baustahl mit den Maßen 100 x 100 mm. Durch die größere Oberfläche dieser Proben, in Anlehnung an den ASTM-Standard D6990-05, sollte ein natürliches Bewuchsbild gewährleistet werden. Ein weiterer Aspekt war, dass der Stahl dem späteren Zielsubstrat entsprach, auf dem die entsprechende Beschichtung appliziert und die Reinigung durchgeführt werden sollte. Es war zu erwarten, dass materialspezifische Unterschiede, insbesondere in Bezug auf die Wärmeleitfähigkeit, eine Rolle spielen könnten. Zu Beginn ging es jedoch vorrangig um die Interaktion der Laser (IR und Blau) mit der Beschichtung bzw. dem Bewuchs. Im Hinblick auf die umfassenden und für den Gesamtprozess signifikanten Prozessparameter (Entwicklung der Laserparameter) wurde zudem die Wahl auf kleinere Geometrien mit den Maßen 76 x 26 mm getroffen. Objektträger aus Glas stellten hier aufgrund ihrer zahlreichen Vorteile eine kostengünstige Alternative dar. Sie ließen sich einfach und schnell beschichten und konnten direkt mikroskopiert werden. Ihre Größe ermöglichte die Herstellung einer großen Anzahl von Replikaten und somit eine statistische Absicherung der Daten. Natürlich war zu beachten, dass Glas als Trägermaterial und seine geringe Stärke ein erhöhtes Bruchrisiko aufwies, insbesondere unter den rauen Umweltbedingungen der Nordsee. Um dieses Risiko zu minimieren, wurde am »IFAM« ein spezielles Auslagerungs- und Befestigungskonzept entwickelt (s. **Abbildung 5**), welches in 2021 von Mitarbeitenden des LZH weiter verbessert wurde (s. **Abbildung 6**). Wie den Abbildungen zu entnehmen ist, konnte der äußere Basisrahmen sowohl für Objektträger als auch für die größeren Stahlkörper genutzt werden. Dadurch wurde eine hohe Flexibilität in der Versuchsplanung ermöglicht und der Arbeitsprozess im Freiland deutlich vereinfacht.



**Abbildung 5:** CAD-Zeichnung einer Probenplatte mit Integrationsmöglichkeit für Objektträger (links), Auslagerungsrahmen mit integrierter Probenplatte, bestückt mit beschichteten Objektträgern (rot) (rechts). Auslagerungsdesign 2020.



**Abbildung 6:** Überarbeitetes Rahmendesign 2021 durch das LZH, für die Auslagerung von beschichteten Glasobjektträgern. Vorteile im Handling durch ein niedrigeres Gesamtgewicht sowie eine Zeitersparnis beim Einsetzen bzw. der Entnahme von Proben sind die erklärten Ziele dieses Designs. Es wird fortan in mehrfacher Ausführung genutzt.



**Abbildung 7:** Helgoländer Auslagerungsprüfstand des IFAM. Im Vordergrund ist das ausgebrachte Kamerasystem in einem eigens am LZH gefertigten Gehäuse erkennbar.



**Abbildung 8:** Basisrahmen (Design 2020) bestückt mit beschichteten Objektträgern (SPC rot) (FRC weiß) (links) sowie Basisrahmen mit beschichteten Stahlproben (Design 2020) (rechts).

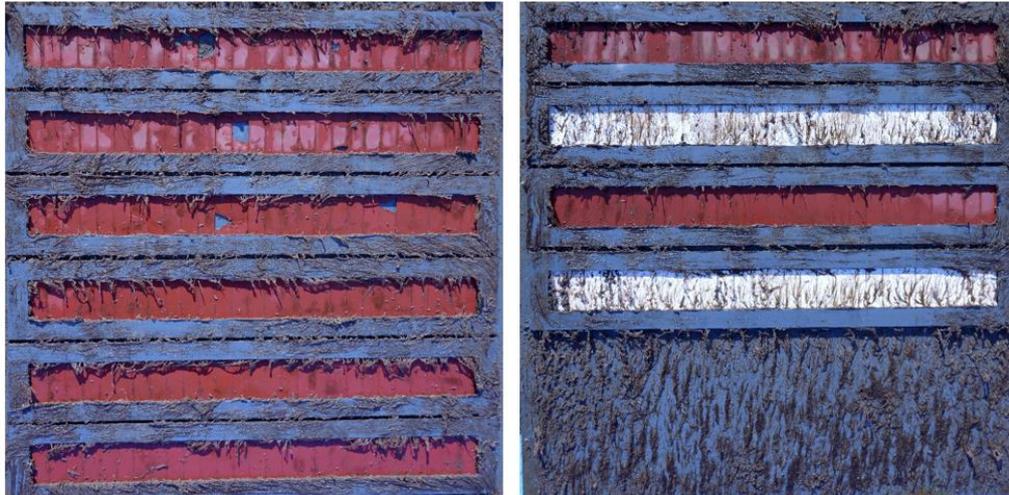
Für die Versuche wurden am IFAM beschichtete Objektträger mit den ausgewählten sechs Lacksystemen hergestellt. Im Fall komplexer geometrischer Formen wurden Versuche unternommen, um verschiedene Applikationstechniken zu evaluieren, um möglicherweise einen hohen Durchsatz von vergleichbaren Proben zu erreichen.

Die ausgelagerten Probenkörper lieferten kontinuierlich das benötigte Probenmaterial. Wie in den **Abbildung 9** und **Abbildung 10** zu erkennen ist, führte die Auslagerung auf Helgoland zuverlässig zu dem gewünschten Bewuchs der beschichteten Substrate. Auf dem FRC-System bildete sich ein mikrobieller Biofilm. An diesem Biofilm ließen sich die Auswirkungen der Laserbestrahlung auf zellulärer Ebene leichter nachvollziehen als bei Proben mit einer vielfältigen Makrofouling-Gemeinschaft. Die Faktoren Zeit und Art der Beschichtung beeinflussen wesentlich die Zusammensetzung der biologischen Gemeinschaft, was die Möglichkeiten zur Untersuchung der Laserbestrahlung auf verschiedene Taxa und Bewuchs-Gemeinschaften signifikant erhöht. Demnach hat sich die Versuchsplanung hier ausreichend bewährt und lieferte insgesamt die für die Versuche erforderlichen biologischen Proben.



**Abbildung 9:** Rahmenkonstruktion (Design 2020) mit ausgelagerten Proben des Foul-Release-Systems (weiß), die wenige Minuten zuvor aus der Seewasserauslagerung entnommen wurde. Die Proben zeigen einen Bewuchs mit Mikrofoouling und wurden anschließend für die Laserbestrahlung entnommen und mit dem Boot auf Land gebracht.

Wie erwartet wiesen die kommerziellen SPC-Systeme in den Feldauslagerungen stets einen geringen Biofilm auf. Beim FRC-System hingegen siedelten sich unter statischen Bedingungen höhere Taxa (Makrofoouling) an, insbesondere Bryozoen. Es wurden keine signifikanten Unterschiede innerhalb der Systeme festgestellt, die beispielsweise durch die unterschiedliche Tiefe oder Randeefekte verursacht wurden (s. Abb. 10). Das Auslagerungskonzept hat sich somit als erfolgreich erwiesen und erforderte keine umfangreichen konstruktiven Veränderungen, um die Fragestellungen zielführend beantworten zu können.



**Abbildung 10:** Inspektion der ausgelagerten Proben am 09.06.2020 auf Helgoland. SPC-System rot, FRC-System weiß.



**Abbildung 11:** Kleinerer Auslagerungsrahmen (Design LZH), der in den Herbst und Wintermonaten im Südhafen eingesetzt wurde, um kontinuierlich Probenmaterial vorhalten zu können. Hier ist der Bewuchs auf SPC- und FRC-Proben in KW12 zu sehen. Diese wurden mit unterschiedlichen Laserparametern bestrahlt [rechtes Bild, obere und mittlere Reihe] und in KW 13 erneut inspiziert [Positionierung im Rahmen geändert].

Auch während der biologisch weniger aktiven Herbst- und Wintermonate wiesen die Proben Soft-Fouling auf, so dass stets ausreichend Versuchsmaterial zur Verfügung stand.

### 2.2.3.1 Screening

In der kommerziellen Schifffahrt werden verschiedene Beschichtungstechnologien eingesetzt, abhängig von den spezifischen Anforderungen und Bedingungen. Die gängigste Technologie ist die Anwendung von Antifouling-Beschichtungen, um marinem Bewuchs vorzubeugen. Diese Beschichtungen können auf verschiedenen Wirkmechanismen beruhen darunter:

- Kupferbasierte Antifouling-Beschichtungen sind die am häufigsten eingesetzten Beschichtungen in der kommerziellen Schifffahrt. Sie enthalten Kupferverbindungen, die freigesetzt werden, um das Wachstum von marinen Organismen zu verhindern. Kupferbasierte Beschichtungen bieten eine effektive Biofouling-Prävention und haben sich über viele Jahre hinweg bewährt. Kupferbasierte Antifouling-Beschichtungen enthalten Kupferverbindungen, die eine toxische Wirkung auf die besiedelnden Organismen haben. Kupferbasierte Antifouling-Beschichtungen verwenden in der Regel Kupferverbindungen, die eine wirksame Bekämpfung von Biofouling ermöglichen. Eine häufig verwendete Kupferverbindung ist Kupferoxid ( $\text{CuO}$ ), das aufgrund seiner toxischen Eigenschaften gegenüber marinen Organismen eine effektive Antifouling-Wirkung aufweist. Eine andere Kupferverbindung, die häufig eingesetzt wird, ist Kupfersulfat ( $\text{CuSO}_4$ ). Kupfersulfat hat ebenfalls eine starke toxische Wirkung auf Organismen und wird in vielen Antifouling-Formulierungen verwendet. Weitere Kupferverbindungen, die in Antifouling-Beschichtungen zum Einsatz kommen können, sind beispielsweise Kupfercarbonat ( $\text{CuCO}_3$ ), Kupferhydroxid ( $\text{Cu(OH)}_2$ ) und Kupferpyrithion ( $\text{CuPT}$ ). Diese Verbindungen werden in unterschiedlichen Konzentrationen und Kombinationen eingesetzt, um eine effektive Biozidwirkung gegen Biofouling-Organismen zu erzielen. Es ist jedoch wichtig zu beachten, dass die genaue Zusammensetzung und Konzentration der Kupferverbindungen in Antifouling-Beschichtungen von Hersteller zu Hersteller variiert. Die freigesetzten Kupferionen wirken als Biozid und beeinträchtigen die Lebensfähigkeit und Reproduktion der Organismen, wodurch ihr Wachstum und ihre Ansiedlung auf der Schiffsoberfläche gehemmt werden. Die Konzentration und Freisetzung von Kupferionen aus der Beschichtung können je nach Formulierung und Zusammensetzung variieren. Es wurden verschiedene Techniken und Materialien entwickelt, um die Freisetzung von Kupferionen zu kontrollieren und eine optimale Wirkung der Beschichtung zu gewährleisten. Darüber hinaus können kupferbasierte Antifouling-Beschichtungen auch andere Inhaltsstoffe enthalten, die ihre Wirksamkeit der Beschichtung verbessern oder zusätzliche Schutzeigenschaften bieten.
- Silikonbasierte Beschichtungen bieten eine glatte Oberfläche, die das Anhaften von Organismen erschwert. Sie können auch eine gewisse Selbstreinigungsfähigkeit aufweisen, indem sie Fouling-Organismen durch hydrophobe Eigenschaften abstoßen. Diese Beschichtungen zeichnen sich durch ihre glatte, nicht haftende Oberfläche aus, die es den Organismen erschwert, sich darauf anzusiedeln. Die Wirkungsweise beruht auf dem sogenannten "Low Surface Energy"-Effekt, der bereits weiter oben im Text behandelt wurde. Die Zusammensetzung von silikonbasierten Fouling-release-Beschichtungen kann unterschiedlich sein, aber sie enthalten in der Regel Silikonpolymerverbindungen als

Hauptbestandteil. Diese Silikonpolymere zeichnen sich durch ihre geringe Oberflächenenergie aus, wodurch sie die gewünschte hydrophobe und nicht haftende Oberfläche bilden. Zusätzlich können der Beschichtung auch andere chemische Substanzen zugesetzt werden, um bestimmte Eigenschaften wie Haltbarkeit, Flexibilität oder Antihafteffekt zu verbessern.

- Reinigungsfähige Hartbeschichtungen zeichnen sich durch ihre glatte Oberfläche aus und ermöglichen eine einfache Reinigung, entweder durch mechanische Mittel wie Bürsten oder durch den Einsatz von Wasserstrahl. Der Wirkmechanismus von reinigungsfähigen Hartbeschichtungen beruht auf ihrer chemischen Zusammensetzung und Oberflächeneigenschaften. Diese Beschichtungen bestehen oft aus einem Trägermaterial, wie zum Beispiel Epoxidharz oder Polyurethan, das mit speziellen Zusätzen angereichert ist. Die Hauptbestandteile umfassen jedoch in der Regel Bindemittel, Füllstoffe, Härter und Zusatzstoffe wie Gleitmittel. Diese Komponenten werden so formuliert, dass sie eine glatte, leicht zu reinigende Oberfläche bilden und gleichzeitig eine gute Haftung auf dem Untergrund gewährleisten. Zudem spielt die Abrasionsstabilität eine wichtige Rolle.

Neben diesen gängigen Technologien gibt es auch andere innovative Ansätze, die in der kommerziellen Schifffahrt Anwendung finden. Beispielsweise werden biobasierte Beschichtungen erforscht, die auf umweltfreundlichen Materialien und Mechanismen zur Verhinderung von Biofouling basieren.

Einige der größten Unternehmen, deren Produkte für das Screening in Frage kamen sind:

- Jotun (assoziiertes Projektpartner) ist einer der weltweit führenden Anbieter von Beschichtungen für die maritime Industrie. Ihr bekanntestes Produkt ist »SeaQuantum«, eine kupferbasierte Antifouling-Beschichtung, die effektiven Schutz vor Biofouling bietet. Für das Screening sowie als kommerzielles Benchmark wurden in diesem Projekt »Marathon IQ« (graue Farbe) und »SeaQuest« (rot) eingesetzt. »Marathon IQ« ist eine lösungsmittelfreie, abriebfeste, zweikomponentige Epoxidbeschichtung. »SeaQuest« hingegen ist eine silikonbasierte Fouling-release-Beschichtung. Es enthält Silikonpolymere und Zusätze, die eine glatte, nicht haftende Oberfläche erzeugen. Das Produkt wird als Unterwasserbeschichtung für den Rumpf von Schiffen verwendet, um eine einfache Entfernung von Biofouling und anderen Ablagerungen zu ermöglichen. »SeaQuest« kann für verschiedene Schiffstypen und Anwendungen verwendet werden, einschließlich Handelsschiffe, Marineschiffe, Kreuzfahrtschiffe und Yachten. Es ist sowohl in Salz- als auch in Süßwasserumgebungen wirksam.
- Hempel ist ein renommierter Hersteller von Beschichtungen und bietet eine Vielzahl von Produkten für die maritime Industrie an. Eines der bekanntesten Produkte ist »Hempasil X3+«, eine silikonbasierte Beschichtung, die eine glatte Oberfläche und hervorragende Anti-Fouling-Eigenschaften bietet. Produkte von Hempel wurden im Projekt nicht vergleichend getestet.
- AkzoNobel (International Paint) bietet eine breite Palette von Beschichtungslösungen für die maritime Industrie an. Ihr bekanntestes Produkt ist »Intersmooth«, eine Kupferbasierte Beschichtung mit einer speziellen Polishing-

Technologie, die den Widerstand gegen Biofouling erhöht. Vier Produkte von AkzoNobel dienten als kommerzielle Referenzbeschichtungen in diesem Teilvorhaben. »Intersmooth 7465HS«, »Interprotect«, »Intercept 8000« und »Intersleek 1100SR«.

»Intersmooth 7465HS« ist ein Antifouling mit hohem Feststoffgehalt, TBT-frei, geringer Reibung und selbstpolierendem Copolymer (SPC). Es ist besonders geeignet für Anwendungen, bei denen die Lösemittlemissionen reduziert werden müssen.

»Interprotect« ist eine Epoxy-Grundierung, die als Unterwasserbeschichtung für den Schiffsrumpf verwendet wird. Sie besteht aus einer Kombination von Epoxidharzen, Füllstoffen und anderen Additiven. Sie dient zur Vorbereitung und zum Schutz des Schiffsrumpfes vor Korrosion und Osmose. Es bildet eine schützende Barriere zwischen dem Metalluntergrund und der Antifouling-Beschichtung. »Interprotect« kann auf verschiedenen Untergründen wie GFK, Aluminium und Stahl angewendet werden. Es wird oft als Grundierung vor der Applikation von Antifouling-Beschichtungen verwendet. Daher diente es im Projekt als „neutraler“ Standard, ohne intrinsische Bewuchsschutzmechanismen.

Bei »Intercept 8000« handelt es sich um eine selbstpolierende Antifouling-Beschichtung. Sie basiert auf einer Kombination von biozidhaltigen Wirkstoffen, die langsam freigesetzt werden, um einen kontinuierlichen Schutz zu gewährleisten. Das Produkt kann ebenfalls auf verschiedenen Schiffstypen und -materialien angewendet werden und ist sowohl für den Einsatz in Salz- als auch Süßwasserumgebungen geeignet.

Mit »Intersleek 1100SR« kommt eine biozidfreie Silikonbeschichtung zum Einsatz, die von AkzoNobel als umweltfreundliche Alternative zu herkömmlichen Antifouling-Beschichtungen entwickelt wurde. Die Beschichtung besteht aus speziellen Silikonpolymeren und hydrophoben Additiven, die das Anhaften von Organismen unter dynamischen Strömungsbedingungen verhindern soll.

- Der vierte, global operierende Lackhersteller in diesem Anwendungsbereich ist PPG Industries. Dessen bekanntestes Produkt ist »Sigma Sailadvance DX«, ein lineares, selbstpolierendes Antifouling auf Basis eines organischen hydrolysierbaren Polymerbinders, das für einen breiten Betriebsbereich entwickelt wurde. Von PPG kamen keine Produkte zum Einsatz, da mit den Produkten von Jotun und Hempel schon ein großes Versuchsportfolio zur Verfügung stand, das alle maßgeblichen Beschichtungstypen und Wirkungsweisen enthielt.

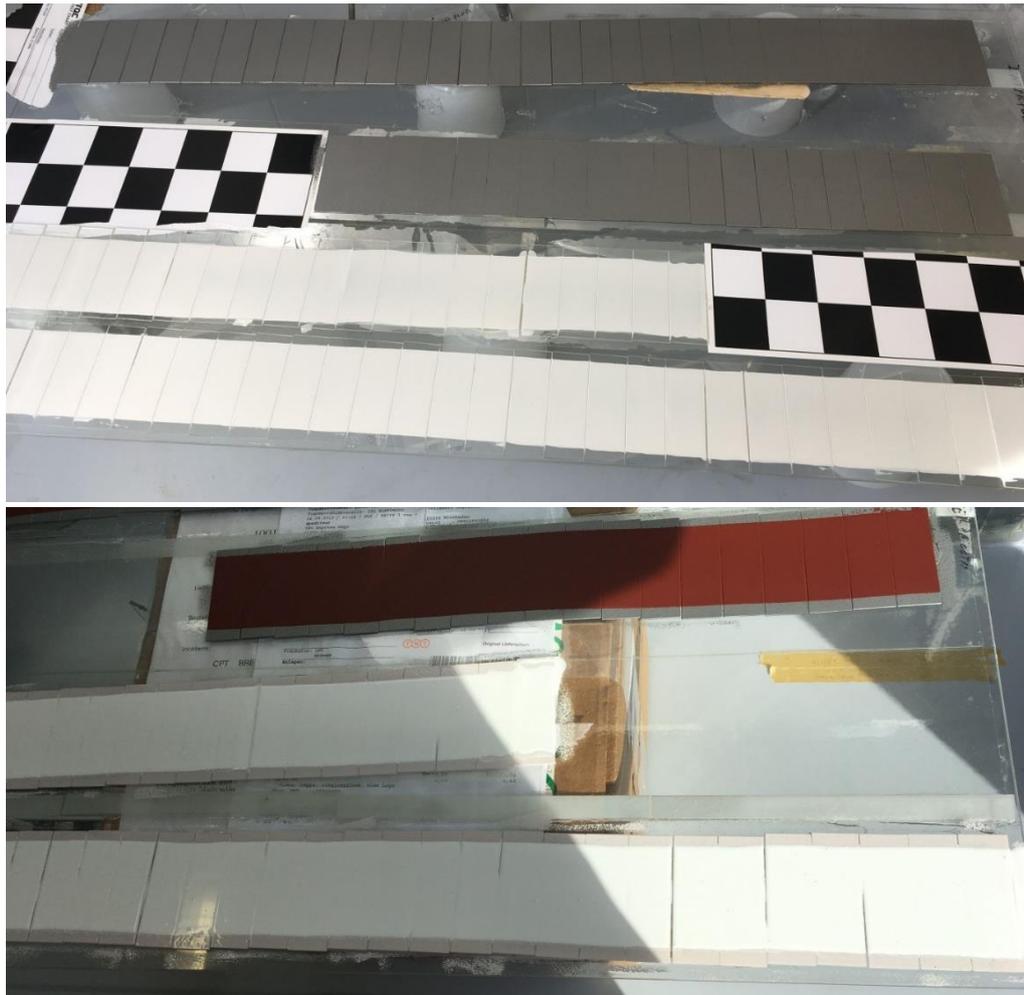
Die genannten Produkte sind Beispiele für die breite Palette an Beschichtungen, die in der kommerziellen Schifffahrt eingesetzt werden, um den Schutz vor Biofouling zu gewährleisten. Auch wenn sich die Formulierungen zwischen den Produkten unterscheiden, lassen sie sich jedoch unabhängig vom Hersteller den genannten Wirkmechanismen zuordnen.

Die Ergebnisse aus den sehr umfangreichen Versuchen mit den kommerziellen Beschichtungssystemen lieferten auch Erkenntnisse für die eigenen Lackentwicklungsarbeiten in Arbeitspaket 5.

**Table 1:** Liste der verwendeten kommerziellen Lacksysteme

Name	ID	Hersteller	Typ
Interprotect	4	AkzoNobel	Epoxid-Polyamid-Grundierung
Intersmooth 7465HS	2	AkzoNobel	Kupferoxid-basiertes selbstpolie- rendes Copolymer
Intercept 8000	3	AkzoNobel	Kupferoxid-basiertes selbstpolie- rendes Copolymer
Intersleek 1100SR	1	AkzoNobel	Biozidfreie Fouling Release-Be- schichtung
SeaQuest	5	Jotun	Biozidfreie Fouling Release-Be- schichtung
Marathon	6	Jotun	Oberflächentolerante, abriebfeste Epoxid-Grundierung für Bereiche mit hoher Korrosivität.

In einem ersten Schritt wurden verschiedene kommerziell erhältliche Antifouling- und Fouling Release-Beschichtungen auf ihre Verträglichkeit mit dem Laserbestrahlungsverfahren getestet. Durch diese Untersuchungen konnte mit vergleichsweise geringem Aufwand ein umfangreicher Erkenntnisgewinn über die grundsätzliche Eignung der verschiedenen Lacksysteme erzielt werden. Darüber hinaus lieferten sie wertvolle Erkenntnisse für die Laserentwicklung (AP6) und die Auswahl geeigneter Parameter (AP9). Die verschiedenen Lacksysteme wurden hundertfach auf geeignete Substrate (Glasobjektträger, Stahlsubstrate) für die Freilandauslagerung auf Helgoland appliziert.



**Abbildung 12:** Fotos der beschichteten Objektträger mit den kommerziellen Lacksystemen.

### 2.2.3.2 Lackentwicklung

Lackformulierungen bestehen typischerweise aus einer Kombination von verschiedenen Komponenten, die jeweils spezifische Funktionen erfüllen. Zu den Hauptbestandteilen gehören Bindemittel, Lösungsmittel, Pigmente, Füllstoffe und Additive.

Das Bindemittel ist für die Bildung des festen Lackfilms verantwortlich, der auf der Oberfläche des Materials haftet. Es verleiht dem Lack Haltbarkeit, Abriebfestigkeit und Beständigkeit gegenüber verschiedenen Einflüssen wie UV-Strahlung, Feuchtigkeit und Chemikalien. Gängige Bindemittel in Lackformulierungen sind Acrylate, Alkyde, Epoxide, Polyurethane und Polyester.

Lösungsmittel dienen dazu, die lackbildenden Bestandteile zu verdünnen und die Viskosität des Lacks zu regulieren. Während des Trocknungsprozesses verdunsten die Lösungsmittel, wodurch der Lack aushärtet. Wasser, Alkohole, Ketone und verschiedene organische Verbindungen werden häufig als Lösungsmittel verwendet.

Pigmente sind feste Partikel, die dem Lack Farbe verleihen. Sie werden in der Regel in Pulverform verwendet und können mineralischen oder organischen Ursprungs sein. Pigmente verbessern die Deckkraft und geben dem Lack die gewünschte Farbe.

Füllstoffe werden verwendet, um die Viskosität des Lacks anzupassen und die Haftung zu verbessern. Sie bestehen aus verschiedenen Materialien wie Kreide, Talkum, Kieselgur oder Glaspartikeln.

Zusätzlich zu den Hauptbestandteilen enthalten Lackformulierungen oft verschiedene Additive, um bestimmte Eigenschaften des Lacks zu verbessern. Dazu gehören Entschäumer, Verdicker, Trocknungsbeschleuniger, UV-Stabilisatoren, Haftvermittler und Antioxidantien.

Es ist wichtig zu beachten, dass die genaue Zusammensetzung einer Lackformulierung von der spezifischen Anwendung, den gewünschten Eigenschaften und den Umweltanforderungen abhängt. Lacke können je nach Verwendungszweck stark variieren, beispielsweise in Bezug auf ihre Chemikalienbeständigkeit, Glanzgrad, Flexibilität oder Härte.

#### Interaktion zwischen Laserbestrahlung und Beschichtung

Bei der Interaktion zwischen einer Laserstrahlquelle und einer Beschichtung können verschiedene Effekte auftreten. Sie stellen mögliche Stellschrauben dar, um die Effektivität der Behandlung zu beeinflussen. Ziel war es dabei negative Auswirkungen zu vermeiden und positive Eigenschaften beschichtungsseitig zu fördern. Ein wichtiger Faktor ist die Absorption. Laserstrahlen können so eingestellt werden, dass sie von bestimmten Materialien selektiv absorbiert werden.

Zudem spielen thermische Effekte eine bedeutende Rolle für den Gesamtprozess. Die Erwärmung der Beschichtung kann dazu führen, dass sich das Biofouling von der Oberfläche löst oder abgetötet wird. Daher ist die thermische Leitfähigkeit einer Beschichtung eine der oben genannten Stellschrauben. In Bezug auf die Wärmeleitfähigkeit in einer Beschichtung können verschiedene physikalische Phänomene auftreten. Einige Beschichtungsbestandteile können eine geringe Wärmeleitfähigkeit aufweisen, was zu einer thermischen Isolierung der beschichteten Oberfläche führen kann.

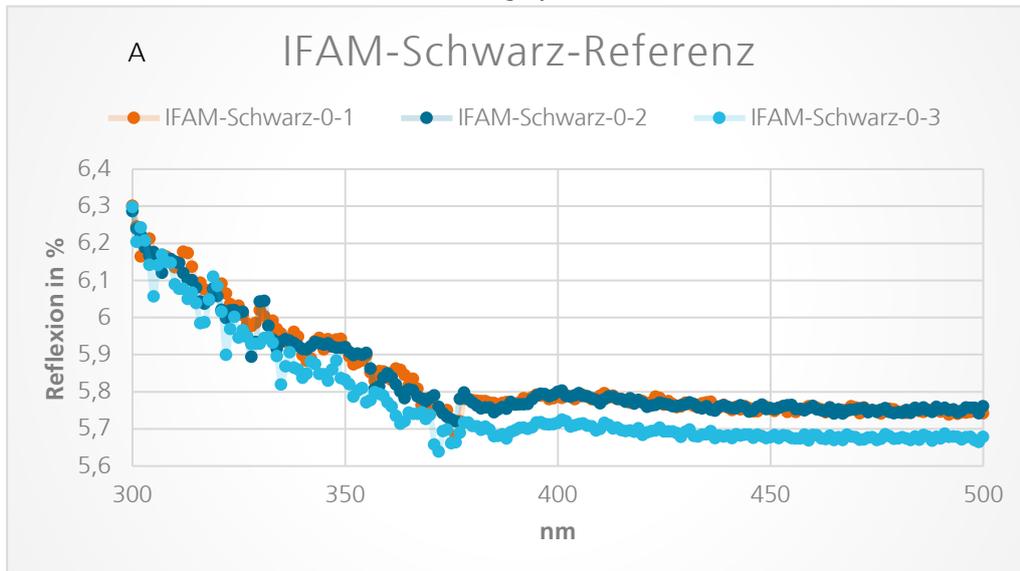
Eine weitere optimierbare Funktionalität stellt die Reflexion dar. Kommt es zu der Bestrahlung wird ein Teil der Laserenergie von der Beschichtung reflektiert. Das Fouling würde dann erneut von der reflektierten Strahlung durchdrungen werden. Eine erhöhte Reflexion führt dazu, dass ein Großteil der Laserenergie von der Beschichtung reflektiert wird und somit nicht von der Beschichtung absorbiert wird. Dadurch fällt unter bestimmten Umständen die zur Behandlung benötigte Energiemenge geringer aus. Eine effizientere Nutzung der Energie setzt die Kosten herab, indem der Energieverbrauch verringert wird. Zudem kann eine hohe Reflexion auch dazu beitragen, dass die Beschichtung selbst weniger durch den Laserstrahl beeinträchtigt wird. Eine geringere Absorption verringert das Risiko von Beschichtungsschäden, wie Verbrennungen oder Blasenbildung. Dadurch bleibt die Integrität der Beschichtung erhalten und damit auch ihre Schutzfunktion gegenüber Korrosion und anderen Umwelteinflüssen.

