



H₂Mare-Projekt TransferWind

Übertragung von wissenschaftlichen Erkenntnissen zur bauseitigen maritimen und offshore-Korrosion in die Normung und Erarbeitung einer Handlungsempfehlung zu Korrosionsschutz und -prüfung

Sachbericht zum Verwendungsnachweis Teil II: Langfassung

Stand:	31.12.2025
Einreichungsdatum (TIB):	31.03.2026
Partnerin/Partner:	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
Autorin/Autor:	Andreas Burkert, Lara Eggert
Fördertitel:	Verbundvorhaben H2Mare_VB3: TransferWind – H ₂ Mare Forschungs-Transfer
Förderkennzeichen:	03HY303
Laufzeit:	01.04.2021 – 31.12.2025
Disclaimer:	<i>Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin/beim Autor/den Autoren.</i>

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt



Finanziert von der
Europäischen Union
NextGenerationEU

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	3
Abbildungsverzeichnis	4
Tabellenverzeichnis	5
I. Ausführliche Darstellung der durchgeführten Arbeiten und erzielten Ergebnisse im Vergleich zur ursprünglichen Vorhabensbeschreibung	6
I.1 Handlungsempfehlungen für Korrosionsprüfverfahren	6
I.2 Transfer von Prüfverfahren in die Praxis	8
I.2.1 Erstellung DIN 50023 [3]	8
I.2.2 Erstellung DIN 50024 [4]	10
I.3 Handlungsempfehlungen zum Korrosionsschutz	13
I.3.1 Bewertung der atmosphärischen Korrosivitätsdaten zur Festlegung der Korrosionsschutzanforderungen und Sicherstellung der Dauerhaftigkeit	13
I.3.2 Werkstoffauswahl von nichtrostenden Stählen unter Offshore-Bedingungen	14
II. Verwendung der Zuwendung	16
II.1 Darstellung der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	16
II.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten	16
III. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des Verwertungsplans ..	16
IV. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens während der Laufzeit	17
V. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen nach Nr. 5 der NKBF/NABF	18
VI. Literaturverzeichnis	20

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erklärung
NSS	Neutrale Salzsprühnebelprüfung
KK	Konstant Klima
NIRO	Nichtrostende Stähle
LK	Lochkorrosion

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zustand des Klemmpunktes einer Solarmodulbefestigung nach 3 Jahren Auslagerung auf Helgoland, Verschraubung nach der Auslagerung nicht mehr lösbar, a) Längsschnitt durch den Klemmpunkt zeigt den Kontaktbereich Aluminiumverbinder / nichtrostende Stahlschraube mit ausgeprägter Weißrostbildung am Aluminiumverbinder, b) Aluminiumverbinder nach Demontage und Entfernung der Korrosionsprodukte mit deutlicher Materialabzehrung infolge Bimetallkorrosion	7
Abbildung 3: Prinzipskizze der Messanordnung für das Prüfverfahren mittels Gelelektrolyten zur Bestimmung von Polarisationswiderständen.....	9
Abbildung 4: links: Praktische Anwendung des Prüfverfahrens DIN 50023 an einer Leitplanke, rechts: Ansicht Unterseite des Prüfkopfes mit Dauermagneten (außen) und Gegenelektrode (zentral)	10
Abbildung 5: Prinzipdarstellung der KorroPad®-Prüfung	11
Abbildung 6: Nachweis einer unvollständigen Passivschichtausbildung mittels KorroPad®-Prüfung, links: Prüfergebnis an den Muttern, rechts: Metallograpischer Schliff durch die Randzone einer Mutter mit Ausscheidung von Sigma-Phase	12
Abbildung 7: KorroPad®-Prüfung an einer Schweißnaht mit deutlichen Anzeigen einer instabilen Passivschicht im Bereich der Wärmeeinflusszone durch unzureichende Nacharbeit.....	12

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: <i>Bewertung der Bimetallkorrosion an Solarbefestigungselementen aus Aluminium und nichtrostendem Stahl nach Auslagerung in maritimer (Helgoland) und städtischer (Berlin) Umgebung und Vergleich mit der Simulation einer maritimen Auslagerung durch Kammerprüfverfahren.....</i>	7
Tabelle 2: <i>Erfolgte Veröffentlichungen</i>	18

