URO	MaReP
Kürzel Forschungseinrichtung 1 (FE 1)	Akronym / Thema kurz Skizze
TMC	2025-1-2
ggf. Kürzel Forschungseinrichtung 2 (FE 2)	Skizzen-Nr. (wird vom FSM eingetragen)
LWF	Christopher Wald
ggf. Kürzel Forschungseinrichtung 3 (FE 3)	Ansprechpartner/-in FE für den FSM

Skizze für ein IGF-Vorhaben zum Thema
Entwicklung realitätsnaher Referenz-Elektrolytzusammensetzungen und simulationsgestützter Prüfmethoden zur Auslegung von Klebverbindungen in der Spritzwasserzone

1. Kurzzusammenfassung und Fachgebiete / Wirtschaftszweige

Klebverbindungen gewinnen im Schiffbau an immer größerer Bedeutung. Insbesondere in Verbindung mit dem verstärkten Einsatz von Leichtbaumaterialien weist die Klebtechnik zahlreiche Vorteile gegenüber konventionellen Fügeverfahren auf. Der Einsatz von Klebverbindungen birgt jedoch Unsicherheiten, da standardisierte Auslegungsverfahren und genormte Alterungszyklen für Klebverbindungen im Schiffbau, vor allem unter Berücksichtigung der Elektrolytzusammensetzung, derzeit fehlen. Die Unkenntnis über das Langzeitverhalten von geklebten Strukturen in Meerwasser und die damit verbundene Befürchtung von massiven Schadensfällen führen dazu, dass Klebverbindungen nicht oder nur in vor äußeren Einflüssen geschützten Bereichen eingesetzt werden. Im geplanten Vorhaben MaReP soll eine Alterungsmethodik zur realitätsnahen Abbildung der Alterungseinflüsse in der kritischen Spritzwasserzone entwickelt werden. Um die Schädigung der Klebungen prognostizieren zu können, wird ein hybrider Ansatz aus numerischer Modellierung und experimenteller Untersuchung verfolgt.

Dabei dienen die experimentellen Ansätze der Charakterisierung der Einflüsse der spezifischen maritimen Elektrolytzusammensetzung und ermöglichen den Vergleich der Alterungsprozesse bei Freibewitterung und der zyklischen Auslagerung in einer Laborumgebung. Auf Basis der numerischen Modellierung des Diffusionsverhaltens wird der Sättigungsgrad der Klebung zu beliebigen Zeitpunkten in den Absorptions- und Desorptionsphasen bestimmt und mit den resultierenden mechanischen Eigenschaften aus den Experimenten verknüpft. Durch die Kombination der so gewonnenen Erkenntnisse wird eine Auslagerungsmethodik erarbeitet, die eine realitätsnahe beschleunigte Laboralterung von Klebverbindungen in der Spitzwasserzone abbildet und somit Kennwerte für die zuverlässige Auslegung von Strukturen, die eine Belastung mit Meerwasser erfahren, liefert.

Die Entwicklung einer gezielten Alterungsmethodik kann folgenden Fachgebieten / Wirtschaftszweigen gemäß DLR Kategorisierung zugeordnet werden:

- Fachgebiet: KC - Leichtbau
- Fachgebiet: MB - Fertigungstechnik, auch: Umformtechnik, Fügetechnik, Oberflächentechnik
- Wirtschaftszweig: 50 - Schifffahrt

2. Wirtschaftliche Relevanz für KMU

2.1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

Im Schiffbau existieren bisher keine einheitlichen Standards, um den Einfluss von Meerwasser auf Klebverbindungen realitätsnah abzubilden. Genormte Laboralterungen rufen zudem nicht dieselben Effekte hervor wie eine Realauslagerung, wodurch der Zulassungsprozess erschwert wird. Aus diesem Grund muss zunächst eine zuverlässige und effiziente Methodik anhand einer Vielzahl an Untersuchungen entwickelt und verifiziert werden, um die Wechselwirkungen innerhalb der Klebschicht und an den Grenzflächen bei Einfluss von Meerwasser zu verstehen. Motivation des Vorhabens ist daher eine gezielte und zuverlässige Bewertung des Alterungseinflusses auf Klebverbindungen mittels einer an die Realbedingungen angepassten Methodik unter Einsatz eines Referenzelektrolyten. Bei der Entwicklung dieser Alterungsmethodik liegt ein Schwerpunkt auf der praxisnahen Umsetzbarkeit eines solchen Vorgehens, um die Einführung standardisierter Prüfungen für mit Meerwasser beanspruchte Klebverbindungen zu beschleunigen.

2.2 Wirtschaftliche Bedeutung der angestrebten Forschungsergebnisse für KMU

Im Rahmen des Projekts entsteht eine angepasste Methodik zur realitätsnahen Alterung von Klebverbindungen in der Spritzwasserzone. Einheitliche Richtlinien und Standards zur maritimen Laboralterung, welche vor allem die Auslegung und Zulassung von klebtechnischen Konstruktionen in der Schifffahrt vereinfachen, resultieren in Kosten- und Qualitätsvorteilen und damit zukünftig in einer stärkeren Einbringung der Klebtechnik als Fügeverfahren. Dies kommt insbesondere den zahlreichen Dienstleistern im Bereich Auslegung und Berechnung von Schiffsstrukturen zugute, die im Wesentlichen im Bereich der kleinen und mittelständischen Unternehmen zu finden sind. Weiterhin ist die zu

entwickelnde Methodik auf andere Branchen, wie z. B. dem Brückenbau in feuchter Umgebung (u. a. Moorgebiete, über Seen), übertragbar.
Das Vorhaben adressiert insbesondere den Themenschwerpunkt „Auslegung“ in den Bereichen „Standardisierung“ und „Digitalisierung“ der Roadmap Klebtechnik 2025 und passt deshalb hervorragend zum Ziel für 2035 „Methoden zur Prognose entlang der Prozesskette“.
Das Thema steigert zudem die ökologische und ökonomische Nachhaltigkeit von Großstrukturen sowie Kleinserien und Unikaten, da mit standardisierten Auslegungsverfahren klebtechnische Anwendungen gefördert, Auslegungsprozesse verschlankt und damit Ressourcen effizienter eingesetzt werden.

