

Hereon

Kürzel Forschungseinrichtung 1 (FE 1)

Fraunhofer IFAM

ggf. Kürzel Forschungseinrichtung 2 (FE 2)

ggf. Kürzel Forschungseinrichtung 3 (FE 3)

eCOMPLETE

Akronym / Thema kurz Skizze

2024-1- 1

Skizzen-Nr. (wird vom FSM eingetragen)

Ansprechpartner/-in FE für den FSM

Skizze für ein IGF-Vorhaben zum Thema
Öko-freundliche MOF- und LDH-Nanofüllstoffe für Antifouling-
Beschichtungen auf Polyurethanbasis

Gliederung der Skizze angelehnt an die Gliederung Beschreibung zum Forschungsantrag der AiF
(Stand: 07/2018)

1. Kurzzusammenfassung und Fachgebiete / Wirtschaftszweige

Bewuchs (Biofouling) als unerwünschte Ablagerung von Meeresorganismen auf der Oberfläche von marinen Bauwerken und Schiffen, verursacht zusätzliche, unnötige Umweltverschmutzung durch den damit einhergehenden Anstieg des Treibstoffbedarfes respektive der CO₂ Emissionen. Biofouling besitzt daher eine große wirtschaftliche Tragweite. Die wichtigste Methode zur Verhinderung von Biofouling besteht in der Anwendung von Antifouling-Anstrichen. Herkömmliche Antifouling-Anstriche enthalten giftige Stoffe, deren Wirkung auf der Vergiftung von Meeresorganismen beruht. Ihre dauerhafte Freisetzung kann jedoch auch Nichtzielorganismen ernsthaft schädigen. Aus diesen Gründen ist die Entwicklung neuartiger, wirksamer und umweltfreundlicher Beschichtungen mit kontrollierbarer Freisetzung von Antifouling-Substanzen dringend erforderlich.

Im Rahmen des Projekts eCOMPLETE werden Antifouling-Beschichtungen auf der Basis handelsüblicher Polyurethanlacke entwickelt, die mit neuen Nanofüllstoffen versetzt sind. Das Ziel ist die Entwicklung nachhaltiger und umweltfreundlicher Nanofüllstoffe unter Einbeziehung von Ausgangsstoffen aus natürlichen oder recycelten Ressourcen. Um dies zu erreichen, werden metallorganische Gerüste (MOFs) und geschichtete Doppelhydroxide (LDHs) als Nanofüllstoffe in den Fokus genommen, die in der Lage sind, Antifouling-Substanzen zu speichern und bei Bedarf kontrolliert und langsam abzugeben. Nachhaltige MOF-Nanofüllstoffe werden aus recycelten Linkern aus PET-Kunststoffabfällen hergestellt. Die natürlichen, umweltfreundlichen LDHs-Nanofüllstoffe wiederum werden mit aktiven Antifouling-Substanzen beladen. Die erhaltenen Verbundbeschichtungen sollen ein hohes Maß an Bewuchsschutz mit langsamer Freisetzung der Wirkstoffe und darüber hinaus noch einen wirksamen Korrosionsschutz bieten.

2. Wirtschaftliche Relevanz für KMU

2.1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

Der marine Bewuchs (Biofouling) hat erhebliche betriebliche und wirtschaftliche Auswirkungen auf Meeresbauwerke und Schiffe. Durch die Ansiedlung von Meeresorganismen auf Schiffsoberflächen erhöhen sich deren Gewicht und Reibungswiderstand erheblich, was wiederum zu einem höheren Kraftstoffverbrauch führt. Außerdem kann Biofouling Korrosionsprozesse an der Oberfläche verursachen, die die Lebensdauer von Stahlwasserbauwerken verkürzen. Die derzeit angewandten Antifouling-Strategien bieten keinen vollständigen Schutz, so dass die Schiffe regelmäßig mit Antifouling behandelt werden müssen, was zeit- und kostenaufwendig ist, d. h. zusätzliche Kosten für die Schiffsindustrie verursacht. Die effektivste Strategie für den Bewuchsschutz ist das Auftragen von biozidhaltigen Bewuchsschutzanstrichen, deren Anwendung jedoch schädliche Auswirkungen auf die gesamte Umwelt hat. Aus diesen Gründen ist die Entwicklung neuer kostengünstiger und umweltfreundlicher Strategien für einen langfristigen Schutz dringend erforderlich. Das eCOMPLETE-Projekt zielt auf die Entwicklung wirksamer Antifouling-Beschichtungen auf der Grundlage handelsüblicher Polyurethanlacke in Kombination mit neuartigen Nanofüllstoffen ab. Im Rahmen des Projekts werden Nanofüllstoffe auf der Grundlage von metallorganischen Gerüsten entwickelt, die aus Kunststoffabfällen gewonnen werden oder aus umweltfreundlichen geschichteten Doppelhydroxiden bestehen. Die Anwendung solcher Nanofüllstoffe stellt einen wirksamen Weg zur Verbesserung der Antifouling-Leistung und des Korrosionsschutzes der Beschichtungen mit minimalen negativen Auswirkungen auf die Umwelt dar, da sowohl LDH als auch MOF zu den Materialien mit der Fähigkeit zur kontrollierten Freisetzung aktiver Spezies in Medien gehören. Im Falle einer erfolgreichen Umsetzung von eCOMPLETE werden auch allgemeine Empfehlungen für die Anwendung von MOFs und LDHs für den Bewuchsschutz erstellt.