I. Ausführliche Darstellung der durchgeführten Arbeiten und erzielten Ergebnisse im Vergleich zur ursprünglichen Vorhabensbeschreibung

I.1 Handlungsempfehlungen für Korrosionsprüfverfahren

Neben Freibewitterungsversuchen unter atmosphärischen Bedingungen, die meist mehrere Jahre umfassen, gibt es zahlreiche Prüfnormen zu sogenannten Kammerprüfverfahren, bei denen bestimmte Umgebungseinflüsse in Prüfkammern nachgestellt werden. Da hier in der Regel das Ziel einer Zeitverkürzung von Versuchen angestrebt wird, werden solche Prüfungen hinsichtlich bestimmter Parameter, wie z.B. Befeuchtungsdauer oder der Temperatur meist verschärft. Einen Überblick über verschiedene internationale Prüfnormen zu den gängigsten Kammerprüfverfahren bietet u.a. die DIN 50937 [1], welche die unterschiedlichen Prüfatmosferaen hinsichtlich ihrer korrosiven Wirkung vergleichend gegenüberstellt. Diese Norm wird durch im DIN NA 062-02-112 AA "Korrosionsprüfverfahren" betreut und während der Laufzeit des Vorhabens überarbeitet und angepasst.

Die Übertragbarkeit der Prüfergebnisse aus den verschiedenen Kammerprüfverfahren auf das Verhalten in der Praxis basiert häufig auf Vergleichen mit Realversuchen sowie langjährigen Erfahrungswerten. Je nach Korrosionsschutzsystem können verschiedene Prüfungen das tatsächliche Verhalten unter praktischen Einsatzbedingungen mehr oder weniger gut widerspiegeln. Andere wiederum sind für bestimmte Systeme völlig ungeeignet, wie etwa die Anwendung der Salzsprühnebelprüfung nach DIN EN ISO 9227 [2] zur Korrosionsprüfung verzinkter Bauteile. In den letzten Jahren haben sich gegenüber den Prüfungen unter konstanten Klimaten in der Prüfpraxis verstärkt zyklische Wechselversuche etabliert, die das Ziel verfolgen, die Ergebnisse der Korrosionsprüfung und die Ausprägung von Korrosionserscheinungen an das Verhalten unter Praxisbedingungen anzugleichen. Nicht selten geht dieses Ziel mit der Verringerung der Korrosivität der Tests einher, so dass die erforderlichen Versuchszeiten tendenziell verlängert werden müssen, um aussagekräftige Versuchsergebnisse für die meist vergleichenden Untersuchungen an verschiedenen Schutzsystemen zu erhalten.

Von der BAM durchgeführte vergleichende Untersuchungen zum Verhalten von Befestigungs-konstruktionen für Solarmodule auf Helgoland, in Berlin sowie in einem Laborauslagerungsversuch über 1,5 und 3 Jahre haben gezeigt, dass die Nachstellung des unter natürlichen Umgebungsbedingungen beobachteten Korrosionsverhaltens der Befestigungs-konstruktion auf Helgoland (Abbildung 1) im Labor durchaus möglich ist. So konnte durch die Kombination einer 96-stündigen neutralen Salzsprühnebelprüfung [2] ohne nachfolgende Reinigung der Versuchsbauteile und deren anschließende Verbringung in ein Konstant-Klima von 30 °C bei 80 % r.F. eine sehr gute Übereinstimmung der Schadensbilder hinsichtlich Umfang und zeitlicher Entwicklung für ein maritimes Umfeld erzielt werden (Tab. 1).