3. Wissenschaftlich-technischer Ansatz

3.1 Stand der Forschung und Entwicklung

Klebtechnik und Prüfung für Anwendungen in der maritimen Technik

Im Rahmen der EU-Forschungsinitiative BONDSHIP [1] wurde die Klebtechnik als neues Verfahren zum Fügen leichter Materialien im Schiffbau umfassend untersucht. Das Projekt hat Vorgehensweisen u. a. zur Auswahl von Klebstoffsystemen, zum Design, zur Herstellung und der Prüfung von Klebverbindungen hervorgebracht. Die Ergebnisse gelten seitdem als Grundlage für das Kleben im Schiffbau. Trotz der zahlreichen Vorteile der Klebtechnik im Vergleich zur Schweißtechnik als Fügeverfahren, welche in BONDSHIP oder verschiedenen Vorhaben wie z. B. „RAMSSES“ [2] und „Halterkleben“ [3] aufgeführt wurden, führt diese nach wie vor ein Nischendasein im konventionellen Schiffbau. Klebtechnische Anwendungen werden meist vermieden oder beschränken sich auf den Einsatz in innenliegenden Schiffsbereichen. Ein Faktor, der den Einsatz der Klebtechnik erschwert, sind das Fehlen genormter Alterungs- und Auslegungsverfahren. Neben [1] finden sich auch in der DIN 2304-2:2024-10 [4], welche speziell die Qualitätsanforderungen von Klebprozessen im Schiffbau und Offshore-Bereich adressieren soll, keine definierten Vorgaben zur Festlegung von Verfahren zu beschleunigten Laboralterungen von Klebstoffen oder Klebverbindungen. In einem Dokument der Bureau Veritas [5], in welchem u. a. Richtlinien für die Zertifizierung in der Schifffahrtindustrie thematisiert sind, werden für den Einsatz von Strukturklebstoffen lediglich Untersuchungen bei den in der Anwendung maximal herrschenden Temperaturen empfohlen. Weitere Versuche zu Einflüssen auf die Festigkeit müssen in einer Einzelfallentscheidung von der Klassifikationsgesellschaft angewiesen werden. Ähnliches wird in [6] für FVK-Werkstoffe, welche ein vergleichbares Verhalten wie Klebstoffe aufweisen, aufgeführt. Die Zulassungen beruhen auf Einzelfallentscheidungen und notwendige Nachweise in Bezug auf Alterungstests werden, abhängig von dem Einsatzgebiet, von der Klassifikationsgesellschaft angewiesen. Vorreiter im Bereich der Kunststoffe sind die Beschichtungen, wo es bspw. mit der ISO 20340:2009-04 [7] oder DIN EN ISO 12944-9:2018-06 [8] definierte Alterungszyklen für Offshore-Anwendungen gibt, die von Zulassungsgesellschaften anerkannt und akzeptiert werden.
Nichtsdestotrotz wurde der Effekt verschiedener maritimer Alterungseinflüsse auf Klebstoffe bereits in unterschiedlichen Vorhaben untersucht. Quelle [9] beschreibt die Auslagerung von Kunststoffproben eines strukturellen Klebstoffsystems nach der ASTM D1183-03. Dieser sieht einen Wechsel von Temperatur, relativer Luftfeuchtigkeit und Lagerung in Meerwasser vor. Neben der Degradation einiger Materialkennwerte kommt der Autor weiterhin zu der Erkenntnis, dass der Standard den realen Meerwassereinfluss nicht realitätsnah abbilden kann. In [10] werden Proben nach ASTM F1980-16 gealtert, welcher jedoch nur Temperatur- und Feuchtigkeitsänderungen ohne Medieneinfluss abdeckt. Das Kriechverhalten von Substanzproben eines Epoxidharzes wurde in [11] untersucht. Die Versuchskörper wurden für bis zu 800 h bei 55 °C in Meerwasser ausgelagert. Mechanische Eigenschaften wie Härte und Modul des Klebstoffs haben mit der Zeit abgenommen. Quelle [12] beschreibt eine Auslagerung für 12 Monate in Seewasser bei 40 °C. Im Anschluss wurden die Prüfkörper (FKV-Fügeteile und ein acrylbasierter Klebstoff) einer zerstörenden Prüfung unterzogen, in der sie noch über 80 % der ungealterten Zugscherfestigkeit erreichen konnten.
Vorangestellte Beispiele zeigen das Potenzial von Klebverbindungen im maritimen Umfeld, da bei direktem Kontakt mit Alterungseinflüssen lediglich von einer Degradation und nicht einem Ausfall der Verbundeigenschaften ausgegangen werden kann.
In Abgrenzung zu gefügten Kunststoffteilen kommt es bei Klebstoff-Metallverbunden zu Korrosionsprozessen an der metallischen Grenzfläche. In [13] wurden mit einem elastischen PU-Klebstoff gefügte Edelstahlhalter miteinander verbunden. Aufgrund fehlender Alterungsstandards wurden zum einen der Salzsprühnebeltest nach DIN EN ISO 4611 und zum anderen der Klimawechseltest nach PV1200 basierend auf Empfehlungen der Classification Society Lloyd´s Register durchgeführt. In anschließenden Prüfverfahren zeigten die Probekörper einen insignifikanten Abfall der mechanischen Eigenschaften und erfüllten weiterhin die Anforderungen an eine sicherheitsrelevante Konstruktion für Schiffsanwendungen. Trotz dieser für die Klebtechnik positiven Ergebnisse wird deutlich, dass es an geeigneten und anerkannten Alterungsverfahren für die Abbildung realer Effekte auf Klebanwendungen mangelt. ASTM-Normen oder bspw. der Klimawechseltest nach PV1200 (hervorgegangen aus der Automobilbranche) decken die realen Umgebungsbedingungen bei

Meerwassereinfluss nur unzureichend ab, was in Unsicherheiten und damit in fehlenden Zulassungskriterien resultiert. Im vom Antragsteller durchgeführten abgeschlossenen FSM-Projekt „Klebschichtalterung“ [14] wurde ein erster Schritt gemacht, um Alterungszyklen für unterschiedliche Bereiche auf einem Schiff zu standardisieren und abgesicherte Alterungsfaktoren zu bestimmen. Das Vorhaben hat gezeigt, dass eine Feldauslagerung in Meerwasser (Auslagerung im Außenbereich eines Stationsschiffes, Testfeld in Spritzwasserzone auf Helgoland) zu höheren Abminderungsfaktoren führt als eine kombinierte Laborauslagerung (u. a. Salzsprühnebeltest). Dies zeigt, dass die Alterungsprozesse bei Metallklebungen in Meerwasser bisher noch nicht vollständig verstanden sind und daher auch nicht erkenntnisbasiert abgebildet werden können.

