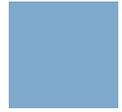


Whitepaper zum Workshop:



---

# KÜNSTLICHE INTELLIGENZ VS. MARITIME KORROSION

## WHERE DO WE GO?

*Autor:innen*

*Daniel Höche, Andreas Momber, Sascha Buchbach, Johannes Schulz-Stellenfleth, Christian Feiler, Tim Nattkemper, Ole Oysten Knudsen, Bahman Daneshian, Lisa Sahlmann, Lukas Jarren, Gino Ebell, Oliver Heins, Mohamed Ben Seghier, Garima Kapoor, Anna Ebeling, Peter Plagemann, Salih Gülhan, Tim Heusinger von Waldegge, Kai Brune, Daniel Pröfrock*





## INHALT

Motivation .....	4
Spezifische Problembeschreibung und Beschlussergebnis.....	5
Impakt.....	5
Lösungsweg: Fokussierung der Forschung auf Schlüsselbereiche.....	7
1. Umweltinteraktion.....	7
2. Beschichtungsentwicklung und Applikation .....	12
3. Wartung und Reparatur.....	14
4. Maritime KI-Methodik .....	16
Zusammenfassung und Handlungsvorschlag.....	20
Referenzen.....	21
Mitwirkende .....	22
Gezeichnet: (Autor:innen) .....	22

---

*„DIE WELTWEITEN KOSTEN DER KORROSION WERDEN AUF 2,5 BILLIONEN US\$ GESCHÄTZT, WAS 3,4 % DES WELTWEITEN BIP ENTSPRICHT“, NACE International*

---



## MOTIVATION

Die maritime Wirtschaft und speziell auch der Bereich Offshore-Energie mit seinen verschiedenen Facetten treffen auf immense Herausforderungen zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit der zugehörigen Anlagen. Diese Herausforderungen können nur durch geeignete Korrosionsschutzmaßnahmen bewältigt werden. Resiliente, wartungsarme, langlebige sowie recycle- und umweltfreundliche Infrastrukturen sind gefordert, um einen ökonomisch und ökologisch sinnvollen und sicheren Betrieb zu gewährleisten. Der Schlüssel dazu liegt in der intelligenten Datenerfassung basierend auf der Kombination von experimentellen Arbeiten, Messungen und deren Nutzung in Design- und Planungsprozessen. Auch in smarten SHM (Structural-Health Monitoring) Konzepten, in der von Robotik getriebenen Reparatur und Wartung, sowie in der Entwicklung von neuartigen vorhersagebasierten Instandhaltungskonzepten spielen vernetzte Daten eine bedeutende Rolle.

Am 11.07.2023 fand vor diesem Hintergrund ein Workshop statt, um das Potenzial von Künstlicher Intelligenz (KI-) Methoden für die maritime Korrosionsforschung auszuloten. Teilnehmende aus Industrie und Forschung diskutierten auf Basis von Fachbeiträgen, wie KI-Methoden im Bereich maritime Korrosion am besten helfen können, die neuen Herausforderungen, die unter anderem die Ausbaupläne der Bundesregierung für Offshore Energie aber auch der Klimawandel mit sich bringen, zu bewältigen. Das Ziel war und ist eine Fokussierung der deutschen Forschungsressourcen in diesem Bereich zu erreichen, um eine maximale Hebelwirkung zu entfalten und eine langfristig steigende Wertschöpfung für die deutsche maritime Wirtschaft zu forcieren.



*Abbildung 1: Gruppenfoto - Workshop am 11.07.2023 in Hamburg*

## SPEZIFISCHE PROBLEMBESCHREIBUNG UND BESCHLUSSERGEBNIS

Die Entwicklung der Computerleistung und der Simulationsmethoden hat in den letzten Jahrzehnten enorme Fortschritte gebracht. Speziell die Nutzung von KI als "Gamechanger" ist mittlerweile in vielen industriellen Sektoren angekommen, so auch im Korrosionsschutz und -management. In diesem Whitepaper möchten wir die erzielten Ergebnisse des KI-Workshops präsentieren und die aktuellen Entwicklungen in den definierten Themenfeldern diskutieren. Verschiedene Perspektiven abgebildet durch Beiträge von Umwelt- und Klimaforschenden, durch Material- und Korrosionsforschende, durch Industrie aus Wartung, Beschichtung und Energie, als auch durch IT-ExpertInnen, sollen helfen, die in den einzelnen Sektoren und Communities auftretenden Herausforderungen in der Korrosionsschutzkonzeptionierung ganzheitlich zu verstehen. Strategien zur zielgerichteten hebelentfaltenden Verwendung von KI-Methoden im Bereich maritime Korrosion bzw. Korrosionsschutz werden beleuchtet und Risiken benannt.

Vier Schlüsselbereiche wurden beim Workshop identifiziert, die im Folgenden detaillierter ausgeführt werden. Im Beschlussergebnis des Workshops, wurden diese Bereiche diskutiert, abgestimmt, priorisiert und mit Kerninhalten gefüllt, die nach übereinstimmender Meinung der Expertinnen und Experten die maximale Hebelwirkung und somit Impact erzeugen.

### IMPAKT

Korrosion ist weltweit ein Ressourcenfresser<sup>1</sup>. Aktuell verursacht Korrosion deutschlandweit jährliche Kosten von ca. 150 Milliarden Euro. Die genannten Aufwendungen berücksichtigen üblicherweise nicht die fallspezifischen sicherheits- oder umweltbezogenen Konsequenzen. Zahlreiche Industriezweige haben durch technische Zwischenfälle erkannt, dass ein mangelhaftes Management von Korrosionsschutzmaßnahmen beträchtliche finanzielle Aufwendungen nach sich ziehen kann. Dies gilt insbesondere für die maritime Wirtschaft. Zum Beispiel erhöht ein mangelhaftes Korrosionsschutzmanagement über die Zeit insbesondere im Bereich der Offshore Windenergieproduktion das Ausfallrisiko entsprechender, kritischer Infrastruktur und damit verbunden die Versorgungssicherheit am Standort Deutschland. Ein angemessenes Management des Korrosionsschutzes und die KI-gestützte Bewertung von Korrosionsereignissen geht demnach mit erheblichen Kosteneinsparungen über die gesamte Nutzungsdauer einer Anlage einher. Um das volle Ausmaß dieser Einsparungen zu realisieren, ist die Implementierung eines Korrosionsmanagementsystems (CMS) erforderlich. Entsprechend eröffnet die Entwicklung neuartige Wege im Korrosionsschutz ein erhebliches Wertschöpfungspotential für die maritime Wirtschaft bei gleichzeitiger Reduktion möglicher ökologischer Auswirkungen, die mit den aktuellen Korrosionsschutzkonzepten einhergehen können. Das in diesem Whitepaper diskutierte Thema KI vs. Maritime Korrosion hat somit mannigfaltige Wirkung auf politische Strategien und Schlüsselthemen. Dazu gibt die folgende Tabelle einen weitreichenden Einblick:

#### Kennzahlen im Überblick

Umwelt und Nachhaltigkeit	Ökonomie	Digitalisierung
<b>Ziel:</b> Umweltpolitisch / EU Green-Deal konforme Korrosionsschutzkonzepte sowie Kreislauffähigkeit	<b>Ziel:</b> Senkung von Kosten / Gefahren durch Reparatur / Wartung / Logistik sowie Vermeidung von Ausfallzeiten	<b>Ziel:</b> Umsetzung der Digitalisierungsstrategie des Bundes und der Länder innerhalb der maritimen Wirtschaft