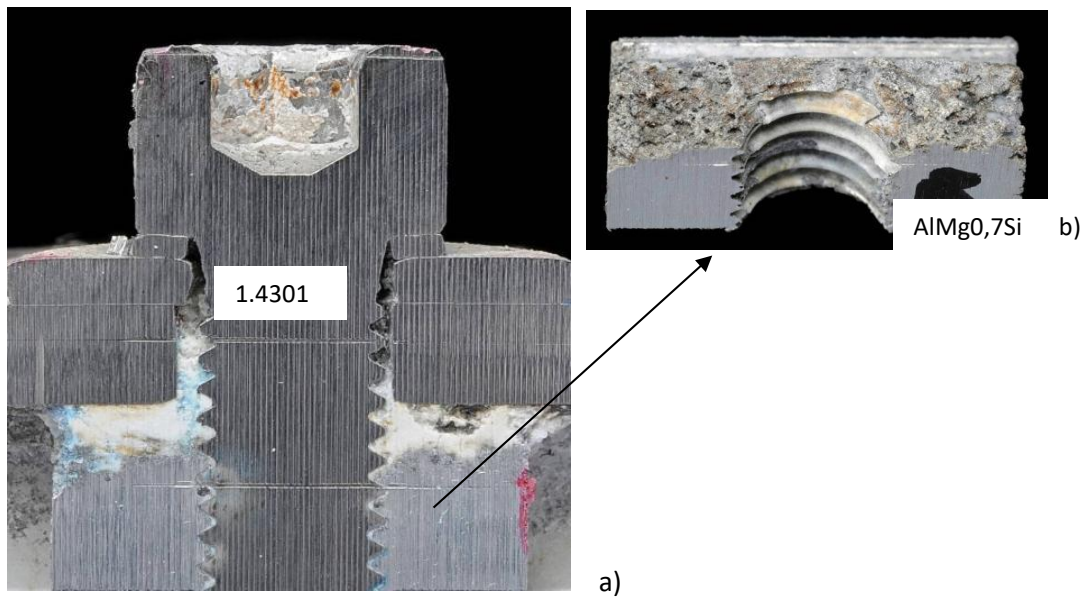


Abbildung 1: Zustand des Klemmpunktes einer Solarmodulbefestigung nach 3 Jahren Auslagerung auf Helgoland, Verschraubung nach der Auslagerung nicht mehr lösbar, a) Längsschnitt durch den Klemmpunkt zeigt den Kontaktbereich Aluminiumverbinder / nichtrostende Stahlschraube mit ausgeprägter Weißrostbildung am Aluminiumverbinder, b) Aluminiumverbinder nach Demontage und Entfernung der Korrosionsprodukte mit deutlicher Materialabzehrung infolge Bimetallkorrosion

Tabelle 1: Bewertung der Bimetallkorrosion an Solarbefestigungselementen aus Aluminium und nichtrostendem Stahl nach Auslagerung in maritimer (Helgoland) und städtischer (Berlin) Umgebung und vergleich mit der Simulation einer maritimen Auslagerung durch Kammerprüfverfahren

Auslagerungsbedingung	Ergebnis nach 1,5 Jahren	Ergebnis nach 3 Jahren
Freibewitterung Berlin	geringe LK am Aluminium im Kontaktbereich zu NIRO, Schrauben leicht lösbar	Vergleichbar mit Zustand nach 1,5 Jahren, geringe LK am Aluminium im Kontaktbereich zu NIRO, Schrauben leicht lösbar
Freibewitterung Helgoland	ausgeprägte Lochkorrosion am Aluminium im Kontaktbereich zu NIRO, Schrauben schwer lösbar	signifikante Materialverluste am Aluminium im Kontaktbereich zu NIRO, Schrauben nicht lösbar
Kammerprüfung Maritim (einmalig NSS über 96 h und anschließende Lagerung im KK bei 30 °C und 80 % r.F.)	stark ausgeprägte Lochkorrosion am Aluminium im Kontaktbereich zu NIRO, Schrauben nicht lösbar	signifikante Materialverluste am Aluminium im Kontaktbereich zu NIRO, Schrauben nicht lösbar

Bei der Auswahl geeigneter Versuche muss die reale Beanspruchung der Konstruktion ebenso Berücksichtigung finden, wie die untersuchten Werkstoffe. Im hier gezeigten Beispiel also der Schutz der Befestigungselemente vor direkter Beregnung durch darüber liegenden Solarmodule. Bei gleichen Bewertungszeiträumen waren die erzeugten Schadensbilder zwischen Helgoland und der

Simulation maritimer Bedingungen im Labor weitestgehend gleich, mit einer zeitlich geringen Beschleunigung im Simulationsversuch. So erreichte die Kammerprüfung hier zwar keinen bedeutenden Zeitvorteil, aber die experimentelle Nachstellung der relevanten Korrosionsbedingungen im Labor stellt gegenüber der Auslagerung auf Helgoland natürlich einen enormen Vorteil für nachfolgende Versuchsreihen zur Bewertung von Korrosionsschutzmaßnahmen unter vergleichbaren Randbedingungen dar. Die Prüfung ist hinsichtlich der Aussagefähigkeit auf andere Metalle bzw. Schutzsysteme nicht zwingend übertragbar.