Transport korrosiver Elektrolyte in Klebverbindungen

Je nach Einsatzort sind Klebverbindungen in maritimen Anwendungen unterschiedlichen Bedingungen ausgesetzt. Dabei variieren die Umgebungen von warm und trocken wie in technischen Innenbereichen bis zu einer permanenten Exposition in Meerwasser, wie z. B. Rumpfstrukturen unterhalb der Wasserlinie [15]. In der Literatur wird zur Untersuchung der Feuchteaufnahme von Klebstoffen aus Zeit- und Aufwandsgründen häufig eine vollständige Immersion in Wasser angestrebt [16]. Je nach untersuchtem Anwendungsbereich werden ergänzend Auslagerungen bei hoher Luftfeuchtigkeit und hoher Temperatur zur Sättigungsbeschleunigung vorgenommen [17]. Aufgrund der stark schwankenden Umgebungsbedingungen und vielen Einflussgrößen ist die Eigenschaftsprognose von Klebverbindungen in der Spritzwasserzone besonders komplex. Dabei müssen sowohl Absorptions- und Desorptionsprozesse als auch die irreversible Klebschichtschädigung in Abhängigkeit von der Zyklenzahl beachtet werden. In der Literatur zeigen die Ergebnisse eine starke Abhängigkeit von der Elektrolytzusammensetzung. Ashcroft et al. stellten bei zyklischen Auslagerungen in Wasser fest, dass bei geklebten Aluminiumlegierungen (AA2024) eine Wiederherstellung der Verbundfestigkeit nach ausreichender Trocknung gegeben ist [18].

Die vergleichende Betrachtung der Auslagerung in destilliertem Wasser und Meerwasser in [19] zeigte für die gleiche Al-Legierung, dass die Alterungsphänomene deutlich von der Zusammensetzung des Elektrolyten abhängen. Die Autoren beobachteten, dass die in Salzwasser ausgelagerten Proben eine deutlich geringere Gewichtszunahme (4,5 %) als die in deionisiertem Wasser eingetauchten Proben (8,4 %) aufwiesen. In [20] wurde für geklebte CFRP-Stahl-Verbunde beobachtet, dass die Immersion in Meerwasser zu einer etwas reduzierten Feuchteaufnahme gegenüber der Immersion in destilliertem Wasser führt. Ein solcher Befund kann möglicherweise auf veränderte osmotische Gleichgewichte und unterschiedliche Beweglichkeiten von hydratisierten Metallionen in den Poren des Klebstoffs zurückgeführt werden.

Ein weiterer Einfluss auf die Feuchteaufnahme ist die Belastung der Klebverbindung während der Auslagerungsphase. In [21] zeigte sich, dass die Diffusionsrate unter Belastung höher ist als ohne parallele mechanische Belastung. Allerdings war die maximale aufgenommene Feuchtigkeit bei belasteten Proben geringer. Die Einschränkung der mechanischen Tragfähigkeit war z. B. nach 522 h in Seewasserlagerung um 54 % geringer im Vergleich zur Referenz [21]. Zur analytischen und numerischen Abbildung der Feuchtediffusion in Klebverbindungen wird diese meist mit einem Fick´schen oder ein Dual-Fick´schen Diffusionsmodell beschrieben. In [22] wurden vom Antragsteller zur Erarbeitung eines einstufigen Fick´schen Diffusionsmodells Klebstoffdiscs bei verschiedenen Temperaturen und Luftfeuchtigkeiten bis zur vollständigen Sättigung ausgelagert. Auf Basis der gravimetrischen Analysen wurde ein numerisches Modell zur Abbildung der eindimensionalen erstellt, welches die Feuchteabsorption der Klebschicht zuverlässig abbilden konnte [22].

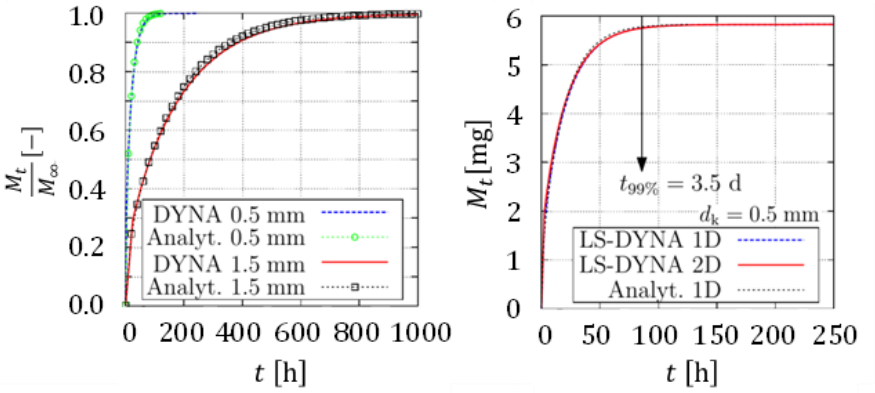

Abbildung 1: Vergleich der analytisch berechneten und FE-simulierten Feuchteaufnahme aus [8]

Dagegen zeigten die Ergebnisse von Mubashar et al. [23] und Loh et al. [15], dass die Diffusionsrate häufig einer zweistufigen (dualen) Fick´schen Diffusion folgt. Diese Ergebnisse zeigen, dass die Diffusionsrate abhängig von dem lokalen Sättigungszustand ist und die Randbereiche einer Klebung zuerst vollständig gesättigt sind, während der mittlere Bereich der Klebfläche noch keine vollständige

Sättigung zeigt [16], [24]. Ergänzend dazu zeigten die Untersuchungen von [16], dass die Diffusion größtenteils von den freien Rändern der Klebschicht ausgeht.
Während die Simulation der Feuchtesättigung sowohl in einstufigen Prozessen als auch in mehreren Absorptions- und Desorptionszyklen erfolgreich abgebildet werden konnte, ist die Simulation der komplexen Prozesse und den daraus folgenden mechanischen Einbußen in der Spritzwasserzone noch wenig erforscht. Dennoch präsentieren die Autoren in [23] eine Methode zur Bestimmung der mechanischen Klebschichteigenschaften in Abhängigkeit von der lokalen Sättigung der Klebschicht. Die resultierende Spannung in der Klebschicht konnte nach der Immersion in deionisiertem Wasser zuverlässig berechnet werden, wobei die mechanischen Eigenschaften nach der Trocknung der Proben fast vollständig wiederhergestellt wurden [23].

Korrosive Enthaftungsprozesse in der Klebfuge

Die Alterung organischer Polymer-Legierungsverbunde in chloridhaltigen bzw. maritimen Umgebungen hat ihren Startpunkt zumeist an Defekten, welche einen Elektrolyttransport zum metallischen Substrat ermöglichen. Hierdurch wird die Schutzwirkung der Kunststoffbarriere beruhend auf ihrem hohen Widerstand gegen den Ionentransport aufgehoben und die Korrosion kann entlang der Polymer-Metall-Grenzfläche voranschreiten. Solche Korrosionsprozesse führen bei organischen Polymeren oft zu einer so genannten „kathodischen Delamination“, d. h. der Schwächung oder dem Verlust der Adhäsion, die durch die kathodische Reduktion von Sauerstoff an der Grenzfläche zwischen Kunststoff und Legierung verursacht wird [25–29]. Die anodische Oxidation des Metalls im Defekt stellt die Gegenreaktion zur Kathode unter dem organischen Polymer dar. Dort entsteht durch die Kathodenreaktion ein stark alkalisches Milieu; darüber hinaus werden reaktive Zwischenprodukte wie Peroxide gebildet, die die Grenzfläche auch oxidativ abbauen (vgl. Abbildung 2).