2.2 Wirtschaftliche Bedeutung der angestrebten Forschungsergebnisse für KMU

Die Antifouling-Beschichtungen, die im Rahmen des eCOMPLETE-Projekts entwickelt werden sollen, haben ein hohes Potenzial für weitere Anwendungen im Schiffs- und Stahlwasserbau und bei maritimen Dienstleistern wie Schiffseignern (einschließlich Verkehr und Tourismus), da sie die Lebensdauer von

Strukturen unter Meeresbedingungen verlängern können. Darüber hinaus können Firmen und kleine Unternehmen, die mit Reinigungssystemen für Bauwerke arbeiten, potenzielle Nutzer der entwickelten Kompositbeschichtungen sein, da sie umweltfreundliche Beschichtungen darstellen. Zudem kann die Entwicklung solcher Beschichtungen auch für kleine Unternehmen und Start-ups interessant sein, die sich auf die Herstellung von Beschichtungen, Farben und Farbzusätzen spezialisiert haben.

Da die Verwendung von biozidbasierten Antifoulingmitteln ab dem 12. Mai 2021 von der deutschen Regierung eingeschränkt wurde, stellen die zu entwickelnden biozidfreien Beschichtungen eine hervorragende umweltfreundliche Alternative dar und entsprechen den gesetzlichen Anforderungen. Darüber hinaus zielt das Projekt eCOMPLETE auf eine nachhaltige Bewirtschaftung der natürlichen Ressourcen ab, die in dem von den Vereinten Nationen aufgestellten Ziel 12 für nachhaltige Entwicklung enthalten ist. Um dieses Ziel zu erreichen, werden aus PET-Polymerabfällen gewonnene Ausgangsstoffe für die Bildung von MOF-Nanofüllstoffen eingesetzt.

3. Wissenschaftlich-technischer Ansatz

3.1 Stand der Forschung und Entwicklung

Mariner Bewuchs, d.h. unerwünschte Ablagerungen von Meeresorganismen auf der Oberfläche von Strukturen, verursacht große Schäden an Schiffen und Offshore-Anlagen. Es führt zu Umweltverschmutzung und enormen wirtschaftlichen Verlusten, die mit einer Erhöhung des Gewichts und des Reibungswiderstands von Schiffen und folglich mit einem höheren Kraftstoffverbrauch [1] sowie mit Kosten für die Reparatur und Reinigung verschmutzter Strukturen verbunden sind. So wird der jährliche wirtschaftliche Verlust allein für die Transportindustrie auf 150 Milliarden Dollar geschätzt [2]. Dabei stellt der Schutz vor Biofouling eine der wichtigsten industriellen Aufgaben dar.

Die wichtigste Methode, um die Ansammlung von Bewuchsorganismen zu verhindern, ist das Aufbringen von Antifouling-Anstrichen. Diese Beschichtungen zeichnen sich durch ihre antimikrobielle Aktivität aus. Die meisten herkömmlichen Antifouling-Beschichtungen setzen auf toxische Stoffe, sogenannte Biozide. Diese gelangen permanent in die Umwelt und können einen negativen Effekt auf aquatische Ökosysteme ausüben. Aufgrund dieser kontinuierlichen Auswaschung und weiteren Verteilung in der Meeresumwelt verursachen sie jedoch auch bei Nichtzielorganismen ernsthafte Schäden [3, 4]. Aufgrund der nachteiligen Auswirkungen auf die Meeresumwelt wurden viele Antifouling-Substanzen von der Internationalen Seeschiffahrtsorganisation (IMO) verboten. Dies gab den Anstoß für die Entwicklung neuer umweltfreundlicher Strategien zum Schutz vor Biofouling. Gegenwärtig wird aktiv an der Entwicklung von Polymerbeschichtungen gearbeitet, die Antifouling-Substanzen enthalten, die eine Alternative zu Bioziden darstellen. Diese Antifouling-Substanzen umfassen eine Reihe umweltfreundlicher Stoffe, wie Alkaloide oder Terpene, die aus lebenden Organismen synthetisiert oder isoliert werden können. Obwohl viele von ihnen einen hohen Schutz gegen Biofouling aufweisen, sind die Verfahren zu ihrer Herstellung komplex und teuer, und ihre Freisetzung ist unkontrollierbar und hängt von der Polymermatrix ab [5, 6]. Parallel zu dieser Strategie stehen Beschichtungen, die auf Benetzbarkeit, d.h. (Super)-Hydrophobie oder (Super)-Hydrophilie basieren, im Mittelpunkt zahlreicher Untersuchungen. Sie können eine hohe Aktivität gegenüber Mikro- oder Makrobewuchs aufweisen, sind aber relativ teuer, haben schlechte mechanische Eigenschaften und eine begrenzte Stabilität [7]. Ein weiteres Beispiel sind selbstpolierende Beschichtungen, deren Aktivität auf ihrer Hydrolyse bei Kontakt mit Meerwasser und anschließender schichtweiser Ablösung beruht. Diese Beschichtungen sind im Handel erhältlich und können das Biofouling unter dynamischen Bedingungen wirksam verhindern. Allerdings sind ihre Preise immer noch hoch, und sie setzen Cu, Zn und Mikroplastik in der Meeresumwelt frei [6]. Jüngste Untersuchungen haben das große Potenzial photokatalytisch aktiver Antifouling-Beschichtungen auf der Basis von ZnO und TiO₂ gezeigt. Ihre Wirkung beruht auf der lokalen Erzeugung kurzlebiger reaktiver Sauerstoffspezies (ROS), die nur auf Organismen einwirken, die sich in der Nähe der Oberflächen befinden, d. h. sie verhindern auf diese Weise die Abtötung anderer Wasserorganismen. Diese Beschichtungen zeigen jedoch nur unter Lichteinfluss ihre Wirkung, und ihre Anwendung in größerem Maßstab ist nach wie vor eine Herausforderung [8]. Obwohl bei der Entwicklung neuer umweltfreundlicher Antifouling-Schutzanstriche ein großer Schritt nach vorn gemacht wurde, gibt es immer noch eine Reihe von Nachteilen bei ihrer weiteren Verwendung, wie z. B. begrenzte Leistung, schlechte mechanische Eigenschaften, unkontrollierbare Freisetzung oder hohe Preise. Aus diesen Gründen besteht nach wie vor ein außerordentlicher Bedarf an der Entwicklung neuer umweltfreundlicher Beschichtungen mit langer Lebensdauer und kontrollierbarer Freisetzung.