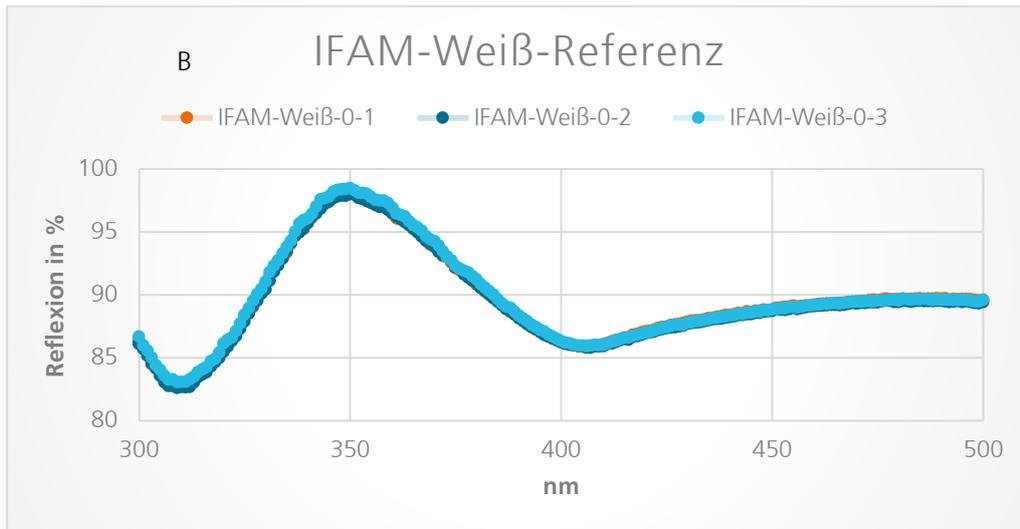
Um die Reflexionseigenschaften einer Beschichtung zu erhöhen, wurden verschiedene Ansätze verfolgt werden. Am erfolgversprechendsten war die Zugabe von reflektierenden Materialien wie Aluminium. Als Pigmente werden aus atomisiertem Aluminiumpulver hergestellt und fast ausschließlich in einem Nassvermahlungsprozess verarbeitet. Sie sind sowohl in *Leafing*- und *non-Leafing*-Varianten verfügbar. Diese Materialien besitzen

die Eigenschaft, das einfallende Licht zu reflektieren und so den Grad der Reflexion zu erhöhen.

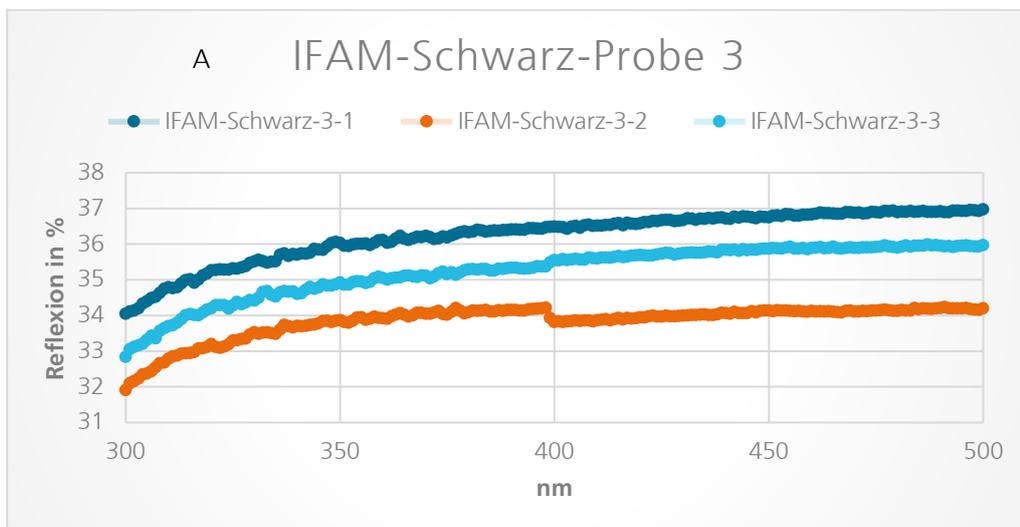
IFAM-Formulierungen mit eingearbeiteten Aluminium-Effektpigmenten, die zur Optimierung der Reflexionseigenschaften dienen sollten, wurden für Untersuchungen in einer Ulbricht-Kugel des LZH hergestellt. Um den tatsächlichen Einfluss der Pigmente bestimmen zu können, wurde ein Klarlacksystem ausgewählt und vergleichend auf eine schwarze und eine weiße Substratfläche appliziert. Die Beschichtungen mit Effektpigmenten wurden im Vergleich zu einem System mit weitgehend identischer Formulierung, jedoch ohne die eingemischten Pigmente, getestet. Die Messungen der Reflexion in Prozent (%) fanden im blauen Spektralbereich von 300 nm bis 500 nm statt. Jede Einzelprobe wurde dreifach auf einer weißen und einer schwarzen Substratfläche gemessen. Die Ergebnisse wurden anhand einer pigmenthaltigen Beschichtung (3) und der nicht pigmentierten Referenz (0) exemplarisch dargestellt. Die Bezeichnung der Proben setzte sich aus der Farbe der Substratfläche (weiß oder schwarz), der zugeordneten Nummer für die jeweilige Formulierung (1 bis ...) und dem Messdurchlauf (1, 2 oder 3) zusammen. Wie erwartet zeigte sich beim Klarlacksystem ohne Effektpigmente ein deutlicher Unterschied zwischen den unterschiedlich eingefärbten Substratflächen. Die schwarze Oberfläche reflektierte nur wenig Licht, während die weiße Fläche eine hohe Reflexion aufwies (s. Abb. 12). Die Beschichtung 3 hingegen zeigte sowohl auf der schwarzen als auch auf der weißen Fläche eine ähnliche Reflexion. Dies deutete darauf hin, dass nicht mehr die Farbe der Substratfläche entscheidend war, sondern das Effektpigment. Bei einem schwarzen Untergrund führte dies zu einer Steigerung der prozentualen Reflexion, während es bei der weißen Fläche im Vergleich zu den Referenzwerten zu einer Reduktion kam.

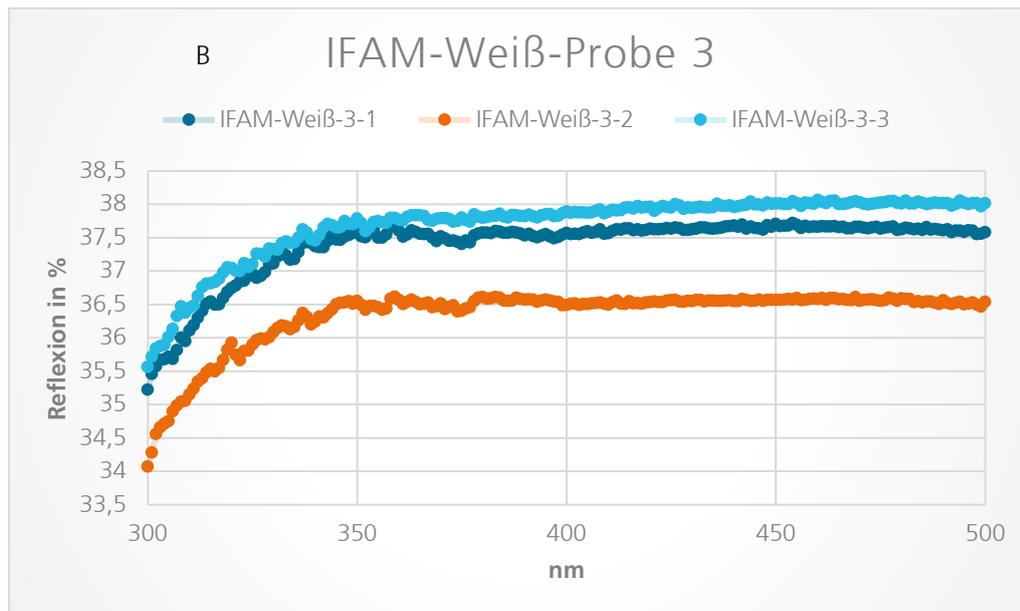
Basierend auf diesen Ergebnissen konnten Ansatzpunkte für die weitere Optimierung der Beschichtung gewonnen werden, die im weiteren Verlauf des Projekts in die nächste Generation der Beschichtungssysteme einfließen sollten.





**Abbildung 13:** (A) Reflexion [%] für ein Klarlacksystem ohne metallische Effektpartikel als Referenz auf schwarzer (A) und weißer (B) Substratoberfläche. Spektralbereich 300 nm bis 500 nm; in 1er-Werten aufsteigend. 3-fach Bestimmung. Die Reflexion auf schwarzem Grund lag für 300 nm bei im Mittel 6,29 % (N=3, SD 0,006). In der Folge verlief sie abnehmend auf gemittelt 5,73% (N=3, SD 0,035) bei 500 nm. Wie zu erwarten, zeigte die Untersuchung auf weißem Untergrund eine höhere Reflexion. Sie erreicht ihr Maximum bei rund 350 nm (97-98%). Der initiale Wert lag im Mittel bei 86,38% (N=3, SD 0,235). Bei 500 nm betrug der Mittelwert 89,53% (N=3, SD 0,078).

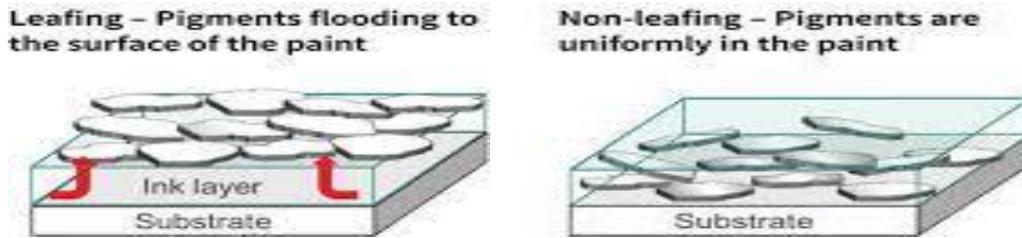




**Abbildung 14:** (A) Reflexion [%] für ein Klarlacksystem mit metallischen Effektpartikel auf schwarzer (A) und weißer (B) Substratoberfläche. Spektralbereich 300 nm bis 500 nm; in 1er-Werten aufsteigend. 3-fach Bestimmung. Die Reflexion auf schwarzem Grund liegt für 300 nm bei im Mittel 32,93% (N=3, SD 0,876). In der Folge verläuft sie im Mittel leicht ansteigend auf 35,71% (N=3, SD 1,146) bei 500 nm. Auf weißem Untergrund liegt die Reflexion in einem ähnlichen Wertebereich. Bei 300 nm wird im Mittel eine Reflexion von 34,95% (N=3, SD 0,638). Für 500 nm konnte ein Mittelwert von 37,38% (N=3,0,619) bestimmt werden.

Die Lackentwicklung am IFAM verfolgte während des Berichtszeitraums mehrere Ansätze. Ein Schwerpunkt lag auf der Entwicklung eigener Lackformulierungen, die neben dem Schutz vor Bewuchs auch den Reinigungsvorgang durch den Laser unterstützen sollen. Auf Basis von umfangreichen Labortests konnten reproduzierbare Oberflächeneigenschaften identifiziert werden, die zu einer reduzierten Haftung von Bewuchs führen. Eine bestehende Herausforderung besteht jedoch weiterhin in der Verbesserung der mechanischen Stabilität der Beschichtungen.

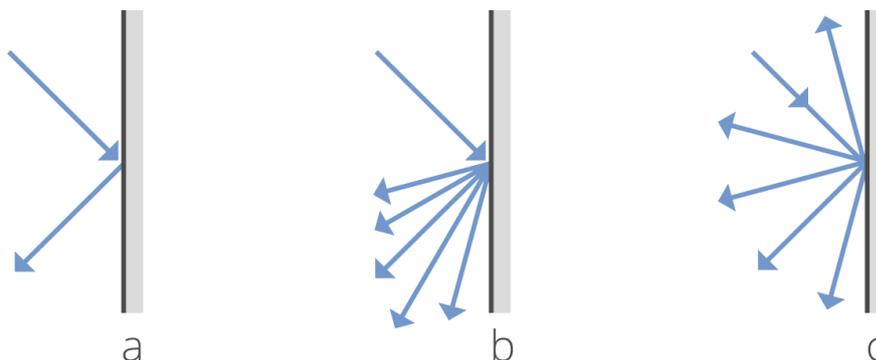
Parallel zu diesen Entwicklungen wurde ein Versuchskonzept erstellt, um den Einfluss von reflektierenden Pigmenten auf die Reinigungsfähigkeit des Lasers zu untersuchen. Hierbei kamen plättchenförmige Metalleffektpigmente zum Einsatz, die eine Länge von etwa 20  $\mu\text{m}$  und eine Breite von 1  $\mu\text{m}$  aufweisen. Die optische Wirkung dieser Pigmente beruht auf ihrer parallelen Anordnung zur Oberfläche des umgebenden Lacksystems. Innerhalb der Lackmatrix können diese Eigenschaften jedoch auf zwei Arten ausgeprägt sein. Bei sogenannten *leafing*-Pigmenten sammeln sich die Pigmente nach der Applikation an der Oberfläche an. Dies führt zu einem intensiven metallischen Glanz, jedoch auch zu einer reduzierten Wisch- und Kratzfestigkeit. Im Gegensatz dazu verteilen sich *non-leafing*-Pigmente nicht an der Oberfläche, sondern in der gesamten Filmmatrix (vgl. Abb. 14). Obwohl der metallische Glanz bei *non-leafing*-Pigmenten weniger intensiv ist, zeichnen sie sich durch eine deutlich höhere Wisch- und Kratzbeständigkeit aus.



**Abbildung 15:** Beschichtung von Floatglas-Objektträgern mit unterschiedlichen Lacksystemen am Fraunhofer IFAM<sup>20</sup>.

Die Verwendung von Aluminium-Effektpigmenten ist am häufigsten, daher lag die anfängliche Wahl darauf. Um die erforderliche hohe Kratz- und Wischbeständigkeit im Anwendungsbereich zu gewährleisten, wurden zusätzlich *non-leafing*-Pigmente eingesetzt. Um einen Vergleichsmaßstab zu haben, wurden die Pigmente in die bereits verwendeten kommerziellen Beschichtungssysteme eingearbeitet. Durch dieses Vorgehen war es möglich, vergleichende Reflexionsmessungen durchzuführen, um festzustellen, ob tatsächlich eine Optimierung stattfindet.

Angesichts der bereits hohen Oberflächenreflektion der weißen Fouling-release-Beschichtung stellt sich die Frage, ob die Reflexion durch die Pigmente und deren Anordnung gezielt beeinflusst werden kann, um eine gerichtete, diffuse oder gemischte Reflexion zu erzielen (vgl. Abb. 15).



**Abbildung 16:** Gerichtete, gemischte und diffuse Reflexion nach dem Auftreffen auf eine Oberfläche.

Neben einer Verbesserung der Reflexionseigenschaften lag die eigentliche Herausforderung bei der Prozesssteuerung und der darauf abgestimmten Beschichtungsentwicklung darin, die Beschichtung selbst nicht zu schädigen. Übermäßige Hitzeentwicklung kann zu Verbrennungen, zum Ablösen oder zur Blasenbildung auf der Oberfläche der Beschichtung führen. Dies würde die Schutzfunktion der Beschichtung beeinträchtigen und zu einer verkürzten Lebensdauer führen. Daher wurde für alle im Projekt untersuchten Beschichtungen die Zerstörungsschwellen bestimmt. Sie markierten eine nicht zu überschreitende Grenze. Es ist wichtig, die Wechselwirkungen zwischen dem Laserstrahl und der spezifischen Beschichtung zu verstehen, um die Wirksamkeit der Behandlung zu optimieren und unerwünschte Nebeneffekte zu minimieren. Dabei ist zu beachten, dass die

<sup>20</sup> PFAFF, G., BARTELT, M., MICHAEL, R. and MAILE, F. (2021), *Metal effect pigments*. Physical Sciences Reviews, vol. 6, no. 6, 2021, pp. 179-197. <https://doi.org/10.1515/psr-2020-0182>

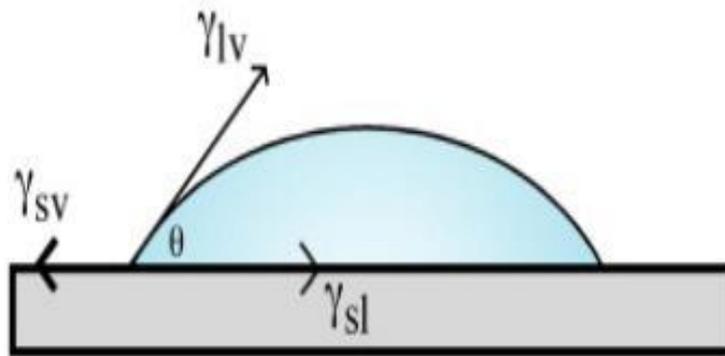
Wechselwirkungen zwischen Laserstrahlung und Beschichtung stark von den spezifischen Parametern abhängen, wie z.B. der Wellenlänge, der Intensität, der Dauer und dem Material der Beschichtung. Eine sorgfältige Auswahl und Anpassung der Laserparameter sind erforderlich, um eine optimale Behandlung zu gewährleisten und potenzielle Schäden an der Beschichtung zu minimieren. Dies erfordert eine gründliche Untersuchung der Beschichtungsmaterialien und eine genaue Abstimmung der Laserparameter auf die spezifischen Anforderungen.

Zusätzlich zu den direkten Interaktionen zwischen Laserstrahlung und Beschichtung können auch andere Faktoren berücksichtigt werden, die die Behandlung beeinflussen können. Dazu gehört unter anderem die Schichtdicke der Beschichtung. Eine höhere Schichtdicke ist unter Umständen in der Lage mehr Energie zu absorbieren, während dünnere Schichten weniger Wärme aufnehmen und daher gegebenenfalls weniger effektiv behandelt werden können. Einen weiteren Faktor stellen Unebenheiten oder Rauheiten auf der Oberfläche der Beschichtung dar. Sie führen zu einer unterschiedlichen Exposition gegenüber der Laserstrahlquelle und rufen zum Teil lokale Defekte hervor. Auch die chemische Zusammensetzung der Beschichtung muss als Faktor hinzugezogen werden. Unterschiedliche Materialien können unterschiedliche Absorptionseigenschaften aufweisen, was am Ende ebenfalls einen Einfluss auf die Effizienz der Behandlung und die Beschichtungsalterung haben kann. Als letzten Einflussfaktor seien die Umgebungsbedingungen genannt. Die Temperatur oder die physikalisch-chemischen Eigenschaften des Wassers stellen ebenfalls einen wichtigen Parameter dar. Die Interaktionen zwischen Laserstrahlung und Beschichtung sind daher vielschichtig und erforderten im Projekt einer detaillierten Untersuchung, auf dessen Grundlage eine optimale Anpassung der Behandlungsparameter und der Beschichtungsentwicklung vorgenommen wurde. Es ist dabei wichtig gewesen, die Vor- und Nachteile abzuwägen und geeignete Maßnahmen zu ergreifen, um die Wirksamkeit der Behandlung zu maximieren und potenzielle Schäden an der Beschichtung zu minimieren. Weitere Forschung und Entwicklung sind an dieser Stelle erforderlich, um das volle Potenzial dieser Technologie zu erschließen und sie sicher und effektiv in der Schifffahrtsindustrie einzusetzen. Näheres hierzu findet sich auch im Abschlussbericht des Kooperationspartners Laserzentrum Hannover (LZH).

### Kontaktwinkelmessungen

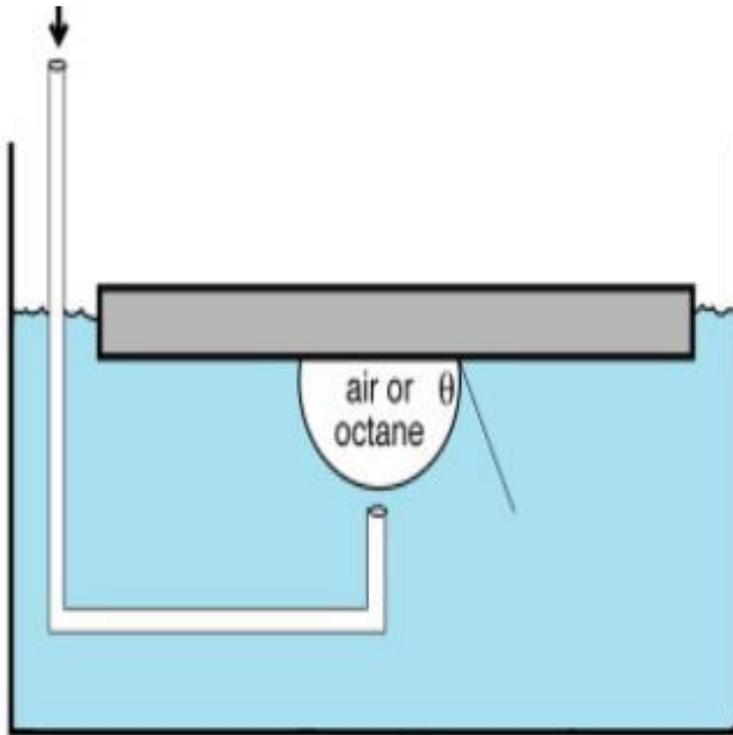
Obwohl die Interaktionen zwischen der Beschichtung und der Laserbestrahlung vielschichtig sind, konnte sich die Entwicklung nicht ausschließlich auf die Optimierung der oben genannten Faktoren konzentrieren. Bewuchsmindernde Eigenschaften und die Verwendung spielte ebenfalls eine zentrale Rolle. Hier wurde eine möglichst gute Balance angestrebt, was viele experimentelle Ansätze erforderte. Eine wichtige Rolle bei der Charakterisierung von Bewuchsschutzbeschichtungen spielt die Kontaktwinkelmessung. Sie ist eine Methode zur Charakterisierung der Benetzbarkeit einer Oberfläche. Die Methode ermöglicht die quantitative Bestimmung des Kontakts zwischen einer Flüssigkeit (z. B. Wasser) und der Oberfläche einer Beschichtung. Der Kontaktwinkel kann, sowohl an der Luft als auch im Wasser bestimmt werden. Bei der Luft-Methode wird ein Tropfen der Testflüssigkeit auf die Oberfläche der Beschichtung gegeben, und der Kontaktwinkel zwischen dem Tropfen und der Oberfläche wird gemessen. Ein hoher Kontaktwinkel (typischerweise über 90 Grad) deutet auf eine geringe Benetzbarkeit hin, da der Tropfen eine kugelförmige Form annimmt und eine minimale Berührung mit der Oberfläche hat. Ein niedriger Kontaktwinkel (typischerweise unter 90 Grad) zeigt hingegen eine hohe

Benetzbarkeit an, da der Tropfen eine flache Form annimmt und eine größere Fläche mit der Oberfläche in Kontakt kommt.



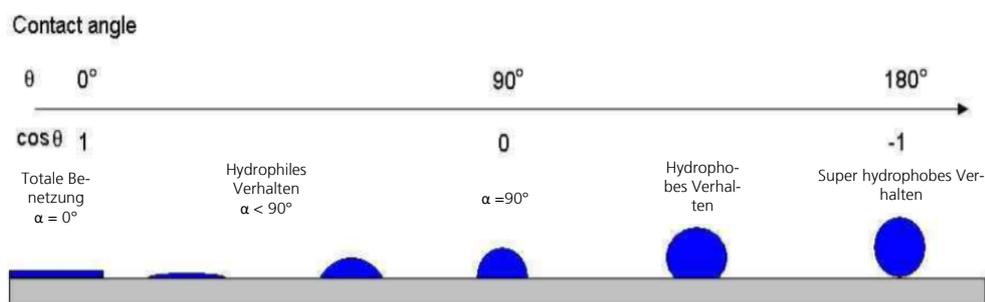
**Abbildung 17:** Funktionsbeziehung zur Bestimmung des Kontaktwinkels zwischen der Beschichtungsfläche und dem liegenden Wassertropfen. Es handelt sich um eine Standardmethode zur Berechnung der freien Oberflächenenergie eines Festkörpers aus dem Kontaktwinkel mit mehreren Flüssigkeiten (Wasser, Di-Jodmethan, Ethylenglycol). Die Berechnung der freien Oberflächenenergie erfolgt nach Owens, Wendt, Rabel und Kaelble (D. H. Kaelble, Dispersion-Polar Surface Tension Properties of Organic Solids. In: J. Adhesion 2 (1970), S. 66-81; D. Owens; R. Wendt, Estimation of the Surface Free Energy of Polymers. In: J. Appl. Polym. Sci 13 (1969), S. 1741-1747; W. Rabel, Einige Aspekte der Benetzungstheorie und ihre Anwendung auf die Untersuchung und Veränderung der Oberflächeneigenschaften von Polymeren. In: Farbe und Lack 77,10 (1971), S. 997-1005.)

Die Messung des Kontaktwinkels im Wasser mithilfe der sogenannten Captive-Bubble-Methode dient zur Messung des Kontaktwinkels zwischen einer Flüssigkeit und einem Festkörper mit Hilfe der Tropfenformanalyse. Bei dieser Methode wird eine Luftblase unter einen Festkörper injiziert, dessen Oberfläche sich in der Flüssigkeit befindet, anstatt einen Tropfen auf dem Festkörper zu platzieren, wie es bei der Sessile-Drop-Methode der Fall ist.

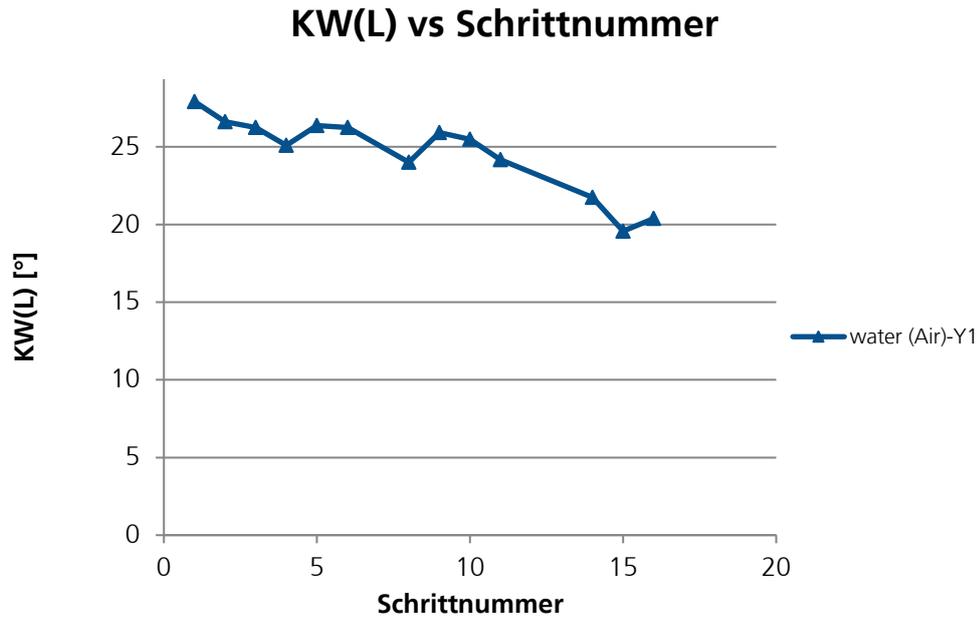


**Abbildung 18:** Kontaktwinkelmessung in Wasser an einer Luftblase (Luftblase sitzt unterhalb des Festkörpers). Der innerhalb der Blasenkontur gemessene Winkel ist noch nicht der gesuchte Kontaktwinkel zwischen Festkörper und Flüssigkeit. Dieser resultiert aus der Differenz zwischen  $180^\circ$  und dem Blasenwinkel. Diese Methode eignet sich vor allem für superhydrophile Beschichtungen. Mögliche Veränderungen der Benetzbarkeit infolge von  $H_2O$ -Auslagerung lassen sich so erfassen.

Die Resultate (vgl. **Abbildung 20**) lieferten wichtige Informationen über die Oberflächeneigenschaften der Versuchsbeschichtungen, insbesondere in Bezug auf ihre Benetzbarkeit. Die Benetzbarkeit wiederum beeinflusst das Haftverhalten von Organismen auf der Oberfläche. Eine Beschichtung mit einer geringen Benetzbarkeit führt in der Theorie dazu, dass Organismen nicht auf der Oberfläche haften und sie somit einen gewissen Bewuchsschutz bieten.