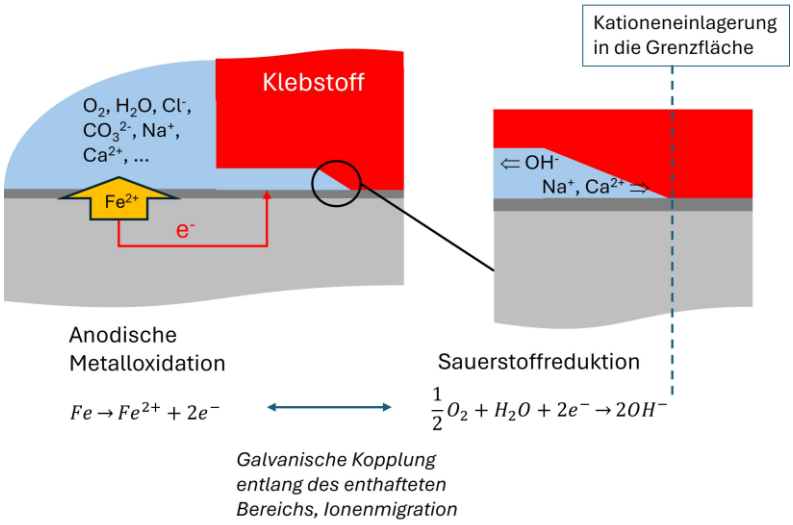

Abbildung 2: Unterwanderungsmechanismus einer Klebschicht

Der Begriff der „Bondline Corrosion“ wird für verklebte Metallverbunde genutzt, um die Korrosion in der Fügezone von der Delamination organischer Kunststoffe abzugrenzen [30]. Der limitierte Zutritt von Sauerstoff und Wasser bedingt durch den wasserundurchlässigen Fügepartner führt zu Änderungen in den Alterungsmechanismen, die stark von den Auslagerungsbedingungen abhängen.
Insbesondere Kinloch et al. und Grundmeier et al. führten systematische Untersuchungen zu den grenzflächenchemischen und elektrochemischen Aspekten der kathodischen Enthaftung von Klebstoffen durch [28, 29]. Kinloch et al. konnten zeigen, dass die Klebung von Stahl und Aluminium zu einer Änderung des Enthaftungsprozesses gegenüber eine reinen Stahlverklebung führt [28]. Grundmeier et al. wiesen nach, dass die Wassereinlagerung an die Klebstoff-Metall-Grenzfläche über die Klebstoffphase selbst die Kinetik der kathodischen Delamination beeinflusst [29]. Die Alterungsreaktionen von Verklebungen mit Meerwasserkontakt sind zudem durch die spezifische Zusammensetzung von Meerwasser beeinflusst [28, 31]. Meerwasser hat typischerweise einen durchschnittlichen pH-Wert von 8,0 bis 8,3, und enthält neben Natrium als einwertiges Kation auch Magnesium und Calcium als zweiwertige Kationen, die die Bildung von Korrosionsprodukten und Ablagerungen während der Alterungsreaktionen aber auch die galvanische Kopplung an der Grenzfläche beeinflussen. Zudem ist der hohe Carbonatgehalt relevant für Alterungsprozesse in maritimen Elektrolyten.

Beschleunigte Alterungsprüfungen für maritime Anwendungen

Untersuchungen zur beschleunigten Alterungsprüfungen mit Relevanz für die Alterung durch Meerwassereinfluss umfassten die Variation der Elektrolytzusammensetzung und der Temperatur [32].

Insbesondere der Chloridgehalt und die damit verbundene Elektrolytleitfähigkeit erwiesen sich als besonders kritisch für die Kinetik der Alterung. Dies wird begründet durch den Angriff von Passivschichten durch Chloride aber auch durch die galvanische Kopplung zwischen dem metallischen Defekt und dem unterwanderten Bereich. Die von Kinloch et al. beschriebene Abhängigkeit von der lokalen Sauerstoffkonzentration könnte ein weiterer Parameter für eine Beschleunigung der Alterung sein [28]. Eine Herausforderung stellt in jedem Falle die Extrapolation von kinetischen Daten aus den Anfangsstadien der Alterung auf spätere Stadien hin. Dies ist begründet durch die Bildung von Alterungsprodukten und Deckschichten, welche Durchtrittsreaktionen aber auch Transportprozesse limitieren.

3.2 Arbeitshypothese

Das Ziel des Antrags ist die Erstellung eines Leitfadenentwurfs zur Simulation des realen Alterungsverhaltens von Klebverbindungen in Meerwasser mit Hauptaugenmerk auf die Spritzwasserzone. Die projektübergreifende Hypothese besteht darin, dass die komplexe Zusammensetzung von Meerwasserelektrolyten bei verklebten Legierungen zu Transport- und Alterungsprozessen in dem Klebstoff sowie zu Alterungsmechanismen und -kinetiken an der Grenzfläche zum Metall führt, die sich durch etablierte Alterungsverfahren nicht ausreichend genau abbilden lassen. Zu nennen sind als die Alterung beeinflussende Komponenten insbesondere Mg^{2+} und Ca^{2+}-Ionen, die in kathodischen Bereichen zur Abscheidung von Carbonatschichten führen können, sowie die Pufferung des Elektrolyt-pH bei 8,1 bis 8,3 basierend auf dem Carbonat-Borat-System. Für die besonders kritische Alterung in der Spritzwasserzone muss zudem die hohe Verfügbarkeit von Sauerstoff, die Belegung mit hygroskopischen Salzen sowie die Wechselbefeuchtung in einer Alterungsprüfung berücksichtigt werden, um eine Voraussage zur langfristigen Stabilität des Verbunds auf Basis numerischer Methoden treffen zu können. Das beantragte Projekt kombiniert daher die Entwicklung einer entsprechenden Auslagerungsmethodik unter Nutzung des Meerwassermodellelektrolyten mit der angepassten Prüfkörperkonzeption und Diffusionsmodellierung sowie mit der Enthaftungs- und Alterungsanalytik der geklebten Verbunde.