<sup>1</sup> NACE International, <http://impact.nace.org/economic-impact.aspx>

<p><b>Fakten:</b></p> <p>1. Der Eintrag durch degradierende, wasserlösliche Beschichtungen nur in der Schifffahrt in die Weltmeere wird auf ca. 80.000 Tonnen pro Jahr geschätzt.</p> <p>2. Das BMU gibt Umweltziel 5 „Meere ohne Belastung durch Abfall“ vor. Korrosionsschutz spielt hier eine zentrale Rolle.</p> <p>3. Die UN SDG Ziel 14: „Ozeane, Meere und Meeresressourcen im Sinne nachhaltiger Entwicklung erhalten und nachhaltig nutzen“<sup>2</sup> zeigt die dramatischen Folgen sowie deren Folgekosten.</p> <p>4. Kathodische Korrosionsschutzsysteme (KKS) im Tauchbereich für Offshore WEA-benötigen oftmals komplementäre organische Beschichtungen, die mit der Umwelt und der Flora und Fauna (negativ) interagieren.</p> <p>5. Windenergieanlagen auf See müssen aktuell nach etwa 20 bis 25 Jahren ersetzt bzw. zurückgebaut werden. Kreislaufkonzepte sind erst im Entstehen. Langlebigkeit ist gefragt.</p>	<p><b>Fakten:</b></p> <p>1. Geschätzte 50-80 Milliarden Dollar wirtschaftlicher Schaden allein im maritimen Sektor durch Korrosion 40% der Kosten stehen in Zusammenhang mit Beschichtungen</p> <p>Reparatur Beschichtungen: Onshore 65 €/m<sup>2</sup> Offshore 5.000 €/m<sup>2</sup> (Faktor 77)<sup>3</sup> (Deutsche Küste)</p> <p>Auftrag Beschichtungen: im Werk 15-25 €/m<sup>2</sup> Offshore 4.000 €/m<sup>2</sup> (Faktor 200) (Deutsche Küste)</p> <p>2. Die Reparatur / Instandsetzung von Beschichtungen Offshore sind aus logistischer Sicht aufwendig, arbeitsschutztechnisch gefährlich, fressen Ressourcen, bedingen gute Wetterbedingungen und sind damit kostenintensiv. Dies betrifft insbesondere den atmosphärischen Bereich.</p> <p>3. Arbeiten rund um Beschichtungen und Korrosionsschutz können gefährlich sein.<sup>4</sup> Schutz- und Sicherheitskonzepte (SchuSiKo) können hier massiv profitieren. 60% der Unfälle passieren bei einfachen mechanischen Arbeiten.<sup>5</sup></p>	<p><b>Fakten:</b></p> <p>1. Die Nutzung von KI bedingt eine digitale Infrastruktur.<sup>6</sup> Diese existiert speziell im Korrosionsschutz eher nicht. Es gibt Leuchtturmprojekte jedoch sind KI sowie entsprechende Datenmanagementkonzepte aktuell eher die Ausnahme.</p> <p>2. Die Anwendung der KI folgt der immer weiter zunehmenden Vernetzung innerhalb der Branche. Daten werden in Echtzeit erfasst und ausgetauscht und das in noch nie dagewesenen Größenordnungen.<sup>7</sup> Dies gilt mehr denn je in den Bereichen Structural-Health-Monitoring und visuelle Bauwerkfassung.</p> <p>3. „ ... ein wachsender Markt für Inspektions- und Wartungsarbeiten. Diese anspruchsvollen Dienstleistungen sicher, zuverlässig und wirtschaftlich durchzuführen sowie dabei moderne digitale Methoden zu implementieren, bietet optimale Einsatzpotenziale für unbemannte Luftfahrtsysteme; dies entlastet gleichzeitig die Menschen bei komplexen Arbeiten in herausfordernden Umgebungen.“ Zitat: IFAM/ DFKI<sup>8</sup></p>
<p><b>KI-Hebel:</b> KKS könnten mittels KI optimiert und der Beschichtungsaufwand minimiert werden. Umweltinteraktion und dessen Folgen könnten prognostiziert und Gegenmaßnahmen priorisiert und zielgerichtet eingesetzt werden.</p>	<p><b>KI-Hebel:</b> Durch gezieltes Monitoring und Bewertung der geschädigten Flächen lassen sich Instandsetzungskampagnen kostengünstiger planen. Gefahren für Mitarbeitende der maritimen Wirtschaft werden minimiert.</p>	<p><b>KI-Hebel:</b> Der Umgang mit KI-Software und das Nutzen der Vorteile wird Impulse für Umstellungen innerhalb von Wertschöpfungsketten liefern. Korrosionsschutz mit seiner Komplexität und Kostennatur ist ein Türöffner für die Nutzung von KI und wird so in andere Bereiche strahlen.</p>
<p><b>Entfaltungs- / Wirkdauer:</b></p> <p>2-3 Jahre / kontinuierlich</p>	<p><b>Entfaltungs- / Wirkdauer:</b></p> <p>2 Jahre / kontinuierlich</p>	<p><b>Entfaltungs- / Wirkdauer:</b></p> <p>1 Jahr / 5 Jahre (Innovationszyklus)</p>

<sup>2</sup> [https://www.un.org/sustainabledevelopment/wp-content/uploads/2019/07/14\\_Why-It-Matters-2020.pdf](https://www.un.org/sustainabledevelopment/wp-content/uploads/2019/07/14_Why-It-Matters-2020.pdf)

<sup>3</sup> Momber, A.W.: Corrosion and Corrosion Protection of Wind Power Structures in Marine Environments, Vol. 1, Elsevier, London, 2023/2024.

<sup>4</sup> Maritime Forschungsstrategie 2025, Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)

<sup>5</sup> Arbeitssicherheit und Unfälle in der Windenergie, Thoralf Lorenz, BG ETEM 2015

<sup>6</sup> Positions- und Forderungspapier Digitalisierung Maritime Wirtschaft, IHK Schleswig-Holstein 2021

<sup>7</sup> Künstliche Intelligenz in der maritimen Wirtschaft, <https://www.bremen-innovativ.de/> 2020

<sup>8</sup> <https://www.dfki.de/web/news/robert-habeck-zu-gast-in-bremen>

Abbildung 2:

**Vision 1 –  
Korrosionsschutzkonzepte für  
eine resiliente und nachhaltige  
Wirtschaft**



## LÖSUNGSWEG: FOKUSSIERUNG DER FORSCHUNG AUF SCHLÜSSELBEREICHE

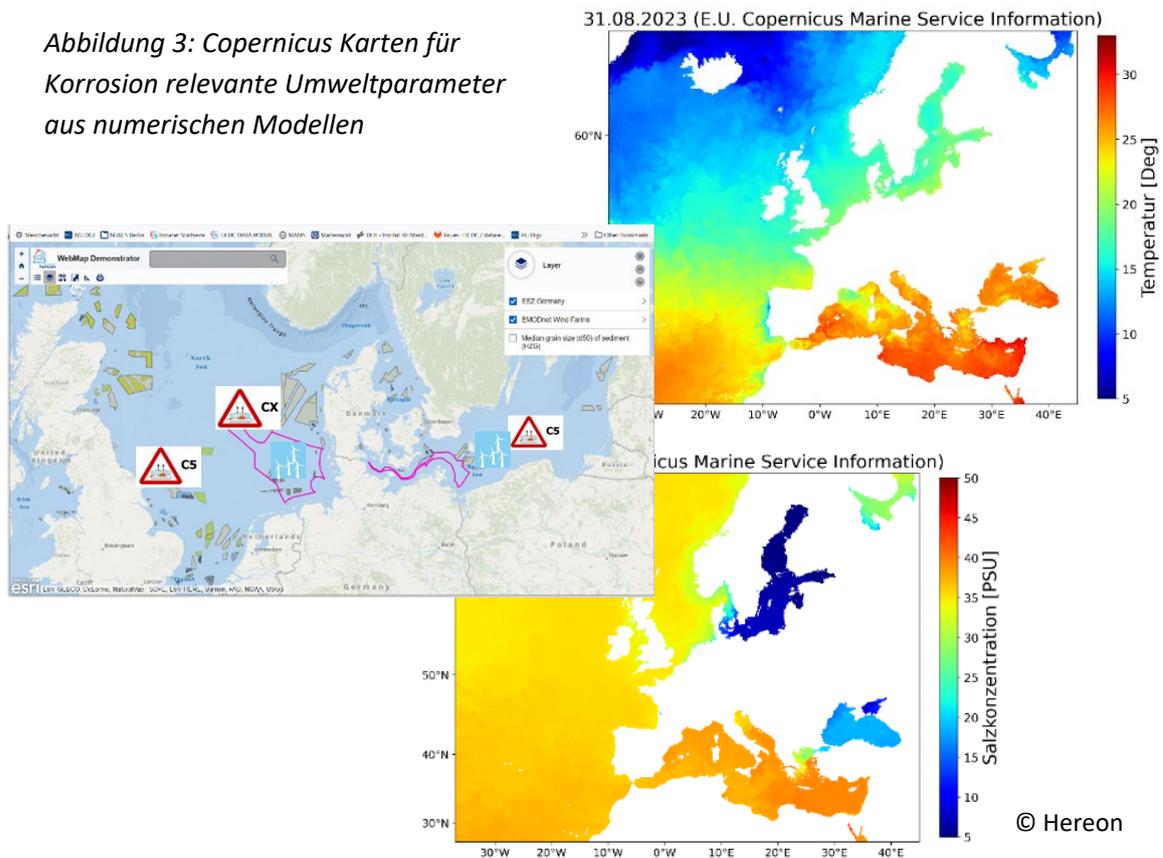
Die folgende Auflistung fasst alle Schlüsselbereiche und Arbeitsthemen zusammen, denen im Workshop die größte Hebelwirkung zugeschrieben werden konnte und bei denen die Verwendung von KI-Methoden wirksame Innovationen und einen großen Mehrwert erwarten lassen. Für die einzelnen Unterpunkte sind die Herausforderungen skizziert. Lösungswege werden aufgezeigt und deren KI-Bezug wird benannt. Entsprechende Handlungsempfehlungen für zukünftige Forschungsthemen werden vorgeschlagen.

### 1. UMWELTINTERAKTION

Die Umwelt steht in zweierlei Hinsicht in Wechselwirkung mit der Korrosion von Offshore-Bauwerken. Zunächst einmal ist die Intensität, die Art und der Verlauf der Korrosion von verschiedenen abiotischen und biotischen Umweltparametern abhängig. Das bedeutet, dass eine Vorhersage die Kenntnis von lokal aufgelösten Korrosionsbedingungen respektive Umweltparametern erfordert. Relevante Parameter, die in der Literatur z.B. (Paul 2012) genannt werden beinhalten z.B. Salzgehalte, Sulfat-Konzentrationen, gelöste Sauerstoffkonzentrationen, pH-Werte, Luftfeuchte und die Temperatur. Die detaillierte Modellierung der Korrosionsprozesse unter Benutzung solcher Umweltinformation ist nach wie vor eine große Herausforderung und bedarf intensiver Forschungsanstrengungen (Brijder et al. 2022). Es ist davon auszugehen, dass eine holistische Betrachtung von Korrosionsprozessen, die gemeinsame Betrachtung von physikalischen, chemischen und biologischen Prozessen erfordert und hierfür entsprechende gekoppelte Modellsysteme entwickelt werden müssen. Darüber hinaus wurden bereits KI-Techniken eingesetzt, die für den entsprechenden Trainingsprozess große Mengen verlässlicher Messdaten benötigen. Das Generieren dieser Messdaten ist eine Herausforderung der man sich zeitnah stellen muss. Die Umweltbedingungen sind auch deswegen von besonderer Komplexität, weil die betrachteten Bauwerke sich im Übergangsbereich zwischen Ozean und Atmosphäre befinden. In

dieser Grenzschicht spielt z.B. der Eintrag von marinen Aerosolen durch brechende Wellen eine wichtige Rolle. Um diese Prozesse für Vorhersagen nachzubilden, ist eine Kopplung von Ozean-, Wellen- und Atmosphärenmodellen erforderlich.

Abbildung 3: Copernicus Karten für Korrosion relevante Umweltparameter aus numerischen Modellen



Für eine langfristige Einschätzung der Korrosionsbedingungen in einer Region müssen auch Aspekte des Klimawandels betrachtet werden. Zur Analyse von Klimaänderungen werden typischerweise Zeitskalen von 30 Jahren betrachtet, was in etwa der Lebenszeit von heutigen Offshore-Installationen entspricht. Es ist gemäß der existierenden Klimavorhersagen davon auszugehen, dass es zu signifikanten Änderungen z.B. der Wassertemperaturen, Salinität und pH-Werte kommen wird z.B. (Orcesi et al. 2022). Mögliche langfristige Trends in der Differenz zwischen Wasser- und Lufttemperaturen können dazu führen, dass sich die Stabilität der atmosphärischen Grenzschicht verändert, was z.B. Konsequenzen für marine Aerosole in der atmosphärischen Grenzschicht mit Auswirkungen auf Korrosionsprozesse hätte. Darüber hinaus haben zu erwartenden Änderungen des Meeresspiegels Auswirkungen auf die Lage und Dimension der Unterwasser-, Gezeiten-, Spritzwasser- und Atmosphärenzone der Bauwerke.

Es zeichnet sich darüber hinaus ab, dass die Offshore Installationen selbst Umweltbedingungen beeinflussen, die für die Korrosion relevant sind. So wurde bereits gezeigt, dass Offshore-Windfarmen zu einer Reduktion der Windgeschwindigkeit, sowie zu einem zusätzlichen Eintrag von Turbulenz in die Atmosphäre führen (Akhtar et al. 2021). Diese Veränderungen in der Atmosphäre haben weiterhin Auswirkungen auf physikalische und biologische Prozesse im Ozean z.B. (Daewel et al. 2022). Darüber hinaus können die Gründungsstrukturen im Wasser direkten Einfluss auf die Durchmischung, Seegang und Sedimentkonzentrationen haben. Die Erfassung dieser Prozesse erfordert die Integration der offshore Installationen in einen entsprechenden digitalen Zwilling für das Umweltsystem.

Aktuelle im maritimen Korrosionsschutz eingesetzte Technologien können zudem systembedingt zur Emission von Schadstoffen führen und so ungewollte ökologische Nebeneffekte bzw. generelle Auswirkungen auf die Meeresumwelt zur Folge haben, insbesondere wenn der Ausbau der Offshore Windenergieproduktion in dem geplanten Maße in Deutschland wie auch auf der europäischen Ebene fortschreitet.

#### *Klimawandel und veränderte Korrosionsbedingungen C5/X Definition*

Mit dem Klimawandel verändert sich nicht nur das Wetter, also Regenmengen, Temperaturen oder Starkwind- bzw. Sturmzeiten. Mit diesen Veränderungen gehen auch Veränderungen der örtlichen Korrosivität der Atmosphäre einher. Die Datengrundlagen der aktuellen nationalen und internationalen Normen und Standards basieren auf Datenerhebungen aus den 1970igern und 80iger Jahren. Zu dieser Zeit spielte speziell der saure Regen (basierend auf hohen SO<sub>2</sub>-Gehalten der Atmosphäre) eine dominierende Rolle. Speziell in Europa hat sich die Lage verändert. Die empirischen Daten sind aufgrund der signifikanten Atmosphärenänderung zu einem Großteil nicht mehr belastbar. Dies belegen die aktuellen Felderfahrungen. Hier zeigen sich erhebliche Abweichungen von Laborvorhersagen gegenüber den Ergebnissen aus dem Feld. Zielgerichtete Messkampagnen und die Anwendung von KI können hier helfen, die komplexen Zusammenhänge hinter sich lokal ändernden Korrosionsbedingungen zu erschließen.