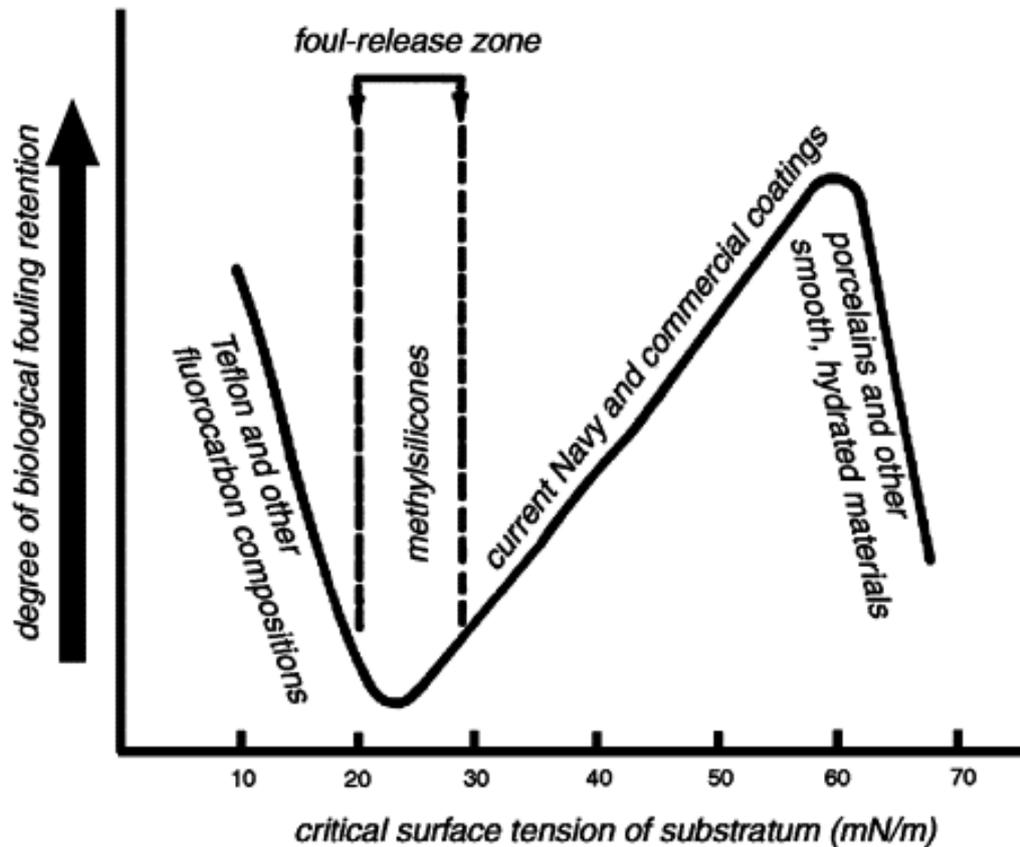


**Abbildung 19:** Schematische Darstellung der Benetzbarkeit in Abhängigkeit des Kontaktwinkels ( $^\circ$ ) eines Tropfens auf einer Oberfläche.



**Abbildung 20:** Exemplarische Kontaktwinkelmessung [KW (Luft) °] mit Wassertropfen an der Luft für eine der untersuchten Beschichtungen. Bei der Kontaktwinkelmessung beschreibt die Schrittnummer den Fortschritt des Messvorgangs. Die Messung erfolgt normalerweise in mehreren Schritten, bei denen der Kontaktwinkel zwischen einer Flüssigkeitstropfen und einer Festoberfläche gemessen wird. Jeder Schritt kann verschiedene Parameter umfassen, wie z.B. die Zugabe von Flüssigkeit, die Änderung der Oberflächenspannung oder die Anpassung der Position des Tropfens. Die Schrittnummer dient dazu, den aktuellen Status der Messung anzugeben und den Fortschritt zu verfolgen. Die untersuchte Beschichtung zeigte ein eher hydrophiles Verhalten.

Spezifischer wird diese Eigenschaft durch die Einbeziehung der Baier-Kurve (**Abbildung 21**). Hierbei handelt es sich um eine grafische Darstellung der Beziehung zwischen der kritischen Oberflächenspannung eines Substrates und der Bewuchsresistenz einer Beschichtung. Sie stellt einen wichtigen, theoretischen Ansatz zur Bewertung der Bewuchseigenschaften von Beschichtungen dar.



**Abbildung 21:** Die Baier-Kurve zeigt die relative Menge des Biofoulings im Verhältnis zur kritischen Oberflächenspannung des Substrats<sup>21</sup>.

Für die Evaluierung der Versuchsbeschichtungen spielte diese theoretische Grundlage demnach eine maßgebliche Rolle.

Unter Berücksichtigung dieser theoretischen Parameter fand die Entwicklungsarbeit am IFAM statt. Im Vordergrund stand hier der Bewuchsschutz, der über biozidfreie, Fouling-release-Eigenschaften erzielt werden sollte. Als Basis dafür dienten Polydimethylsiloxan in unterschiedlichen Formulierungen. Bei Polydimethylsiloxan (PDMS) handelt es sich um ein Silikonpolymer. Polydimethylsiloxan (PDMS) wird aufgrund seiner spezifischen Eigenschaften oft in der Entwicklung von Bewuchsschutzbeschichtungen eingesetzt. Das ist u. a. darauf zurückzuführen, dass PDMS von Natur aus hydrophob ist. Diese Grundeigenschaft hilft dabei, die Haftung von marinen Organismen wie Algen, Muscheln oder Seepocken auf der beschichteten Oberfläche zu verringern. Zudem sind PDMS-Beschichtungen flexibel und elastisch, was ihnen ermöglicht, den thermischen Ausdehnungs- und Kontraktionszyklen des Substrats standzuhalten, ohne zu reißen oder zu beschädigen. Diese Eigenschaft ist wichtig, um eine langfristige Integrität der Beschichtung sicherzustellen. Durch die Kombination dieser Eigenschaften kann PDMS in Bewuchsschutzbeschichtungen einen effektiven Schutz gegen marinen Bewuchs bieten. Dafür gilt es jedoch ein paar Herausforderungen zu bewältigen. Hier ist vor allem die Empfindlichkeit gegenüber abrasiven Beanspruchungen zu nennen. Reine PDMS-Systeme sind zumeist anfällig für Kratzer und Abrieb, insbesondere wenn sie hohen Reibungskräften oder

<sup>21</sup>MAGIN, C., COOPER, S., BRENNAN, A. (2010), *Non-toxic antifouling strategies*. Materials Today - MATER TODAY. 13. 36-44. 10.1016/S1369-7021(10)70058-4.

aggressiven Reinigungsmethoden ausgesetzt sind. Eine Beschädigung der Beschichtung kann ihre Schutzwirkung beeinträchtigen und zu einem schnelleren Bewuchs führen. Obwohl PDMS eine gute Haftung auf vielen Substratmaterialien zeigt, kann es in einigen Fällen zu Haftungsproblemen kommen. Besonders bei porösen oder stark strukturierten Oberflächen kann die Haftung von PDMS-Beschichtungen eingeschränkt sein, was zu einer geringeren Wirksamkeit des Bewuchsschutzes führen kann. Durch gezielte Funktionalisierungen lassen sich hier Optimierungen herbeiführen. Im Rahmen des Projektes wurden daher auch Epoxy-modifizierte Polydimethylsiloxane und Polyurethan-modifiziertes Polydimethylsiloxan getestet. Epoxy- und PU-modifizierte Polydimethylsiloxane verfügen über verbesserte mechanischen Eigenschaften.

### 2.2.3.3 Optimierung

Im Mittelpunkt der Optimierungsarbeiten stand der Einsatz von Laborprüfungen zur quantitativen, validierenden und evaluierenden Bewertung der Optimierungsarbeiten. Zudem wurden Möglichkeiten zur Veränderung von Mengenverhältnissen, Konzentrationen und der Auswahl von Rohstoffen eingehend betrachtet, um ein umfassendes Verständnis für die Beschichtungsoptimierung zu erlangen.

Eine vielversprechende Optimierungsmaßnahme besteht in der präzisen Anpassung der Mengenverhältnisse der Komponenten in der Beschichtung. Durch eine systematische Variation dieser Verhältnisse können die gewünschten Eigenschaften der Beschichtung gezielt gesteuert und optimiert werden. Dies ermöglicht eine Feinabstimmung von Parametern wie Härte, Haftfestigkeit, Flexibilität und Oberflächenbeschaffenheit. Eine sorgfältige Analyse und systematische Variation der Mengenverhältnisse erlaubt es, das optimale Gleichgewicht zwischen den Komponenten zu finden und die gewünschten Leistungsmerkmale der Beschichtung zu maximieren.

Die sorgfältige Auswahl der Rohstoffe spielt ebenfalls eine entscheidende Rolle bei der Beschichtungsoptimierung. Hierbei werden verschiedene Faktoren wie chemische Kompatibilität, physikalische Eigenschaften und Verfügbarkeit berücksichtigt. Die Verwendung funktionaler Rohstoffe trägt maßgeblich zur Verbesserung der Beschichtungseigenschaften bei und gewährleistet eine hohe Qualität der Endprodukte. Durch die gezielte Auswahl und Kombination geeigneter Rohstoffe können beispielsweise eine verbesserte chemische Beständigkeit, effektivere Bewuchsschutzeigenschaften, eine bessere Wärmeleitfähigkeit, eine erhöhte Kratzfestigkeit oder eine bessere UV-Stabilität erzielt werden. Eine optimierte Auswahl und Kombination von Rohstoffen ermöglichen eine gezielte Unterstützung und Verstärkung der gewünschten Leistungsmerkmale der Beschichtung.

Um die Wirksamkeit der durchgeführten Optimierungsmaßnahmen zu belegen und die gewonnenen Erkenntnisse zu validieren, wurden umfangreiche Laborprüfungen durchgeführt. Diese Prüfungen dienen der präzisen Quantifizierung und Evaluierung der Optimierungsarbeiten. Hierbei werden unterschiedliche Analyseverfahren und Testmethoden angewendet, um die relevanten Beschichtungseigenschaften zu messen und zu bewerten. Rheologische Messungen ermöglichen beispielsweise die Bestimmung der Viskosität und Fließeigenschaften der Beschichtung. Haftfestigkeitstests erlauben die Bewertung der Adhäsion zwischen Beschichtung und Substrat. Oberflächenprofilanalysen geben Aufschluss über die Rauheit und Textur der Beschichtungs Oberfläche. Zudem können chemische Analysen genutzt werden, um die Zusammensetzung und Struktur der

Beschichtung zu untersuchen. Die gewonnenen Daten aus den Laborprüfungen dienen als Grundlage für eine fundierte Evaluierung der durchgeführten Optimierungsarbeiten und ermöglichen die Ableitung weiterer Verbesserungsstrategien.

Die experimentellen Formulierungen wurden in Labortests auf ihre potenziellen Anwendungseignung geprüft (vgl. **Tabelle 2**) und mit den Zielwerten abgeglichen. Für den einen bestmöglichen Foul-release Effekt lag der Zielkorridor zwischen 20 – 30 mN/m (vgl. freie Oberflächenenergie). Als zweiter maßgeblicher Faktor dient die Shore-Härte, die Rückschlüsse auf die mechanische Stabilität liefert. Die idealen Shore D- und Shore A-Messwerte für eine mechanisch stabile, aber dennoch flexible Beschichtung hängen von den spezifischen Anforderungen der Anwendung ab. Allgemein lässt sich sagen, dass für eine Balance zwischen Stabilität und Flexibilität bei einer Beschichtung idealerweise ein Shore D-Wert von 50-80 und ein Shore A-Wert von 40-70 angestrebt werden können. Diese Werte bieten eine gewisse Härte und Festigkeit, während gleichzeitig genügend Flexibilität für die Bewegung und Dehnung der Beschichtung gewährleistet wird. Da die Bewuchsschutzeigenschaften hier jedoch als höheres Gut eingestuft sind, auch weil es sich bei dem Laser um ein berührungsfreies Verfahren handelt, wurden auch abweichende Formulierungen weiter charakterisiert. Die **Tabelle 2** zeichnet ein Bild der Ergebnisse, die sich basierend auf unterschiedlichen Formulierungen ergeben haben. Die aussichtsreichsten Formulierungen wurden für die weitere Formulierungsarbeit mit den reflektierenden Pigmenten ausgewählt.

**Tabelle 2:** Ausgewählt Werte aus den Laborprüfungen zur Beschichtungsentwicklung am Beispiel von PDMS, EP-PDMS und PU-PDMS-Formulierungsansätzen. KW= Kontaktwinkel in °, die Shore A- und Shore D-Härte sind Maßeinheiten zur Bestimmung der Härte von Materialien, wobei Shore A für weiche Materialien und Shore D für harte Materialien verwendet wird. Eine höhere Shore A-Härte deutet auf eine weiche, flexiblere Beschichtung hin, während eine höhere Shore D-Härte auf eine härtere, weniger flexible Beschichtung hinweist. Diese Härteangaben ermöglichen Rückschlüsse auf die mechanischen Eigenschaften und die Eignung einer Beschichtung für bestimmte Anwendungen.

Beschichtung	KW-Medium		KW-Medium		KW-Medium		Freie Oberflächenenergie	Disperse	polar	Shore D	Shore A					
	Wasser	+/-	Ethylenglykol	+/-	Diiodmethan	+/-										
PDMS 1	107,34	1,37	84,18	1,19	68,08	1,4	23,91	0,69	23,08	0,64	0,1	0,06	4	0,3	25	1,5
PDMS 2	111,04	3,03	91,01	2,71	73,29	2,15	20,91	1,02	20,89	0,97	0,02	0,05	3	0,0	16	0,6
PDMS 3	109,66	2,74	84,71	2,28	69,23	1,26	23,38	0,11	23,32	0,1	0,06	0,01	2	0,6	22	0,0
PDMS 4	115,49	5,69	91,55	4,28	75,15	3,66	20,08	0,22	20,08	0,21	0	0	3	0,3	13	0,8
PDMS 5	122,93	5,71	100,89	7,44	76,65	4,66	19,5	0,55	19,16	0,46	0,34	0,09	2	0,3	8	0,8
EP-PDMS 1	103,08	6,05	72,95	1,88	62,68	1,39	27,8	0,7	27,06	0,51	0,74	0,19	81	1,0	97	1,3
EP-PDMS 2	97,1	3,64	73,96	0,61	51,9	0,6	33,22	0,57	33,18	0,54	0,04	0,04	77	1,5	96	0,6
EP-PDMS 3	97,36	4,65	73,34	0,49	50,2	0,55	34,17	0,37	34,15	0,36	0,02	0,02	68	0,6	97	0,6
PU-PDMS	105,46	2,73	93,01	1,3	66,52	3,54	22,19	7,56	22,17	7,31	0,02	0,26	7	0,3	63	0,6

PU-PDMS	116,78	1,93	91,76	6,98	65,83	4,88	25,38	0,45	25,15	0,41	0,23	0,03	16	1,5	64	2,3
PU-PDMS	122,17	1,79	80,22	8,41	62,44	3,57	28,59	4,02	27,57	3,4	1,02	0,62	10	0,6	52	1,7
PU-PDMS	111,67	1,66	94,3	1,81	74,59	2,9	19,16	3,3	19,14	3,17	0,03	0,13	11	0,9	56	0,60

## 2.2.4 AP8 -Beeinflussung der Beschichtung

### 2.2.4.1 Absorptionsverhalten

Die am IFAM im Rahmen des Arbeitspaketes 5.1 hergestellten Proben wurden dem LZH für Versuche zum Absorptions- und Reflexionsverhalten der unterschiedlichen Beschichtungen bei verschiedenen Wellenlängen zur Verfügung gestellt. Die Ergebnisse zeigten eine starke Abhängigkeit von der Beschichtungsfarbe, was bereits im Vorfeld zu erwarten war. Die Abhängigkeit zwischen der Beschichtungsfarbe und ihrer Reflexion und Absorption kann durch die Eigenschaften der Farbpigmente und ihrer Wechselwirkung mit Licht erklärt werden. Verschiedene Farben absorbieren und reflektieren Licht unterschiedlich, basierend auf den spezifischen optischen Eigenschaften der Pigmente. Im Allgemeinen kann gesagt werden, dass helle Farben tendenziell mehr Licht reflektieren als dunkle Farben. Dies liegt daran, dass helle Farben ein breites Spektrum des sichtbaren Lichts reflektieren, während dunkle Farben einen Großteil des Lichts absorbieren.

Die Reflexionseigenschaften einer Beschichtung werden durch den Grad der Lichtreflexion bestimmt, während die Absorptionseigenschaften angeben, wie viel Licht von der Beschichtung absorbiert wird. Helle Beschichtungen mit hoher Reflexion reflektieren einen Großteil des einfallenden Lichts, wodurch weniger Licht von der Beschichtung absorbiert wird. Dadurch haben helle Beschichtungen tendenziell eine geringere Wärmeabsorption und können daher kühler bleiben.

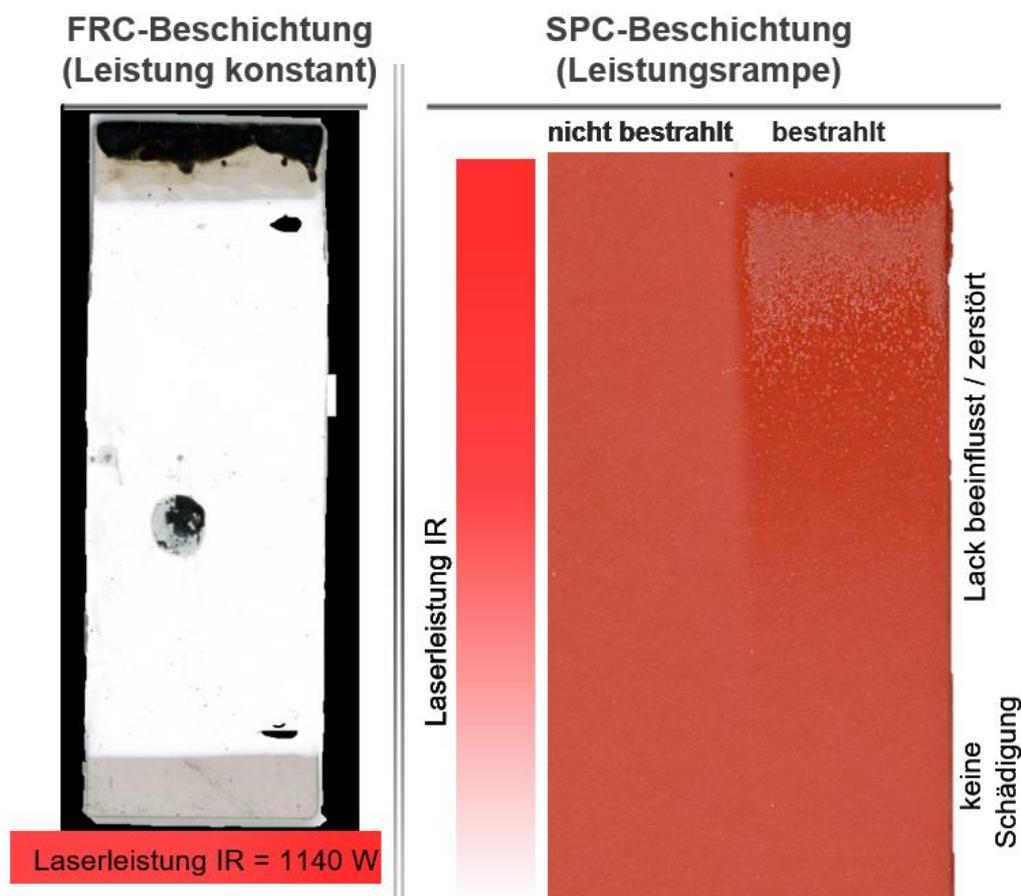
Dunkle Beschichtungen hingegen absorbieren mehr Licht, was zu einer höheren Wärmeabsorption führen kann. Daher können dunkle Beschichtungen bei Wärmeeinstrahlung stärker erwärmen.

Es ist jedoch wichtig anzumerken, dass die Reflexion und Absorption von Farben auch von anderen Faktoren wie der Zusammensetzung der Pigmente, der Oberflächenstruktur und der Beschichtungsdicke abhängen können. Darüber hinaus können spezielle Pigmente und Beschichtungstechnologien verwendet werden, um gezielt das Reflexions- und Absorptionsverhalten einer Beschichtung zu steuern und bestimmte Anforderungen zu erfüllen.

Im weiteren Projektverlauf wurden vom LZH weitere Messungen zum Absorptions- und Reflexionsverhalten durchgeführt, basierend auf zuvor bestrahlten / gealterten Beschichtungsproben. Die Ergebnisse zeigten, dass die vorherige Laserbestrahlung keinen signifikanten Einfluss auf das Reflexionsverhalten der FRC- und SPC-Systeme hatte. Bei der Grundierung (»Interprotect«) hingegen war eine Verringerung der Reflexion zu beobachten.

Nach erfolgreichem Aufbau des Lasersystems (IR und Blau) auf Helgoland durch Mitarbeitende des LZH und von Laserline konnten die Experimente direkt vor Ort mit zuvor definierten Prozessparametern durchgeführt werden. Ein wichtiger

Untersuchungsparameter war dabei die Veränderung der Beschichtung in Abhängigkeit von der Strahlungsintensität und der Bestrahlungsdauer. Die erzielten Ergebnisse zeigten eine klare Abhängigkeit von der Lackfarbe. Dabei wurden verschiedene Parametersets getestet. Insgesamt bestätigten sich die Erkenntnisse, die bereits aus den Reflexionsmessungen gewonnen wurden. Bei den hellen Beschichtungen lag die Zerstörungsschwelle deutlich höher aufgrund der geringeren Absorption (höhere Reflexion). Bei der Bestrahlung an der Luft traten bei den FRCs punktuelle Schädigungen an inhomogenen Fehlstellen (Applikationsartefakte) in der Beschichtung auf. Es wurde deutlich, dass eine hohe Verarbeitungsqualität entscheidend ist. Bei den SPCs war ein kontinuierlicher Übergang der Schädigung mit steigender Laserleistung zu beobachten. Der Lack zeigte Verfärbungen bis hin zur Bildung von Blasen (**Abbildung 22**).



**Abbildung 22:** Bestrahlungsversuche durch das LZH an FRC (links) und SPC-Systemen (rechts) an der Luft (IR-Laser).

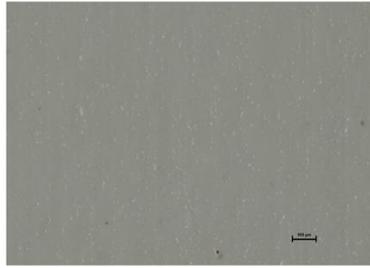
Die mikroskopischen Analysen der sechs untersuchten, kommerziellen Lacksysteme wurden von Wissenschaftler:innen des IFAM durchgeführt, um möglicherweise auch die nicht sofort ersichtlichen Schadbilder aufzudecken. Die Ergebnisse dieser Analysen sind in der folgenden Übersicht dargestellt. Als Referenzoberfläche dient eine unbehandelte Probe. Die anderen Proben wurden mit unterschiedlichen Laserleistungen bestrahlt. In der folgenden Übersicht werden illustrative Icons verwendet, um den Zustand der Proben zu kennzeichnen. Ein grüner Daumen steht für keine sichtbare Beeinflussung, ein gelber Daumen zur Seite zeigt einen leichten Austritt von Dämpfen an und ein roter Daumen nach unten kennzeichnet eine Beschädigung der Oberfläche.

### Lack-ID 1 (FRC)

Probe 46  
(unbestrahlt)



Probe 8  
(250 W)



Probe 22  
(420 W)



Probe 13  
(830 W)

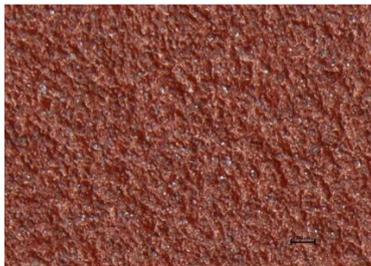


### Lack-ID 2 (SPC)

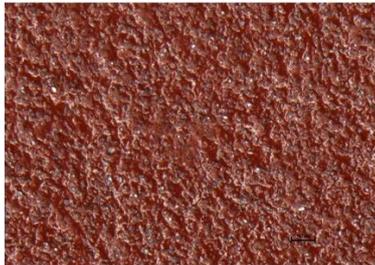
Probe 96  
(unbestrahlt)



Probe 69  
(44 W)

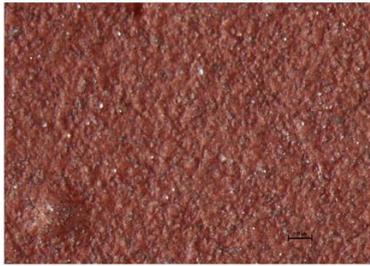


Probe 72  
(71 W)

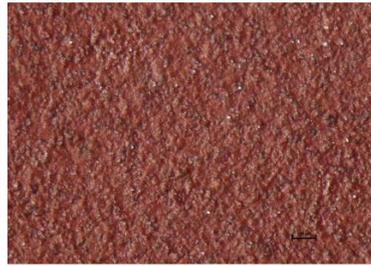


### Lack-ID 3 (SPC)

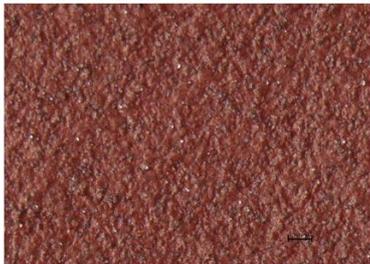
Probe 130  
(unbestrahlt)



Probe 107  
(34 W)

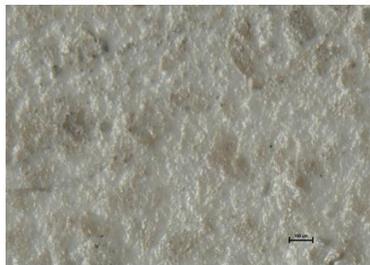


Probe 114  
(71 W)

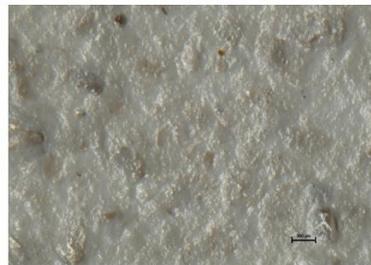


### Lack-ID 4 (Grundierung)

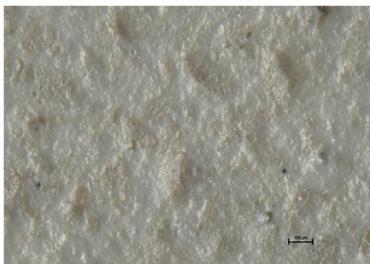
Probe 188  
(unbestrahlt)



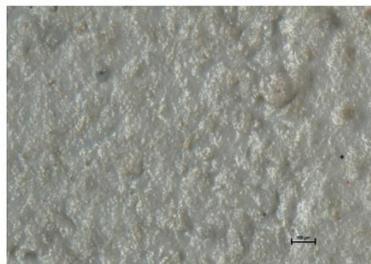
Probe 179  
(300 W)



Probe 176  
(386 W)

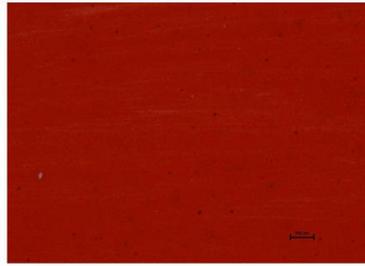
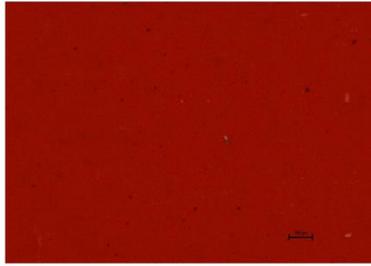


Probe 170  
(485 W)



### Lack-ID 5 (FRC)

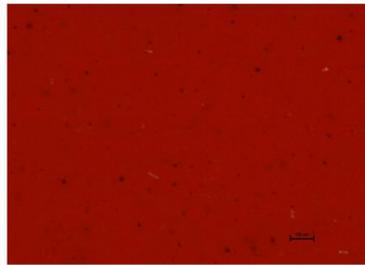
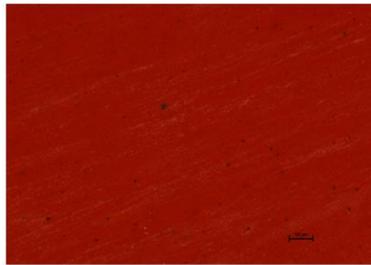
Probe 222  
(unbestrahlt)



Probe 200  
(25 W)



Probe 204  
(34 W)

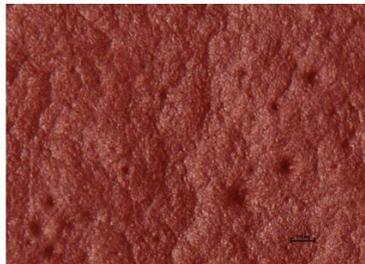


Probe 206  
(74 W)



### Lack-ID 6 (SPC)

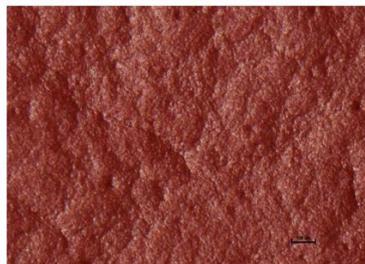
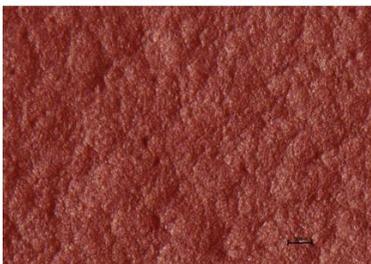
Probe 248  
(unbestrahlt)



Probe 231  
(25 W)



Probe 234  
(60 W)



Probe 237  
(100 W)



#### 2.2.4.2 Bestrahlungsversuche (an der Luft / im Wasser)

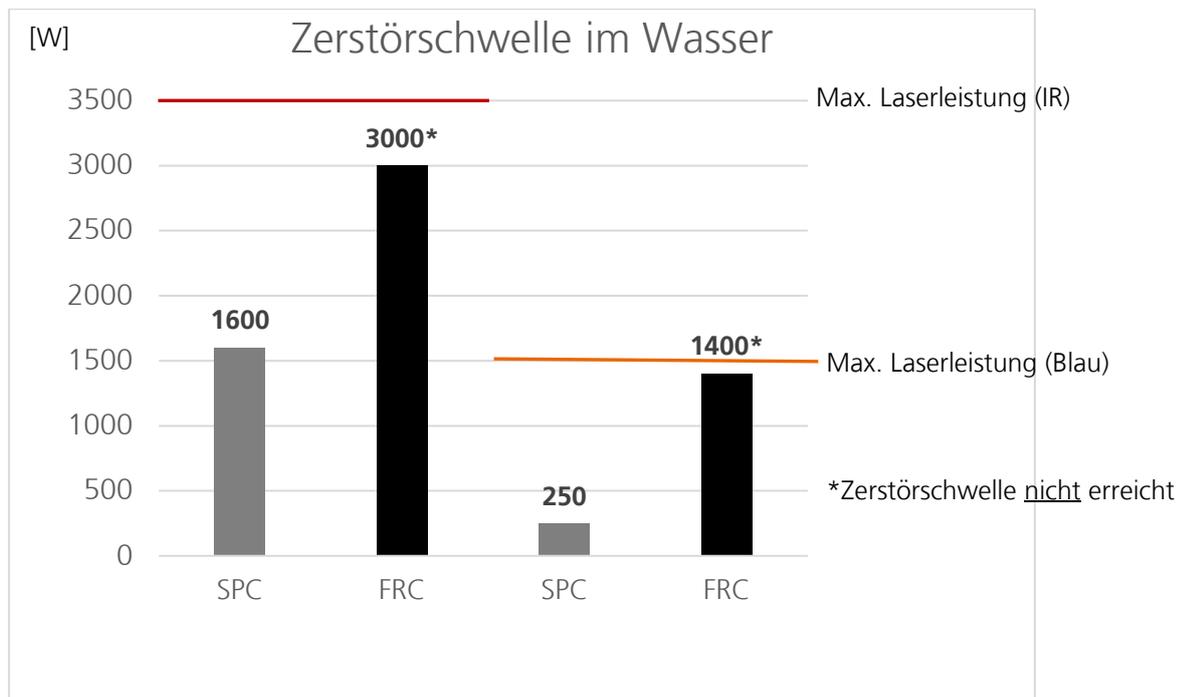
Als nächste Stufe zur Bestimmung der Zerstörungsschwellen wurden die Experimente unter Wasser durchgeführt, wobei die Proben in Helgoländer Meerwasser eingetaucht wurden. Trotz der Verwendung nahezu maximaler Laserleistungen von 3000 Watt (für den IR-Laser bis zu max. 3500 Watt) und 1300 Watt (für den blauen Laser bis zu max. 1400 Watt) konnte keine Zerstörungsschwelle für das weiße FRC (Fouling-release-Coating) im Wasser festgestellt werden (s. **Abbildung 23**). Bei dem SPC (Self-polishing-Coating) wurde eine Zerstörungsschwelle von 1600 Watt bei Bestrahlung mit dem IR-Laser beobachtet. Der blaue Laser führte bereits bei 250 Watt zur Zerstörung der Beschichtung. Diese Abweichungen sind auf die unterschiedlichen Absorptionskoeffizienten des Wassers in Abhängigkeit von den Laserwellenlängen zurückzuführen. Der Absorptionskoeffizient gibt an, wie stark ein Medium Licht oder Strahlung absorbiert. Er ist ein Maß für die Absorptionseigenschaft dieses Mediums in Abhängigkeit von der Wellenlänge des einfallenden Lichts / der Strahlung.