4. Lösungsweg

4.1 Bearbeitungsschritte und Personaleinsatz

AP1: Bestimmung der Prüfrandbedingungen (URO, LWF, TMC)

In AP 1 werden die Prüfrandbedingungen in enger Zusammenarbeit mit dem PA bestimmt. Hierfür werden im ersten Schritt die Grundeigenschaften der Werk- und Klebstoffe für den Aufbau verschiedener Metall-Klebstoff-Verbunde charakterisiert (TMC, LWF). Bei den Klebstoffen sind neben den mechanischen Eigenschaften vor allem der Feuchtegehalt im Referenzzustand durch eine gravimetrische Analyse (LWF) zu bestimmen. Die Fügeteilwerkstoffe werden in Bezug auf ihre chemische Zusammensetzung an der Oberfläche charakterisiert und deren chemische Wechselwirkung mit typischen Bestandteilen von Meerwasser (wie z. B. Chloriden und Sulfaten) analysiert. Als Grundlage für den experimentellen Aufbau werden die Auslagerungsbedingungen und eine Norm-Elektrolytzusammensetzung (z. B. aus DIN EN ISO 9227:2023-03) als Referenz ausgewählt (TMC). Um eine praxisnahe Abbildung der Spritzwasserzone zu gewährleisten, werden Daten aus bestehenden Versuchsständen recherchiert, klassifiziert und in einen laborgeeigneten Klimawechselzyklus überführt (URO).

AP2: Prüfkörperkonzeption und Diffusionsmodellierung (LWF)

Zur Charakterisierung des temperaturabhängigen Sättigungsverhaltens des Klebstoffs werden Substanzproben bei verschiedenen Klimata bis zur Sättigung ausgelagert. Die gewählten Temperatur-Luftfeuchtigkeit-Kombinationen sind an die in AP 1 ermittelten realen Zustände angelehnt. Darüber hinaus werden die Auswirkungen von erhöhten Temperaturniveaus im Sinne einer höheren Diffusionsgeschwindigkeit ebenfalls betrachtet. Die Sorptions- und Desorptionsraten in der Klebfuge unterscheiden sich aufgrund der Einflüsse durch das Substrat und die verminderte exponierte Oberfläche deutlich zu den Sättigungsraten der Substanzproben [22], sodass die Konzeption geeigneter praxisrelevanter Prüfkörper erforderlich ist. Hierfür werden sowohl die klebgerechten Flanschgeometrien als auch eine Optimierung der Geometrie hinsichtlich der Auslagerung in Laborumgebung berücksichtigt. Das veränderte Sättigungsverhalten des Klebstoffs im Prüfkörper wird bei den gleichen Klimata analysiert, sodass die Diffusionsgeschwindigkeit für den überschüssigen Klebstoff und den Klebstoff in der Fuge in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur bestimmt werden können. Parallel dazu wird das Diffusionsverhalten des Klebstoffs in der Simulationsumgebung LS DYNA modelliert. Hierfür kommt ein Hygroschädigungsmodell auf Basis des Temperatursolvers zum Einsatz. Dieser berücksichtigt den temperaturabhängigen Diffusionskoeffizient und die feuchteabhängige Sättigungskonzentration des Klebstoffs. Dabei wird insbesondere auch die irreversible Schädigung durch die Feuchtediffusion bei mehrfachen Wechselzyklen mit Befeuchtungs- und Trocknungsphasen abgebildet.

AP3: Analyse der Transportvorgänge und Grenzflächenchemie (TMC)
In AP3 erfolgt die Analyse der Mikrostruktur u. Oberflächenchemie der Fügepartner mittels Elektronenmikroskopie (FE-REM) sowie Spektroskopie (FTIR, Röntgenphotoelektronenspektroskopie (XPS)). Die elektrochemische Analyse der Klebstofffilme unter Bedingungen der Spritzwasserzone (Nutzung einer Umlaufzelle zur Wechselbefeuchtung) erlaubt die vergleichende temperaturabhängige Messung der Elektrolyteinlagerung mittels einer 3-Elektrodenanordnung (durch den Klebstoffilm hindurch) sowie einer 2-Elektrodenimpedanzmessung an der Grenzfläche Klebstoff-Metall. Beantwortet werden soll so die Frage, welche ionischen Leitfähigkeiten sich an der Grenzfläche nach entsprechenden Auslagerungszeiten einstellen. Vergleichend dazu wird eine Messzelle etabliert, die es erlaubt, die Migration der Ionen entlang der Klebstoff-Fügeteil-Grenzfläche bei Anlegung einer elektrischen Spannung mittels einer Raster-Kelvinsonde zu analysieren. Die Nachanalytik der Ionenverteilung an der Grenzfläche erfolgt mittels XPS.

AP4: Erarbeitung einer Auslagerungsmethodik (URO)
Auf Basis der Arbeiten in AP1 sollen in AP4 die gewonnen Erkenntnisse in den Aufbau und die Validierung eines Alterungsprüfstands fließen. Am Beispiel der kritischen Spritzwasserzone werden die notwendigen Anforderungen an eine für den maritimen Einsatz bestimmten Alterung zusammengetragen, um verschiedene Kombinationen relevanter Alterungszyklen aufzustellen. Diese bestehen bspw. aus Variationen bestehender Offshore-Zyklen (z. B. DIN EN ISO 12944-9:2018-06, zur Zulassung von Offshore-Strukturen anerkanntes Auslagerungsverfahren) und zyklischen Tauchprüfungen in Meerwasser (z. B. DIN 50905-4:2018-03). Im Zuge dessen wird ein Alterungsprüfstand entwickelt, in welchem die Spritzwasserzone mit den definierten Alterungszyklen nachgestellt wird. Mittels vergleichender Prüfkörper in der Realauslagerung z. B. an einer Kaikante werden die Ergebnisse der Proben aus dem Laborprüfstand validiert und dieser iterativ angepasst, um die Abbildung maritimer Bedingung weiter zu verbessern.

AP5: Ermittlung von Abminderungsfaktoren (LWF)
In AP 5 wird das Diffusionsmodell validiert. Dies geschieht durch den Vergleich von mittels Simulation prognostizierten Kennwerten und den experimentell ermittelten Werten der unter Klimawechsellasten ausgelagerten Klebverbindungen. Für eine parallele Validierung der erarbeiteten Referenz-Elektrolytzusammensetzung werden Proben bei realer Freibewitterung sowie in dem Alterungsprüfstand aus AP 4 ausgelagert. Der Fokus der Untersuchungen liegt auf den resultierenden Festigkeitseinbußen durch die jeweilige Auslagerungsmethodik. Zur Validierung des Simulationsmodells werden die Proben gravimetrisch und mechanisch charakterisiert. Aus den gewonnenen Erkenntnissen werden Abminderungsfaktoren für die Auslegung von Klebverbindungen unter Meerwassereinfluss abgeleitet.