#### *Biofouling*

Im Tauchbereich ist der kathodische Korrosionsschutz das Mittel der Wahl. Leider können elektrische Felder und induzierte Gegenströme nicht verhindern, dass sich Biofouling ansiedelt. Biofouling bezeichnet die ungewollte Ansammlung und das Wachstum von marinen Lebewesen, Algen und anderen organischen Substanzen auf Oberflächen von Schiffen, Unterwasserstrukturen und industriellen Anlagen. Diese Organismen bilden einen Bewuchs aus, der nicht nur die betroffenen Oberflächen bedeckt, sondern auch biochemische, physikalische und ökologische Veränderungen induzieren kann. Die Schaffung zielgerichteter Datenbanken für KI-gestützte Prognosen zum Korrosionsverhalten sind für die Lebensdauerbemessung solcher Gründungselemente essenziell.

Die Nachteile von Biofouling sind vielfältig. Erstens führt die Anhaftung von Organismen zu einem erhöhten hydrodynamischen Widerstand, was den Kraftstoffverbrauch von Schiffen erhöht und die Effizienz von Unterwasserstrukturen beeinträchtigt. Zweitens kann Biofouling die Korrosivität in der Phasengrenze Material-Biofouling beeinflussen und die Lebensdauer von Materialien durch auftretende beschleunigte Korrosion reduzieren, da die Organismen chemische Reaktionen auslösen oder mechanische Defekte erzeugen können. Dies gilt auch für eine rein bakterielle Besiedlung von Gründungsstrukturen im Sediment. Eine Inspektion wie sie in der UW-Zone noch möglich ist, kann hier nicht durchgeführt werden.

Die Interaktion von Biofouling mit Korrosion ist besonders problematisch. Mikroorganismen können als Katalysatoren für elektrochemische Prozesse wirken, die zur Beschleunigung von Korrosion führen. Die kombinierten Effekte von Biofouling und Korrosion können erhebliche Schäden an Infrastrukturen verursachen und erfordern daher effektive Präventions- und Kontrollmaßnahmen. Die Inspektion von Anlagen ist durch Fouling erschwert, da es die Sicht auf Strukturen behindert und potenzielle Schäden verbergen kann. KI kann auch hier helfen, dass Biofouling zu detektieren zu analysieren und daraus Vorhersageszenarien zu entwickeln. Reinigungs- und Unterwasserarbeiten, wie Inspektionen und Wartungen könnten so zukünftig evidenzbasiert durchgeführt werden. Die sehr komplexen, multivariaten Zusammenhänge der Biofouling-Entstehung, sowie dessen Sukzession zu verstehen und diese Erkenntnisse mit der Korrosionsprävention zu

verknüpfen, scheint durch die Verwendung von KI-Methoden mit Messdaten-basierten Datensätzen möglich. Die Entwicklung von neuen Bewuchsschutztechnologien, wie zum Beispiel reinigungsfähige Bewuchsschutzbeschichtungen, kann ebenfalls von diesem Wissen profitieren.

*Abbildung 4: Biofouling auf einer Beschichtungsoberfläche, die Bakterien beeinflussen Korrosionsprozesse am Stahl*



© Fraunhofer IFAM

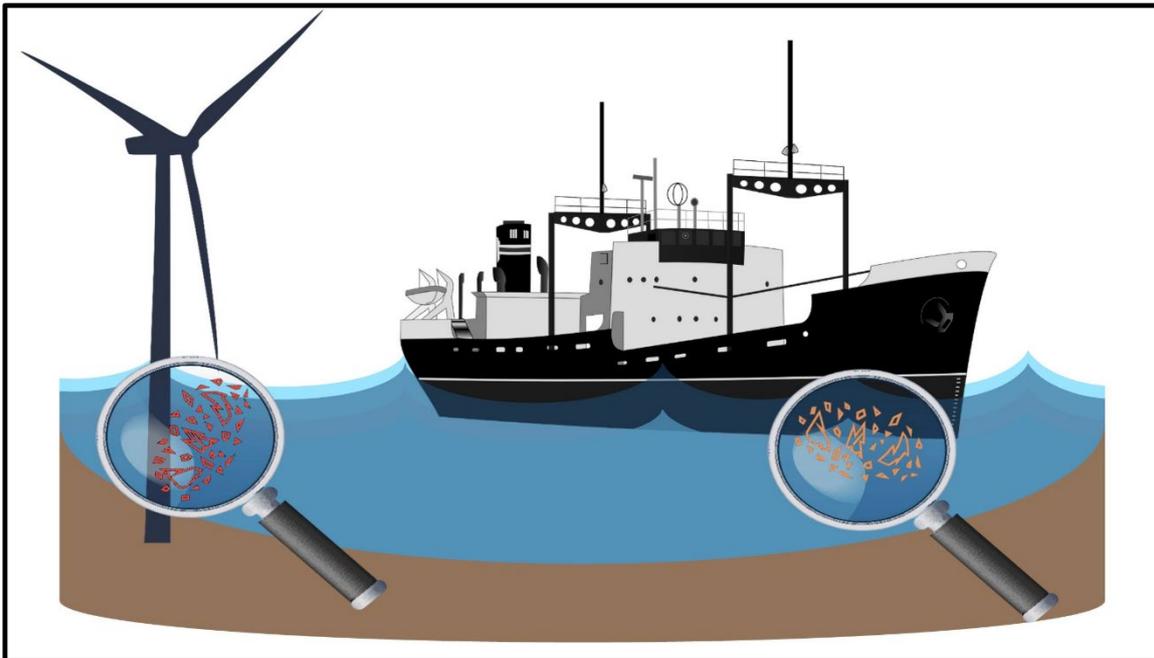
### *Umweltchemie*

Korrosionsschutzsysteme stehen in direktem Kontakt mit der marinen Umwelt und können je nach Art des Konzeptes und des verwendeten Materials verschiedene Stoffe in die Umwelt abgeben. Galvanische Anoden aus AlZnIn-Legierungen werden im Laufe der Lebenszeit einer Windkraftanlage verbraucht und emittieren qua Design. Neben Al, Zn und In ist eine Vielzahl anderer Elemente in den Anoden enthalten, darunter auch die toxikologisch relevanten Elemente Cd und Pb (Reese et al. 2020). Zudem können aus den aktuell eingesetzten Beschichtungssystemen, die auf Polyurethan und Epoxy basieren, durch bspw. UV-Strahlung, Verwitterung und Abrasion, Partikel sowie unterschiedlichste organische Additive, wie bspw. Bisphenole und Alkylphenole, herausgelöst werden und in die marine Umwelt gelangen (Kirchgeorg et al. 2018). Der Einfluss von chemischen Emissionen aus Korrosionsschutzsystemen im Offshore-Kontext auf das umliegende Ökosystem ist nur lückenhaft erforscht. Zudem ist noch unklar, wie sich die Emissionen dieser neuen Punktquellen verteilen und wo sie schlussendlich verbleiben.

KI-basierte Ansätze in Kombination mit entsprechenden Messungen der Freisetzungswege sowie der stofflichen Auswirkungen können dazu beitragen z.B. durch eine Vorhersage der optimalen Anodendimension und -position die notwendigen Aufwandmengen zu minimieren oder entsprechende Beschichtungssysteme resilienter und umweltfreundlicher zu gestalten, z.B. durch die Vorhersage von Stoffeigenschaften und Auswirkungen auf die Umwelt auf Basis von Informationen zu den eingesetzten Additiven und deren physikalisch-chemischen Eigenschaften.