Der Absorptionskoeffizient wird normalerweise als eine positive reelle Zahl angegeben und hat die Einheit von Länge hoch minus eins (z. B.  $\text{cm}^{-1}$  oder  $\text{m}^{-1}$ ). Je höher der

Absorptionskoeffizient, desto stärker wird das Licht oder die Strahlung vom Medium absorbiert.

Ein hoher Absorptionskoeffizient bedeutet, dass das Material eine große Menge an Lichtenergie absorbiert und diese in andere Formen von Energie, wie Wärme, umwandelt. Ein niedriger Absorptionskoeffizient zeigt an, dass das Medium weniger Lichtenergie absorbiert und es eher durchlässt oder reflektiert.

Der Absorptionskoeffizient ist abhängig von den physikalischen und chemischen Eigenschaften des Mediums sowie von der Wellenlänge des einfallenden Lichts.



**Abbildung 23:** Zerstörschwelle im Wasser für ein SPC- und ein FRC-System in Abhängigkeit vom Lasertyp und der Laserleistung in Watt (Datenermittlung LZH).

Wie bereits in den Ergebnissen aus AP8.1 erwartet, zeigte sich auch bei den Bestrahlungsversuchen an der Luft und in Wasser eine deutliche Abhängigkeit von der Lackfarbe. Dies bestätigte die Bedeutung der Lackfarbe für die Lackformulierungen.

Nach Abschluss der Bestrahlungsversuche wurden die bestrahlten Proben von den Verbundpartnern zum IFAM zurückgeschickt. Dort wurden sie, wie zuvor die Proben zur Untersuchung des Absorptionsverhaltens, mithilfe verschiedener Oberflächenanalyseverfahren charakterisiert, um mögliche chemische Veränderungen infolge der Laserbestrahlung zu untersuchen.

Die beschichteten Objektträger boten in diesem Teilprojekt eine umfangreiche Grundlage für die Messung des Absorptionsverhaltens, der Reflexion, der Zerstörschwelle und der Alterung. Diese Messungen wurden jeweils in Abhängigkeit variabler Laserparameter wie Nennleistung, Arbeitsabstand und Vorschubgeschwindigkeit durchgeführt. Detaillierte Informationen zu diesen Versuchen und den daraus resultierenden Ergebnissen finden sich im Teilvorhaben des LZH mit dem Förderkennzeichen 03SX489A. Ein Großteil dieser Versuche wurde in enger Zusammenarbeit der beiden Institute auf Helgoland durchgeführt.

### 2.2.4.3 Alterungseinflüsse der Beschichtung

Im maritimen Einsatz ist eine Beschichtung auf Schiffsrümpfen und anderen maritimen Strukturen zahlreichen Alterungseinflüssen ausgesetzt. Diese Einflüsse können die Haltbarkeit und Funktionalität der Beschichtung beeinträchtigen. Zu den wichtigsten Alterungseinflüssen gehört die intensive UV-Strahlung in maritimen Umgebungen, die zu einer beschleunigten Alterung der Beschichtung führen kann. UV-Strahlung kann chemische Reaktionen in den Beschichtungsmaterialien auslösen, die zu einer Verringerung der mechanischen Eigenschaften, Verfärbungen und Oberflächendegradation führen können. Für Schiffsbeschichtungen, die sich im Bereich des Unterwasserschiffs befinden ist dieser Faktor jedoch nicht von entscheidender Bedeutung. Von größerer Relevanz ist hier schon die ständige Exposition gegenüber dem salzigen Meerwasser, dass zum Beispiel zu Salzeinlagerungen führen kann. Blasenbildung, Abplatzungen und/oder Rissbildung wären dann die Folge. Auch häufige, extreme Temperaturwechsel können negative Auswirkungen auf Beschichtungen herbeiführen. Auch hier können in der Folge Risse, Schrumpfungen und Delaminationen auftreten. Für die Haltbarkeit und Funktionalität einer Beschichtung stellen mechanische Belastungen eine große Herausforderung dar. Beschichtungen auf Schiffsrümpfen und maritimen Strukturen sind mechanischen Belastungen durch Wellen, Kollisionen, Reibung und Abrieb ausgesetzt. Diese Belastungen können zu Beschädigungen der Beschichtung führen und ihre Haftung und Schutzeigenschaften signifikant beeinträchtigen. Kommt es zu überdurchschnittlicher Alterung können daraus verschiedene Risiken resultieren. Eine alternde Beschichtung verliert ihre ursprünglichen Schutzeigenschaften gegen Korrosion, Feuchtigkeitseintritt und chemische Einwirkungen. Dies erhöht das Risiko von Korrosionsschäden an der darunterliegenden (Stahl-)Oberfläche. Auch die Haftungseigenschaften können in Folge beschleunigter Alterung beeinträchtigt werden. Delaminationen wäre die Folge und auch hier bestünde das hohe Risiko die Schutzwirkung nicht nur lokal, sondern kurz- bis mittelfristig großflächig zu verlieren. Auch ästhetische Beeinträchtigungen können eine Rolle spielen, nicht unbedingt in der Containerschifffahrt aber beispielsweise für die Kreuzfahrtreedereien. Hier kommt es in der Folge von ungewollter Alterung zu Verfärbungen, Abblätterungen, Blasenbildung und Rissen.

Die Auswirkungen der Alterung auf die Funktion und Haftung einer Beschichtung können schwerwiegend sein und die Lebensdauer und Effektivität der Beschichtung beeinträchtigen. Daher ist eine regelmäßige Inspektion, Wartung und Instandhaltung der Beschichtung erforderlich, um Alterungsprozesse zu erkennen und entsprechende Maßnahmen zur Reparatur oder Erneuerung zu ergreifen. Im Kontext dieses Projektes ist es daher von entscheidender Bedeutung für die Akzeptanz dieser Technologie, dass eine vorzeitige Alterung durch die Laserreinigung ausgeschlossen werden kann. Es war daher das Ziel mehrerer Versuchsreihen dieses Faktors zu analysieren, zum Beispiel in vergleichender Testung zu unbestrahlten Referenzproben.

### 2.2.5 Labormethoden zur Analyse der Alterung

Im Labor gibt es verschiedene gängige Prüfungen zur Überprüfung von Beschichtungen. Hier sind einige davon mit einer kurzen Erläuterung zur Durchführung, dem Ziel der Prüfung und den zugrunde liegenden Grundlagen der Ergebnisse:

- **Haftfestigkeitsprüfung (ISO 2409):** Diese Prüfung dient zur Beurteilung der Haftfestigkeit einer Beschichtung auf einem Substrat. Sie wird durchgeführt, indem ein kreuzförmiges Muster auf die beschichtete Oberfläche geritzt wird. Ein

Klebeband wird dann auf die Kerbe aufgebracht und abgezogen. Das Ziel ist es, die Haftung der Beschichtung auf das Substrat zu bewerten. Die Ergebnisse basieren auf dem Ausmaß der Beschichtungsablösung vom Substrat.

- Schichtdickenmessung (ISO 2808): Diese Prüfung ermöglicht die Messung der Dicke einer Beschichtung. Sie wird in der Regel mit einem Schichtdickenmessgerät durchgeführt. Das Ziel ist es, sicherzustellen, dass die Beschichtung die erforderliche Dicke aufweist. Die Ergebnisse basieren auf der gemessenen Dicke der Beschichtung im Vergleich zu den vorgegebenen Anforderungen.
- Gitterschnittprüfung (ISO 2409): Diese Prüfung wird verwendet, um die Adhäsion und die Haftfestigkeit von Beschichtungen zu bewerten. Ein Gitterschnittmuster wird auf die Beschichtung aufgebracht und dann mit einem Klebeband abgezogen. Das Ziel ist es, das Ausmaß der Beschichtungsablösung zu beurteilen. Die Ergebnisse basieren auf dem Grad der Beschichtungsablösung entlang der Schnittkanten.
- Salzsprühtest (ISO 9227): Dieser Test wird verwendet, um die Korrosionsbeständigkeit von Beschichtungen zu bewerten. Die Beschichtung wird einer kontinuierlichen Exposition gegenüber einer salzhaltigen Umgebung ausgesetzt. Das Ziel ist es, festzustellen, wie gut die Beschichtung Korrosion widersteht. Die Ergebnisse basieren auf dem Auftreten von Korrosionserscheinungen, wie z.B. Blasenbildung oder Rostbildung.
- Härteprüfung (ISO 1522): Diese Prüfung misst die Härte einer Beschichtung. Verschiedene Verfahren wie Stift- oder Ritzhärte können verwendet werden, um die Widerstandsfähigkeit der Beschichtung gegenüber mechanischer Beanspruchung zu bewerten. Das Ziel ist es, die Beständigkeit der Beschichtung gegen Kratzer und Abrieb zu beurteilen. Die Ergebnisse basieren auf der Eindringtiefe oder dem Auftreten von Rissen oder Kratzern auf der Beschichtungs Oberfläche.

## 2.2.6 Untersuchungen zur Freisetzung von anorganischen Verbindungen

Regulative und ökologische Aspekte hinsichtlich der Freisetzung von Bioziden durch die Reinigung von Self-polishing-Copolymers (SPC) spielen für eine spätere Verwertung eine entscheidende Rolle. Um hierzu bereits frühzeitig Erkenntnisse zu generieren, wurden Proben eines SPC-Systems in einem Volumen von 50 ml natürlichen Seewassers jeweils mit dem IR- und dem Blauen-Laser bestrahlt. Die 50 ml wurde nach der Bestrahlung in ein 50 ml Zentrifugenröhrchen überführt. Als Referenz dienten 50 ml natürliches Seewasser, welches im Südhafen der Insel Helgoland entnommen wurde und vorher nicht in den Kontakt mit den SPC-Proben kam. Die Versuche sollten Aufschluss darüber geben, ob die Laserreinigung zu einer Emission von Kupferbioziden aus der SPC-Beschichtung führt.

Als Nachweismethode wurde die Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma eingesetzt (ICPMS: Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry). Dabei handelt es sich um eine empfindliche Analysemethode für den Nachweis anorganischer Elemente. Zu Beginn der Messung wird ein hochfrequenter Strom ionisierten Argons induziert und die Proben auf 5000 °C bis 10000 °C erhitzt. Die hohe Temperatur führt dazu, dass die Atome ionisiert werden und ein Plasma entsteht. Im Anschluss findet eine Beschleunigung der im Plasma entstandenen Ionen statt, die in Richtung des Massenspektrometers erfolgt. Hier befindet sich der Messpunkt, an dem einzelne Elemente und Isotope ermittelt werden. Die Nachweisgrenze liegt bei dem überwiegenden Teil der bekannten Elemente im Bereich von ng/l bzw. sub ng/l. Feinste Unterschiede sind demnach bereits nachweisbar. Die Methode ist damit prädestiniert für die Spurenanalyse von

Schwermetallen und eignet sich daher hervorragend für den Nachweis des Kupfergehaltes in den Proben.

Die Analyse ergab für die Seewasser-Referenz einen Wert von unter 0,02 mg/kg. Das Prozesswasser aus der Bestrahlung des SPC-Systems mit dem Blauen Laser lieferte einen Wert von 0,03 mg/kg. Im Vergleich dazu lag der Wert für die Bestrahlung mit dem IR-Laser bei 0,38 mg/kg. Die Werte zeigen eine deutliche Differenz, um mehr als den Faktor 10, zwischen den Strahlquellen. Unterschiedliche Laserleistungen könnten ursächlich für diese Diskrepanz sein. So lag diese beim IR-Laser bei 900 W und beim Blauen-Laser bei 250 W. Diese Prozessparameter orientierten sich an der zuvor ermittelten Zerstörungsschwelle. Geht man jedoch weiter ins Detail und betrachtet die Absorption des IR-Strahls in Wasser und die höhere Durchdringung des Blauen-Lasers, so relativiert sich dies. Die Berechnung der Flächenleistung vor dem Wassereintritt und unter Wasser verdeutlicht diesen Umstand. Beträgt die Leistung des IR-Lasers vor Wassereintritt noch 1,19 [W/mm<sup>2</sup>] sind es unter Wasser bei einem eingestellten Arbeitsabstand (Distanz zwischen Bearbeitungskopf und Beschichtungsfläche) von 2 cm nur noch 0,57 [W/mm<sup>2</sup>]. Beim Blauen-Laser hingegen bleibt der Wert vor und nach dem Wassereintritt nahezu identisch bei 0,33 [W/mm<sup>2</sup>]. Die eigentliche Differenz in der Flächenleistung zwischen den beiden Lasern beträgt somit an diesem Punkt lediglich 0,24 [W/mm<sup>2</sup>]. Als weiterer Faktor kommt jedoch noch die wellenlängenabhängige Reflexion/Absorption der SPC-Beschichtung zum Tragen. Die Projektergebnisse der Reflexions- und Absorptionsmessungen zeigen, dass die SPC-Systeme im blauen Spektralbereich deutlich mehr Strahlung absorbieren als im infraroten Bereich. Zieht man folglich den wellenlängenspezifischen Anteil der reflektierten Strahlung ab, so sind die Werte zwischen IR- und Blauem-Laser annähernd vergleichbar. Der IR-Laser liefert einen Wert von 0,34 [W/mm<sup>2</sup>] im Vergleich zum Blauen-Laser mit 0,31 [W/mm<sup>2</sup>]. Es scheint daher, auf Basis dieser Daten, zunächst erst einmal unwahrscheinlich, dass der Effekt rein durch die Art der Strahlquelle zu erklären ist. Grundsätzlich ist jedoch hervorzuheben, dass gerade die Bestrahlung mit dem Blauen-Laser eine Kontamination des Prozesswassers mit Kupfer vermeidet. Der gemessene Wert ist nahezu identisch mit dem Vergleichswert der unbehandelten Kontrolle. Demnach erfüllt das Verfahren, nach derzeitigem Stand, einen wichtigen Aspekt für eine spätere, regulatorische Zulassung. Vor allem scheint es damit deutlich umweltschonender zu sein als bisherige, invasive Reinigungstechniken mit Bürsten und Hochdruckwasserstrahl.

## 2.2.7 AP9 – Parameterstudien

### 2.2.7.1 Einfluss der Laserparameter (IR)

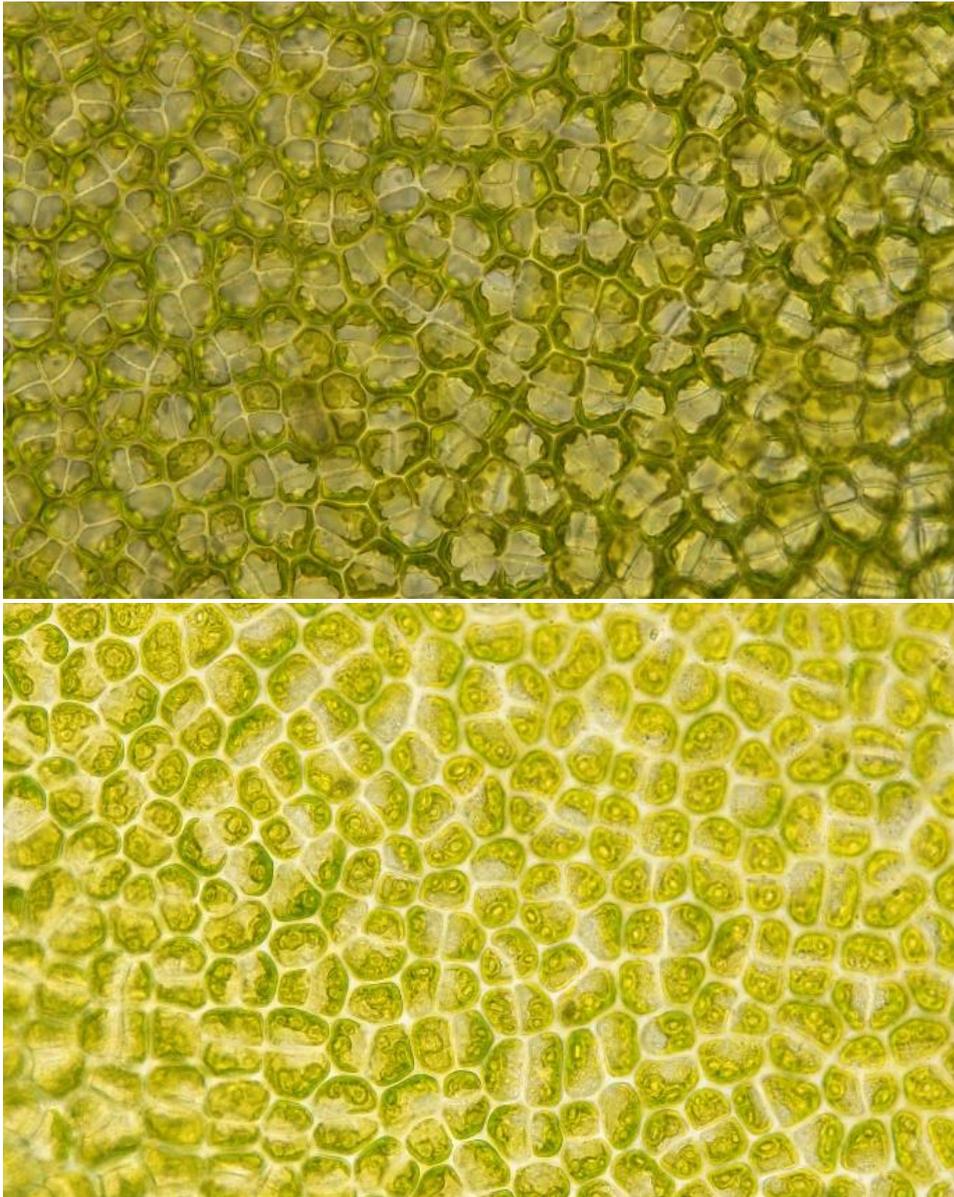
### 2.2.7.2 Einfluss der Laserparameter (Blauer Laser)

Die Ergebnisse dieser Arbeitspakete stehen in direkter Verbindung zum Arbeitspaket 10 »Biologische Schädigung«. Das Hauptziel des APs bestand darin, die Feldtests zu nutzen, um umfangreiche Erkenntnisse über die Reaktion der verschiedenen Beschichtungssysteme und des marinen Bewuchses auf die Laserbestrahlung zu gewinnen. Es ging darum, die Prozessparameter für die jeweilige Strahlquelle zu optimieren und den Grad der biologischen Schädigung in Abhängigkeit von diesen Parametern für unterschiedliche Arten der marinen Fouling-Gemeinschaft zu bewerten. Es konnte nachgewiesen werden, dass die Laserbestrahlung einen letalen Einfluss auf verschiedene Taxa hatte. Hierfür wurden unterschiedliche Versuchsszenarien etabliert, die auch eine nachfolgende Auslagerung der Proben nach der Laserbestrahlung ermöglichten. Selbst wenn keine sofortige

sichtbare Zersetzung des biologischen Materials beobachtet wurde, konnte geprüft werden, ob und wann ein solcher Zerfall eintritt. Zudem wurde die Regenerationsfähigkeit der Organismen untersucht. Es zeigte sich nach direkter Bestrahlung vor allem eine optische Farbveränderung des Biofilms und höherer Algen, die bereits in den Vorversuchen festgestellt worden waren. Während der Biofilm von einer dunkelgrünen/bräunlichen Farbgebung zu einer helleren grünen Farbe überging, verloren Rotalgen ihr ursprüngliches Erscheinungsbild und nahmen nach der Laserbestrahlung eine bräunlich/grüne Farbe an (s. Abb. 22). Rotalgen, die nach der Laserbestrahlung erneut im Hafen der Insel ausgelagert wurden, konnten innerhalb von zwei Wochen ihre ursprüngliche Farbe nicht wiedererlangen und zeigten kein signifikantes Wachstum. Stattdessen kam es in diesem Zeitraum zu einer vollständigen Gewebeauflösung. Eine ähnliche Gewebeauflösung wurde auch bei der Grünalge *Ulva lactuca* beobachtet. Unter dem Mikroskop konnten direkte Schädigungen der Zellen bei *Ulva* festgestellt werden (s. Abb. 23). Die nicht bestrahlten Referenzproben blieben auch nach 14 Tagen gemeinsamer Auslagerung vital. Diese Ergebnisse wurden sowohl mit dem IR- als auch mit dem Blaulaser erzielt. Demnach ist bei den untersuchten höheren Algen von einer zerstörerischen Wirkung der Laserstrahlung auszugehen. In weiteren Experimenten konnten diese Ergebnisse reproduziert werden.



**Abbildung 24:** Lichtmikroskopische Detailaufnahme einer Rotalge *Ceramium virgatum* in 10x Vergrößerung vor (links) und nach der Bestrahlung mit dem Blauen-Laser (rechts). Es ist eine deutliche Farbveränderung von rot ins bräunliche zu erkennen.

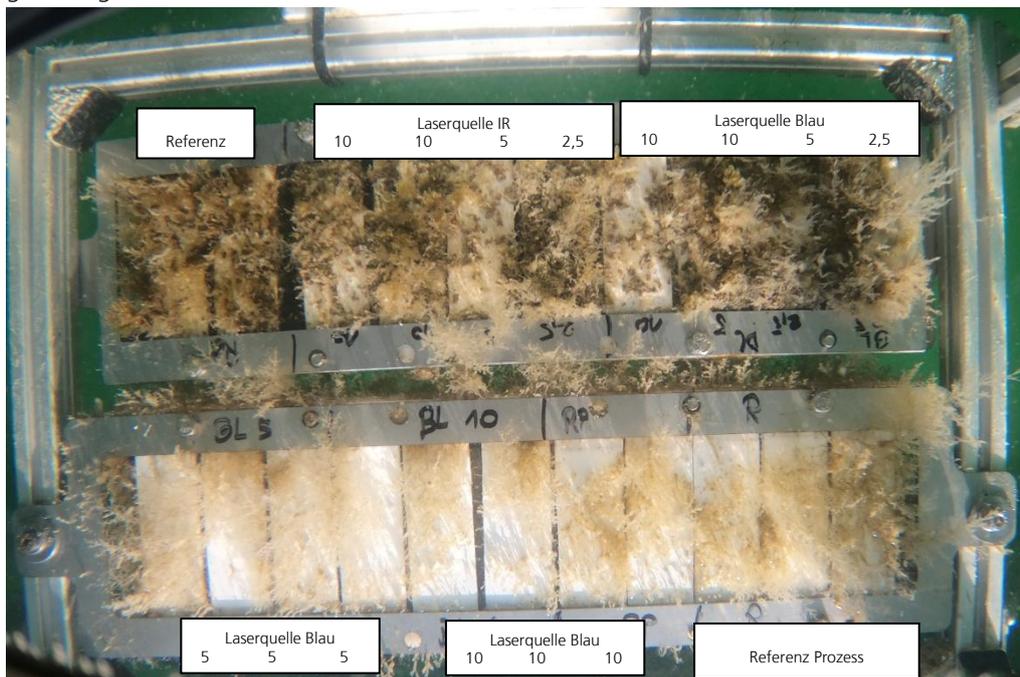


**Abbildung 25:** Lichtmikroskopische Detailaufnahme einer Grünalge *Ulva lactuca* in 60x Vergrößerung vor (links) und nach der Bestrahlung mit dem Infrarot-Laser (rechts). Erkennbar ist eine Schädigung der Chloroplasten.

Ein wertvolles Instrument zur detaillierten Bestimmung des laserbasierten Reinigungserfolges stellte der Einsatz eines eigens vom LZH konzipierten Unterwasser-Kamerasystems mit passenden Probenhalterungen dar, dass am IFAM-Prüfstand für statische Bewuchstest zum Einsatz kam. Dieser Aufbau ermöglichte es, die Entwicklungen nach der Laserreinigung kontinuierlich zu beobachten, die zuvor einer weiteren Untersuchung entzogen waren. Das bisherige Intervall von 14 Tagen zwischen der Bestrahlung und der erneuten Inspektion wurde nun durch das System engmaschig geschlossen. Durch die Auswertung der Aufnahmen waren neue, detaillierte Erkenntnisse über die Auswirkungen der Laserbestrahlung auf das Wachstum, die Regenerationsfähigkeit und die Ablösung des Biofouling in natürlicher Umgebung möglich. Die automatisch aufgenommenen Fotos lieferten zunächst eine große Datenmenge, die nach der Bearbeitung zahlreiche neue Auswertungsmöglichkeiten boten. Eine Unterwasseraufnahme des Systems ist

beispielhaft in **Abbildung 26** dargestellt und zeigt die erreichte Aufnahmequalität nach Optimierungen am System und den Auslagerungsparametern. Das System wurde seit der Kalenderwoche 16 / 2021 eingesetzt.

Die Einführung des Unterwasser-Kamerasystems ermöglichte es den Projektpartnern, die Veränderungen des bewachsenen Probenmaterials unmittelbar nach der Laserbehandlung zu beobachten. Dieser fortlaufende Überwachungsprozess eröffnete neue Einsichten in den Reinigungserfolg sowie das Verhalten des Biofoulings im Zeitverlauf. Durch die kontinuierliche Dokumentation und Auswertung der Aufnahmen konnten wir den Einfluss der Laserbestrahlung auf das Wachstum und die Regeneration der Organismen sowie die Wirksamkeit der Ablösung des Biofoulings in einer natürlichen Umgebung untersuchen. Die gewonnenen Erkenntnisse aus diesem verbesserten Beobachtungsverfahren sind in die Weiterentwicklung und Optimierung laserbasierter Reinigungstechnologien eingeflossen.



**Abbildung 26:** Unterwasseraufnahme, aufgenommen von dem ausgebrachten Kamerasystem mit einer GoPro Hero 8. Die Kamera dokumentierte in festgelegten Intervallen den Bewuchs auf den zuvor bestrahlten FRC-Proben. Sie wurden mit unterschiedlichen Laserparametern (Vorschubgeschwindigkeit in mm/s) und Strahlquellen bearbeitet. IR=Infrarot-Laser; Bl= Blauer Laser; Ref= unbestrahlte Referenz im Wasserbecken ohne Prozessablauf; Referenz+Prozess= Versuchsablauf mit ausgeschaltetem Laser.