AP6: Vergleich von Degradationsprozessen bei Freibewitterung und Laborauslagerung (TMC)
In AP6 wird die Änderung der Transportkinetik der Elektrolyte über die Auslagerungszeit bei Wechselbefeuchtung (Simulation der Spritzwasserzone, Rolle von Defekten und Füllstoffen in den Klebstoffen) untersucht. Die Messung erfolgt wie in AP3 mittels elektrochemischer Impedanzspektroskopie. Zudem wird die Änderung der Grenzflächenchemie mit der Auslagerungszeit (Änderung der Oxidchemie an der Grenzfläche durch Einwirkung der maritimen Elektrolyte führt zu Änderungen in der Haftung, Messung mittels XPS nach Delamination des Klebstoffs) analysiert. Untersucht wird dabei der Einfluss der Auslagerung auf die Zusammensetzung der Grenzfläche (Änderung des Passivoxids, Anreicherung von Metallsalzen aus dem maritimen Elektrolyten). Der Einfluss der Elektrolytzusammensetzung und der Auslagerungsbedingungen auf die Alterung und Enthaftung (Hypothese: kathodische Polarisation bei der Enthaftung führt zur Abscheidung von Schichten (z. B. Oxyhydroxide, Metallkarbonate) aus dem maritimen Elektrolyten in dem enthafteten Bereich) wird nach Auslagerung mittels FE-REM und konfokaler Ramanmikroskopie im Querschliff sowie nach Enthaftung des Polymers untersucht. Es wird geprüft, inwieweit unter Alterungsbedingungen gebildete Schichten einen maßgeblichen Einfluss auf die galvanische Kopplung zwischen Defekt und Enthaftungsfront haben.

AP7: Erstellung eines Leitfadenentwurfs zur Nachstellung von Freibewitterung (URO)
Auf Basis der Erkenntnisse aus den vorherigen AP werden in AP7 alterungssensitive Parameter herausgestellt, welche einen kritischen Einfluss auf die untersuchten Materialpaarungen haben. Die Berücksichtigung dieser ist notwendig, um einen auf definierte Umweltbedingungen angepassten Referenzelektrolyten zusammenzustellen. Dieser wird in einem hygrothermischen Wechselzyklus definiert. Mittels dieser neuartigen Methodik wird eine realitätsnahe Alterung in einer Laborumgebung sichergestellt, mit der reale Materialveränderungen einer Freibewitterung abgebildet werden können. Das gesamte Vorgehen wird abschließend am Beispiel der Spritzwasserzone in einem Leitfadenentwurf zur Nachstellung von Freibewitterung in einer Laborumgebung zusammenfassend dargestellt.

AP8: Dokumentation und Transfer (URO, LWF, TMC)
In AP8 werden alle Ergebnisse aus den vorangegangen AP aufbereitet und in einem Abschlussbericht strukturiert dokumentiert und dargestellt.

4.2 Arbeitsdiagramm

AP	Arbeitsinhalte	1. Jahr				2. Jahr				3. Jahr	
		Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2
AP1	Bestimmung Prüfrandbedingungen										
AP2	Prüfkörperkonzeption und Diffusionsmodell										
AP3	Analyse Grenzflächenchemie										
AP4	Erarbeitung Auslagerungsmethodik										
AP5	Ermittlung Abminderungsfaktoren										
AP6	Analyse Schadensfälle nach Auslagerung										
AP7	Erstellung Leitfadenentwurf										
AP8	Dokumentation und Transfer										

5. Umsetzbarkeit und Transfer der Ergebnisse

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

Ergebnisse des Projekts sind ein prototypischer Alterungsprüfstand sowie ein Leitfadenentwurf zur Nachstellung von Freibewitterung in einer Laborumgebung. Kurzfristig können die numerischen Modelle und der Prototyp mit geringem Aufwand in die Prozesse der Dienstleister im Bereich Auslegung und Berechnung von Schiffsstrukturen eingebunden werden. Für den praxisnahen Einsatz als Prüfstand sind Schritte zur Optimierung der Systeme, Erhöhung der Robustheit und Benutzerführung zu unternehmen. Die hierzu erforderlichen Entwicklungskosten sind den zu erwartenden wirtschaftlichen Vorteilen gegenüber zu stellen. Es ist zu erwarten, dass eine zuverlässige und an die Einsatzbedingungen anpassbare Alterungsmethodik als normative Grundlage dienen kann und die Akzeptanz von Klebverbindungen stark erhöht. Hiermit einher geht die Eröffnung neuer Leichtbaupotenziale und der damit verbundenen Vorteile, unterschiedlichste Materialien miteinander zu verbinden, Gewicht zu sparen und somit den Treibstoffverbrauch zu verringern oder die Nutzlasten zu erhöhen.

5.2 Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Zu Projektbeginn ist eine Workshop-Phase mit den zukünftigen Anwendern, insbesondere Werften und KMU, geplant, um die inhaltliche Ausrichtung des Projektes anwendungsnah zu gestalten. Weiterhin wird das Projekt auf der URO-, LWF-, TMC- und der FSM-Webseite veröffentlicht und wissenschaftliche Arbeiten begonnen. Während der Projektlaufzeit erfolgt eine Einbindung der PA-Mitglieder auch außerhalb der regelmäßigen PA-Sitzungen, um Zwischenergebnisse vorzustellen, die Expertise der Anwender im Projektverlauf zu nutzen und zusätzliche Daten von Realbauteilen zu gewinnen. Veröffentlichungen erfolgen in dieser Zeit und nach Projektende in Fachzeitschriften und auf Konferenzen, wie den jährlichen Kolloquien in relevanten GfKORR-Arbeitskreisen, Gemeinsame Forschung in der Klebtechnik, der Schiffbau Industrie oder dem Journal of Ship Production and Design. Zum Projektende werden in Zusammenarbeit mit dem PA die entwickelte Methodik und der Leitfadenentwurf bewertet und deren Verwertung geplant. Hierzu gehört die Konzeption einer praxistauglichen Richtlinie sowie geeignete Anwender der neuen Methodik. Im Anschluss an das Projekt wird die Publikationstätigkeit fortgesetzt und es erfolgt eine Einbindung der gewonnenen Erkenntnisse in die Lehre der beteiligten Lehrstühle (z. B. Masterstudiengang „Materials Science“ an der UPB, Vorlesungen in der Fakultät Maschinenbau: Beschichtungstechnik, Klebtechnische Fertigungsverfahren, Grundlagen der Fügetechnik) und in die Entwicklung von Folgeprojekten.