Jüngste Untersuchungen haben gezeigt, dass metallorganische Gerüste (MOFs) und geschichtete Doppelhydroxide (LDHs) für den Bewuchsschutz sehr wirksam sind [9, 10]. MOFs sind eine Klasse kristalliner Materialien, deren geordnete Netzwerke aus Metallkationen bestehen, die durch organische Verbindungsmoleküle verbunden sind [11, 12]. In der Regel werden sie unter milden Bedingungen synthetisiert und, was besonders wichtig ist, können aus nachhaltigen Ausgangsstoffen hergestellt werden [13]. LDHs wiederum gehören zur Klasse der kostengünstigen und umweltfreundlichen anionischen Tone und können dank ihrer Ionenaustauscheigenschaften zahlreiche funktionelle Spezies einlagern [14, 15]. Die Besonderheit von LDHs und MOFs besteht in ihrer Fähigkeit als Nanocontainer,

d.h. sie können funktionelle Spezies (Antifouling und Inhibitoren) speichern und bei Bedarf (z.B. bei Änderung des pH-Wertes in Verbindung mit der Anwesenheit von Bakterien auf der Oberfläche oder Korrosionsprozessen) kontrolliert freisetzen, jedoch nicht dauerhaft [16-18]. Im Rahmen des aktuellen Vorhabens werden die Eigenschaften von LDHs und MOFs für die Entwicklung umweltfreundlicher und/oder nachhaltiger Nanofüllstoffe mit kontrollierbarer Freisetzung genutzt. Sie werden als Nanofüllstoffe in Polyurethanbeschichtungen eingesetzt, die für ihre guten mechanischen Eigenschaften und geringe Toxizität bekannt sind [19].

3.2 Arbeitshypothese

Im Rahmen des Projekts eCOMPLETE werden Wissenschaftler:innen des Helmholtz-Zentrums Hereon und des Fraunhofer-Instituts für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM neue Antifouling-Beschichtungen auf Polyurethanbasis entwickeln, die mit umweltfreundlichen und/oder nachhaltigen Nanofüllstoffen beladen sind, die bei Bedarf freigesetzt werden können. Als Nanofüllstoffe stehen MOFs und LDHs-Nanocontainer mit bemerkenswerter Antifouling-Leistung im Mittelpunkt. Ziel des Projekts ist die Entwicklung nachhaltiger MOF-Nanofüllstoffe unter Verwendung von Ausgangsstoffen aus PET-Kunststoffabfällen. Die umweltfreundlichen LDHs wiederum werden mit Antifouling-Wirkstoffen beladen, die dank der Nanocontainer-Eigenschaften der LDHs langsam und kontrolliert aus dem Polymer freigesetzt werden können, z. B. nach einer Änderung des Oberflächen-pH-Wertes in Verbindung mit einem Kontakt mit lebenden Organismen. Die erfolgreiche Umsetzung von eCOMPLETE wird durch eine enge Zusammenarbeit zwischen Gruppen mit Fachkenntnissen auf dem Gebiet der MOFs und LDH-Nanocontainer (Hereon) und der Lackformulierung / Applikation von Lackbeschichtungen (IFAM) erreicht. Ein großer Vorteil ist die Verfügbarkeit von eigenen maritimen Testgeländen für die Prüfung der Antifouling-Eigenschaften unter realen Umweltbedingungen (IFAM). Am Ende des eCOMPLETE-Projekts werden neuartige umweltfreundliche Polyurethan-Beschichtungen zur Verfügung stehen, die mit Füllstoffen auf Nanocontainer-Basis angereichert sind und folgende Eigenschaften aufweisen: antifouling mit kontrollierbarer und langsamer Freisetzung von Wirkstoffen; hoher Korrosionsschutz; nachhaltig und umweltfreundlich durch die Einbeziehung von umweltfreundlichen und Nanofüllstoffen aus natürlichen oder recycelten Ressourcen.