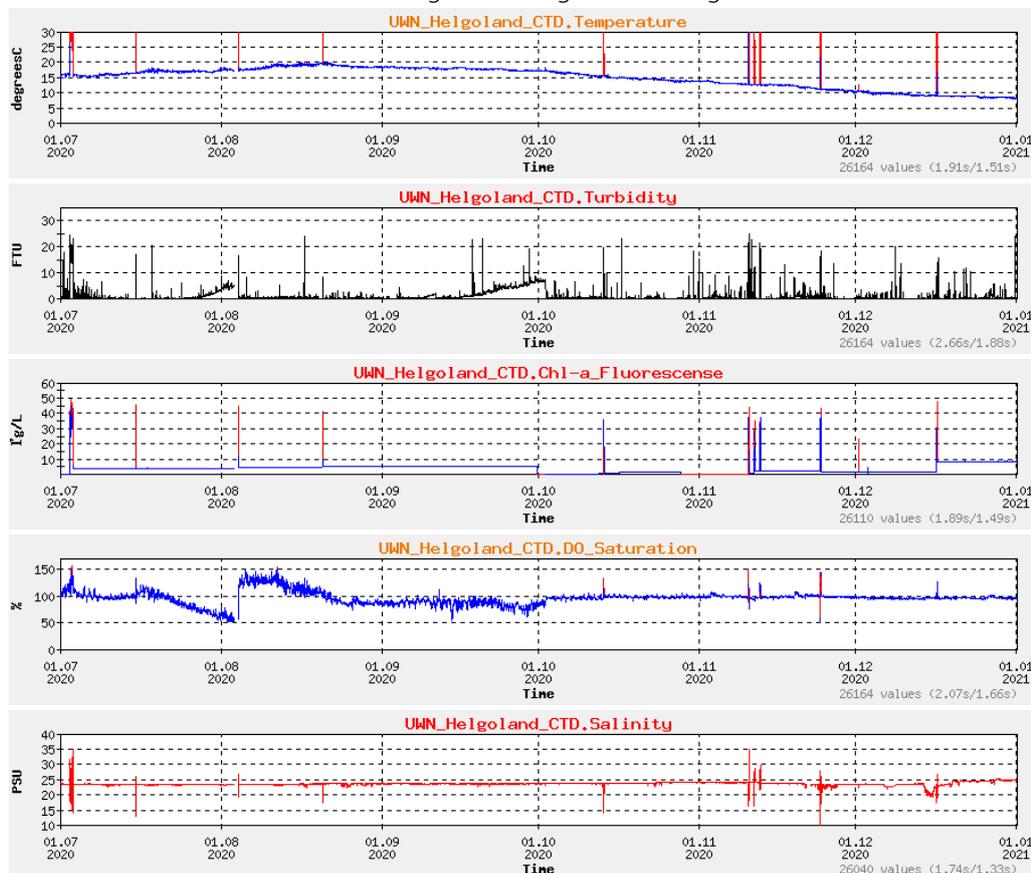
### 2.2.7.3 Wasseranalyse

Im Rahmen der Versuche wurden Messinstrumente zur Bestimmung potenziell prozessbeeinflussender Wasserparameter durch das LZH beschafft, wodurch eine regelmäßige Überwachung des Prozesswassers ermöglicht wurde. Es wurden Temperatur, Salinität, Leitfähigkeit, Trübung und pH-Wert des Wassers durch Mitarbeitende des LZH gemessen. Alle Messdaten wurden in die gesicherte »FouLas«- Cloud übertragen, sodass sie jederzeit zur Ergebnisauswertung herangezogen werden konnten.

Für die Versuche wurde hauptsächlich Helgoländer Seewasser aus dem Bereich des Südhafens verwendet, das jeweils zu jedem Termin frisch entnommen wurde. Ein geringer Teil der Versuche basierte auf künstlichem Seewasser, das am IFAM hergestellt und sterilisiert wurde, um mikrobiologische Tests durchzuführen. Der Salzgehalt des

künstlichen Seewassers wurde an den des natürlichen Seewassers der Insel angepasst. Mit einem Handgerät wurden bei jedem Termin die Wassertemperatur [°C], die Salinität [psu], die Leitfähigkeit [S/m], die Trübung [NTU] und der pH-Wert des Wassers gemessen und protokolliert. Die Messwerte wiesen keine signifikanten Abweichungen auf, mit Ausnahme der Temperatur, die sich jedoch naturgemäß der Raumtemperatur im Versuchsraum annähert.

Neben den selbst gewonnenen Messdaten hat das IFAM auf Langzeitmessdaten einer Unterwassermessstation des Alfred-Wegener-Instituts (AWI) und des Helmholtz-Zentrums Geesthacht (HZG) Zugriff erhalten. Die in **Abbildung 27** dargestellten Verläufe zeigen den Berichtszeitraum vom 01.07.2020 bis 31.12.2020 für die Parameter Wassertemperatur in °C, Trübung in FTU (Formazine Turbidity Unit), Chlorophyll a in µg/l, Sauerstoffgehalt in % und Salinität in psu. Diese Werte können zur Validierung der eigenen Messdaten herangezogen werden und lieferten zudem wichtige Indikatorwerte (Chlorophyll a, Formazin Turbidity Unit) für die Einordnung des Bewuchsdruckes. Dank der vorliegenden Messdaten war es möglich, das Prozesswasser detaillierter zu charakterisieren, als es die ausschließliche Verwendung des Handgerätes ermöglicht hätte.



**Abbildung 27:** Wassertemperatur in °C, Trübung in FTU [Formazin Turbidity Unit], Chlorophyll a in µg/l, Sauerstoffgehalt in % und Salinität in psu vom 01.07.2020 – 31.12.2021. COSYNA data web portal (CODM): Underwaternode Helgoland provided by AWI and HZG.

## 2.2.8 AP10 - Biologische Schädigung und Aktivität

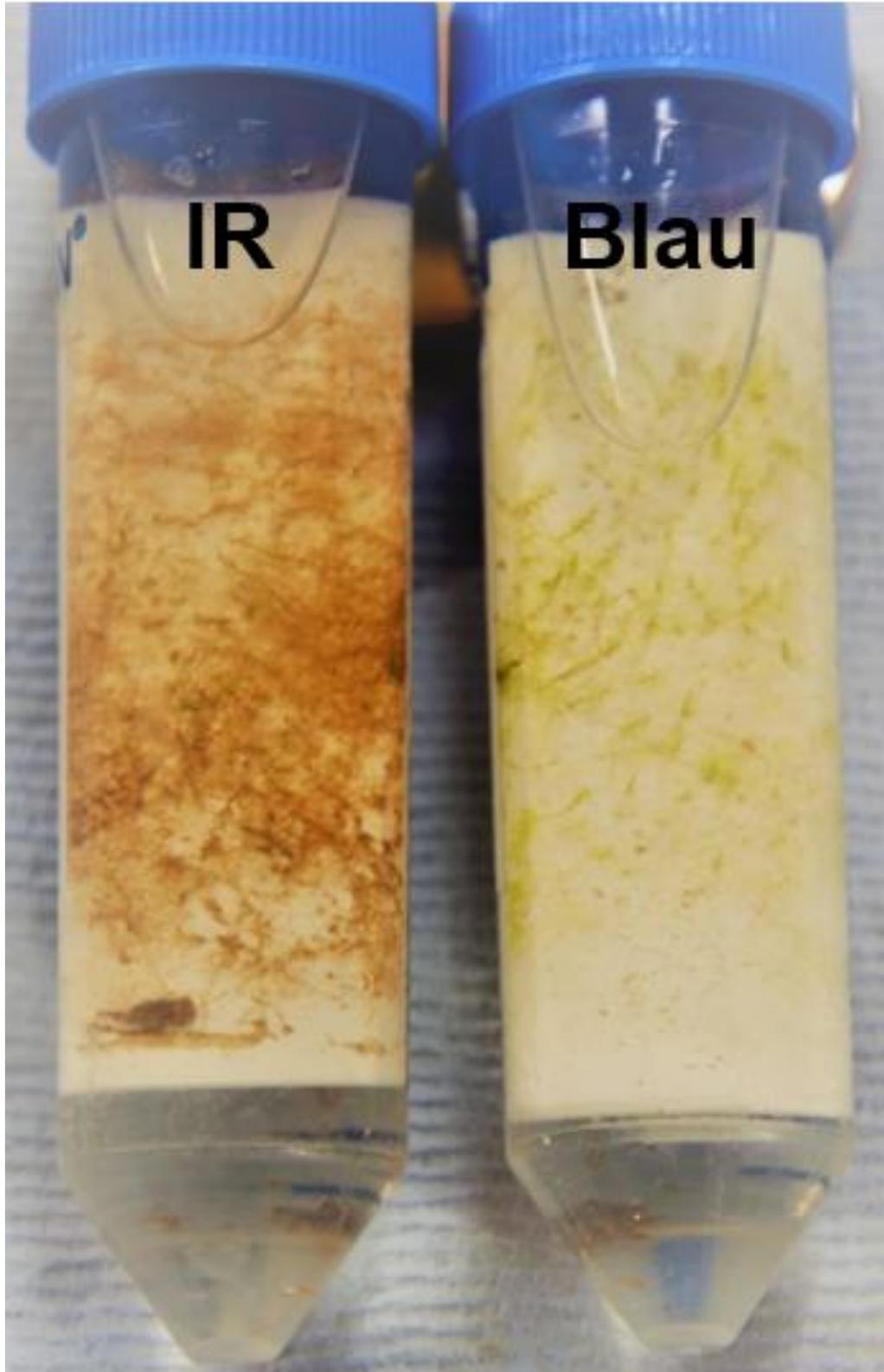
Das folgende Kapitel beinhaltet die Ergebnisse einer umfangreichen Untersuchung zur Schadwirkung von Laserstrahlung unter Wasser auf den marinen Bewuchs. Das Ziel dieses APs war es, das Potenzial der Laserreinigungstechnologie für den Einsatz in marinen Umgebungen zu bewerten und mögliche Auswirkungen auf den Bewuchs zu analysieren. Zunächst wurde mit dem Demonstrator auf Helgoland eine geeignete Laborumgebung geschaffen, die die Bedingungen in marinen Ökosystemen nachahmt (Versuche in natürlichem Meerwasser). Hierbei wurde ein Wasserbecken verwendet, das mit Helgoländer Seewasser gefüllt wurden, um eine realistische Testumgebung zu schaffen und Artefakte bei der Interpretation der Daten zu vermeiden (z.B. durch eine Vorschädigung des Bewuchses). Anschließend wurden verschiedene Laserparameter wie Leistung, Pulsdauer und Wellenlänge systematisch variiert, um den Einfluss auf den Bewuchs zu untersuchen.

Die Bewertung der Schadwirkung erfolgte durch eine Kombination aus visueller Inspektion, Bildanalyse und quantitativen Messungen. Dabei wurden der Grad des Bewuchses, die Überlebensrate der Organismen und eventuelle strukturelle Schäden untersucht. Zudem wurden die physikalischen und chemischen Parameter des Wassers regelmäßig überwacht, um potenzielle Einflüsse auf die Ergebnisse zu erfassen (vgl. AP9).

Ein wichtiger Aspekt dieser Studie war es, die Optimierungspotenziale der Laserreinigungstechnologie zu identifizieren. Dazu wurden verschiedene Laserparameter getestet, um die bestmögliche Reinigungsleistung zu erzielen. Die gewonnenen Erkenntnisse haben dazu beigetragen, zukünftige Entwicklungen in der Laserreinigungstechnologie voranzutreiben und den Einsatz unterwasserrelevanter Anwendungen zu optimieren.

Bereits die ersten Bestrahlungsversuche lieferten wichtige, differenzierte Erkenntnisse für beide Laserstrahlquellen. Proben die mit dem IR-Laser bei 3200W, 10 mm/s und 7,3 mm Linienbreite bestrahlt wurden, zeigten makroskopisch keinen sichtbaren Unterschied nach der Bestrahlung. Beim Einsatz des Blauen-Lasers mit 1400W, 10 mm/s und 7,3 mm Linienbreite verfärbte sich Bewuchs hingegen von braun nach grün (s. **Abbildung 28**).

Im Folgenden folgen weitere Techniken zur Identifikation der biologischen Schädigung sowie Resultate aus dem Einsatz dieser Methoden.



**Abbildung 28:** Bewuchs auf FRC-Proben nach Laserbehandlung mit dem IR (links) und dem Blauen Laser (rechts).

Die Fluoreszenzmikroskopie ist eine leistungsstarke Methode zur Visualisierung von Mikroorganismen, einschließlich Bakterien, unter Verwendung von Fluoreszenzfarbstoffen. Eine besondere Anwendung der Fluoreszenzmikroskopie bei der Untersuchung von Bakterien ist die sogenannte Vitalfärbung.

Die Vitalfärbung, auch bekannt als Lebend-Tot-Färbung, ist eine weit verbreitete Methode in der Mikrobiologie, um lebende Zellen von abgestorbenen oder inaktiven Zellen zu unterscheiden. Diese Färbetechnik ermöglicht es, die Vitalität und metabolische Aktivität von Mikroorganismen zu bewerten und wichtige Informationen über ihr Verhalten, ihre Funktionen und ihr Überleben zu gewinnen.

Die Vitalfärbung basiert auf der Fähigkeit spezifischer Farbstoffe, selektiv in lebende Zellen einzudringen und dort spezifische Reaktionen mit zellulären Komponenten durchzuführen. Der genaue Mechanismus der Vitalfärbung kann je nach verwendetem Farbstoff variieren. Es gibt jedoch einige allgemeine Prinzipien, die bei vielen Vitalfärbemethoden Anwendung finden. Dazu gehört die Fähigkeit des Farbstoffs, in lebende Zellen einzudringen und mit zellulären Komponenten zu interagieren, wie z.B. Enzymen, Proteinen oder Nukleinsäuren. Dies führt in der Folge zu Farbänderungen oder Fluoreszenz in den lebenden Zellen, während abgestorbene oder inaktive Zellen diese Reaktionen nicht aufweisen.

Als Methode wird sie in verschiedenen Bereichen der Mikrobiologie angewandt. Ein häufiger Einsatzbereich ist die Untersuchung der Zellvitalität, um die Wirksamkeit von antimikrobiellen Substanzen oder die Wirkung von Umweltbedingungen auf das Überleben von Mikroorganismen zu bewerten. Die Vitalfärbung ermöglicht auch die Unterscheidung zwischen lebenden und toten Zellen in Populationen und die Analyse des Zellzyklus oder des Stoffwechsels von Mikroorganismen. In dem projektspezifischen Fall sollte der Einfluss unterschiedlicher Laserparameter auf die Zellen betrachtet werden, um Rückschlüsse auf das letale Schädigungspotenzial ziehen zu können.

Für die Vitalfärbung werden verschiedene Farbstoffe eingesetzt. Ein häufig verwendeter Farbstoff ist das Fluorescein-Diacetat (FDA). FDA ist ein nichtfluoreszierender Farbstoff, der in lebenden Bakterien durch intrazelluläre Enzyme in ein fluoreszierendes Produkt umgewandelt wird. Es dringt in lebende Zellen ein und wird dort hydrolysiert, wodurch es zu grünem Fluoreszenzsignal kommt. Ein weiterer beliebter Farbstoff ist das Propidiumiodid (PI), das die DNA von abgestorbenen Zellen bindet, indem es die durchlässige Zellmembran durchdringt. Dadurch kommt es zu einer Rotfärbung der toten Bakterien. Andere Farbstoffe wie Calcein AM, Ethidiumbromid, Acridinorange und Janusgrün werden ebenfalls häufig in der Vitalfärbung eingesetzt. Die Wahl des richtigen Farbstoffs hängt von den Eigenschaften der zu untersuchenden Zellen und den angestrebten Zielen ab. Darüber hinaus können Faktoren wie die Konzentration des Farbstoffs, die Inkubationszeit und die Umgebungsbedingungen (z.B. Eigenfluoreszenz des Oberflächenmaterials) die Ergebnisse der Vitalfärbung beeinflussen. Es ist wichtig, diese Faktoren sorgfältig zu optimieren, um zuverlässige und reproduzierbare Ergebnisse zu erzielen.

Die Vorgehensweise bei der Lebend-Tot-Färbung von Bakterien mit Fluoreszenzmikroskopie umfasst in der Regel folgende Schritte:

Zunächst erfolgt die Vorbereitung der Fluoreszenzfarbstoffe, wie beispielsweise FDA und PI, gemäß den Herstelleranweisungen. Hierbei werden in der Regel Arbeitslösungen mit geeigneten Konzentrationen hergestellt.

Im nächsten Schritt werden die Bakterien inkubiert, indem sie mit den vorbereiteten Fluoreszenzfarbstoffen in Kontakt gebracht werden. Die Dauer der Inkubation variiert

abhängig von den zu untersuchenden Bakterien und den gewünschten Effekten, liegt jedoch in der Regel zwischen 10 und 30 Minuten.

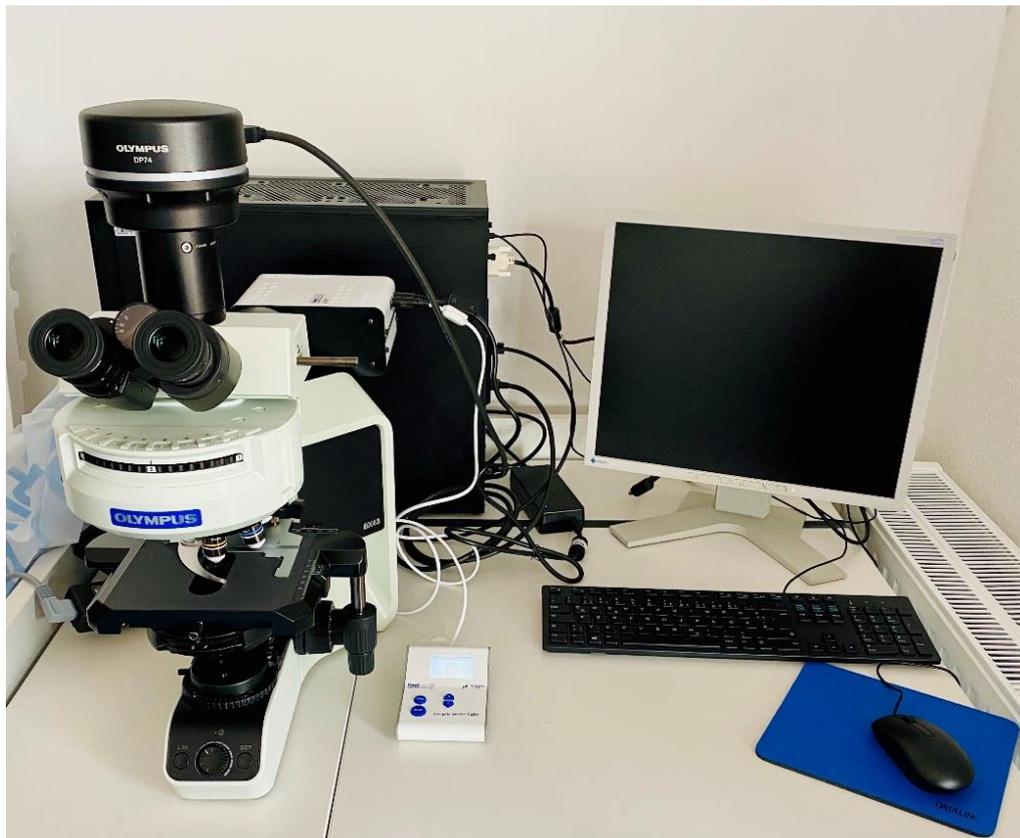
Nach der Inkubation werden die Bakterien gewaschen, um überschüssige Farbstoffe zu entfernen und die Hintergrundfluoreszenz zu reduzieren. Dies erfolgt typischerweise durch Zentrifugation der bakteriellen Probe und anschließendes Entfernen des Überstandes. Anschließend wird die bakterielle Probe für die Mikroskopie vorbereitet. Hierzu wird sie entweder auf einen Objektträger oder in eine spezielle Kammer übertragen und mit einem Deckglas abgedeckt, um eine geeignete Präparation für die Fluoreszenzmikroskopie sicherzustellen.

Die eigentliche mikroskopische Analyse erfolgt unter einem Fluoreszenzmikroskop.

Durch die Kombination von Fluoreszenzmikroskopie mit anderen Analysetechniken (z.B. Anreicherungskulturen, Proliferationstests) können zusätzliche Informationen über den Zustand der Zellen gewonnen werden.

Die Lebend-Tot-Färbung mit Fluoreszenzmikroskopie stellt somit eine wertvolle Methode dar, um Einblicke in die Mikrobiologie zu gewinnen und die dynamischen Prozesse in Bakterienpopulationen zu erforschen. Sie ermöglicht eine detaillierte Untersuchung der Interaktionen zwischen Bakterien und den eingesetzten Laserparametern.

Mit der Inbetriebnahme des Fluoreszenzmikroskops war es im Projekt möglich derartige Analysen durchzuführen, um Rückschlüsse zur biologischen Schädigung bei mikrobiellen Biofilmen ziehen zu können oder durch rein optische Verfahren zu (Lichtmikroskopie) (s. **Abbildung 29**).

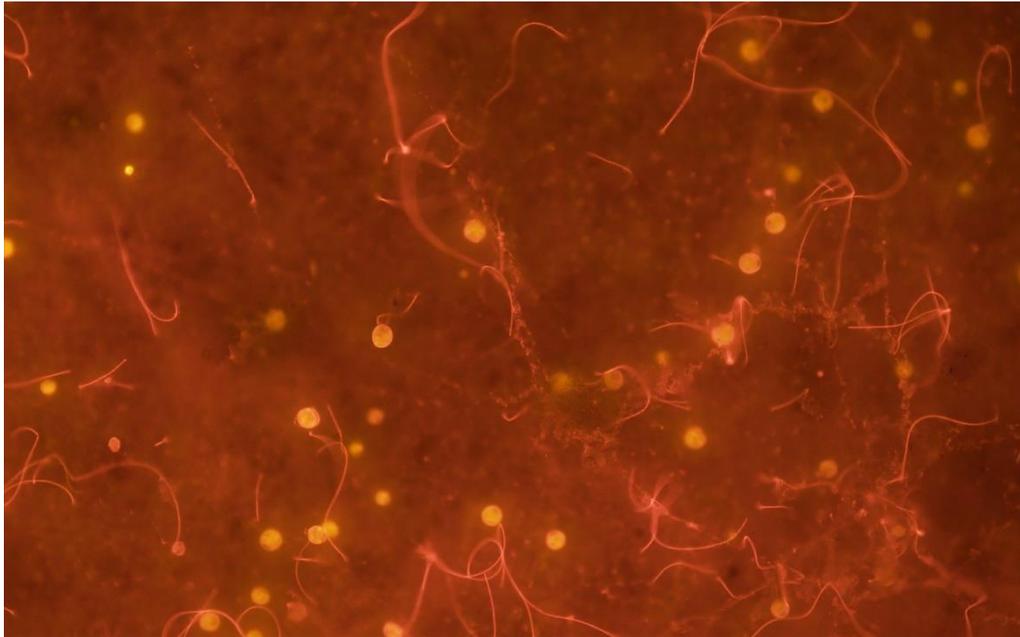


**Abbildung 29:** Fluoreszenzmikroskop zur Bestimmung der biologischen Schädigung am Standort Helgoland.



**Abbildung 30:** Fluoreszenzmikroskopische Aufnahme von marinem Fouling auf einer FRC-Probe in 10facher Vergrößerung.

Mit der Durchführung von Fluoreszenzmessungen konnten die Eigenschaften der untersuchten Proben im Detail analysiert werden. Dabei zeigte sich, dass die Beschichtungsproben eine signifikante Eigenfluoreszenz aufwiesen. Die Eigenfluoreszenz entsteht durch ein Phänomen, das als intrinsische Fluoreszenz bezeichnet wird. Bei der intrinsischen Fluoreszenz absorbieren die Moleküle einer Probe Lichtenergie und geben sie anschließend in Form von Fluoreszenzlicht wieder ab. Dieser Prozess basiert auf der Anregung von Elektronen in den Molekülen auf ein höheres Energieniveau durch die Einwirkung von Licht. Dabei kann das absorbierte Licht eine bestimmte Wellenlänge haben, die charakteristisch für die molekularen Eigenschaften der Probe ist. Sobald die angeregten Elektronen in den Molekülen in ihren Grundzustand zurückkehren, wird die überschüssige Energie in Form von Fluoreszenzlicht freigesetzt. Die Wellenlänge dieses emittierten Lichts kann eine andere sein als die des absorbierten Lichts, wodurch ein charakteristisches Fluoreszenzspektrum entsteht. Die Eigenfluoreszenz einer Probe kann von verschiedenen Faktoren wie der chemischen Zusammensetzung, der molekularen Struktur und den physikalischen Bedingungen beeinflusst werden.



**Abbildung 31:** Fluoreszenzaufnahme (10fache Vergrößerung) einer zuvor mit SYBR-Green und PI gefärbten SPC-Probe aus der Naturlagerung nach der Bestrahlung mit dem blauen Laser unter dem BX-43. Die Eigenfluoreszenz des Beschichtungsmaterials erschwerte eine differenzierte Unterscheidung bzw. Identifizierung zwischen lebenden und toten Zellen. Daher wurden zusätzlich alternative Methoden eingesetzt, beispielsweise die sterile Abnahme des Biofilms von der Beschichtungsoberfläche mit anschließender Anfärbung des biologischen Materials sowie mikrobiologische Anreicherungskulturen.

#### 2.2.10 Mikrobiologische Anreicherungskulturen

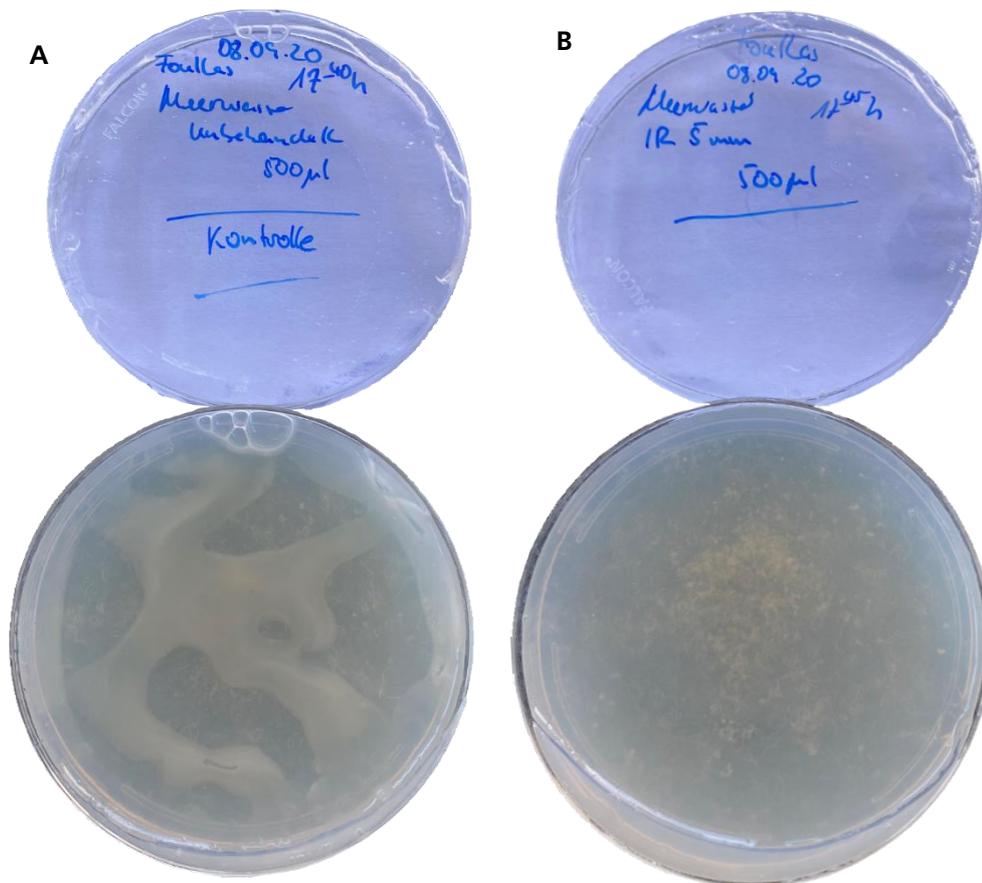
Als weitere Untersuchungsmethode wurden Versuche mit mikrobiologischen Anreicherungskulturen durchgeführt (vgl. **Abbildung 32**). Dabei handelt es sich um eine gängige Methode, um die Anwesenheit und Vitalität von Mikroorganismen auf Oberflächen zu untersuchen.

Die Probenentnahme erfolgt durch das Abklatschen die zu untersuchenden Oberfläche auf einen Agar-Nährboden. Hierbei werden Mikroorganismen von der Oberfläche auf den Nährboden in einer Petrischale übertragen. Es ist wichtig, angemessenen Druck und Kontaktzeit aufzubringen, um eine effektive Probenentnahme zu gewährleisten.

Durch Inkubation unter kontrollierten Bedingungen und über einen bestimmten Zeitraum hinweg wird das Wachstum der Mikroorganismen ermöglicht, insofern sich nach der Laserbehandlung noch lebensfähige Zellen auf der Probe befinden. Nach der Inkubation können die gewachsenen Kolonien ausgezählt werden.