6. Durchführende Forschungseinrichtung(en)

Universität Rostock, Lehrstuhl für Fertigungstechnik
Albert-Einstein-Straße 30, 18059 Rostock
Leiter Forschungseinrichtung: Prof. Dr.-Ing. Wilko Flügge
Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. Wilko Flügge
Tel.: +49 381 49682-20 | E-Mail: wilko.fluegge@igp.fraunhofer.de

Universität Paderborn, Fakultät Naturwissenschaften - Technische Chemie
Warburger Straße 100, 33098 Paderborn
Leiter Forschungseinrichtung: Prof. Dr.-Ing. Guido Grundmeier
Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. Guido Grundmeier
Tel.: +49 5251 60-5700 | E-Mail: guido.grundmeier@uni-paderborn.de

Laboratorium für Werkstoff- und Fügetechnik
Pohlweg 47-49, 33098 Paderborn
Leiter Forschungseinrichtung: Prof. Dr.-Ing. Gerson Meschut
Projektleiter: Lucas Hermelingmeier
Tel.: +49 5251 60-5284 | E-Mail: hermelingmeier@lwf.upb.de

7. Literaturverzeichnis

[1] EU 5. Rahmenprogramm Growth GRD1-1999-11012, „Bonding of lightweight materials for cost effective production of high speed craft and passenger ships", Laufzeit: 2000 – 2003

[2] Horizon 2020 der Europäischen Union Nr. 723246, "Realisation and Demonstration of Advanced Material Solutions for Sustainable and Efficient Ships", Laufzeit: 2017 – 2021

[3] Schlussbericht IGF-Vorhaben Nr. 18527 BG zum Thema „Nachbearbeitungsfreies Halterkleben auf Schiff- und Stahlbaubeschichtungen (Kurztitel: Halterkleben)", Laufzeit: 2016 – 2018

[4] DIN 2304-2:2024-10 „Klebtechnik - Qualitätsanforderungen an Klebprozesse - Teil 2: Kleben im Schiffbau"

[5] NR546 DT R04 – November 2022, „Hull in composite, plywood, and high density polyethylene materials"

[6] NI663 DT R01 – März 2023, „Propeller in composite materials"

[7] ISO 20340:2009-04 „Beschichtungsstoffe - Leistungsanforderungen an Beschichtungssysteme für Bauwerke im Offshorebereich"

[8] DIN EN ISO 12944-9:2018-06 „Beschichtungsstoffe - Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme - Teil 9: Beschichtungssysteme und Leistungsprüfverfahren im Labor für Bauwerke im Offshorebereich"

[9] Souto-Silvar, D. A.; Álvarez-García, A.;·Díaz-Díaz, A.; Rodríguez-Dopico, F. J.;·López-Beceiro, J., „The effect of marine ageing on the mechanical properties of a structural adhesive", Mechanics of Time-Dependent Materials (2024) 28:2531–2552

[10] Lamberti, M.; Maurel-Pantel, A.; Lebon, F., "Accelerated aging procedure of epoxy structural adhesive for marine offshore applications", Journal of Advanced Joining Processes 9 (2024) 100216

[11] Feng, W.; He, J.; Dai, Z.; Chang, X.; Shi, X.; Xu, F.; Liu, B., "Creep behavior of epoxy adhesives subjected to different hygrothermal aging conditions—nanoindentation creep tests and theoretical study", Polymer Degradation and Stability 229 (2024) 110926

[12] Davies, P.; Le Jeune, S., „Influence of seawater immersion on acrylic adhesive properties and bond strength on wet composites", International Journal of Adhesion and Adhesives 132 (2024) 103712

[13] Momber, A. W.; Fröck, L.; Marquardt, T., "Effects of accelerated ageing on the mechanical properties of adhesive joints between stainless steel and polymeric top coat materials for marine applications", International Journal of Adhesion and Adhesives 103 (2020) 102699

[14] Schlussbericht zu IGF-Vorhaben Nr. 21189 BG zum Thema „Entwicklung und Validierung von Laboralterungszyklen für die Zulassung von schiffbaulichen Klebverbindungen (Kurztitel: Klebschichtalterung)", Laufzeit: 2020 – 2024

[15] Delzendehrooy, F.; Akhavan-Safar, A.; Barbosa, A. Q.; Beygi, R.; Cardoso, D.; Carbas, R.J.C. et al. (2022): A comprehensive review on structural joining techniques in the marine industry. In: Composite Structures 289, S. 115490. DOI: 10.1016/j.compstruct.2022.115490.

[16] Loh, W. K.; Crocombe, A. D.; Abdel Wahab, M. M.; Ashcroft, I. A. (2005): Modelling anomalous moisture uptake, swelling and thermal characteristics of a rubber toughened epoxy adhesive. In: International Journal of Adhesion and Adhesives 25 (1), S. 1–12. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2004.02.002.

[17] Hayashibara, Hitoshi; Iwata, Toshiaki; Ando, Takahiro; Murakami, Chikahisa; Mori, Eitarou; Kobayashi, Ippei (2020): Degradation of structural adhesive bonding joints on ship exposure decks. In: J Mar Sci Technol 25 (2), S. 510–519. DOI: 10.1007/s00773-019-00657-w.

[18] Mubashar, A.; Ashcroft, I. A.; Critchlow, G. W.; Crocombe, A. D. (2009): Moisture absorption–desorption effects in adhesive joints. In: International Journal of Adhesion and Adhesives 29 (8), S. 751–760. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2009.05.001.

[19] Bordes, M.; Davies, P.; Cognard, J.-Y.; Sohier, L.; Sauvant-Moynot, V.; Galy, J. (2009): Prediction of long term strength of adhesively bonded steel/epoxy joints in sea water. In: International Journal of Adhesion and Adhesives 29 (6), S. 595–608. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2009.02.013.

[20] Xian, Guijun; Wang, Zhen; Kong, Deao; Dong, Shaoce; Li, Chenggao; Hong, Bin (2024): Degradation of an underwater epoxy adhesive and its bonding to steel subjected to water or seawater immersion. In: International Journal of Adhesion and Adhesives 132, S. 103711. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2024.103711.

[21] Rodríguez-Dopico, Francisco J.; Álvarez García, A.; Tarrío-Saavedra, Javier (2024): Characterization of Epoxy Adhesive for Marine Applications. In: Oceans 5 (4), S. 906–922. DOI: 10.3390/oceans5040052.

[22] Sander, S.; Meschut, G.; Kroll, U.; Matzenmiller, A. (2022): Methodology for the systematic investigation of the hygrothermal-mechanical behavior of a structural epoxy adhesive. In:

International Journal of Adhesion and Adhesives 113, S. 103072. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2021.103072.

[23] Mubashar, A.; Ashcroft, I. A.; Critchlow, G. W.; Crocombe, A. D. (2009): Modelling Cyclic Moisture Uptake in an Epoxy Adhesive. In: The Journal of Adhesion 85 (10), S. 711–735. DOI: 10.1080/00218460902997224.

[24] Al-Harthi, Mamdouh; Loughlin, Kevin; Kahraman, Ramazan (2007): Moisture diffusion into epoxy adhesive: testing and modeling. In: Adsorption 13 (2), S. 115–120. DOI: 10.1007/s10450-007-9011-y.

[25] Grundmeier, G.; Stratmann, M., Adhesion and De-adhesion Mechanisms at Polymer/Metal-Interfaces: Mechanistic Understanding Based on In Situ Studies of Buried Interfaces. Annu. Rev. Mater. Res. 2005, 35, 571–615, doi:10.1146/annurev.matsci.34.012703.105111.

[26] Posner, R.; Ozcan, O.; Grundmeier, G. Water and Ions at Polymer/Metal Interfaces. Advanced Structured Materials 2013, 25, 21–52, doi:10.1007/978-3-642-37614-6_2.