4. Lösungsweg

4.1 Bearbeitungsschritte und Personaleinsatz

AP Nr.	2	Führende Gruppe	Hereon, IFAM	Anfang/Endmonat	1-12
Name	Synthese von MOFs aus PET-Abfällen und ihre Anwendung als Nanofüllstoffe für Polyurethanlacke				
Ziele:	Das Hauptziel von WP1 ist es, nachhaltige MOF-basierte Nanofüllstoffe zu entwickeln und in Polyurethanbeschichtungen zu integrieren.				
Verantwortliche Forscher:	Dr. V. Kasneryk, Dr. N. Scharnagl, T. Heusinger von Waldegge, Dr. C. Schreiner				
Aufgabe 1.1:	<u>Herstellung von organischen Linkern aus PET-Abfällen.</u> Diese Aufgabe umfasst die Herstellung von Terephthalsäure durch Hydrolyse von Polyethylenterephthalat (PET)-Abfällen (d. h. PET-Recycling), um organische Linker zu bilden, die für die weitere Bildung von MOF-Nanofüllstoffen geeignet sind (Aufgabe 1.2). Dies soll durch die Variation der Syntheseparameter erreicht werden: Zersetzungstemperatur (120-180 °C), Zeit (1-8 h) und pH-Wert (4-10).				
Aufgabe 1.2:	<u>Synthese von MOF-Nanofüllstoffen aus PET-Abfällen.</u> Die in 1.1. gewonnenen recycelten organischen Linker werden für die weitere Herstellung von Cu-BDC- und MOF-5-MOF-Nanofüllstoffen verwendet. Diese Aufgabe umfasst die Bewertung, Optimierung und Validierung der klassischen Methoden zur Herstellung dieser MOFs, um Nanofüllstoffe zu erhalten, die in Polyurethanbeschichtungen eingebracht werden können (Aufgabe 1.3). Dies geschieht durch die Variation der Syntheseparameter: Zusammensetzung der Reaktionsmischung für die Kristallisation sowie Reaktionstemperatur (30-120 °C) und Zeit (1-24 h). Die Synthese aus wässrigen Reaktionsmischungen bei niedrigeren Temperaturen steht dabei im Mittelpunkt. Es werden MOF-Nanofüllstoffe mit unterschiedlicher Kristallgröße erzeugt. Die Charakterisierung der erhaltenen Proben wird in WP4 (4.1) durchgeführt.				
Aufgabe 1.3:	<u>Formulierung von Polyurethan-Antifouling-Beschichtungen, die mit nachhaltigen MOF-Füllstoffen beladen sind.</u> Die in 1.2. aus PET-Abfällen hergestellten MOF-Pulver werden als Nanofüllstoffe für Beschichtungen auf Polyurethanbasis verwendet, die auf Stahlsubstrate aufgetragen werden. Die Formulierung von Lacken am IFAM ist ein komplexer Prozess, der eine sorgfältige Abwägung verschiedener Faktoren erfordert, um die gewünschten Eigenschaften zu erreichen. Bei der Einbettung neuer, unbekannter Materialien in Lacke ist besondere Vorsicht geboten, um potenzielle Wechselwirkungen und unerwünschte Effekte zu vermeiden. Ein entscheidender Aspekt ist die Kompatibilität des neuen Materials mit den anderen Komponenten der Lackformulierung, um eine homogene Mischung zu gewährleisten. Zusätzlich müssen mögliche Auswirkungen auf die physikalischen, chemischen und mechanischen Eigenschaften des Lackfilms berücksichtigt werden. Bei der Formulierung von Lacken stehen verschiedene Stellschrauben zur Verfügung, um die gewünschten Eigenschaften zu beeinflussen. Dazu gehören die Auswahl und Dosierung der Bindemittel, Lösungsmittel, Additive und Pigmente. Die Zusammensetzung dieser Komponenten kann angepasst werden, um eine optimale Haftung, Abriebfestigkeit, chemische Beständigkeit und andere basale Lackeigenschaften zu erzielen. Darüber hinaus werden spezifische funktionalen Eigenschaften angestrebt, die den Anforderungen der marinen, dynamischen Anwendung entsprechen. Dazu gehören beispielsweise eine hohe Korrosionsbeständigkeit, UV-Stabilität, Kratzfestigkeit oder eine verbesserte Härte und die Bewuchsschutzeigenschaften. Die Entwicklung einer Lackformulierung erfordert daher ein tiefgreifendes Verständnis der chemischen und physikalischen Zusammenhänge sowie umfangreiche Erfahrung in der Lacktechnologie, um eine maßgeschneiderte Lösung zu schaffen, die sowohl funktional als auch in Bezug auf grundlegende Lackeigenschaften höchsten Anforderungen gerecht wird. Um die Umweltbelastung, z.B. durch				