## Mikroplastik

Neben der direkten Freisetzung von anorganischen wie auch organischen Schadstoffen kann maritimer Korrosionsschutz insbesondere im Bereich der Offshore Windenergieproduktion die kontinuierliche Freisetzung von partikulären Stoffen mit entsprechender Schadwirkung bedingen. Diese entstehen zum einen durch die Verwitterung des bisher eingesetzten Polyurethans und Epoxy-Beschichtungen und deren Abtrag durch mechanischen Stress wie z.B. Wellenschlag oder Unterrostung. Eine weitere Quelle sind die Schutzbeschichtungen der sich bewegenden Rotoren, die durch Blitzschlag, Wassertropfen oder Gischt oberflächlich erodiert werden. Die so freigesetzten Partikel werden über die Atmosphäre oder in der Wasserphase transportiert und abhängig von ihrer Größe und Form sowie ihrer chemischen Zusammensetzung können sie unterschiedliche Auswirkungen in der marinen Umwelt entfalten. KI basierte Ansätze in Kombination mit entsprechenden Messungen der Freisetzungswege sowie der stofflichen Auswirkungen können dazu beitragen entsprechende Beschichtungssysteme resilienter und umweltfreundlicher zu gestalten z.B. durch die Vorhersage von Stoffeigenschaften und Auswirkungen auf die Umwelt auf Basis von Informationen zu den eingesetzten Additiven und deren physikalisch-chemischen Eigenschaften.



© Hereon

*Abbildung 5: Korrosionsschutzbeschichtungen als potenzielle Quelle für Mikroplastikeintrag in die marine Umwelt*

Abbildung 6:

**Vision 2** – Beschichtungen die immer „schützen“ können



## 2. BESCHICHTUNGSENTWICKLUNG UND APPLIKATION

Die aktuell verfügbaren Korrosionsschutzsysteme sind bereits sehr ausgereift und speziell die Beschichtungsmaterialsysteme auf Epoxy-Basis können unter „normalen“ Bedingungen bis in den C5/Cx Bereich einen sehr guten Korrosionsschutz über Jahrzehnte gewährleisten. Reinigungs- und Vorbehandlungsschritte sind gut aufeinander abgestimmt. Dennoch ist das Schichtversagen immer noch der Hauptgrund für kritische Schadensinitiierung mit entsprechenden Korrosionsproblemen (>50%). Die Ursache dafür liegt zumeist in unsachgemäßer Praxis, oft getriggert durch Termindruck On-Shore, welche sich durch Fehler in der Applikation darstellt. Auch Fehler während der Konzeptionierung oder ungewollte Defekte, welche durch mechanische Einwirkung wie an spitzen Kanten (siehe Abbildung 6) oder durch „Anecken“ entstehen, können massive Probleme an entsprechenden Bauteilen verursachen. Beschichtungssysteme müssen daher noch schadenstoleranter und dabei gleichzeitig noch umweltschonender werden, um negative Effekte auf die Umwelt zu verhindern. KI kann hier helfen, noch besser zu werden. Auf diesem Weg können die folgenden Themen massiv von der Nutzung KI profitieren und sind somit von größter Relevanz.

### *KI gestützte Schutzkonzepte für Fehlertolerantes Beschichten sowie Kantenschutzmanagement*

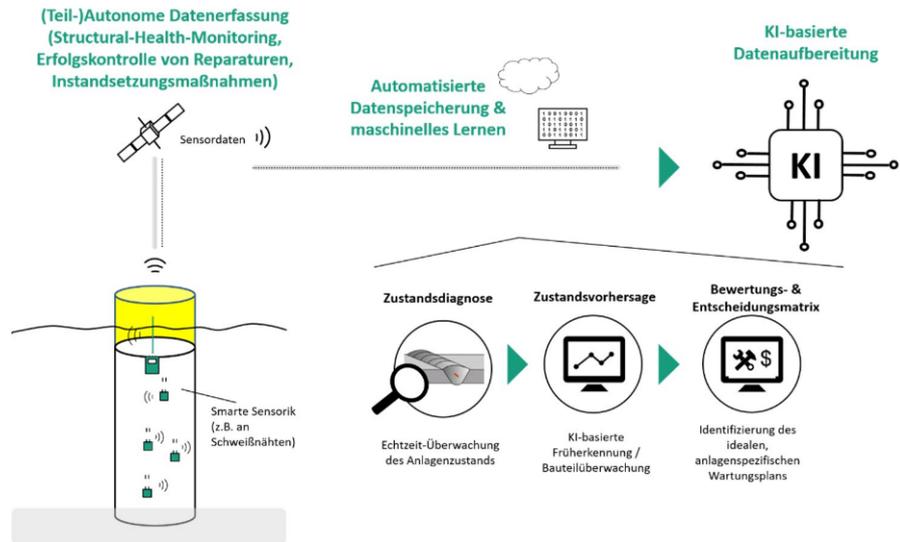
Die Felderfahrung zeigt, dass die meisten kritischen Schäden an Kanten oder auch an Schweißungen auftreten. Dort muss der KI-Hebel angesetzt werden. In Zukunft können KI-Methoden helfen, kritische Kanten / Radien usw. automatisch zu erkennen und die für diesen Zweck nötigen Eigenschaften an die Beschichtungsmaterialien zu spezifizieren. Dabei sollten die verwendeten Beschichtungssysteme generell fehlertoleranter werden. Dies beinhaltet mechanische Resistenz gegen Schnitt und Druck, als auch eine Korrosionsschutzwirkung nach Verlust von Adhäsion oder bei Verlust der Barrierewirkung.



Abbildung 8:

### Vision 3 –

*KI gesteuerte Systeme machen das besser*



© Fraunhofer IFAM

## 3. WARTUNG UND REPARATUR

Die Einführung von vorhersagebasierten und durchgängig digitalisierten Instandhaltungsmethoden für Korrosionsschutzsysteme von maritimen Strukturen erfordert zwingend die Erfassung und Verarbeitung großer Datenmengen aus verschiedenen Domänen. Das schließt insbesondere visuelle Daten, Scan-Daten, Sensordaten und Fernüberwachungsdaten (z.B. aus kathodischen Fremdstromschutzsystemen) ein. Berücksichtigt werden müssen lebensdauerbestimmende Mechanismen wie Korrosion, Beschichtungsdegradation, aber auch konstruktive Hot Spots. KI ist unverzichtbar für die Verarbeitung und Interpretation der Daten und für die Ableitung entsprechender Instandhaltungsmodelle sowie für lokale Risikobetrachtungen. Generelle Konzepte sind bereits erarbeitet worden (Momber et al. 2023; Momber et al. 2022); deren Umsetzung erfordert jedoch die weitere Erhöhung der Qualität/Genauigkeit, der Effektivität und der Anwendungsfreundlichkeit von KI-basierten Methoden (z.B. maschinelles Lernen) auf der Basis sehr großer Mess- und Betriebsdatenmengen. Darüber hinaus ist es notwendig zielgerichtet Schäden an Forschungsstrukturen zu initiieren, deren Schadensverlauf durch in situ Messungen dokumentiert und bewertet werden kann. Auf Basis dessen kann eine KI-gestützte Prognose des Korrosionsverlaufs der Früherkennung zukünftiger integralerer Schäden dienen und eine unmittelbare Abschätzung des Instandsetzungsbedarfes abgeleitet werden.

### Coating Grid (Sensoren)

Zustandsanalysen von strukturellen Bereichen werden zunehmend mittels Sensordaten vorgenommen (z.B. Stahldickesensoren, Beschichtungssensoren). Das trifft ebenso auf Sensoren zur Aufnahme meteorologischer Daten (RH, Temperatur, Chloride, Niederschlag, Wind, etc.) und ozeanographischer Daten (Salinität, pH, Strömung, Temperatur, etc.) zu, die die komplexen sehr korrosiv wirkenden atmosphärischen und Unterwasserbedingungen überwachen und dokumentieren (Daneshian et al. 2023; Momber, Wilms, and Brün 2022). Maritime Strukturen werden in der Zukunft im Rahmen von „Prognostic Health Management“-Routinen standardmäßig mit diversen Sensoren ausgestattet werden. Für die Vernetzung, Auswertung und Interpretation der großen Datenmengen müssen leistungsfähige KI-Methoden entwickelt und zur Verfügung gestellt werden.