[27] Active Protective Coatings: New-Generation Coatings for Metals; Buchheit, R.G.; Hughes, A.E.; Mol, J.M.C.; Zheludkevich, M.L., Eds., 1st ed. 2016; Springer Netherlands; Imprint: Springer: Dordrecht, 2016, ISBN 9789401775403.

[28] Kinloch, A.J.; Korenberg, C.F.; Tan, K.T.; Watts, J.F. Crack growth in structural adhesive joints in aqueous environments. J Mater Sci 2007, 42, 6353–6370, doi:10.1007/s10853-006-1181-6.

[29] Grundmeier, G.; Schmidt, W.; Stratmann, M. Corrosion protection by organic coatings: electrochemical mechanism and novel methods of investigation. Electrochimica Acta 2000, 45, 2515–2533, doi:10.1016/S0013-4686(00)00348-0.

[30] Abrahami, S.T.; Hauffman, T.; M.M. de Kok, J.; Terryn, H.; Mol, J.M.C. Adhesive Bonding and Corrosion Performance Investigated as a Function of Aluminum Oxide Chemistry and Adhesives. CORROSION 2017, 73, 903–914, doi:10.5006/2391.

[31] Ahmadzadeh, M.; Shahrabi, T.; Izadi, M.; Mohammadi, I.; Hoseinieh, S.M.; Barnoush, A. Calcareous scales deposited in the organic coating defects during artificial seawater cathodic protection: Effect of zinc cations. Journal of Alloys and Compounds 2019, 784, 744–755, doi:10.1016/j.jallcom.2019.01.096.

[32] LeBozec, N.; Thierry, D.; Pelissier, K. A new accelerated corrosion test for marine paint systems used for ship's topsides and superstructures. Materials & Corrosion 2018, 69, 447–459, doi:10.1002/maco.201709814.

8. Mitglieder des Projektbegleitenden Ausschusses (PA)

Unternehmen (Name, Sitz)	Ansprechpartner/-in (Vor- u. Nachname)	Kompetenz	Interesse PA	KMU	FSM-Mitglied
Corroconsult GmbH, Hamburg	*Daniel Engel*	*Korrosionsschutz-experte*	*ja*	*ja*	*nein*
Sika Deutschland CH AG & Co KG, Stuttgart	*Roland Seiffert*	*Verkaufsleiter Marine*	*ja*	*nein*	*nein*
Fr. Lürssen Werft GmbH & Co. KG, Bremen	*Sven Exner*	*Auslegung Verbindungstechn*	*ja*	*nein*	*ja*
ABEKING & RASMUSSEN Schiffs- und Yachtwerft SE, Lemwerder	*Andreas Brehme*	*Design und Konstruktion*	*ja*	*nein*	*ja*
KLEBTECHNIK Dr. Hartwig Lohse e. K., Breitenberg	*Hartwig Lohse*	*Klebstoffauswahl und Auslegung Klebverbindungen*	*ja*	*ja*	*nein*
Dr. Lappe-Niemeier Profltechnik GmbH, Paderborn	*Dr. Wilhelm Lappe*	*Einzelanfertigung, Sonderserienbau, Profilkonstruktione*	*ja*	*ja*	*nein*
Tamsen Maritim GmbH, Rostock	*Marcel Jänsch*	*Schiffsreparatur und -neubau*	*ja*	*ja*	*nein*
TILSE GmbH, Hamburg	*Henning von der Thüsen*	*Yachtverglasung*	*ja*	*ja*	*ja*
fkks Fachverband kathodischer Korrosionsschutz e. V.	*Dr. Bernd Isecke* *Dr. Thorsten Eichler*	*Modellierung Korrosion, Korrosionsprä-vention*	*ja*	*-*	*ja (DNV)*

9. Laufzeit und Beantragte Zuwendung (bZ)

Laufzeit in Monaten: 30

Beantragte Zuwendung (bZ) FE 1 (URO) in EUR

Beantragte Zuwendung (bZ)	1. Jahr	2. Jahr	ggf. 3. Jahr	Summe
A.1 Bruttoentgelte für wiss.-techn. Personal	48.840,00	73.260,00	24.420,00	146.520,00
A.2 Bruttoentgelte für übriges Fachpersonal	8.800,00	13.200,00	0,00	22.000,00
A.3 Bruttoentgelte für Hilfskräfte	12.000,00	12.000,00	4.000,00	28.000,00
A.4 Pauschale für Personalausgaben (6 %)	4.178,40	5.907,60	1.705,20	11.791,20
B. Ausgaben für Gerätebeschaffung				0,00
C. Ausgaben für Leistungen Dritter				0,00
D. Pauschale für Sonstige Ausgaben (20 %)	14.763,68	20.873,52	6.025,04	41.662,24
Summe der bZ	88.582,08	125.241,12	36.150,24	**249.973,44**

ggf. Beantragte Zuwendung (bZ) FE 2 (TMC) in EUR

Beantragte Zuwendung (bZ)	1. Jahr	2. Jahr	ggf. 3. Jahr	Summe
A.1 Bruttoentgelte für wiss.-techn. Personal	56.880,00	56.880,00	28.440,00	142.200,00
A.2 Bruttoentgelte für übriges Fachpersonal	14.100,00	28.200,00		42.300,00
A.3 Bruttoentgelte für Hilfskräfte		9.840,00		9.840,00
A.4 Pauschale für Personalausgaben (6 %)	4.258,80	5.695,20	1.706,40	11.660,40
B. Ausgaben für Gerätebeschaffung				0,00
C. Ausgaben für Leistungen Dritter				0,00
D. Pauschale für Sonstige Ausgaben (20 %)	15.047,76	20.123,04	6.029,28	41.200,08
Summe der bZ	90.286,56	120.738,24	36.175,68	**247.200,48**

ggf. Beantragte Zuwendung (bZ) FE 3 (LWF) in EUR

Beantragte Zuwendung (bZ)	1. Jahr	2. Jahr	ggf. 3. Jahr	Summe
A.1 Bruttoentgelte für wiss.-techn. Personal	62.000,00	68.200,00	18.600,00	148.800,00
A.2 Bruttoentgelte für übriges Fachpersonal	6.600,00	8.800,00	2.200,00	17.600,00
A.3 Bruttoentgelte für Hilfskräfte	16.000,00	14.000,00	0,00	30.000,00
A.4 Pauschale für Personalausgaben (6 %)	5.076,00	5.460,00	1.248,00	11.784,00
B. Ausgaben für Gerätebeschaffung				0,00
C. Ausgaben für Leistungen Dritter				0,00
D. Pauschale für Sonstige Ausgaben (20 %)	17.935,20	19.292,00	4.409,60	41.636,80
Summe der bZ	107.611,20	115.752,00	26.457,60	**249.820,80**