organische Lösungsmittel, zu minimieren, werden Reaktionsmischungen auf Wasserbasis im Mittelpunkt stehen. Es werden Proben mit unterschiedlichen Konzentrationen von Nanofüllstoffen (3-20%) hergestellt. Für die erste Optimierung der Beschichtung wird die Tauchbeschichtungsmethode (Hereon) angewandt, später wird dann die Sprühbeschichtungsmethode (IFAM) eingesetzt. Die Charakterisierung der hergestellten Proben wird in WP4 durchgeführt. Die Charakterisierung der Antifouling-Leistung wird in WP3 durchgeführt.					
AP Nr.	2	Führende Gruppe	Hereon, IFAM	Anfang/Endmonat	4-15
Name	Herstellung von Polyurethan-Antifouling-Beschichtungen mit umweltfreundlichen LDH-Nanofüllstoffen				
Ziele: Die Herstellung von LDH-Nanocontainern, die mit Antifouling-Mitteln beladen sind, und ihre weitere Anwendung als Zusatzstoff für Polyurethanbeschichtungen werden im Mittelpunkt von WP2 stehen.					
Verantwortliche Forscher: Dr. V. Kasneryk, Dr. M. Serdechnova, Dr. N. Scharnagl, T. Heusinger von Waldegge					
Aufgabe 2.1: <u>Beladung von LDH mit Bewuchsschutz-Substanzen.</u> Die handelsüblichen Zn-Al oder Mg-Al LDH (NO ₃ -) werden mit aktiven Antifouling-Substanzen beladen. Als erster Ansatz werden Indol und 3-Formylindol verwendet, danach können auch andere Indol- oder Furanverbindungen einbezogen werden. Reaktionstemperatur (25-90°C), pH-Wert (7-11), Wirkstoffkonzentration (10 ⁻⁴ -10 ⁻² mol/L) usw. werden systematisch getestet, um Bedingungen für die höchste Beladung zu finden. Die Charakterisierung aller interkalierten Proben wird in WP4 durchgeführt. Nur LDH mit der höchsten Beladung an Antifoulingmitteln wird als Füllstoff für Polyurethan verwendet (Aufgabe 2.2).					
Aufgabe 2.2: <u>Herstellung von Polyurethan-Antifouling-Beschichtungen, die mit nachhaltigen MOF-Füllstoffen beladen sind.</u> LDH-Nanocontainer, die in 2.1. mit Antifouling-Substanzen beladen wurden, werden als Füllstoffe für Beschichtungen auf Polyurethanbasis verwendet, die dann auf Stahlsubstrate aufgetragen werden. Ähnlich wie in 1.3. wird ein Polyurethanlack auf Wasserbasis im Mittelpunkt stehen. Es werden Beschichtungen mit unterschiedlichen Konzentrationen von LDH-Nanofüllstoffen (3-20%) hergestellt. Die Viskosität der Polyurethanbeschichtungen wird kontrolliert. Zur ersten Optimierung der Beschichtung wird die Tauchbeschichtungsmethode (Hereon) angewandt und dann im Projektverlauf die Sprühbeschichtungsmethode (IFAM) eingesetzt. Die allgemeine Charakterisierung der erhaltenen Proben wird in WP4 durchgeführt, die Charakterisierung der Antifouling-Leistung in WP3.					
AP	3	Führende Gruppe	IFAM	Anfang/Endmonat	10-20
Name	Charakterisierung der Antifouling-Leistung der erhaltenen Polyurethanbeschichtungen, die mit umweltfreundlichen MOF- und LDH-Nanofüllstoffen beladen sind				
Ziele: AP3 wird sich auf die Bestimmung der Antifouling-Leistung der erhaltenen Polyurethanbeschichtungen mit unterschiedlichen Additiven konzentrieren.					
Verantwortliche Forscher: T. Heusinger von Waldegge, Dr. D. Stübing, Dr. C. Schreiner					
Aufgabe 3.1: <u>Studie über die Freisetzung von Antifouling-Substanzen aus Nanofüllstoffen.</u> Im Mittelpunkt dieser Aufgabe steht die Untersuchung der Freisetzungskinetik von Antifouling-Mitteln aus MOF und LDH, die in die Polyurethanmatrix eingebaut sind. Bei dieser Untersuchung werden verschiedene Techniken eingesetzt, um die Freisetzungsmechanismen und -profile unter verschiedenen anwendungsorientierten Parametern zu erhellen. Zunächst können dynamische Freisetzungstudien mit Methoden wie der UV-Vis-Spektroskopie in Verbindung mit der Massenspektrometrie (LC-MS) durchgeführt werden. Diese Techniken ermöglichen die Quantifizierung von Antifouling-Mitteln, die bei bestimmten Parametern und zu bestimmten Zeiten freigesetzt werden, und geben Aufschluss über die gesamte Freisetzungskinetik. Zu den beeinflussenden Parametern können unterschiedliche pH-Werte, Temperaturen oder Salzgehalte gehören. Darüber hinaus können Oberflächenanalyseverfahren wie die Rasterelektronenmikroskopie (REM) eingesetzt werden, um die Morphologie und Struktur der Nanofüllstoffe in der Polyurethanmatrix sichtbar zu machen.					
Aufgabe 3.2: <u>Antifouling-Leistung.</u> Ziel dieser Aufgabe ist es, die Leistung ausgewählter Beschichtungssysteme unter realistischen Bedingungen zu validieren, insbesondere im Hinblick auf ihre Wirksamkeit bei der Verhinderung von Bewuchs. Dazu werden die Beschichtungen simulierten Feldtests unter Verwendung der statischen und dynamischen Bewuchsprüfstände unterzogen, die in der IFAM-Einrichtung auf Helgoland zur Verfügung stehen. Während dieser Tests werden die Beschichtungen Umweltbedingungen ausgesetzt, darunter Temperaturschwankungen, Salzgehalt und der Kontakt mit Meeresorganismen. Die statischen Prüfstände bieten kontrollierte Bedingungen für die Bewertung der Bewuchsfestigkeit der Beschichtungen in einer stationären Umgebung, während der dynamische Prüfstand die Auswirkungen von Wasserströmung und Wellengang nachbildet, um die Leistung der Beschichtungen unter dynamischen Bedingungen zu bewerten.					
Die Tests werden in Übereinstimmung mit den einschlägigen ASTM-Normen durchgeführt, z. B. ASTM 3623-78a und ASTM D6990-20 für statische Immersions- und für dynamische Belastungstests. Diese Normen gewährleisten Konsistenz und Genauigkeit im Bewertungsprozess und ermöglichen zuverlässige Vergleiche zwischen verschiedenen Beschichtungssystemen. Indem die Beschichtungen simulierten Feldtests nach ASTM-Normen unterzogen werden, soll dieses Arbeitspaket wertvolle Einblicke in ihre reale Wirksamkeit bei der Verhinderung von Bewuchs liefern. Die aus diesen Tests gewonnenen Daten werden in weitere Optimierungsbemühungen einfließen und die Entwicklung fortschrittlicher Antifouling-Technologien leiten.					
AP No.	4	Leading group	Hereon, IFAM	Anfang/Endmonat	1-24
Name	Allgemeine Charakterisierung der Proben				
Ziele: Allgemeine Charakterisierung der hergestellten umweltfreundlichen MOF- und LDH-Nanofüllstoffe sowie der beladenen Polyurethanbeschichtungen vor und nach Antifouling-Anwendungstests.					
Verantwortliche Forscher: Dr. V. Kasneryk, Dr. M. Serdechnova, T. Heusinger von Waldegge, Dr. D. Stübing					
Das WP. 4 beinhaltet die folgenden Aufgaben:					
Aufgabe 4.1: <u>Charakterisierung MOF-Nanofüller</u>			Aufgabe 4.2: <u>Charakterisierung LDH-Nanofüller</u>		
Aufgabe 4.3: <u>Charakterisierung der Polyurethanbeschichtungen mit MOF oder LDH beladen</u>					
- Zur Durchführung der Aufgaben 4.1 - 4.3 werden folgende Charakterisierungstechniken angewandt: Strukturformel, Beladung mit Antifouling-Substanzen, Phasenverteilung in der Beschichtung: Röntgenbeugung (XRD), Fourier-Transformations-Infrarotspektroskopie (FTIR), Raman-Spektroskopie, optische Emissionsspektroskopie mit Glimmentladung, thermogravimetrische Analyse (TGA);					