Am Fraunhofer IFAM wurden Agarplatten mit dem Nährmedium Mariner Bouillon hergestellt, um unterschiedliche Prozessparameter der Laserbestrahlung in statistischen Versuchsreihen zu untersuchen. Ein Schwerpunkt lag dabei auf der Frage, ob ein bestimmtes Volumen des Prozesswassers durch die Laserbestrahlung sterilisiert werden kann. Zu diesem Zweck wurden 500 µl des bestrahlten Wassers auf den Nährboden pipettiert und für 24 Stunden bei Raumtemperatur inkubiert. Unbehandeltes Seewasser diente als Positivkontrolle, während autoklaviertes Meerwasser als Negativreferenz verwendet wurde. Die Ergebnisse dieser Tests zeigten eine erwartungsgemäße, volumenabhängige Korrelation des Abtötungseffekts. Darüber hinaus wurde festgestellt, dass die Anzahl der

Kulturen nach der Laserbestrahlung geringer war als bei der unbehandelten Kontrolle. Nach der Bestrahlung wurden die Oberflächen der Objektträger auf den Agar gelegt und die Proben für weitere 24 Stunden inkubiert.



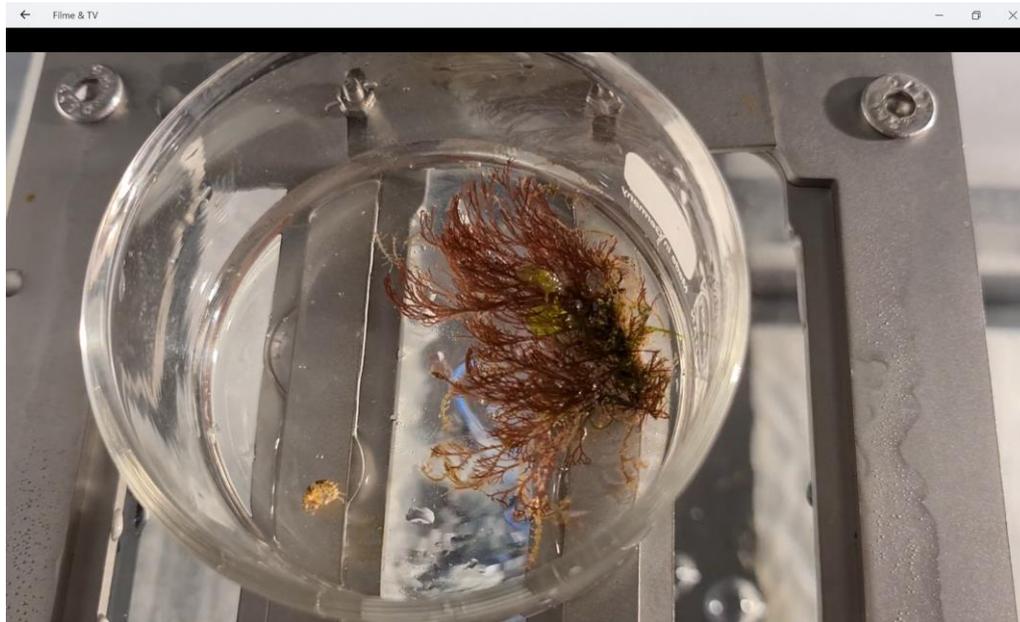
**Abbildung 33:** Bakterienkulturen (Agarplatte mit Marinem Bouillon als Nährmedium) wurden nach 24-stündiger Inkubation bei Raumtemperatur untersucht. Der spezifische Test hatte zum Ziel festzustellen, ob natürliches Helgoländer Seewasser bei einer bestimmten Einfüllhöhe in mm in einer Kristallisationschale (Außendurchmesser 70 mm, max. Volumen 100 ml) noch lebende Bakterien enthält oder ob die Laserstrahlung auch einen Einfluss auf das umgebende Prozesswasser hat. Die Anordnung auf der Agarplatte war wie folgt: (A) 500 µl Meerwasser, Einfüllhöhe 5mm, Strahlquelle: unbehandelte Referenz, (B) 500 µl Meerwasser, Einfüllhöhe 5mm, Strahlquelle: IR-Laser. Während die Positivkontrolle starken Bewuchs aufwies (A), waren auf der Probe B keine Kulturen zu erkennen (bei dem erkennbaren Material handelt es sich um Artefakte aus dem Nährmedium/Agar). Der Einfluss des Lasers konnte an dieser Stelle demnach klar nachgewiesen werden. Zahlreiche Experimente mit ähnlichem Versuchsansatz aber divergenten Parametern folgten.

Obwohl der Makrobewuchs im Verlauf der Biofouling-Sukzession auf Oberflächen erst später auftritt, war die Wirkung der Strahlquelle dennoch von Interesse für die allgemeine Effektivität der Laserreinigung. Zusätzlich stellte sich anfangs die Frage, ob die Art der Strahlquelle auch einen signifikanten Einfluss auf verschiedene Spezies des Makrofouling hat. Ein weiterer Vorteil bei der Betrachtung des Makrofouling lag darin, dass die letale Schädigung direkt visuell bewertet werden konnte (siehe eingefügte, beispielhafte Videos). Das erste Video zeigte verschiedene Taxa, die auch Teil des Fouling-Ökosystems in der Nordsee sein können. Dies umfasste die Makroalge *Ceramium virgatum*, die Amphipoden *Corophium spec.* und den invasiven Gespensterkrebs *Caprella mutica*, der ursprünglich aus dem Japanischen Meer stammt. Sie befanden sich zusammen in einer Kristallisationschale, die mit natürlichem Helgoländer Seewasser gefüllt war. Zwischen der Laserbestrahlung und der Videoaufnahme vergingen nur wenige Minuten, um

andere letale Effekte auszuschließen. Um zusätzlich zu der direkten Schädigung durch die Laserstrahlung auch einen möglichen thermischen Effekt als Folge zu bewerten, wurde vor und nach der Bestrahlung eine Temperaturmessung durchgeführt. Obwohl die Wassertemperatur aufgrund der Laserbestrahlung anstieg, wurde kein unmittelbares letales Maximum erreicht (maximal 38,8 °C nach einmaliger Bestrahlung). Daher kann davon ausgegangen werden, dass es sich um einen direkten Effekt der direkten Laserbestrahlung handelt.

Das folgende Video zeigt den Makrobewuchs **vor** der Bestrahlung mit dem Blauen-Laser (Leistung 1400 W, Vorschubgeschwindigkeit 10 mm/s).

Bitte mit einem „Klick“ ► auf das Filmklappen-Icon starten:



Rotalge-vor-Laser.mp4

Video desselben Makrobewuchses **nach** der Bestrahlung mit dem Blauen-Laser (Leistung 1400 W, Vorschubgeschwindigkeit 10 mm/s).

Bitte mit einem „Klick“ ► auf das Filmklappen-Icon starten:



Rotalge-nach-Laser.mp4

Zusammenfassend lieferten die durchgeführten Untersuchungen zu der biologischen Schädigung der Laserbestrahlung sowohl auf zellulärer als auch auf organischer Ebene eindeutige Resultate, die eine letale Schädigung reproduzierbar nachwies. Die Laserbestrahlung wirkte nekrotisch auf die untersuchten Zellen, was auch den zeitverzögerten Reinigungserfolg erklärte. Die nekrotischen Zellen verlieren ihre strukturelle Integrität und Funktionalität.

Es ist wichtig zu beachten, dass Nekrose ein pathologischer Zustand, mit ungeordnetem Zelltod ist und mit einer direkten Zell- oder Gewebeschädigung gekoppelt ist. Im Gegensatz dazu ist die Autolyse ein natürlicher Zersetzungsprozess, der nach dem Tod von Organismen eintritt. Obwohl sich einige Aspekte der Zellyse bei Nekrose und Autolyse ähneln können, unterscheiden sich die zugrunde liegenden Mechanismen und Kontexte dieser Prozesse.

Definitionsgemäß handelt es sich bei der Autolyse um einen natürlichen, kontrollierten Zerfallsprozess von Zellen, während Nekrose ein pathologischer, ungeordneter Zelltod aufgrund von Gewebeschädigung oder Krankheit ist.

Wenn Tier- und Pflanzenzellen sterben und es zur Zellyse kommt, beginnt ein Prozess, bei dem die Zellbestandteile und Biomoleküle abgebaut werden. In der Autolyse setzt der Abbau der Zellbestandteile ein. Enzyme innerhalb der Zelle, insbesondere lysosomale Enzyme, werden freigesetzt und beginnen, die Proteine, Lipide und Nukleinsäuren im Inneren der Zelle abzubauen. Dies führt zur Auflösung der Zellmembran und zur Freisetzung der Zellinhalte.

Die Geschwindigkeit des Autolyseprozesses hängt von verschiedenen Faktoren ab, darunter die Umgebungstemperatur, Feuchtigkeit, den pH-Wert und das Vorhandensein von Mikroorganismen. In einem warmen, feuchten Umfeld mit reichlich Mikroorganismen kann der Zersetzungsprozess relativ schnell fortschreiten. Unter ungünstigen Bedingungen wie bei niedrigen Temperaturen oder in trockenen Umgebungen kann der Prozess hingegen erheblich verlangsamt werden.

Die Dauer des Autolyseprozesses variiert stark. Bei kleinen Organismen oder Geweben kann die Autolyse innerhalb weniger Stunden oder Tage abgeschlossen sein. Bei größeren Arten dauert es demzufolge länger. Es ist wichtig anzumerken, dass der Zersetzungsprozess durch das Vorhandensein von Aasfressern und anderen Destruenten beschleunigt werden kann, da diese Organismen die Kadaver aktiv abbauen und zersetzen. Dies ist bei der Interpretation der Ergebnisse aus den Folgeauslagerungen nach erfolgten Bestrahlungsversuchen zu berücksichtigen.

Abschließend sei noch auf eine Besonderheit von kalkifizierenden Organismen hingewiesen, auch wenn das Projektziel auf die Entfernung von Softfouling abzielte. Hartschalige, kalkifizierende Organismen stellen eine Herausforderung für die Laserreinigung in Unterwasserumgebungen dar, da ihr Hauptproblem der anorganische Teil ist, der durch die Laserbestrahlung nicht zerstört wird. Bei diesen Organismen nekrotisiert lediglich das lebende Gewebe, während ihre kalkhaltigen Schalen erhalten bleiben. Als Beispiel hierfür seien Seepocke herangezogen, die in mehreren Versuchsserien untersucht wurden. Seepocken gehören zur Klasse der Rankenfüßer (Cirripedia) und bestehen aus einer äußeren hartschaligen Struktur, die aus mehreren Platten besteht. Diese Platten bilden den Schutz für den Organismus und ermöglichen es ihm, sich an verschiedenen Oberflächen im marinen Umfeld festzusetzen. Die Platten (Basal, Carina, Lateral, Tergum, Scutum und Rostrum) bestehen aus einer harten, kalkhaltigen Substanz (Calciumcarbonat  $\text{CaCO}_3$ ). Die genaue mineralische Zusammensetzung kann variieren, aber in der Regel besteht sie aus Calcit oder Aragonit, die beide Formen von Calciumcarbonat sind.

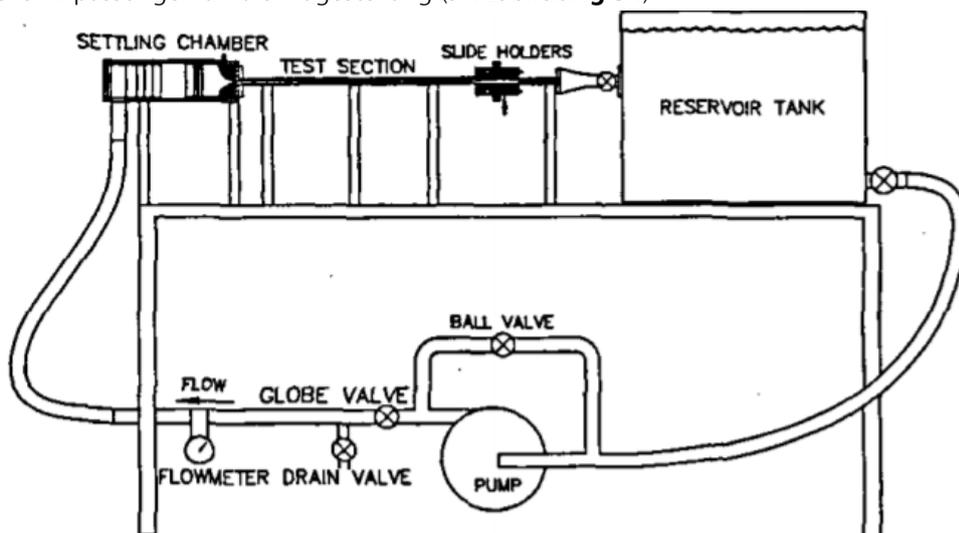
Nichtsdestotrotz lösten sich bei hydrodynamischer Anströmung oder bei Folgeauslagerungen auch Seepocken von der Oberfläche der Beschichtungen. Es ist wichtig zu beachten, dass die genaue Wirkung der Laserbestrahlung auf hartschalige, kalkifizierende Organismen von verschiedenen Faktoren abhängt, einschließlich der Art des Organismus, der Dicke und Struktur der Schale sowie der genauen Parameter der Laserbestrahlung. Selbstverständlich spielt hier auch die Beschichtungstechnologie, auf der das Substrat beruht, eine gewichtige Rolle. In diesem konkreten Fall wären Fouling-release beziehungsweise Easy-to-clean-Beschichtungen von Vorteil. Zukünftige Experimente sollten an diesem Punkt ansetzen und die Datenlage vergrößern, um zu validen Erkenntnissen zu kommen.

### 2.2.11 Flow-Cell

Die im Projekt erzielten Erkenntnisse über den Einfluss der Laserbestrahlung auf das Fouling zeigen eine Schädigung des Bewuchses. Dennoch war es erforderlich, die Mechanismen detaillierter zu untersuchen. Vor allem zeigte sich, dass die Spezieszusammensetzung und die Sukzession des Fouling einen Einfluss auf den Gesamtprozess hat. Ein Baustein zu dem besseren Verständnis der Reinigungswirkung bestand darin, die unbestrahlten und bestrahlten (Referenz-) Proben einer definierten Strömungsgeschwindigkeit

auszusetzen. Daraus sollte ein weiter, wichtiger Parameter zur Wirksamkeitsbetrachtung der Laserbehandlung unter Bestimmung des Ablösungsverhaltens gewonnen werden. Hierfür wurde eigens im Projekt ein Strömungskanal beziehungsweise eine Durchflussmesszelle («Flow-Cell») mit Probenhalterung entwickelt. Die Flow-Cell wurde entwickelt, um den Einfluss von Strömungen unterschiedlicher Geschwindigkeit auf bestrahlte und nicht bestrahlte Bewuchsproben zu ermitteln. Damit sollten die hydrodynamischen Eigenschaften bei in Fahrt befindlichen Schiffen, simuliert werden. Der Strömungskanal besteht aus einer langen, schmalen Sektion (Testsektion), in dem Wasser mit kontrollierter Geschwindigkeit und Richtung fließt. Geschwindigkeit: Die Fließgeschwindigkeit des Wassers kann eingestellt und variiert werden, um verschiedene Strömungsbedingungen nachzuahmen. Dies ermöglicht die Untersuchung des Verhaltens der Beschichtung unter verschiedenen Geschwindigkeiten. Zudem ist es möglich die Turbulenzeigenschaften der Strömung durch die Gestaltung der Kanalgeometrie zu manipulieren. Zur Überwachung der Parameter dienen Strömungssensoren.

Aus diesen technischen und anwendungsspezifischen Überlegungen heraus hat das IFAM im Projekt mit der Konzeptionierung eines Durchflusskanals begonnen. Der Aufbau basiert auf den Grundkonzepten von Schultz *et al.* 2000, erforderte aber mehr spezifische Anpassungen an die Fragestellung (s. **Abbildung 34**).



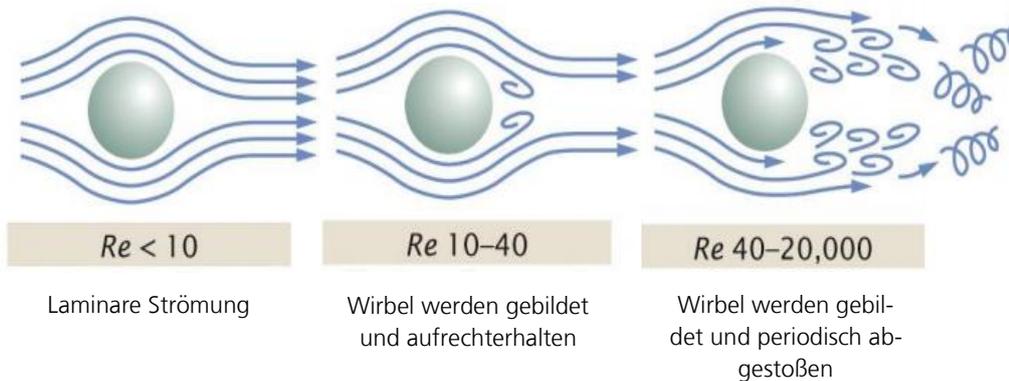
**Abbildung 34:** Schematische Darstellung eines turbulenten Durchflusskanals nach Schultz, Michael P., Finlay, John A., Callow, Maureen E. and Callow, James A. (2000): A turbulent channel flow apparatus for the determination of the adhesion strength of microfouling organisms, *Biofouling*, 15:4, 243- 251.

Der Strömungskanal besteht aus verschiedenen Elementen, die eine entscheidende Rolle bei der Erreichung spezifischer Versuchsparameter spielten. Eine Zentrifugalpumpe wurde verwendet, um das Wasser mit der gewünschten Geschwindigkeit in den Kanal zu pumpen. Durch Ventile und Durchflussmesser war die Regelung des Wasserflusses möglich. Eine Absetzkammer sorgte dafür, dass eventuelle Feststoffpartikel aus dem Wasser entfernt werden. Die eigentliche Testsektion im Kanal ist der Bereich, in dem das zu untersuchende Objekt platziert werden konnte. Ein digitaler Druckmesser kam zur Anwendung, um den Druck innerhalb des Kanals zu überwachen. Das abfließende Wasser wurde in einem Auslassbehälter gesammelt. Die Verrohrung verband alle Elemente des Strömungskanals miteinander.

Am IFAM wurden die einzelnen Elemente des Strömungskanals entsprechend den Projektvorgaben konzipiert. In der anfänglichen technischen Simulation erfolgte die

Auslegung der Bauteile. Ziel war es eine maximale Strömungsgeschwindigkeit von 5,1 m/s zu erreichen.

Die wesentlichen konzeptionellen Details der Flow-Cell sind in **Abbildung 36**, **Abbildung 36** und **Abbildung 38** dargestellt. Durch Berechnungen unter Verwendung der Leistungskennzahlen der ausgewählten Strömungspumpe wurde die finale Strömungsgeschwindigkeit ermittelt. Darüber hinaus wurden Simulationen durchgeführt, um den Einfluss des gesamten Rohrsystems auf die Strömungsgeschwindigkeit, den Druckabfall und somit auch die Reynoldszahl zu untersuchen.



**Abbildung 35:** Strömungsverhalten entlang einer Kugel in Abhängigkeit von der Reynoldszahl ( $Re$ ).<sup>22</sup>

Als Referenz für das Konzept diente die häufig zitierte Durchflusszelle von Schulz et al. aus dem Jahr 2000. Allerdings reichte die erreichte Strömungsgeschwindigkeit in dieser Zelle nicht für die geplanten Versuche in »Foullas« aus. Daher wurden vom IFAM-Anpassungen vorgenommen, um eine Maximierung der Strömungsgeschwindigkeit zu erreichen. Diese betrafen beispielsweise die Rohrquerschnitte und die Pumpenleistung. Schulz et al. erreichten mit einem ähnlichen Aufbau eine maximale Strömungsgeschwindigkeit von 3,3 m/s bei einer Reynoldszahl von maximal 27.000 (siehe **Abbildung 35**), was einer Pumpleistung von 9 m<sup>3</sup>/h entspricht. Die Durchflusszelle des IFAM sollte hingegen Werte von bis zu 5,1 m/s erreichen können. In der vorliegenden Berichtsperiode wurde das Konzept in die Bauphase überführt und nach Abschluss der Bauarbeiten ersten Tests unterzogen. Nach Vorversuchen am IFAM wurde die Durchflusszelle demonstriert, nach Helgoland transportiert und an ihrem endgültigen Bestimmungsort wieder aufgebaut.

Für die Erzeugung der erforderlichen Wasserströmung wird eine salzwasserbeständige, selbstansaugende Astral Pool Nautilus Pumpe aus glasfaserverstärktem Polypropylen eingesetzt. Bei einem Druck von 8 m Wassersäule beträgt ihre Leistung 18,0 m<sup>3</sup>/h und 0,78 kW. Die 18,0 m<sup>3</sup>/h entsprechen etwa 0,28 L/s. Die Betriebsspannung beträgt 230 V. Durch den Einsatz kalibrierter Strömungsmesser werden die genauen Werte für die IFAM-Durchflusszelle ermittelt und validiert. Als Ultraschall-Durchflussmessgerät wird ein PCE-TDS 100HS verwendet (Handgerät mit einem Messbereich von -32 ... +32 m/s, einer Auflösung von 0,0001 m/s und einer Genauigkeit von  $\pm 3,5$  % vom Messwert für  $DN \geq 50$  mm bzw.  $\pm 1,0$  % vom Messwert für  $DN < 50$  mm, sowie einer Reproduzierbarkeit von  $\pm 1,0$  % vom Messwert). Zur Druckmessung in der Testsektion kommt ein RS PRO RS-8890 Druckmessgerät zum Einsatz (Druckbereich von -2 psi bis 0,137 bar bzw. 0,14

<sup>22</sup>Purcell – Life at low Reynolds number (Am. J. Phys 1977)

kg/cm<sup>2</sup>, 2 psi, mit einer Genauigkeit von ±0,3 %). Stromaufwärts der Teststrecke wurde eine Setzkammer mit Diffusoren platziert, um die Strömungsgleichmäßigkeit zu verbessern, großräumige Wirbel, die durch die Pumpe erzeugt werden, zu eliminieren und die Hintergrundturbulenzintensität in der Teststrecke zu verringern. Die Wände der Absetzkammer wurden aus 15 mm dickem Acrylglas (Acrylglas XT, farblos transparent, gemäß den IFAM-dxf-Dateien gefräst, mit gefrästen und entgrateten Schnittkanten) hergestellt. Die Strömung tritt über ein perforiertes Kunststoffrohr in die Setzkammer ein und fließt dann durch perforierte Platten, die als Diffusor fungieren. Diese Platten wurden aus nichtrostendem Drahtgewebe V2A mit einer Maschenweite von 1,0 mm bzw. 0,72 mm und einem Drahtdurchmesser von 0,3 mm konstruiert. Bei einer Maschenweite von 0,72 mm beträgt der prozentuale Anteil der freien Fläche 49,83 %. Bei 1 mm Maschenweite nähert sich der prozentuale Anteil der freien Fläche mit wenigen Nachkommastellen dem Wert von Schulz et al. aus dem Jahr 2000 von 59,84 % an (s. **Tabelle 3**).

**Tabelle 3:** Berechnung der Maschenweite und Durchlässigkeit der perforierten Platten für die IFAM-Setzkammer im Vergleich zu dem von Schulz et. al. eingesetzten Material.

**Maschenweite**      **0,72**      **Mm**  
**Drahtstärke**      **0,3**      **Mm**

Calculate Mesh Count for a known Opening Size and Wire Diameter:

Wire Diameter (inches):	Wire Diameter (mm):	Mesh Count per inch:	Opening (inches):	Opening (mm):	Open Area Percentage:
0.0118	0.3	24.902	0.0283	0.72	49.83%

**Maschenweite**      **1**      **mm**  
**Drahtstärke**      **0,3**      **mm**

Calculate Mesh Count for a known Opening Size and Wire Diameter:

Wire Diameter (inches):	Wire Diameter (mm):	Mesh Count per inch:	Opening (inches):	Opening (mm):	Open Area Percentage:
0.0118	0.3	19.5385	0.0394	1	59.17%

■ Vergleichswerte aus: Schultz et al., 2000:

**Anzahl Maschen pro Inch**      **24**  
**Maschenweite**      **0,82**      **mm**  
**Drahtstärke**      **0,24**      **mm**

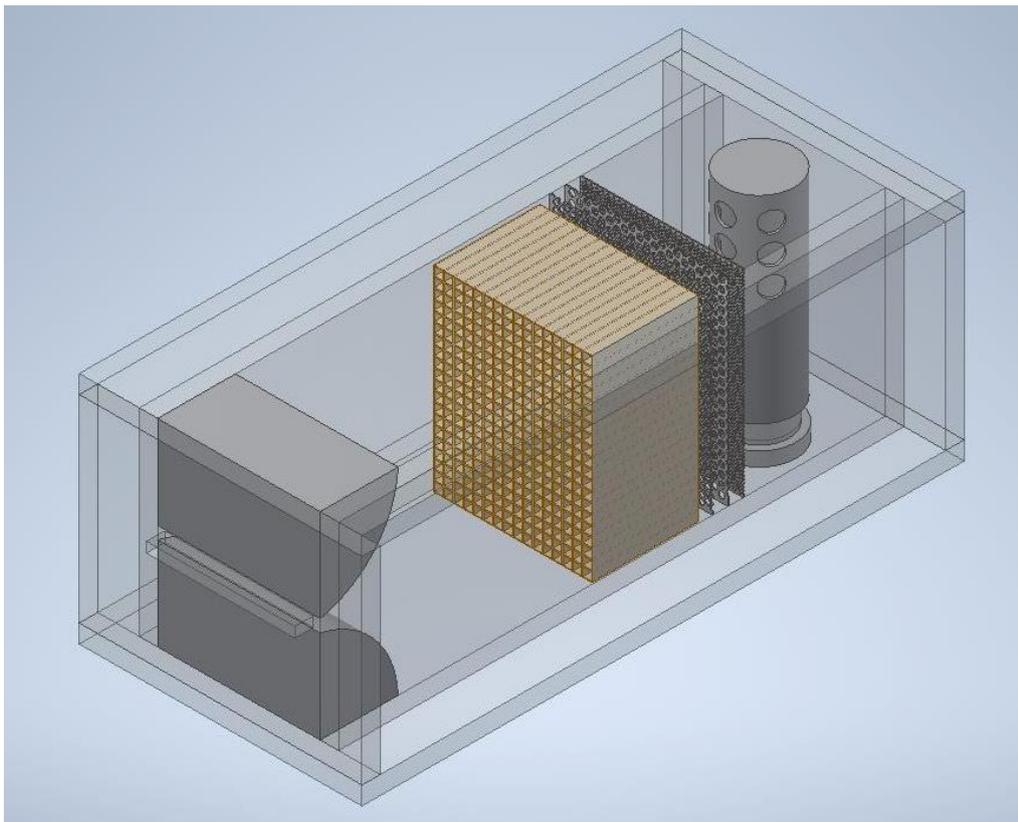
Calculate Mesh Count for a known Opening Size and Wire Diameter:

Wire Diameter (inches):	Wire Diameter (mm):	Mesh Count per inch:	Opening (inches):	Opening (mm):	Open Area Percentage:
0.0094	0.24	23.9623	0.0323	0.82	59.84%

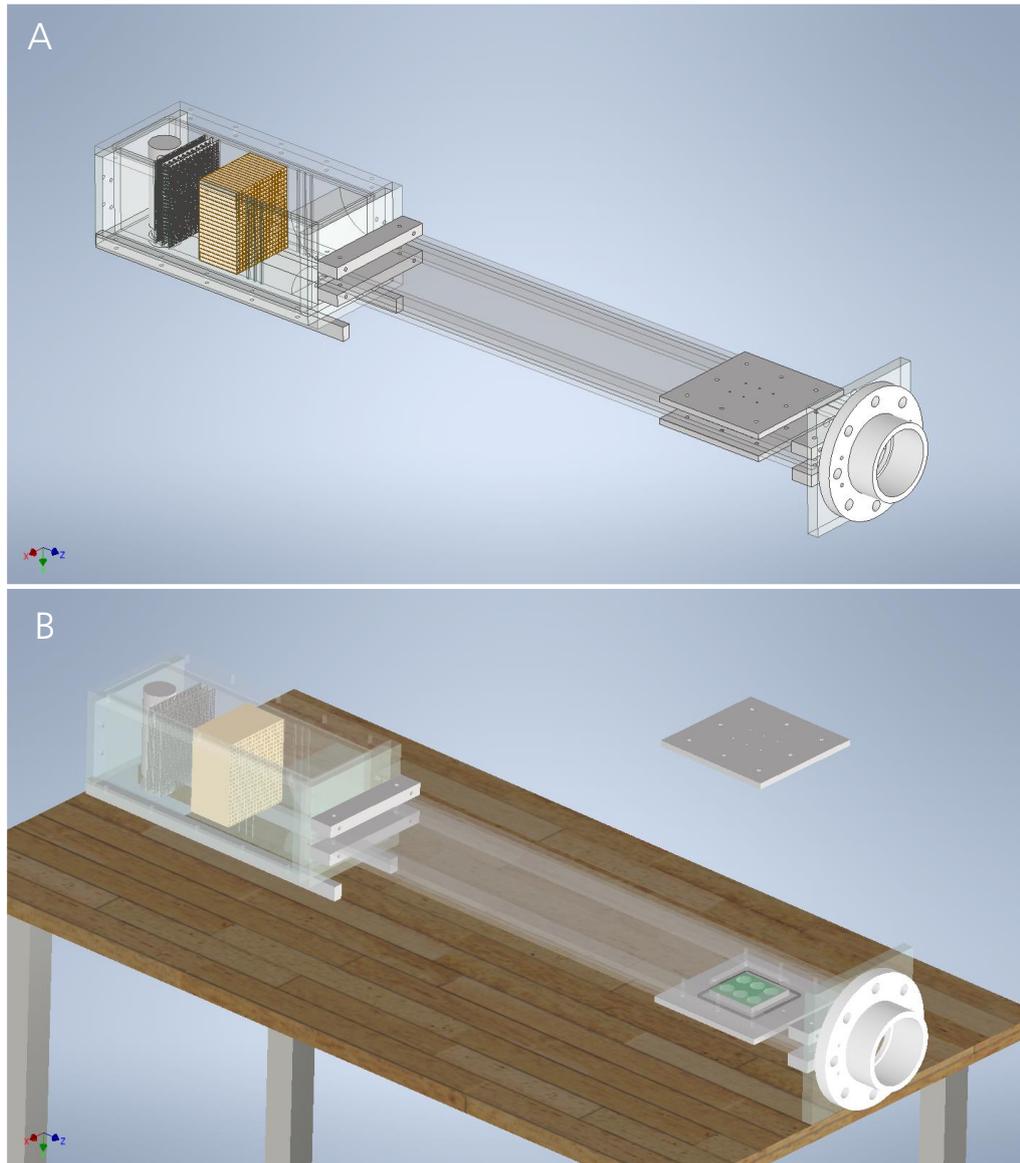
Ein Wabenkern aus Polycarbonat C-6.0 wurde gemäß den Vorgaben von Schulz et al. als nachgeschaltetes Bauteil verwendet. Der Wabenkern hatte die Abmessungen  $140(\pm 2) \times 120(\pm 1) \times 75,0(\pm 0,5)$  mm und eine Zellgröße von  $6,0 (\pm 0,3)$  mm. Die Farbe des Wabenkerns war transparent (CL), und die Dichte betrug  $55 \text{ kg/m}^3 \pm 15 \%$ . Durch den Einsatz des Wabenkerns wurden großräumige Wirbel und freie Strömungsturbulenzen reduziert. Die zweidimensionale-Düse, die sich vor dem Auslass aus der Setzkammer befand und dazu diente, die Strömung zu beschleunigen und die relative Größe der Hintergrundturbulenz zu verringern, wurde ebenfalls gemäß den Vorgaben von Schulz et al. konzipiert und hergestellt.