Im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen Freibewitterungsversuchen und den Kammerprüfverfahren eignen sich elektrochemische Untersuchungsmethoden sehr gut, um die grundlegenden Korrosionsvorgänge umfassend zu untersuchen und zu verstehen. Vorteil dabei ist, dass hier die zugrundeliegenden Korrosionsreaktionen selbst Gegenstand der Untersuchungen sind und nicht wie bei den Auslagerungsversuchen der Eintritt eines messbaren Massenverlustes bzw. einer sichtbaren korrosiven Schädigung der Prüfkörper. Die elektrochemischen Prüfmethoden stellen in der Regel einen hohen Anspruch an die Erfahrungen und das korrosionstechnische Hintergrundwissen beim Anwender, da sie in geeigneter Weise an das Korrosionssystem und die Fragestellung angepasst werden müssen. Je nach Art des Metalls bzw. Schutzsystems und auch der zugrundeliegenden Fragestellung bedarf es unterschiedlicher Prüfmethoden. Deshalb sind diese Methoden auch vorwiegend in der Korrosionsforschung beheimatet. Durch die exakte Beschreibung der Durchführung in Normen und Regelwerken für einen konkreten Anwendungszweck, kann dennoch ein geeigneter Transfer von Methoden für die praktische Prüfung im Feld gelingen. Mit diesem Ziel wurden innerhalb des Vorhabens zwei nationale Prüfnormen im DIN-Normenausschuss Materialprüfung (NMP), Arbeitsausschuss NA 062-02-112 AA "Korrosionsprüfverfahren" erarbeitet und veröffentlicht.

I.2 Transfer von Prüfverfahren in die Praxis

I.2.1 Erstellung DIN 50023 [3]

Diese Norm kann zur Bestimmung der Korrosionsschutzwirkung von Deckschichten an Zink und Zinküberzügen eingesetzt werden, welche sich unter atmosphärischen Bedingungen im maritimen und nichtmaritimen Umfeld durch Interaktion mit den jeweiligen Umgebungsbedingungen ausbilden. Die elektrochemischen Messungen gestatten dabei Prognosen über die Dauerhaftigkeit des Korrosionsschutzes und ggf. des Eintrags von Metallionen, die nicht auf einem ermittelten Massenverlust, sondern auf der Untersuchung der Kinetik der Korrosionsreaktionen gründen.

Die Durchführung elektrochemischer Messungen an Zink bzw. verzinkten Bauteilen in typischen wässrigen Elektrolyten mit geringen Zusätzen von Sulfaten oder Chloriden führte jedoch nicht zu verwertbaren Ergebnissen, da sich die atmosphärisch gebildeten Deckschichten bei Kontakt mit einem Bulkelektrolyten (größere Menge an Wasser in den Prüfwelle) unter hoher Reaktionskinetik sehr schnell umbilden. Aus diesen Messungen gewonnene elektrochemische Kennwerte waren daher nicht geeignet, die Schutzwirkung der unter atmosphärischer Beanspruchung gebildeten Deckschichten zu beschreiben. Zur Erreichung dieses Ziels war es notwendig, den klassischen Bulkelektrolyten durch einen gelartigen Elektrolyten zu ersetzen. Der gelartige Elektrolyt bildet beim Auflegen auf eine Metalloberfläche durch Synärese-Effekte nur einen sehr dünnen Feuchtigkeitsfilm aus. Innerhalb dieses Feuchtigkeitsfilms stellt sich schnell ein neues Metallionengleichgewicht ein, ohne dass die Deckschicht dabei wesentlich umgebildet wird. Durch Aufsetzen einer Messzelle mit Bezugs- und Gegenelektrode und der Kontaktierung des Messobjektes als Arbeitselektrode erhält man eine klassische Dreielektrodenanordnung und damit die Möglichkeit zur Durchführung diverser elektrochemischer Messungen (Abbildung 2). Dadurch ist es möglich an stabilen Deckschichten

innerhalb kurzer Messzeiten etwa den Deckschichtwiderstand zu ermitteln, der ein Maß für die Schutzeigenschaften der Deckschicht darstellt.