### *AI in der Großflächenanalyse und hybride zerstörungsfreie Prüfung*

Die Erfassung, Verarbeitung und Bewertung visueller Daten aus Inspektionen von maritimen Bauwerken/Konstruktionen (Offshore, Brücken, Hafengebäuden, Schiffe) bilden die Voraussetzung für die Entwicklung von vorhersagebasierten Instandhaltungsmethoden. Konzepte für eine durchgängige maschinenbasierte Verarbeitung visueller Daten liegen bereits vor (Momber et al. 2023). Die Umsetzung erfordert eine Erhöhung der Qualität/Genauigkeit und der Effektivität von KI-basierten Methoden (z.B. maschinelles Lernen) auf der Basis sehr großer Mess- und Betriebsdatenmengen. Weiterhin müssen die Schnittstellen zwischen KI-basierten und menschlich-basierten Inspektionsmethoden, und somit die Grenzen für effektive KI-Anwendungen, analysiert und definiert werden.

*Abbildung 9: Reinigungsroboter (inkl. Absaugung) beim Entfernen einer alten Beschichtung an einer Stahlstruktur*



### *Reparatur-Robotik (zonenübergreifend)*

Roboter und drohnengestützte Verfahren setzen sich als Reparaturlösungen für maritime Strukturen durch, ebenso alternative Verfahren, wie Laserabtragen, die sich vergleichsweise einfach automatisieren lassen. Die an den Geräten erfassten Daten (Maschinendaten, operative Daten, Verbrauchsdaten, etc.) erlauben einen optimierten, ressourcenschonenden Einsatz. Hierfür werden leistungsfähige KI-Methoden benötigt, z.B. virtuelle Zwillinge, digitale Zwillinge und maschinelles Lernen. Der Einsatz von Robotik und vor allem Drohnen könnte bzw. hat das große Potential, Treiber für KI zu werden, weil Prozesse und Zustände automatisch erfasst werden können und Daten erzeugt werden.

Abbildung 10:

## **Vision 4 – Software für alle Fälle**



### 4. MARITIME KI-METHODIK

Die Softwareentwicklung im Bereich KI hat sich in den letzten Jahren zu einem wahren Sturm entwickelt. Es existieren Unmengen an frei verfügbaren Codes, die im Prinzip ohne große Probleme auf maritime Datensätze losgelassen werden könnten. Dennoch fehlen konkrete Routinen, die fähig sind, die ganzheitlichen Herausforderungen and Datenmanagement, Datenakquise (Sensorik), Datenprocessing (z.B. via Convolutional Neural Networks Abk.: CNNs) sowie auch Modellierung bewerkstelligen. Hierfür ist ein systematischer Ansatz gefragt, der in Sachen eines Mehrwertes für die maritime Wirtschaft durch die Verwendung von KI folgende Kernpunkte enthalten sollte:

#### *Coating Passport*

In den aktuellen Digitalisierungsstrategien insbesondere zu Kreislaufwirtschaft und Nachhaltigkeit spielt das *Data-Tracking* entlang des Materiallebens eine entscheidende Rolle. Dieses sogenannte Passportkonzept sollte auf Beschichtungsmaterialien und entsprechende Substrate in einem *Coating-Passport* umgesetzt werden. Der digitale Passport enthält alle Materialinformation inklusive dessen Geschichte und erlaubt dessen Nutzung innerhalb einer KI.

Jährlich werden in Deutschland etwa 2 Mio. t Lacke hergestellt.<sup>9</sup> Die Zusammensetzung dieser Lacke muss kontinuierlich durch das wachsende Verbot bisher genutzter Lackbestandteile durch Regularien, z.B. CMR-Stoffe durch REACH oder dem europäischen Green Deal für eine nachhaltige Europäische Union angepasst werden. Anwender fordern von den Lackherstellern jedoch eine stets gleichbleibende Qualität und Verarbeitbarkeit der Lacke. Lackhersteller sind somit gezwungen einzelne Lackbestandteile über ein zeit- und energieintensives „*Trial-and-Error*“ Prinzip zu ersetzen und hierbei eine gleichbleibende Benchmarkqualität zu gewährleisten.

<sup>9</sup> <https://de.statista.com/themen/7132/farben-und-lacke/#dossierKeyfigures>, letzter Zugriff am 11. Oktober 2022

Stand heute findet kein standardisierter Datenaustausch entlang der Wertschöpfungskette in der Lacktechnik statt, sodass die Grundlage für den Einsatz digitaler Technologien bislang in diesem Wirtschaftszweig grundsätzlich nicht oder nur bedingt gegeben ist. Ein „*Trial-and-Error*“ Prozess ist somit in der Lackentwicklung und -herstellung sowie in der Lackverarbeitung Stand der Technik. Dieser Prozess, der „Error“, führt in der Lackentwicklung und -herstellung zu vergleichsweise hohen Ausschussraten. So verzeichnen Lackhersteller 5 bis zu 30 Tonnen (abhängig vom Produktionsvolumen) Lackabfälle pro Jahr.

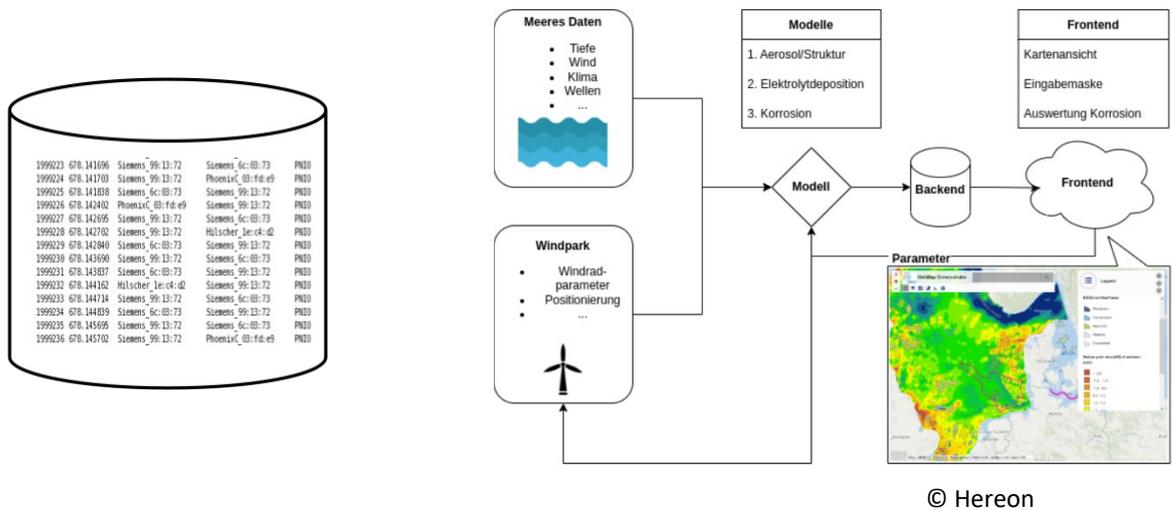
Bis jetzt gibt es keine Software und/oder kein valides Vorhersagemodell, um den Einfluss aller entscheidenden Parameter auf das Erscheinungsbild einer lackierten Oberfläche vorherzusagen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Prozessschritte und das Zusammenspiel der Lackherstellung, der Versorgung, der Applikation und der Trocknung noch nicht in physikalische Modelle überführt werden konnten. Lacktechnologische Prozessparameter werden stand heute gespeichert, jedoch nicht durch digitale Technologien verarbeitet. Oft entstehen Unmengen an unvollständigen Daten. Lackverarbeitende Betriebe halten die Applikationsparameter möglichst konstant, unabhängig von dem Eingangszustand der verwendeten Lacke. Dies führt insbesondere bei der Einführung von nachwachsenden Rohstoffen in der Lackformulierung zu Problemen und bis heute haben diese Einflussgrößen eins gemeinsam: Ihr Einfluss auf das Lackierergebnis und die Abhängigkeiten untereinander sind noch nicht gänzlich über physikalische Modelle oder eine KI abbildbar.