Die Durchflusszelle ermöglichte die gleichzeitige Untersuchung von drei Proben gemäß den Abmessungen  $76 \times 26$  mm (DIN ISO 8037-1), die in einer Probensektion (1x3 nebeneinander) präzise angeordnet waren. Die Objektträger wurden in einer Längsachse ausgerichtet, die mit der Strömungsrichtung übereinstimmte. Zur Fixierung der Proben während der Strömung wurde eine Industrie-Vakuumpumpe 400 A2 von Structio in Kombination mit einer 6-Liter-Edelstahl-Vakuunkammer verwendet.

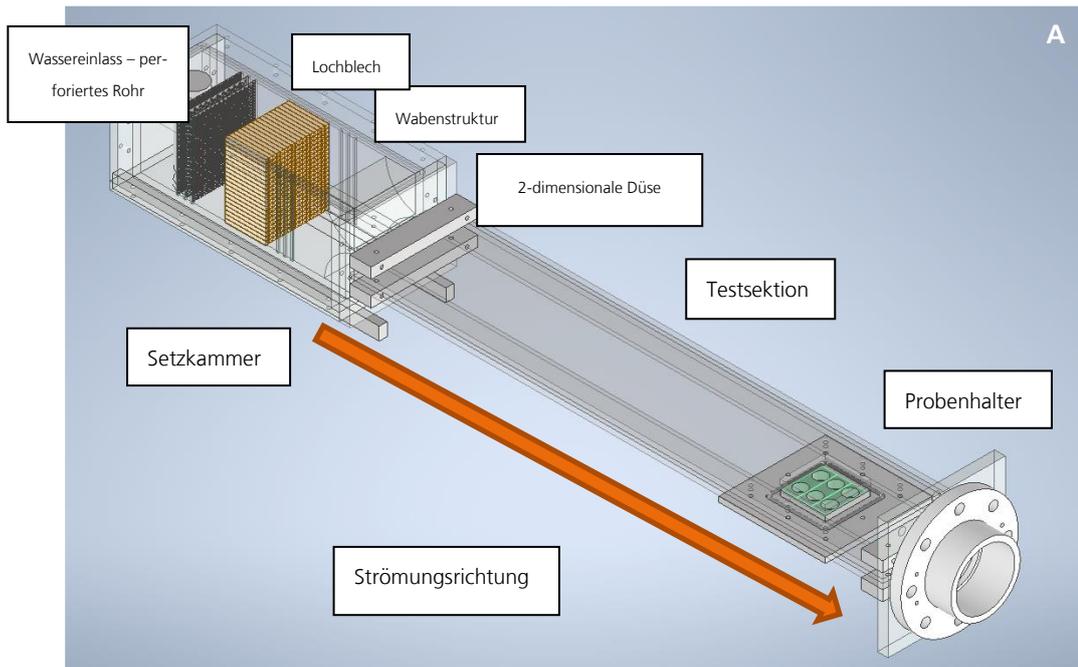
Die Strömung aus der Teststrecke trat in ein Diffusorrohr ein, gefolgt von einem großvolumigen Abflussbehälter. Der Abflussbehälter hatte ein maximales Wasservolumen von 210 L, um die Verweildauer des Gesamtprozesswassers im Kreislauf zu verlängern und die Wärmeentwicklung im Meerwasser zu reduzieren. Darüber hinaus ermöglichte ein Reservoir dieser Größe eine Absetzung der Strömung, bevor sie rezirkuliert wurde. Eine Abbildung des Aufbaus ist in **Abbildung 36** dargestellt.



**Abbildung 36:** CAD-Modell einer am IFAM konzipierten Absetzkammer.

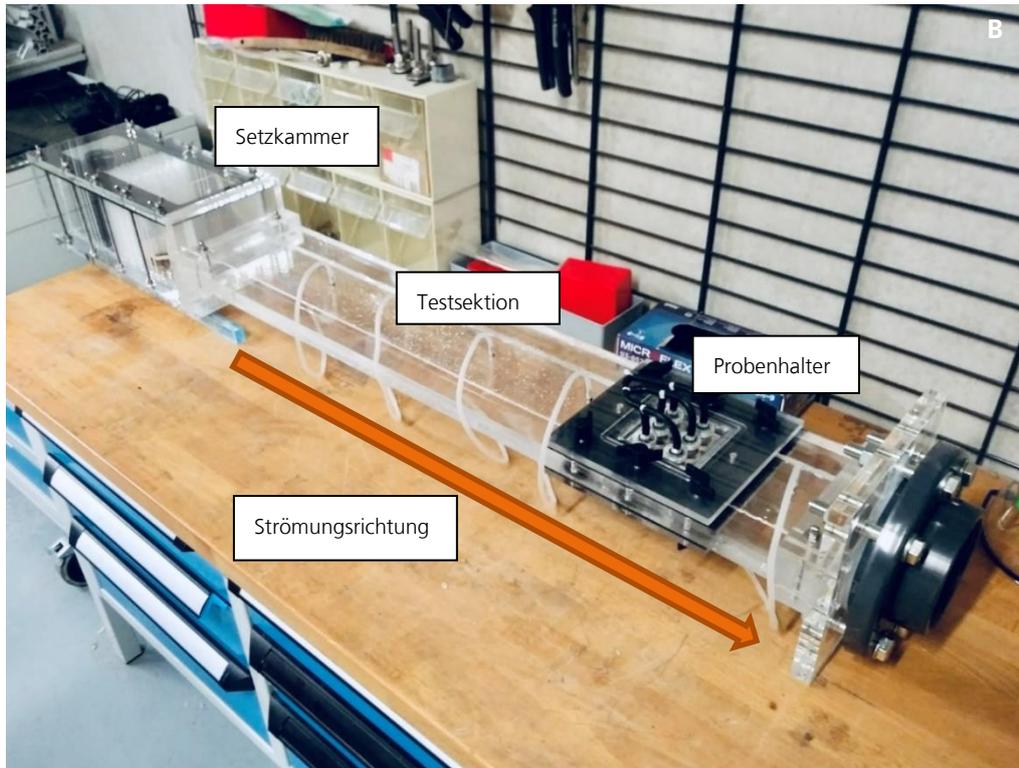


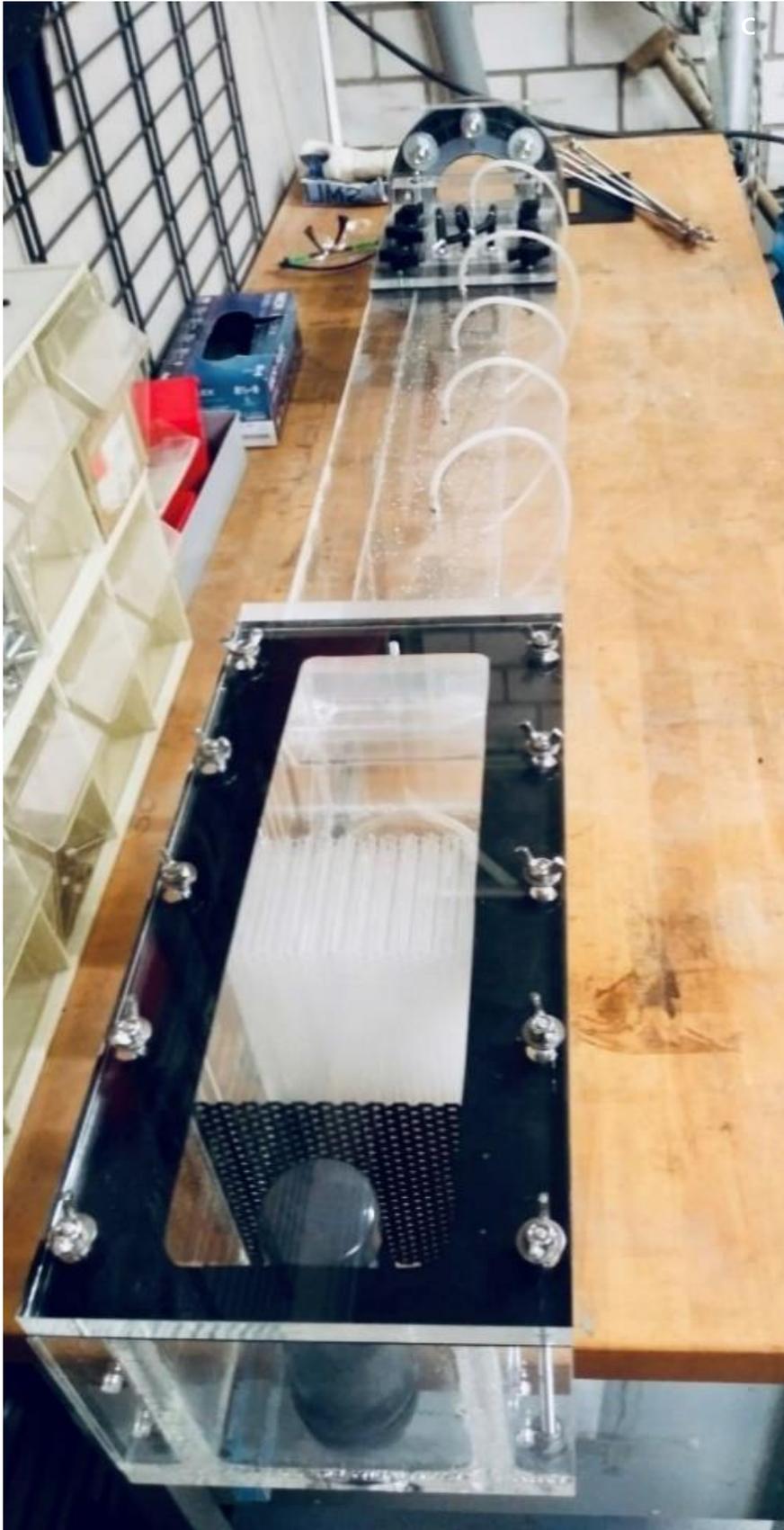
**Abbildung 37 A+ B:** Technische Zeichnung der am IFAM konzipierten, Flow-Cell zur Bewertung des Fouling-Abtrages nach der Laser-Reinigung in Abhängigkeit von einer definierten Strömungsgeschwindigkeit (Verrohrung, Strömungs- und Druckmesser, Reservoirtank und die Strömungspumpe, da es sich in der Zeichnung nicht enthalten). Dargestellt ist der elementare Aufbau der Absetzkammer (von links oben), Testsektion, Probenhalterung)



**Abbildung 38:** Konstruktionszeichnung der IFAM-Durchflusszelle mit Darstellung der Setzkammer, der Testsektion und der Probenhalterung.

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen den Aufbau der fertigen Konstruktion.

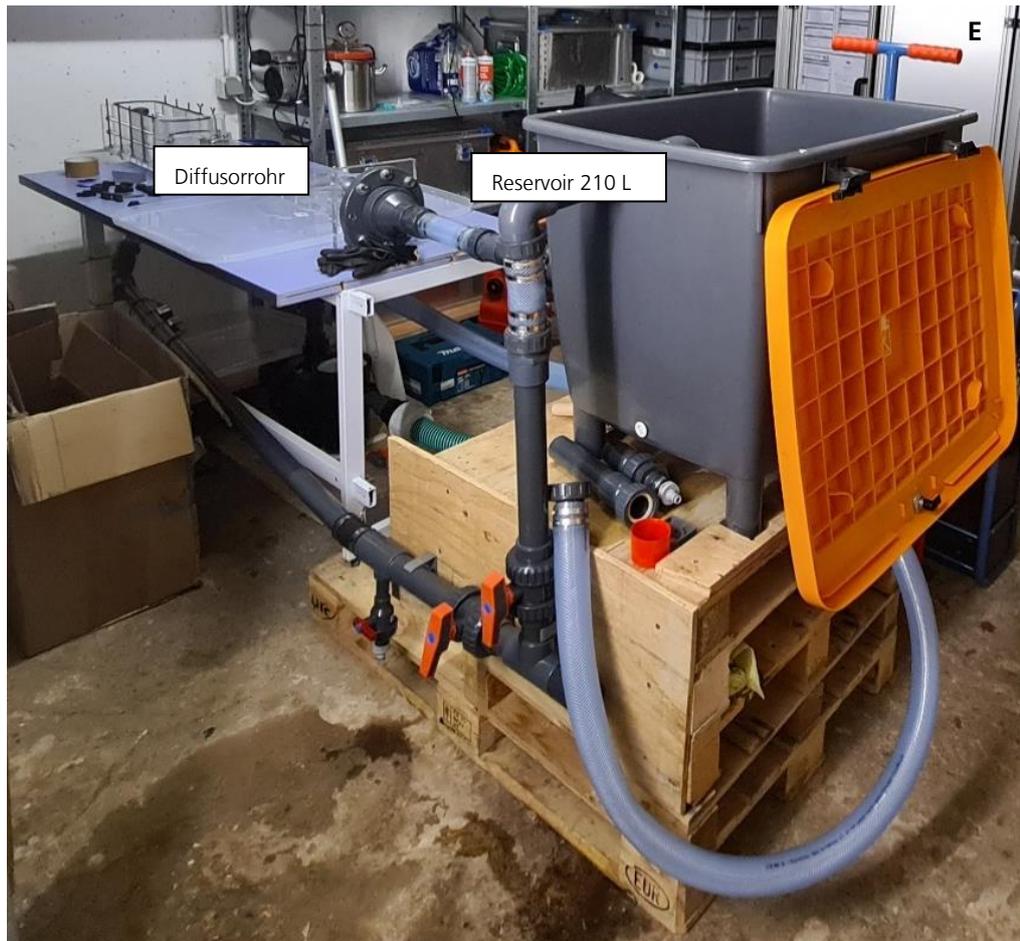




Teil 2: Eingehende Darstellung



Teil 2: Eingehende Darstellung

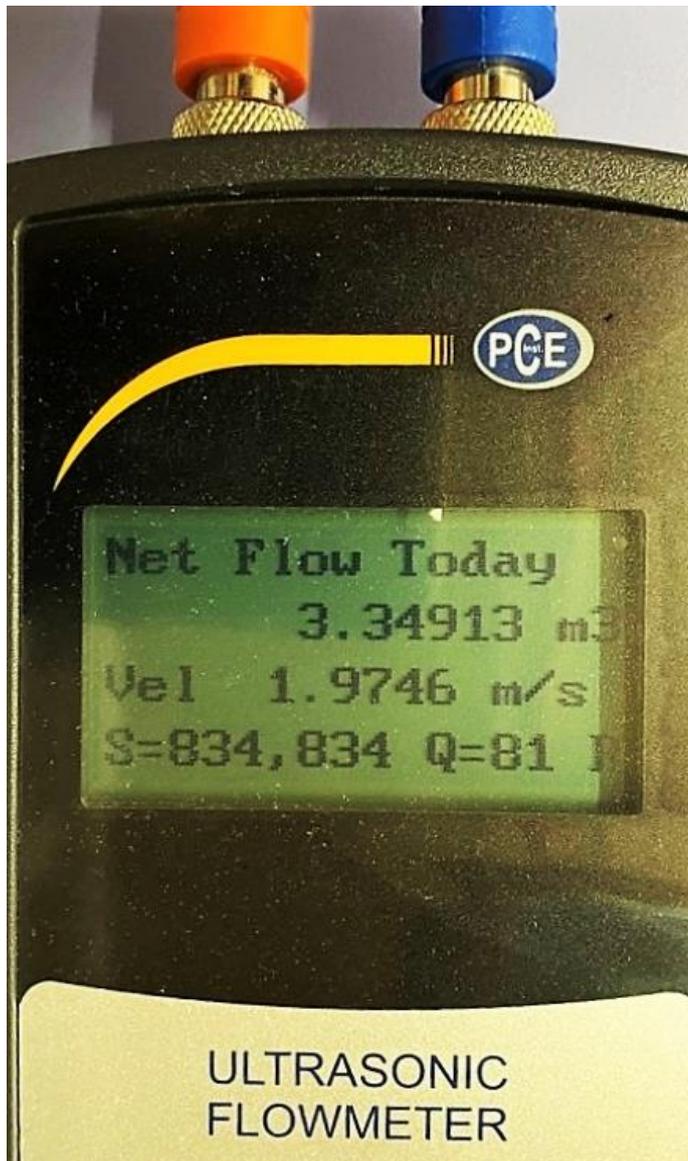


**Abbildung 39:** Die Fotos A bis E zeigen die Durchflusszelle nach ihrer Fertigstellung am Fraunhofer IFAM (oben). Nachdem der gesamte Aufbau die Erprobungsphase am IFAM erfolgreich absolviert hatte, wurde das gesamte Material nach Helgoland verlegt und dort erneut zusammengesetzt. Das untere Foto zeigt den Zustand zu einem späten Zeitpunkt der Installationsarbeiten. An den Aufbau schloss sich eine Validierungsphase an, in der unter anderem die zu erreichenden Strömungsgeschwindigkeiten ermittelt wurden. Zudem wurden Anpassungen in der Setzkammer mittels verschiedener modularer Einsätze vorgenommen. Des Weiteren wurden die Sensoren platziert und kalibriert. Die Proben wurden auch bei hoher Anströmung mithilfe einer Vakuumpumpe an Ort und Stelle gehalten. Die Fertigstellung und Inbetriebnahme der Durchflusszelle markierten einen wichtigen Meilenstein für den weiteren Verlauf des Projekts.

Zu Beginn der Experimente sollten diese theoretischen Werte durch praktische Messungen validiert werden, um die gewünschte Strömungsgeschwindigkeit einzustellen. Zu diesem Zweck wurden Druck- und Strömungsmesser an entscheidenden Stellen installiert. Nach Abschluss der Inbetriebnahme und Kalibrierung wurden kontinuierliche Messungen gemäß dem Versuchsplan an den Proben durchgeführt.

Vor dem Einsatz der Flow-Cell basierten die Ergebnisse zur biologischen Schädigung nach Laserbestrahlung größtenteils auf statischen Testbedingungen. Mit der Einführung der IFAM-Durchflusszelle wurde ein neues Testverfahren für dynamische Belastungen des bestrahlten Bewuchses eingeführt. Durch die räumliche Nähe des statischen Biofouling-Prüfstandes im Helgoländer Südhafen und der Laser-Versuchsordnung konnten potenzielle Artefakte, die durch längere Transportwege entstehen könnten (z. B. Austrocknung, Luftkontakt, Temperatur), zuverlässig vermieden werden.

Zunächst wurden Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich von 4,8 m/s bis hinunter zu 1,5 m/s erfolgreich realisiert. Die Geschwindigkeit wurde in Echtzeit mit einem Flowmeter gemessen, das auf dem Laufzeitdifferenzverfahren basiert (s. **Abbildung 40**: PCE-TDS 100HS Ultraschall-Durchflussmessgerät lieferte Messwerte während des Betriebs der IFAM-Durchflusszelle.). Das Verfahren nutzt elektroakustische Wandler, die mithilfe des Piezoeffekts kurze Ultraschallimpulse durch das strömende Medium im Rohr senden und empfangen. Die Wandler sind längsversetzt an beiden Seiten des Messrohrs angebracht worden.

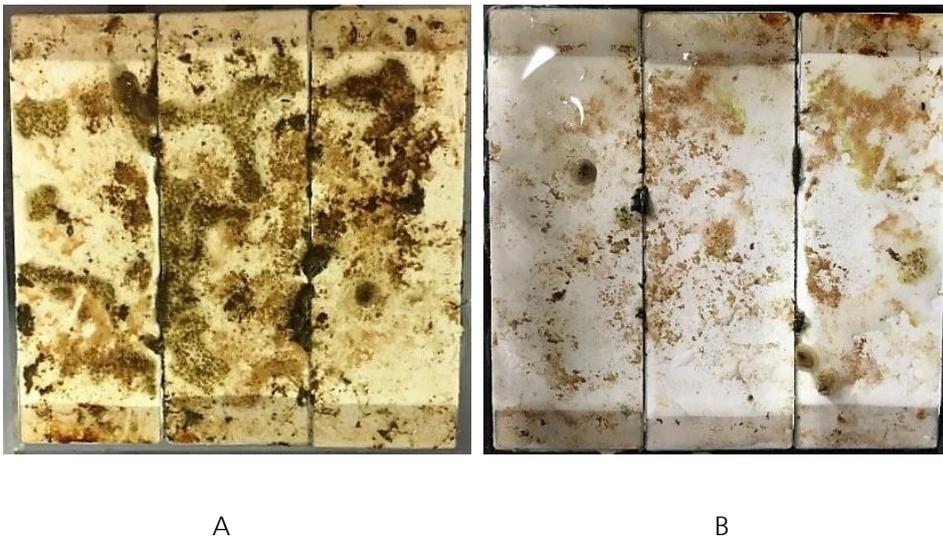


**Abbildung 40:** PCE-TDS 100HS Ultraschall-Durchflussmessgerät lieferte Messwerte während des Betriebs der IFAM-Durchflusszelle.

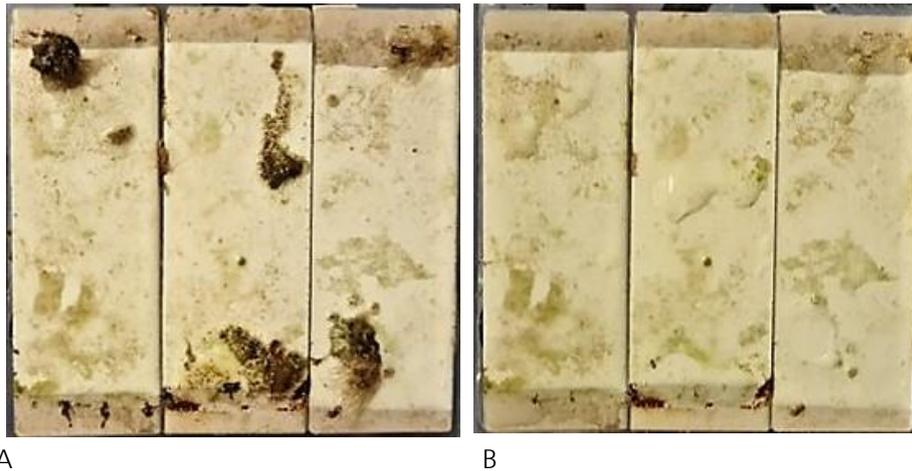
Im nächsten Schritt wurde der bestehende Datensatz erweitert, um die optimale Strömungsgeschwindigkeit für maximale Ablösung zu ermitteln. Diese steht in engem Zusammenhang mit den zuvor festgelegten Laserparametern. Modulare Bausteine, wie zusätzliche Lochblechmodule mit unterschiedlichen Maschenweiten, sollten eine gezieltere Beeinflussung des Strömungsregimes ermöglichen.

Ein zielgerichtetes Vorgehen war, angesichts der Vielzahl möglicher Parameter, erforderlich, um die optimale Einstellung der Prozessparameter zu ermitteln. Ein wichtiger Aspekt war der Vergleich zwischen den beiden Strahlquellen (Infrarot und Blau). Darüber hinaus spielte die Vorschubgeschwindigkeit eine entscheidende Rolle in Bezug auf den erzielten Reinigungseffekt, da die Prozessgeschwindigkeit einen direkten Einfluss auf die Marktchancen der Technologie hatte. Während der Helgoländer-Testkampagnen führten das LZH und das IFAM umfangreiche Versuche am Standort durch.

Aus den Ergebnissen mit der Flow-Cell wurde deutlich, dass die Dauer der Anströmung keinen signifikanten Einfluss auf die Ablösung des Bewuchses hatte. Beim Erreichen der gewünschten Strömungsgeschwindigkeit löste sich der Großteil des Bewuchses unmittelbar. Es wurde beobachtet, dass der Abtrag bei zuvor bestrahlten Proben höher war im Vergleich zu unbestrahlten Vergleichsproben. Um dies zu veranschaulichen, wurde ein exemplarischer Versuch durchgeführt, bei dem eine unbestrahlte Fouling-release-Beschichtung mit Bewuchs vor und nach einer einminütigen Anströmung mit 4,8 m/s betrachtet wurde (s. **Abbildung 41**, **Abbildung 42**). Der Bewuchs nahm dabei erkennbar ab, jedoch blieb ein signifikanter Anteil auf den Proben zurück, einschließlich lebender Seepocken. In **Abbildung 6** wurde derselbe Versuch mit einer zuvor bestrahlten Probe durchgeführt, wobei sich hier der Reinigungserfolg deutlich stärker zeigte.



**Abbildung 41:** Unbestrahlte Fouling-release Beschichtung mit Bewuchs vor der 1-minütigen Anströmung mit 4,8 m/s in der Durchflusszelle (A) und danach (B).



**Abbildung 42:** Bestrahlte Fouling-release Beschichtung mit Bewuchs vor der 1-minütigen Anströmung mit 4,8 m/s in der Durchflusszelle (A) und danach (B).

Mit fortlaufender Projektlaufzeit war es das erklärte Ziel, die multivariablen Prozessparameter immer weiter einzuschränken, um die optimale Reinigungsleistung für die verschiedenen Beschichtungssysteme zu ermitteln. Dies erforderte nicht nur die Bewertung der verschiedenen Beschichtungssysteme, sondern auch die gezielte Untersuchung der Menge und Zusammensetzung des Biofoulings, der Laserleistung (Fläche) und der Vorschubgeschwindigkeit. Durch den Einsatz der IFAM-Durchflusszelle konnte festgestellt werden, ob sich das nach der Bestrahlung haftende Fouling, abhängig von den gewählten Laserparametern, bei definierten Strömungsgeschwindigkeiten schneller oder langsamer ablöst. Es zeigte sich, dass bereits eine geringere Laserleistung ausreicht, um unter dynamischen Bedingungen, im Vergleich zu statischen Bedingungen, eine signifikante Entfernung des geschädigten Biofoulings zu erreichen.

Kontinuierliche Optimierungsarbeiten an der Laseroptik haben im Projektverlauf zu einer Erweiterung des Parameterbereichs geführt. Eine höhere Leistungsdichte des Laserstrahls ermöglichte neue Betriebsparameter, die zuvor nicht verfügbar waren.

Die **Abbildung 43** zeigt eine weitere Versuchsreihe mit der Flow-Cell, die im späteren Projektverlauf durchgeführt wurde. Dabei wurden zunächst eine bewachsene Probe bestrahlt, die anschließend direkt für zwei Minuten in der Flow-Cell einer maximalen Strömungsgeschwindigkeit (4,8 m/s) ausgesetzt wurde. Die Dauer und Strömungsgeschwindigkeit konnten je nach Datensituation im Verlauf Versuchsreihe variiert werden. Der Zustand vor und nach dem jeweiligen Prozess wurde dokumentiert. Im Vergleich zu den nicht bestrahlten Referenzproben zeigte sich ein deutlicher Reinigungseffekt durch die Laserbestrahlung beziehungsweise durch den kombinierten Effekt aus Bestrahlung und hydrodynamischer Anströmung.



**Abbildung 43:** (A) Fouling auf unbeschichteten Glasobjektträgern (76 × 26 mm). Die Proben wurden für eine initiale Besiedlung ausgelagert, dann durch Mitarbeitende des LZH mit dem Laser bestrahlt, für weitere 14 Tage ausgelagert und abschließend erneut bestrahlt. (B) Direkt im Anschluss wurden sie in der Flow-Cell bei maximaler Strömung von 4,8 m/s für 2 Minuten angeströmt. Die Referenzen wurden nicht bestrahlt, unterlagen aber den hydrodynamischen Kräften in der Flow-Cell. Die Laserleistung lag bei 1400 W (blau) bei einer Vor-schubgeschwindigkeit von 30 mm/s, 40 mm/s und 50 mm/s.