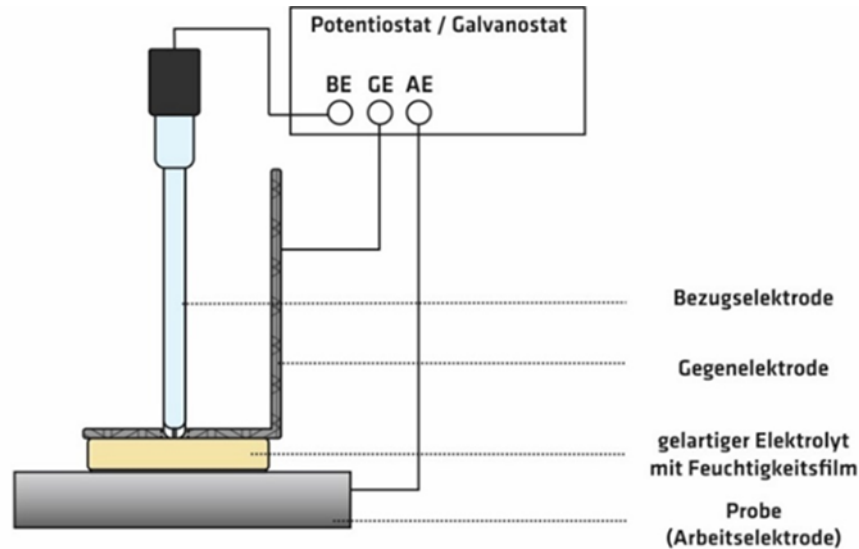


Abbildung 2: Prinzipskizze der Messanordnung für das Prüfverfahren mittels Gelelektrolyten zur Bestimmung von Polarisationswiderständen

Über einen längeren Beobachtungszeitraum können aus der Kenntnis der zeitlichen Entwicklung von Deckschichtwiderständen umgebungsabhängig der zeitliche Verlauf der Ausbildung von Deckschichten, welche die Korrosionsgeschwindigkeit erheblich herabsetzen, beschrieben werden. Dies bietet die Möglichkeit, mehrjährige Auslagerungsversuche zu begleiten und diese später so weit zu verkürzen, bis eine weitgehend stabile Deckschicht vorliegt. Von diesem Zustand ausgehend sind dann Langzeitprognosen zum Verbrauch des Überzugsmaterials und damit zur Auslegung bzw. zur Dauerhaftigkeit des Korrosionsschutzes durch Zink unter der Voraussetzung möglich, dass sich die Korrosivität der Umgebung im Betrachtungszeitraum nicht wesentlich ändert.

Neben der Begleitung von Auslagerungsversuchen gestattet die Methode auch direkte Messungen an neuen Bauwerken oder Bestandsobjekten. Das Handling von Gelelektrolyten erweist sich bei derartigen Messungen als großer Vorteil, da die Messzelle nicht gegen den Austritt von Flüssigkeiten abgedichtet werden muss und so auch an seitlichen Flächen bzw. über Kopf oder an gekrümmten Oberflächen gemessen werden kann (Abbildung 3).



Abbildung 3: links: Praktische Anwendung des Prüfverfahrens DIN 50023 an einer Leitplanke, rechts: Ansicht Unterseite des Prüfkopfes mit Dauermagneten (außen) und Gegenelektrode (zentral)

So kann die Ausbildung von Deckschichten in Abhängigkeit der Oberflächenausrichtung am Objekt (waagrecht, horizontal, oben, unten, direkt beregnet, geschützt) separat ermittelt und ggf. relevante Unterschiede beschrieben werden. Eine zeitliche Begleitung von Pilotanlagen bzw. Demonstratoren kann dazu dienen, die Prognosewerte in einer Realumgebung zu verifizieren und bei unerwarteten Abweichungen die Modellannahmen anzupassen.

Die DIN 50023 beschreibt alle notwendigen Randbedingungen zur Vorbereitung und Durchführung der Messungen und gibt Hinweise zur Interpretation. Die Prüfmethode wurde von den Entwicklungspartnern selbständig getestet und es erfolgte eine entsprechende Rückkopplung in die Normungsarbeit auf Basis der dabei gewonnenen Erfahrungen und aufgetretener Probleme.