#### *Zentrale Datenbank für Schäden an Korrosionsschutzmaßnahmen*

Der starke Ausbau der Windenergie in den nächsten Jahren wird auch einen proportionalen Anstieg der Nachfrage für Inspektion, Wartung und Reparatur bedeuten. Für das Training von InspektionsexpertInnen und für die Entwicklung und Evaluation von Computer-gestützten Methoden (s.u.) wäre eine Sammlung von visuellen Daten (digitale Fotos und Videos aus Inspektionsprozessen) zusammen mit ihrer Klassifikation in eine Schadenskategorie (aus einem definierten und genormten Schadenskatalog) sehr hilfreich. Zur Sammlung und Annotation (d.h. Verknüpfung einer *region-of-interest* (ROI) mit einer semantischen Kategorie) sollten geeignete Werkzeuge wie z.B. BIIGLE eingesetzt werden, die eine kooperative online Sichtung und Annotation dieser Daten unterstützt und etablierte Mechanismen zur Qualitätsüberwachung (s.u.).

Zur Steigerung der Effizienz in den Inspektions- und Monitoring Prozessen wird die Entwicklung von KI-basierten Methoden und deren effektive Einbindung in neue effizientere Workflows sehr wahrscheinlich eine Rolle von steigender Bedeutung spielen. Die Einbindung von KI-Systemen kann u.a. die Entdeckung von Schäden oder auffälligen Oberflächenmustern (mit Hilfe von CNN) erleichtern, oder deren Klassifikation unterstützen. Auch die Kontur- bzw. Formerfassung eines Schadens kann durch moderne *deep learning*-basierte Segmentierungsmodelle (Unet, SAM (*segment anything model*)) sehr effektiv umgesetzt werden. Die Performanz der Computer-gestützten Methoden und Algorithmen, wird in der Regel durch die Sensitivität/Spezifität in der Detektion und der Korrektheit der Klassifikation oder der Genauigkeit in der Segmentierung beschrieben. Die Performance der modernen KI-Algorithmen in der Bild-/Videoanalyse, die in der Regel auch unter dem Begriff *deep learning* zusammengefasst werden (z.B. YOLO, Mask R-CNN, faster R-CNN, ResNet, Vision Transformer etc.) übersteigt zwar die Performance der „klassischen“ Bildverarbeitungsnetze oder der sog. „*shallow learners*“, aber sie hängt sehr stark von der Verfügbarkeit großer Mengen annotierter Bild-/Videodaten, sog. Trainingsdaten, ab. Auch wenn diese Bedingung durch

Abbildung 11: Daten, Daten, Daten



Ansätze wie *transfer learning* und *self-supervised learning* etwas abgeschwächt werden kann, so sind  $n \cdot 100$  Beispiele pro Kategorie notwendig, um *deep learning* Systeme zu trainieren. Angesichts der besonderen Herausforderungen in der Bild- / Videoanalyse von Offshore-Plattformen (wechselnde Wetter- / Lichtbedingungen, unterschiedliche Trägersysteme / Kameras, Heterogenität in Plattformstrukturen), ist davon auszugehen, dass für manche Schadenskategorien die Menge der notwendigen Trainingsdaten über dieser obigen Schätzung liegen wird, um die eine gute Generalisierungsleistung zu erzielen. Aus diesem Grund ist es notwendig, eine ausreichende Anzahl Daten zu sammeln und für definierte Projekte verfügbar zu machen.

### Datenreinigung

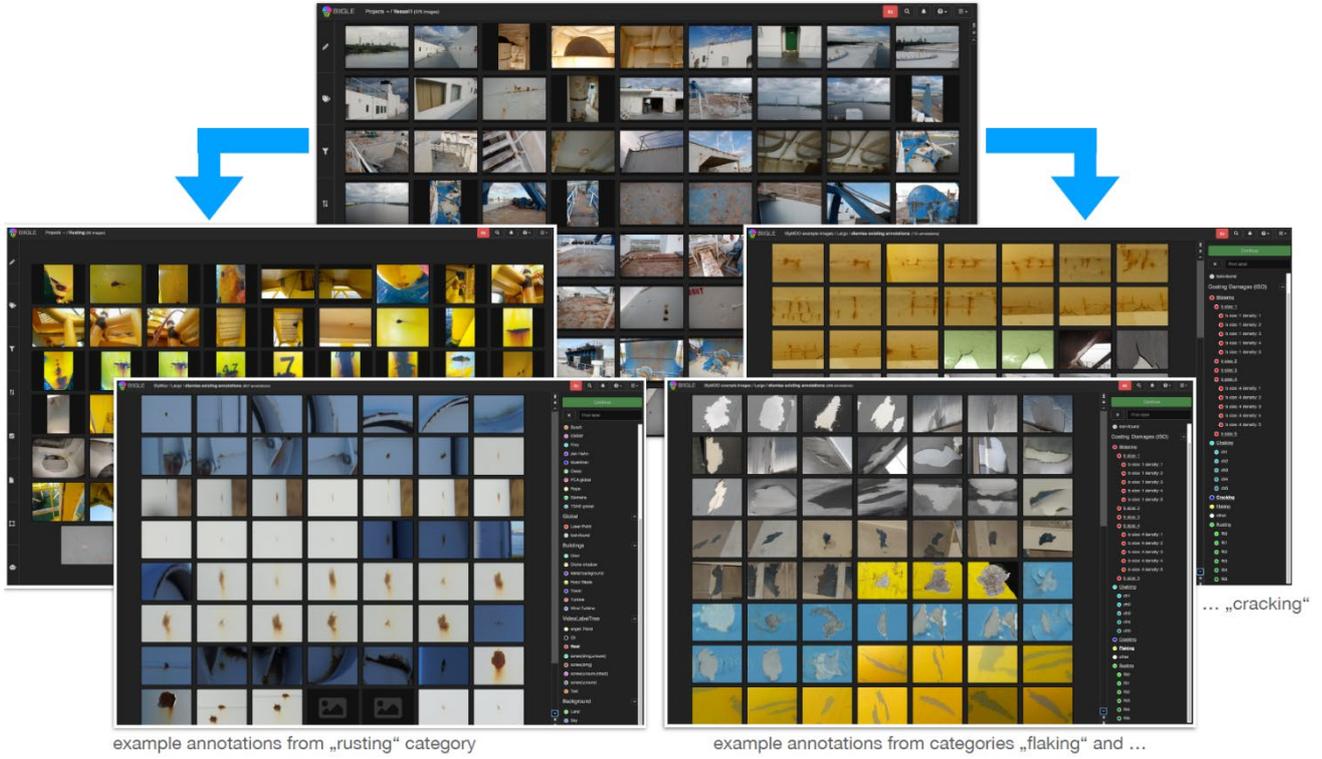
Mit der wachsenden Datenmenge geht auch eine wachsende Unsicherheit zur Nutzbarkeit der Daten einher. KI-basierte Methoden können auch hier helfen, die Spreu vom Weizen zu trennen. Zu diesem Zweck bedarf es Entwicklungsarbeiten, die in Zukunft die gesammelten Daten automatisiert auf Konsistenz und Metadatenqualität überprüfen.

### KI gestütztes Qualitäts- und Bewertungsmanagement

Oben wurde eine Sammlung von annotierten digitalen Bild- und Videodaten für das Training von Inspektionspersonal und die Entwicklung und Evaluation von Computer-gestützten Methoden motiviert. Als eine Erweiterung dieses Vorschlags motivieren wir hier die die Umsetzung von Maßnahmen zur Qualitätserfassung in der manuellen Annotation. Der Begriff Qualität bezieht sich hier auf die Reproduzierbarkeit einer Detektion oder Klassifikation durch die/den gleichen NutzerIn (sog. *Intra-Observer Agreement*) oder andere Nutzer\*innen (*Inter-Observer Agreement*). Aus diesem Grund sollten technische Systeme zur Verfügung stehen, um derartige Studien zur Qualitätserfassung umzusetzen.