## 2.2.12 AP11 – Vergleichsverfahren

### 2.2.13 Referenzverfahren

Unterwasser Schiffsreinigung mit Kunststoffbürsten:

Die Unterwasser Schiffsreinigung mit Kunststoffbürsten hat sich als eine gängige Methode zur Bewuchsentfernung auf Schiffsrümpfen etabliert. Kunststoffbürsten werden entweder manuell oder mithilfe von Unterwasserrobotern eingesetzt, um den Bewuchs von der Schiffsoberfläche zu entfernen. Der Vorteil dieser Methode liegt darin, dass der Bewuchs unmittelbar von der Oberfläche abgelöst wird, was in Abhängigkeit vom Bewuchsgrad, zu einer effektiven Reinigung führt. Wie bei allen kommerziell verfügbaren Reinigungsmethoden nimmt die Intensität der Reinigungsleistung mit der Zunahme von hartschaligem Makrofouling ab. Dem Zeitpunkt der Reinigung kommt daher eine gewichtige Rolle zu.

Bei der Verwendung von Kunststoffbürsten treten einige Nachteile zu Tage, die umweltrechtliche, prozesstechnische und ökologische Fragestellungen aufwerfen. Ein Hauptnachteil besteht in der potenziellen Freisetzung von Mikroplastikpartikeln während des Reinigungsprozesses. Durch die Abnutzung der Kunststoffbürsten können winzige Partikel in das umgebende Wasser gelangen und langfristig die Meeresumwelt beeinträchtigen. Zudem besteht das Risiko, dass während der Reinigung Beschichtungsbestandteile

oder Biozide freigesetzt werden, die ebenfalls umweltschädlich (z.B. Anreicherung in Hafensedimenten mit Einfluss auf die benthische Fauna) sein können.

Ein weiterer Aspekt, der berücksichtigt werden muss, ist das kontaminierte Prozesswasser, das während der Reinigung entsteht. Dieses Wasser enthält sowohl gelöste Bestandteile des Bewuchses als auch mögliche Rückstände aus der Beschichtung. Eine ordnungsgemäße Entsorgung des kontaminierten Prozesswassers ist daher erforderlich, um eine weitere Belastung der Meeresumwelt zu vermeiden. Alternativ kann das Prozesswasser aufwändig aufbereitet und wiederverwendet werden.

Des Weiteren besteht das Risiko von Beschädigungen an der vorhandenen Beschichtung. Insbesondere bei unsachgemäßer Anwendung oder bei zu hoher Bürstendrehzahl können Kratzer, Abrieb oder sogar Beschichtungsablösungen auftreten. Dies kann wiederum zu einer Beeinträchtigung der Schutzfunktion der Beschichtung und einer erhöhten Korrosionsanfälligkeit des Schiffsrumpfes führen.

Einsatz von Hochdruckwasserstrahl:

Der Einsatz von Hochdruckwasserstrahl zur Unterwasser Schiffsreinigung ist eine weitverbreitete Methode zur Bewuchsentfernung. Durch den hohen Wasserdruck wird der Bewuchs von der Schiffsoberfläche abgelöst. Diese Methode ermöglicht ebenfalls eine unmittelbare Ablösung des Bewuchses und eine effektive Reinigung. Auch hier spielt jedoch der Bewuchsgrad und die Spezieszusammensetzung eine Rolle für den Reinigungserfolg.

Auch bei diesem Verfahren sind einige Nachteile zu berücksichtigen. Wie bei der Reinigung mit Kunststoffbürsten besteht die Gefahr der Freisetzung von Mikroplastikpartikeln in das umgebende Wasser. Der Wasserstrahl kann dazu führen, dass kleinste Kunststoffpartikel abgetragen und in die Umwelt abgegeben werden. Zudem kann der Hochdruckwasserstrahl, insbesondere bei unsachgemäßer Anwendung, zu Beschädigungen an der Beschichtung führen. Durch die hohe kinetische Energie des Wasserstrahls können Kratzer, Abrieb oder Beschichtungsablösungen auftreten, die die Integrität der Beschichtung beeinträchtigen und Korrosionsprobleme verursachen können.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Kontaminierung des Prozesswassers während der Reinigung mit Hochdruckwasserstrahl. Das Wasser enthält Rückstände des Bewuchses sowie mögliche chemische Bestandteile aus Reinigungsmitteln oder Beschichtungen. Dieses kontaminierte Wasser erfordert eine geeignete Entsorgung oder eine aufwendige Aufbereitung, um negative Auswirkungen auf die Umwelt zu vermeiden.

Bei den durchgeführten Versuchsreihen auf Helgoland wurden praktische Resultate erzielt, die wichtige Erkenntnisse zur Unterwasser Schiffsreinigung mit Kunststoffbürsten und Hochdruckwasserstrahl liefern. Diese Resultate wurden exemplarisch anhand von Fotos dokumentiert und verdeutlichen die Effektivität und Limitierungen dieser Verfahren.

Die aufgenommenen Fotos zeigen, dass die Bewuchsentfernung in den Simulationsversuchen nicht in allen Fällen zu einer 100%igen Entfernung des Bewuchses führte. Es konnten vereinzelt Reste von Organismen auf den ausgelagerten Beschichtungsproben nachgewiesen werden. Dies verdeutlicht, dass eine vollständige letale Schädigung und

Entfernung der Organismen in Abhängigkeit von der Anwendungsdauer nicht immer garantiert ist, insbesondere bei hartnäckigem oder starkem Bewuchs (s. **Abbildung 45.**)

Des Weiteren zeigen die Fotos auch, dass es bei der Anwendung von Kunststoffbürsten und Hochdruckwasserstrahl zu Defekten an den experimentellen Bewuchsschutzbeschichtungen des IFAM gekommen ist. Es konnten Schäden wie Kratzer, Abrieb oder Beschichtungsablösungen festgestellt werden (s. **Abbildung 44**). Diese Defekte beeinträchtigen die Schutzfunktion der Beschichtung in hohem Maße, da diese Oberflächen-defekte ohne die entsprechende Funktionalisierung als Eintrittspforte für eine Besiedlung genutzt werden können.



PDMS-Polysilazan-Formulierung  
in KW42/2021 nach einer  
Bürstenreinigung mit einer  
Dauer von 30 Sekunden



**Abbildung 44:** Reinigung einer experimentellen IFAM-Beschichtung mit einer rotierenden Rundbürste aus Nylon. Die Reinigungsdauer betrug 30 Sekunden. Die Kreise markieren sichtbare Defekte in der PDMS-Polysilazan-Beschichtung. Auch eine Reihe weitere Beschichtungen, inklusive der kommerziellen Referenzen, wiesen derartige Artefakte nach einer Bürstenreinigung auf.

Die Resultate der Versuchsreihen verdeutlichen somit, dass sowohl die Unterwasser Schiffsreinigung mit Kunststoffbürsten als auch der Einsatz von Hochdruckwasserstrahl gewisse Limitierungen und Risiken aufweisen. Es wird deutlich, dass eine optimale Bewuchsentfernung und Oberflächenschonung eine Herausforderung darstellen, insbesondere bei komplexem Bewuchs und empfindlichen Beschichtungen.

Basierend auf den Projektergebnissen bietet die Verwendung eines laserbasierten Reinigungssystems in Bezug auf den Reinigungserfolg sowohl Vor- als auch Nachteile im Vergleich zu konventionellen Reinigungstechniken. Im Folgenden sind einige der Vor- und Herausforderungen beziehungsweise potenzielle Nachteile aufgeführt:

- Nicht-abrasive Reinigung: Im Gegensatz zu konventionellen Verfahren wie Bürstenreinigung oder Hochdruckwasserstrahlen verursacht der Laser keine mechanischen Abrieb- oder Erosionsschäden an der Oberfläche. Dadurch wird das Risiko von Beschädigungen an den Beschichtungen minimiert. Mit Hilfe der Zerstörschwellenbestimmung der Lacke konnte zudem nachweislich und reproduzierbar eine Beeinträchtigung der Beschichtungen durch ein angepasstes Parameterset ausgeschlossen werden.
- Effektive Reinigung: Das Lasersystem kann durch die letale Schädigung des Fouling einen Reinigungseffekt herbeiführen, vor allem bei Softfouling. Er hat sich jedoch auch auf Makrofouling-Organismen (Seepocken) erstreckt. Zudem wird der Bewuchs durch die Laserbehandlung abgetötet, sodass die Methode eine wirkungsvolle Maßnahme gegen die Einschleppung von invasiven Arten darstellt.
- Umweltfreundlichkeit: Die laserbasierte Reinigung erfordert keine chemischen Reinigungsmittel oder große Wassermengen, was zu einer geringeren Umweltbelastung führt. Es entstehen keine Abwässer oder schädlichen Abfallstoffe.
- Präzision und Kontrolle: Das Lasersystem bietet eine präzise Steuerung der Reinigungsparameter wie Intensität, Spotgröße und Bearbeitungsgeschwindigkeit. Dadurch können spezifische Reinigungsanforderungen erfüllt und die Oberflächen geschützt werden.

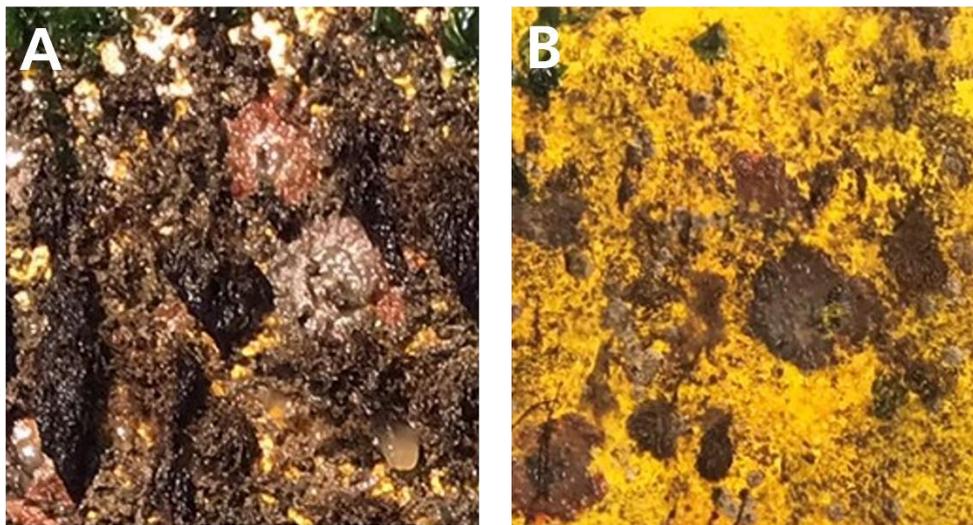
Demgegenüber stehen zum derzeitigen Zeitpunkt ein paar Herausforderungen beziehungsweise potenzielle Nachteile gegenüber bestehenden Verfahren. Dazu gehören:

- Hohe Anschaffungskosten: Die Anschaffung eines laserbasierten Reinigungssystems ist kostenintensiv, insbesondere im Vergleich zu konventionellen Reinigungstechniken. Da es sich noch um ein recht neues Verfahren handelt ist jedoch mit sinkenden Prozess- und Komponentenkosten zu rechnen (s. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (AP11.3)).
- Komplexität: Der Betrieb und die Wartung des Lasersystems erfordern spezielles Fachwissen und geschultes Personal. Die Bedienung des Systems erfordert technisches Know-how und Sicherheitsmaßnahmen, um Laserstrahlung zu vermeiden. Diese Aspekte sind jedoch auch bei den anderen Technologien zu berücksichtigen. Hier kommt vor allem der Aspekt der Lasersicherheit hinzu.
- Reinigungserfolg: Im Gegensatz zu der mechanischen Reinigung tritt der Reinigungserfolg bei der Laserreinigung nicht unmittelbar ein. Er beruht vielmehr auf der letalen Schädigung des Fouling und setzt damit zeitversetzt ein. Die geschädigten Zellen nekrotisieren und der organische Zerfall führt in der Folge zum Auflösen / Ablösen des Bewuchses. Hydrodynamische Kräfte, wie sie in der Flow-Cell simuliert wurden, können diesen Vorgang beschleunigen, aber auch hier spielt die Zusammensetzung des Fouling eine Rolle.

Zusammenfassend zeigt sich demnach im direkten Vergleich, dass die U/W-Laserreinigung vielversprechende Ergebnisse hervorgebracht hat. Sie führte zu einer effektiven, aber zeitverzögerten Entfernung (durch Nekrose) des Bewuchses, ohne dass sichtbare Defekte an den Bewuchsschutzbeschichtungen auftraten. Dies unterstreicht die Präzision

und Oberflächenschonungsfähigkeit der U/W-Laserreinigungstechnologie. Ein wesentlicher Vorteil der U/W-Laserreinigung bleibt die Vermeidung der Freisetzung von Mikroplastikpartikeln und schädlichen Chemikalien in die Meeresumwelt. Da der Laser rein thermisch wirkt, entstehen keine abgetragenen Partikel oder Rückstände, die die Umwelt belasten könnten. Dies trägt zur Minimierung des ökologischen Fußabdrucks bei.

Die praktischen Resultate auf Helgoland lieferten somit wertvolle Einblicke in die Vor- und Nachteile der verschiedenen Reinigungsmethoden und unterstützen die weitere Entwicklung und Optimierung dieser Technologien. Es wird deutlich, dass die U/W-Laserreinigung vielversprechende Vorteile in Bezug auf Effektivität und Oberflächenschonung bietet, jedoch weiterhin Forschung und Entwicklung erforderlich sind, um potenzielle Bottlenecks zu überwinden und ihre Anwendbarkeit in der Praxis zu verbessern.



PDMS-Polysilazan-Formulierung in KW41/2022 vor [A] und nach [B] der Reinigung mit U/W-Hochdruckwasserstrahl.

**Abbildung 45:** Reinigung einer experimentellen IFAM-Beschichtung mit Hochdruckwasserstrahl U/W. Die Reinigungsdauer betrug 60 Sekunden. A = Zustand vor der Reinigung; B = Zustand nach der Reinigung. Es wurde kein einhundertprozentiger Reinigungserfolg erzielt.

### 2.2.14 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Die Kosten-Nutzen-Analyse spielt eine zentrale Rolle bei der umfassenden Bewertung des Gesamtsystems der laserbasierten Reinigung im Vergleich zu konventionellen Verfahren. Sie ermöglicht einen detaillierten Vergleich der wirtschaftlichen Aspekte und berücksichtigt eine Vielzahl von Faktoren, um eine fundierte Entscheidungsgrundlage zu schaffen.

Zu den Kostenfaktoren gehören zunächst die Investitionskosten für die Anschaffung der Lasersysteme und der Beschichtungssysteme sowie die damit verbundenen Infrastrukturkosten. Weiterhin werden die laufenden Kosten analysiert, wie beispielsweise Energieverbrauch, Wartungskosten und Personalkosten. Darüber hinaus werden mögliche Schulungs- und Zertifizierungskosten für das Bedienungspersonal berücksichtigt.

Auf der Nutzenseite werden verschiedene Aspekte betrachtet. Eine Effizienzsteigerung der Reinigungsprozesse kann zu einer Reduzierung der Reinigungszeiten führen. Dies

bedeutet potenzielle Einsparungen in Form von reduziertem Personaleinsatz oder verkürzten Produktionsstillständen.

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung umfasst auch die Evaluierung der Haltbarkeit der eingesetzten Beschichtungen. Durch die laserbasierte Reinigung können Beschichtungen schonender behandelt und deren Lebensdauer verlängert werden, was zu geringeren Kosten für die Beschichtungserneuerung führt.

Des Weiteren wurden Potenziale zur Prozessoptimierung untersucht. Dazu zählen Strategien zur Einsatzplanung, wie die zeitliche Koordination der Reinigungsarbeiten, um eine effiziente Auslastung der Ressourcen zu gewährleisten. Die Möglichkeit der Prozess-Parallelisierung durch den Einsatz mehrerer Laserköpfe oder eine breitere Laserlinie kann die Flächenleistung steigern und somit zu einer höheren Produktivität führen.

Auch die Marktverfügbarkeit und Kosten der Formulierungsbestandteile für das Beschichtungssystem wurden in die Analyse einbezogen. Die Auswahl der Rohstoffe kann die Wirtschaftlichkeit beeinflussen, da Kosten, Verfügbarkeit und Eigenschaften der Beschichtungen berücksichtigt werden müssen.

Die Kosten-Nutzen-Analyse ermöglicht es, das Gesamtsystem der laserbasierten Reinigung unter Berücksichtigung all dieser Faktoren mit konventionellen Verfahren zu vergleichen. Sie bietet Entscheidungsträgern eine umfassende Grundlage zur Bewertung und ermöglicht die Identifizierung von Potenzialen zur Effizienzsteigerung, Kosteneinsparung und Umweltverträglichkeit.

Das Ergebnis der Analyse ergab, dass ein laserbasiertes Reinigungssystem unter bestimmten Bedingungen wettbewerbsfähig sein kann. Folgende Faktoren sind dafür von Bedeutung.

Das System muss eine hohe Reinigungseffizienz und eine ausreichend hohe Flächenleistung bieten, um mit konventionellen Verfahren mithalten zu können. Eine schnelle und gründliche Reinigung ermöglicht eine effiziente Nutzung der Ressourcen und reduziert die Produktionsausfallzeiten.

Das laserbasierte Reinigungssystem sollte in der Gesamtbetrachtung potenzielle Kosteneinsparungen im Vergleich zu konventionellen Verfahren bieten. Dies kann durch reduzierten Materialverbrauch, geringeren Personaleinsatz, längere Beschichtungshaltbarkeit, kürzere Reinigungszeiten und geringere Entsorgungs- und der Wiederaufbereitungskosten von kontaminierten Prozesswasser erreicht werden. Die Gesamtbetriebskosten des Systems müssen wettbewerbsfähig sein. Es ist jedoch keine ausschließliche Frage der Kosten. Wenn das System umweltfreundlichere Reinigungsmethoden ermöglicht, indem es die Freisetzung von Bioziden oder Mikroplastik verhindert, ist dies ein klarer Wettbewerbsvorteil. Eine zunehmende Nachfrage nach umweltverträglichen Lösungen in der globalen Handelsschifffahrt, die unter sehr großem Transformationsdruck steht<sup>23</sup>,

dürfte die Wettbewerbsfähigkeit des Systems ebenfalls positiv beeinflussen.

<sup>23</sup><https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimaneutrale-schifffahrt-1964314>

Darüber hinaus sollte das System flexibel und an verschiedene Anwendungsbereiche anpassbar sein. Zudem wäre es vorteilhaft, wenn eine Vielzahl von Oberflächenmaterialien und Biofouling-Zuständen effektiv zu reinigen wären.

Wie für jedes technische Gerät ist dessen Zuverlässigkeit ein entscheidendes Kriterium für den Erfolg der Technologie. Eine langfristige Funktionsfähigkeit ohne häufige Ausfälle oder teure Wartungsarbeiten ist entscheidend, um konkurrenzfähig zu sein.

Zusammengenommen ist das Kosten-Nutzen-Verhältnis in Summe entscheidend. Die Vorteile der laserbasierten Reinigung sollten die Investitionskosten über die Lebensdauer des Systems hinweg überwiegen. Bisherige Erkenntnisse zeigen insgesamt eine positive Entwicklung. Hier sei jedoch abschließend festgehalten, dass dieses Projekt zunächst dem Hauptziel gewidmet war die generelle Machbarkeit der Methode auf Basis wissenschaftlicher Fakten zu evaluieren. Nach den vielversprechenden Ergebnissen muss es das Ziel weiterführender Arbeiten sein detaillierter in eine Wirtschaftlichkeitsanalyse einzusteigen. Dafür sind, wie dargestellt, jedoch entscheidende, spezifische Kernparameter von Nöten, um am Ende zu einer realistischen Kosten-Nutzen-Abschätzung kommen zu können. Auf Basis von ersten Demonstrationen konnte hier also allenfalls eine erste Abschätzung erfolgen.

## 2.3 Fortschreibung des Verwertungsplans

Die F/E-Ergebnisverwertung erfolgt gemäß den Richtlinien des Fördermittelgebers und des Projektträgers nach einem Verwertungsplan - s. Anlage. Dieser Verwertungsplan gewährleistet unter Berücksichtigung der vorhandenen und zukünftigen Voraussetzungen in Bezug auf die Zusammenarbeit mit weiteren Partnern aus Industrie und Forschung eine effiziente Nutzung und Implementierung der wissenschaftlich-technischen Ergebnisse des geförderten Projekts in die praktische Anwendung.

Der vorliegende Abschlussbericht enthält umfangreiche wissenschaftlich Erkenntnisse und technologische Innovationen, die eine Vielzahl von Verwertungsmöglichkeiten in wissenschaftlicher und technischer Hinsicht bieten. Die gewonnenen Forschungsergebnisse, angewandten Methoden und Prüfungen sind von großer Bedeutung für weitere nationale und internationale Forschungs- und Entwicklungsprojekte. Die dienen auch über die Laufzeit hinaus als Grundlage für wissenschaftliche Veröffentlichungen in Fachzeitschriften. Dies ermöglicht den wissenschaftlichen Austausch mit interessiertem Stakeholder. Die auch weiterhin geplante Präsentation der Ergebnisse auf nationalen und internationalen Konferenzen ermöglicht den fachlichen Austausch mit anderen Wissenschaftler: Innen und technischen Expert:Innen. Durch die aktive Teilnahme an Konferenzen können wertvolle Diskussionen geführt, Kooperationen angestoßen und neue Forschungsperspektiven entwickelt werden.

Die entwickelten Beschichtungsformulierungen dienen vor allem der Weiterentwicklung in einem angestrebten und bereits in der Beantragung befindlichen Folgeprojekt (»FoulLas<sup>2</sup>«). Darüber hinaus zeigte sich bereits während der Projektlaufzeit ein großes Interesse bei Industriepartnern, insbesondere aus der maritimen Industrie. Durch die Zusammenarbeit mit relevanten Unternehmen können die Technologien und Innovationen aus diesem Projekt mittel- bis langfristig in praktische Anwendungen und neue Dienstleistungen überführt werden, um Bewuchs auf Oberflächen zu verhindern und die

Leistungsfähigkeit von Produkten zu verbessern. Innovative Technologien und neuartige Konzepte, die im Rahmen dieses Forschungsprojekts entwickelt wurden, kommen für Patente und Lizenzen in Betracht. Hier findet kurzfristig ein Technologie-Screening statt.

Über das Nachfolgeprojekt hinaus liefert dieses Teilvorhaben eine solide Grundlage für weiterführende Forschungsprojekte. Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen können andere alternative Ansätze entwickelt oder neue Anwendungsbereiche für die multifunktionale Beschichtung erforscht werden. Dies fördert den Fortschritt in diesem Bereich und ermöglicht die Erschließung neuer Marktpotenziale.

Die identifizierten Verwertungsmöglichkeiten in wissenschaftlicher und technischer Hinsicht bieten somit vielfältige Wege, um die Forschungsergebnisse effektiv zu nutzen und den Fortschritt in der maritimen Oberflächenbeschichtung sowie in der erforderlichen Prüfinfrastruktur voranzutreiben.

Konkrete, (populär-)wissenschaftliche Verwertungen während des laufenden Vorhabens:

- Erstellung einer im Konsortium gemeinschaftlich verfassten Pressemitteilung, mit anschließender Veröffentlichung auf der LZH-Homepage sowie Verbreitung über Redaktionsnetzwerke.
- Teilnahme und Projektvorstellung im Rahmen des „Virtueller Biofouling-Workshop: Aktuelle Branchenentwicklung“ am 24.11.2020. Veranstalter: Kompetenzzentrum GreenShipping Niedersachsen, Maritimes Cluster Norddeutschland e. V. (MCN) und die EurA AG: <https://www.maritimes-cluster.de/news/aktuelles/veranstaltungsrueckblick-virtueller-biofouling-workshop-aktuelle-branchenentwicklung/>
- M. Baumann, M. Ackermann, A. Balck, T. Bonhoff, O. Botter, R. Lange, S. Marfels, D. Dinakaran, A. Kösters, V. Krause, B. Emde, S. Zimbelmann, J. Hermsdorf, S. Kaieler, T. Heusinger von Waldegge (2022): 4XX nm diode-laser beyond 2 kW of output power, Proceedings Volume 11983, High-Power Diode Laser Technology XX; 1198300 <https://doi.org/10.1117/12.2615623>, Event: SPIE LASE, 2022, San Francisco, California, United States
- Stanislav Zimbelmann, Benjamin Emde, Tim Heusinger von Waldegge, Dorothea Stübing, Markus Baumann, Jörg Hermsdorf (2022): Interaction between laser radiation and biofouling for ship hull cleaning, Procedia CIRP, Volume 111, Pages 705-710, ISSN 2212-8271, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.08.013>
- Tim Heusinger von Waldegge, Dorothea Stübing, Benjamin Emde, Stanislav Zimbelmann, Jörg Hermsdorf, Markus Baumann (2022): Underwater Hull Cleaning by Laser - Feasibility and Perspectives, 14th Symposium on High-Performance Marine Vehicles HIPER'22 pp. 190-200, Cortona, 29-31 August 2022.
- Fernsehbeitrag über die Thematik mit Darstellung der Feldprüfungen und Interviews zweier IFAM-Wissenschaftler »3sat nano: Unterwasserversuche unter Extrembedingungen, 14.12.2021, abrufbar unter: <https://www.3sat.de/wissen/nano/211214-unterwasser--nano-100.html> bis zum 14.12.2026.

## 2.4 Während der Projektlaufzeit bekannt gewordene Fortschritte auf dem Fachgebiet

Dezidierte Fortschritte auf dem Fachgebiet, die sich mit identischen beziehungsweise eng verwandten Lösungsstrategien beschäftigen sind nicht bekannt geworden.

Globaler gesehen wurden jedoch in den letzten Jahren verschiedene neue Technologien zur Entfernung von Bewuchs an Schiffsrümpfen (weiter-)entwickelt und erforscht. Dazu zählt u.a. die Ultraschalltechnologie. Sie wird eingesetzt, um hochfrequente Schallwellen zu erzeugen, die eine Ansiedlung von Bewuchsorganismen verhindern soll.

Eine weitere Methode stellt der elektrochemische Bewuchsschutz dar. Bei dieser Methode wird ein elektrischer Strom durch den Schiffsrumpf geleitet, wodurch Ionen freigesetzt werden, die das Anhaften von Bewuchsorganismen reduzieren.

Eine LED-basierte Bewuchsschutztechnologie nutzt spezielle LEDs, um einer Besiedlung der Oberflächen vorzubeugen. Durch die Abgabe von UV- Licht wird das Wachstum der Bewuchsorganismen gestört.

Zudem wurden zahlreiche (teil-)autonome Unterwasserfahrzeuge entwickelt, um den Bewuchs auf Schiffsrümpfen zu überwachen und zu entfernen. Diese Technologien nutzen beispielsweise Kamerabilder und Sensoren, um den Zustand des Schiffsrumpfs zu analysieren und gezielte Reinigungsmaßnahmen (mit konventionellen, abrasiven Methoden) durchzuführen.

Nach wie vor forschen Forschungseinrichtungen und Unternehmen an neuen Beschichtungstechnologien. Hier geht der Trend zu biozidfreien, bioabbaubaren oder biobasierten Beschichtungen.

### 3 Danksagung

Diese Arbeit wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) im Rahmen des Forschungsprojektes »Foullas« Fouling-Entfernung von maritimen Oberflächen mittels Laserstrahlung unter Wasser unter dem Förderkennzeichen **03SX489B** vom Projektträger Forschungszentrum Jülich GmbH gefördert. Die Autoren bedanken sich herzlich bei den Fördergebern, Forschungspartnern und beteiligten Unternehmen für die engagierte und produktive Zusammenarbeit und Unterstützung.

Supported by:



on the basis of a decision  
by the German Bundestag



An dieser Stelle möchten wir auch unseren aufrichtigen Dank an die Projektleitung, die Kooperationspartner und alle beteiligten Kollegen und Kolleginnen aussprechen. Die erfolgreiche Durchführung dieses dreieinhalbjährigen Projektes wäre ohne die wertvolle Unterstützung, Expertise und engagierte Mitarbeit nicht möglich gewesen. Wir möchten allen Beteiligten daher für Ihre kontinuierliche Mitarbeit und Zusammenarbeit danken, die dazu beigetragen hat, dass wir unsere Forschungsziele erreichen konnten.

gez.

Tim Heusinger von Waldegge  
Projektleiter

Prof. Dr. Bernd Mayer  
Institutsleiter

Fraunhofer Institut für Fertigungstechnik und  
Angewandte Materialforschung IFAM  
Bereich Klebtechnik und Oberflächen | Abtl. Lack-  
technik | AG Antimikrobielle Beschichtungen und  
Bewuchsschutz  
Wienerstraße 12  
28359 Bremen

Fraunhofer Institut für Fertigungstechnik und  
Angewandte Materialforschung IFAM  
Bereich Klebtechnik und Oberflächen

Wienerstraße 12  
28359 Bremen

Tel: +49 421 - 2246-7377  
Fax: +49 421 - 2246-430  
E-Mail: [Tim.Heusinger@ifam.fraunhofer.de](mailto:Tim.Heusinger@ifam.fraunhofer.de)

<https://www.ifam.fraunhofer.de/>