- Zur Charakterisierung der Morphologie der Materialien, der porösen Strukturen und der Elementverteilung in den Beschichtungen: Rasterelektronenmikroskopie (SEM), energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDS);
 - Die Freisetzung von Inhibitoren wird mit Hilfe der UV/vis-Spektroskopie bewertet;
 - Zur Verfolgung der Korrosionsbeständigkeit: Potentiodynamische Polarisation, elektrochemische Impedanzspektroskopie, OCP-Messungen und weitere Korrosionstests (Wechseltauch-, Salzsprühnebel-, Zyklische Umwelttests und Filiformkorrosionstest) werden zur vergleichenden Bewertung der Korrosionsbeständigkeit und zur Charakterisierung des Degradationsverhaltens der Beschichtungen eingesetzt. Eine Bewertung des Korrosionsschutzes ist erforderlich, da die Meeresumgebung ein hochkorrosives Klima darstellt.
 - Das IFAM unterhält ein Prüflabor für Beschichtungen, das gemäß den Standards des NADCAP und der ISO 17025 akkreditiert ist. Ziel dieses Labors ist es, die Qualität und Beständigkeit von Beschichtungen zu gewährleisten, insbesondere unter den anspruchsvollen Bedingungen des marinen Umfelds. Die Tests umfassen den Salzsprühnebel zur Simulation der Korrosionsbeständigkeit unter marinen Bedingungen, den QUV-Test zur Bewertung der UV-Beständigkeit, die zyklische Klimaprüfung zur Beurteilung der Beständigkeit gegenüber extremen Umweltbedingungen, den Kratzfestigkeitstest zur Widerstandsfähigkeit gegen mechanische Belastungen und Kratzer sowie den Haftfestigkeitstest, um sicherzustellen, dass die Beschichtung auch unter starken Beanspruchungen intakt bleibt. Diese Prüfungen sind von entscheidender Bedeutung, um sicherzustellen, dass Beschichtungen im marinen Umfeld die erforderliche Haltbarkeit und Leistungsfähigkeit aufweisen, um den langfristigen Schutz maritimen Strukturen zu gewährleisten.