Ein wichtiger Beitrag zur Qualitätssicherung ist die Entwicklung standardisierter Annotationsprotokolle (Schoening, Osterloff, and Nattkemper 2016), Schadenskataloge und Metadatenprofile (Langenkämper et al. 2017), um die Vergleichbarkeit von Datensätzen und Annotationsergebnissen zu gewährleisten.

database with heterogenous digital image and video collections from inspections



© Universität Bielefeld / Muehlhan Holding GmbH

Abbildung 12: Entscheidungshilfen entlang Inspektionsdatenbanken und auf Basis gelernter Modelle

## ZUSAMMENFASSUNG UND HANDLUNGSVORSCHLAG

Auf Basis umfangreicher Felderfahrungen und Fachdiskussionen zum Thema Korrosion- und Korrosionsschutzkonzepte werden für die beschleunigte Integration der Methoden der KI in Wertschöpfungsketten innerhalb der maritimen Wirtschaft, vier Handlungsfelder vorgeschlagen. Unter der Beachtung der verschiedenen aufgeführten Perspektiven der jeweiligen Interessengruppen und unter dem Motto: „maximale Hebelwirkung“, stellen sich entsprechende Forschungs- und Entwicklungsbedarfe folgendermaßen dar:

-  1. vier Kernthemen in der Umweltinteraktion zu
  - Klimawandelaspekten
  - Biofouling
  - Umweltchemie
  - Mikroplastik,
  
-  2. vier Kernthemen zum Korrosionsschutz mittels Beschichtungstechnik zu
  - fehlertoleranten Schutzkonzepten
  - fehlerminimierender Applikation
  - Monitoringsystemen
  - effizienter Anwendung - Minimalismus,
  
-  3. drei Kernthemen in der Reparatur und Wartung zu
  - Coating-Grids und Großflächenanalyse
  - hybriden zerstörungsfreier Prüfung
  - Reparatur-Robotik,
  
-  4. vier Kernthemen in der Maritimem KI-Methodik zu
  - digitalem Passport
  - Datenbanken
  - Datenreinigung
  - Qualitäts- und Bewertungsmanagement.

Es wird vorgeschlagen, entsprechende Förderlinien anzupassen bzw. zu initiieren, um eine maximale Hebelwirkung der Nutzung von Methoden der künstlichen Intelligenz innerhalb der deutschen maritimen Wirtschaft zu erzielen. Sie wirkt dabei komplementär zu bereits existierenden Strategiepapieren der einzelnen Ministerien. Mit gezielten Impulsen sollen neue Wertschöpfungsketten erschlossen sowie eine globale Vorreiterrolle in diesem Sektor unserer Wirtschaft erreicht werden.

## REFERENZEN

- Akhtar, Naveed, Beate Geyer, Burkhardt Rockel, Philipp S Sommer, and Corinna Schrum. 2021. *Accelerating deployment of offshore wind energy alter wind climate and reduce future power generation potentials* (Nature Publishing Group UK London).
- Brijder, Robert, Catalina H. M. Hagen, Ainhoa Cortés, Andoni Irizar, Upeksha Chaturani Thibbotuwa, Stijn Helsen, Sandra Vásquez, and Agusmian Partogi Ompusunggu. 2022.
- Daewel, Ute, Naveed Akhtar, Nils Christiansen, and Corinna Schrum. 2022. *Offshore wind farms are projected to impact primary production and bottom water deoxygenation in the North Sea* (Nature Publishing Group UK London).
- Daneshian, Bahman, Daniel Höche, Ole Øystein Knudsen, and Anders Werner Bredvei Skilbred. 2023. 'Effect of climatic parameters on marine atmospheric corrosion: Correlation analysis of on-site sensors data', *npj Materials Degradation*, 7: 10.
- Kirchgeorg, T., I. Weinberg, M. Hörnig, R. Baier, M. J. Schmid, and B. Brockmeyer. 2018. 'Emissions from corrosion protection systems of offshore wind farms: Evaluation of the potential impact on the marine environment', *Marine pollution bulletin*, 136: 257-68.
- Langenkämper, Daniel, Martin Zurowietz, Timm Schoening, and Tim W Nattkemper. 2017. *BIIGLE 2.0-browsing and annotating large marine image collections* (Frontiers Media SA).
- Momber, A. W., M. Wilms, and D. Brün. 2022. 'The use of meteorological and oceanographic sensor data in the German offshore territory for the corrosion monitoring of marine structures', *Ocean Engineering*, 257: 110994.
- Momber, Andreas W., Daniel Langenkämper, Torben Möller, and Tim W. Nattkemper. 2023. 'The exploration and annotation of large amounts of visual inspection data for protective coating systems on stationary marine steel structures', *Ocean Engineering*, 278: 114337.
- Momber, Andreas W., Tim W. Nattkemper, Daniel Langenkämper, Torben Möller, Daniel Brün, Peter Schaumann, and Sulaiman Shojai. 2022. 'A data-based model for condition monitoring and maintenance planning for protective coating systems for wind tower structures', *Renewable Energy*, 186: 957-73.
- Orcesi, Andre, Alan O'Connor, Emilio Bastidas-Arteaga, Mark G. Stewart, Boulent Imam, Katerina Kreislova, Franck Schoefs, Olga Markogiannaki, Teng Wu, Yue Li, Abdullahi Salman, Lara Hawchar, and Paraic C. Ryan. 2022. 'Investigating the Effects of Climate Change on Material Properties and Structural Performance', *Structural Engineering International*, 32: 577-88.
- Paul, Subir. 2012. 'Modeling to Study the Effect of Environmental Parameters on Corrosion of Mild Steel in Seawater Using Neural Network', *ISRN Metallurgy*, 2012: 487351.
- Reese, Anna, Nathalie Voigt, Tristan Zimmermann, Johanna Irrgeher, and Daniel Pröfrock. 2020. 'Characterization of alloying components in galvanic anodes as potential environmental tracers for heavy metal emissions from offshore wind structures', *Chemosphere*, 257: 127182.
- Schoening, Timm, Jonas Osterloff, and Tim W Nattkemper. 2016. *RecoMIA—Recommendations for marine image annotation: Lessons learned and future directions* (Frontiers Media SA).

## MITWIRKENDE

Wir bedanken uns bei allen Beitragenden, UnternehmerInnen, WissenschaftlerInnen und Fachleuten, die an unserem Workshop teilgenommen haben. Außerdem an Vielen Dank an das Schreibteam welches an dem Whitepaper mitgewirkt und Zeit investiert hat. Vielen Dank an Alle!

- PD Dr. Andreas Momber, Muehlhan Holding GmbH
- Prof. Dr. Tim Nattkemper, Universität Bielefeld
- Dr. Gino Ebell, Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM)
- Dr. Daniel Höche, Helmholtz Zentrum Hereon GmbH
- Dr. Christian Feiler, Helmholtz Zentrum Hereon GmbH
- Oliver Heins, EnBW Energie Baden-Wuerttemberg AG
- Dr. Sascha Buchbach und Tim Heusinger von Waldegge, Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM
- Salih Gülhan, SPECTAIR GmbH
- Dr. Ole Øystein Knudsen, SiNTEF Industry
- Dr. Johannes Schulz-Stellenfleth, Helmholtz Zentrum Hereon GmbH
- Dr. Daniel Pröfrock, Helmholtz Zentrum Hereon GmbH
- Dr. Mohamed Ben Seghier, Oslo Metropolitan University
- Dr. Bahman Daneshian, Helmut-Schmidt-Universität - Universität der Bundeswehr Hamburg
- Dr. Kai Brune, Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM
- Dr. Peter Plagemann, Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM
- Dr. Anna Ebeling, Helmholtz Zentrum Hereon GmbH
- Sebastian Schibsdatt, Technische-Universität Hamburg TUHH
- Lisa Sahlmann, Lukas Jarren und Dr. Garima Kapoor, Helmholtz Zentrum Hereon GmbH
- Thomas Jensch und Marko Lenz, Liebherr-MCCtec Rostock GmbH

## GEZEICHNET: (AUTOR:INNEN)