4.2 Arbeitsdiagramm

Gantt-Diagramm des Projekts eCOMPLETE								
	1-3	4-6	7-9	10-12	13-15	16-18	19-21	22-24
AP1	Herstellung von MOF und mit MOF beladenen Polyurethan-Beschichtungen: Hereon & IFAM							
1.1	Hereon							
1.2		Hereon						
1.3				Hereon&IFAM				
AP2		Herstellung von Polyurethan-Antifouling-Beschichtungen mit LDH-Nanofüllstoffen: Hereon						
2.1			Hereon					
2.2				Hereon&IFAM				
AP3				Charakterisierung der Antifouling-Leistung: IFAM				
3.1								
3.2								
AP4	Allgemeine Charakterisierung: Hereon & IFAM							
4.1		Hereon						
4.2			Hereon					
4.3				Hereon&IFAM				Hereon&IFAM
Bericht				Bericht 1				Bericht 2

5. Umsetzbarkeit und Transfer der Ergebnisse

5.1 Aussagen zur voraussichtlichen industriellen Umsetzung der FuE-Ergebnisse nach Projektende

Angesichts der Robustheit der Forschungsergebnisse und der bestehenden Marktnachfrage nach fortschrittlichen Antifouling-Technologien ist die Wahrscheinlichkeit einer späteren industriellen Umsetzung hoch. Die Akteure der Industrie haben großes Interesse an der Übernahme der entwickelten Beschichtungen bekundet, was auf günstige Bedingungen für die Umsetzung hindeutet. Es wird erwartet, dass die Umsetzung der angestrebten Forschungsergebnisse erhebliche Vorteile für Unternehmen, insbesondere KMU, die in der Schifffahrtsindustrie tätig sind, bringen wird. Zu diesen Vorteilen gehören eine verbesserte Betriebseffizienz, geringere Wartungskosten und eine verlängerte Nutzungsdauer der Schiffsanlagen. Darüber hinaus kann der Einsatz fortschrittlicher Antifouling-Beschichtungen zu einer verbesserten Umweltverträglichkeit führen, da der Einsatz biozider Mittel minimiert wird.

5.2 Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Während der Projektlaufzeit wird das Forschungsteam durch Workshops, Seminare und technische Vorführungen aktiv mit Industriepartnern zusammenarbeiten, um die Forschungsergebnisse zu verbreiten und den Wissenstransfer zu erleichtern. Im Anschluss an das Projekt wird ein umfassender Verbreitungsplan umgesetzt, der die Veröffentlichung von Forschungsergebnissen in Fachzeitschriften, die Teilnahme an Industriekonferenzen und die Einrichtung von Kooperationsnetzwerken zur Erleichterung des Technologietransfers vorsieht. Darüber hinaus werden Lizenzvereinbarungen oder Joint Ventures mit Industriepartnern geprüft, um den Kommerzialisierungsprozess zu beschleunigen und eine breite Akzeptanz der entwickelten Beschichtungen sicherzustellen.

6. Durchführende Forschungseinrichtung(en)

Helmholtz-Zentrum hereon GmbH

Matthias Rehahn: Prof. Dr., Geschäftsführer des Helmholtz-Zentrums Hereon

Mikhail L. Zheludkevich: Prof. Dr., Leiter des Institut für Oberflächenforschung

Valeryia Kasneryk: Dr., Projektleiterin and Ansprechpartnerin, Postdoktorandin in der Abteilung für Funktionale Oberflächen, Institut für Oberflächenforschung, valeryia.kasneryk@hereon.de

Carsten Blawert: Dr.-Ing., Leiter der Abteilung für Funktionale Oberflächen

Maria Serdechnova: Dr., Mitarbeiterin in der Abteilung für Funktionale Oberflächen

Nico Scharnagl: Dr., Mitarbeiter in der Abteilung für Funktionale Oberflächen

Fraunhofer IFAM

Tim Heusinger von Waldegge: Projektleiter und Ansprechpartner, Arbeitsgruppe Antimikrobielle Beschichtungen und Bewuchsschutz, Abteilung: Lacktechnik, Bereich: Oberflächentechnik, Tel. 0421 2246-7377, tim.heusinger@ifam.fraunhofer.de

Dorothea Stübing, Dr., Arbeitsgruppenleiterin, Antimikrobielle Beschichtungen und Bewuchsschutz. Abteilung: Lacktechnik, Bereich: Oberflächentechnik

Claus Schreiner, Dr., Mitarbeiter in der Abteilung Lacktechnik, Bereich: Oberflächentechnik.

7. Literaturverzeichnis

[1] S. Zimmelmann, B. Emde, T.H. von Waldegge, D. Stübing, M. Baumann, J. Hermsdorf, *Procedia CIRP*, 111 (2022) 705-710.
 [2] L. Chen, Y. Duan, M. Cui, R. Huang, R. Su, W. Qi, Z. He, *Science of The Total Environment*, 766 (2021) 144469.
 [3] M. Lagerström, A.-L. Wrangé, D.R. Oliveira, L. Granhaq, A.I. Larsson, E. Ytreberg, *Marine Pollution Bulletin*, 184 (2022) 114102.
 [4] C.A. Paz-Villarraga, I.B. Castro, G. Fillmann, *Environmental Science and Pollution Research*, 29 (2022) 30090-30101.
 [5] D. Liu, H. Shu, J. Zhou, X. Bai, P. Cao, *Biomimetics*, 8 (2023) 200.
 [6] H. Qiu, K. Feng, A. Gapeeva, K. Meurisch, S. Kaps, X. Li, L. Yu, Y.K. Mishra, R. Adelung, M. Baum, *Progress in Polymer Science*, 127 (2022) 101516.
 [7] L.D. Chambers, K.R. Stokes, F.C. Walsh, R.J.K. Wood, *Surface and Coatings Technology*, 201 (2006) 3642-3652.
 [8] S. Kumar, F. Ye, S. Dobretsov, J. Dutta, *Frontiers in Nanotechnology*, 3 (2021).
 [9] L. Rameesha, D. Rana, A. Nagendran, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11 (2023) 109888.
 [10] M. Yang, L. Gu, B. Yang, L. Wang, Z. Sun, J. Zheng, J. Zhang, J. Hou, C. Lin, *Applied Surface Science*, 426 (2017) 185-193.
 [11] N. Stock, S. Biswas, *Chemical Reviews*, 112 (2012) 933-969.
 [12] P. Rani, V. Kasnerky, M. Opanasenko, *Applied Materials Today*, 26 (2022) 101283.
 [13] K. Boukayouh, L. Bazzi, S. El Hankari, *Coordination Chemistry Reviews*, 478 (2023) 214986.
 [14] A.C. Bouali, M. Serdechnova, C. Blawert, J. Tedim, M.G.S. Ferreira, M.L. Zheludkevich, *Applied Materials Today*, 21 (2020) 100857.
 [15] V. Kasnerky, M. Serdechnova, C. Blawert, M.L. Zheludkevich, *Applied Clay Science*, 232 (2023) 106774.
 [16] M. Serdechnova, A.N. Salak, F.S. Barbosa, D.E.L. Vieira, J. Tedim, M.L. Zheludkevich, M.G.S. Ferreira, *Journal of Solid State Chemistry*, 233 (2016) 158-165.
 [17] L. Jiang, Y. Dong, Y. Yuan, X. Zhou, Y. Liu, X. Meng, *Chemical Engineering Journal*, 430 (2022) 132823.
 [18] K. Wei, Y. Wei, Y. Zhang, Y. Kasnerky, M. Serdechnova, H. Wang, Z. Zhang, Y. Yuan, C. Blawert, M.L. Zheludkevich, F. Chen, *Corrosion Science*, 227 (2024) 111731.
 [19] A. Das, P. Mahanwar, *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 3 (2020) 93-101.

8. Mitglieder des Projektbegleitenden Ausschusses (PA)

Unternehmen (Name, Sitz)	Ansprechpartner/-in (Vor- u. Nachname)	Kompetenz	Interesse PA	* KMU	** FSM-Mitglied
Thyssenkrupp Marine Systems GmbH	Dr.-Ing. Martin Schöttelndreyer	Schiffbau	ja	nein	ja
SmallMatek	Dr. Frederico Maia	Korrosionsschutz	ja	ja	nein
AkzoNobel	Dr. Peter Visser	Farben	angefragt	nein	nein
Aditya Birla Advanced Materials	Dr. Hubert Theil	Farben	angefragt	nein	nein
Fassmer Werft	Hinnerk Worzyk	Schiffbau	angefragt	nein	ja
Lürssen	Dr. Bernhard Urban	Schiffbau	angefragt	nein	ja
GTF Freese Oberflächentechnik	Markus Morschheuser	Oberflächentechnik	angefragt	ja	nein
Hapag-Lloyd AG	Jan-Evan Luetje	Reederei	angefragt	nein	nein

9. Laufzeit und Beantragte Zuwendung (bZ)

Laufzeit in Monaten: 24 Monate

Beantragte Zuwendung (bZ) FE 1 in EUR

Beantragte Zuwendung (bZ)	1. Jahr	2. Jahr	ggf. 3. Jahr	Summe
A.1 Bruttoentgelte für wiss.-techn. Personal	81,800.00	81,800.00		163,600.00
A.2 Bruttoentgelte für übriges Fachpersonal				0.00
A.3 Bruttoentgelte für Hilfskräfte				0.00
A.4 Pauschale für Personalausgaben (7 %)	5,726.00	5,726.00	0.00	11,452.00
B. Ausgaben für Gerätebeschaffung				0.00
C. Ausgaben für Leistungen Dritter				0.00
D. Pauschale für Sonstige Ausgaben (20 %)	17,505.20	17,505.20	0.00	35,010.40
Summe der bZ	105,031.20	105,031.20	0.00	210,062.40

ggf. Beantragte Zuwendung (bZ) FE 2 in EUR

Beantragte Zuwendung (bZ)	1. Jahr	2. Jahr	ggf. 3. Jahr	Summe
A.1 Bruttoentgelte für wiss.-techn. Personal	97,000.00	97,000.00		194,000.00
A.2 Bruttoentgelte für übriges Fachpersonal				0.00
A.3 Bruttoentgelte für Hilfskräfte				0.00
A.4 Pauschale für Personalausgaben (7 %)	6,790.00	6,790.00	0.00	13,580.00
B. Ausgaben für Gerätebeschaffung				0.00
C. Ausgaben für Leistungen Dritter				0.00
D. Pauschale für Sonstige Ausgaben (20 %)	20,758.00	20,758.00	0.00	41,516.00
Summe der bZ	124,548.00	124,548.00	0.00	249,096.00