I.2.2 Erstellung DIN 50024 [4]

Neben der Anwendung klassischer elektrochemischer Prüfverfahren, die immer Spezialkenntnisse und korrosionstechnische Erfahrungen voraussetzen, ist es auch möglich, elektrochemische Versuche weiter zu vereinfachen. Damit sollen diese auch für eine breite Anwendung in der Praxis keine Hürde darstellen und eine entsprechend große Akzeptanz finden. Dass dies möglich ist, zeigt beispielhaft die Entwicklung der KorroPad®-Methode für nichtrostende Stähle, die ebenfalls auf einem gelartigen Elektrolyten basiert. Auch hierbei handelt es sich vom Prinzip her um ein elektrochemisches Prüfverfahren, welches aber als Bewertungskriterium nicht auf Potentiale oder Ströme setzt, sondern auf einen Farbumschlag durch einen zugesetzten Farbindikator. Im Fall der Anwendung auf nichtrostenden Stählen handelt es sich dabei um Kaliumhexacyanoferrat, welches bei Kontakt mit Eisen-II-Ionen zu einem blauen Farbumschlag innerhalb des gelartigen Prüfmittels führt. Gleichzeitig dient der Indikator als Oxidationsmittel, der das Prüfpotential auf Werte um 300 mV (Ag/AgCl) anhebt. Durch eine intakte Passivschicht, die vorwiegend aus Chromoxiden besteht, treten während der Prüfung keine Eisenionen durch die Passivschicht und es gibt auch keine Anzeigen. Fehlstellen, an denen der Durchtritt von Eisenionen möglich ist, werden im Test durch eine örtliche Blaufärbung im Prüfmittel angezeigt und können so auch entsprechend lokalisiert und ggf. gezielt untersucht werden (Abbildung 4).

Von der Idee bis zur breiten Einführung und Akzeptanz einer neuen Prüfmethode am Markt können durchaus 5 bis 10 Jahre an Forschungs- und Entwicklungsarbeit vorausgehen. Die Entwicklungsarbeit sollte parallel immer durch geeignete Transfermaßnahmen, wie

Pilotanwendungen bei ausgewählten Kunden, Publikationen und/oder Vorträge, wenn immer möglich Experimentalvorträge begleitet werden. Für die Akzeptanz bei potenziellen Anwendern ist es wichtig, dass die Maßnahmen auch außerhalb der Wissenschaftscommunity stattfinden. Nur dadurch ist es möglich frühzeitig auf Verständnis bzw. Handlings-Probleme im Prüfablauf beim Anwender einzugehen.

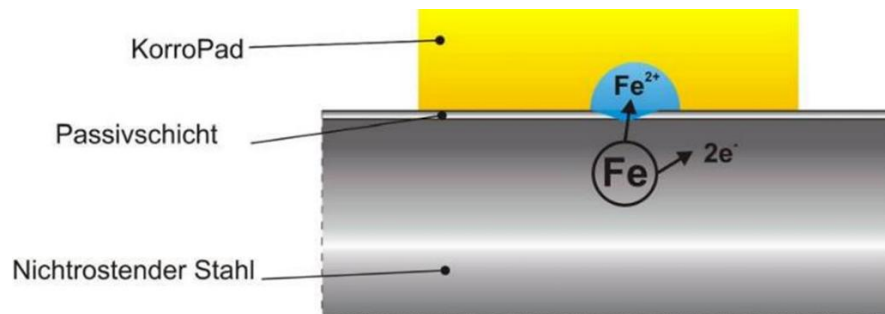


Abbildung 4: Prinzipdarstellung der KorroPad®-Prüfung

Aufbauend auf einer langjährigen Vorarbeit konnte im Rahmen des Vorhabens auch für dieses Verfahren eine Prüfnorm erstellt und veröffentlicht werden. Diese ermöglicht es die Passivschichtstabilität an Realbauteilen aus nichtrostenden Stählen zerstörungsfrei zu prüfen, wie z.B. im Anschluss an eine mechanische oder chemische Oberflächennachbehandlung etwa im Bereich von Schweißnähten. Damit lassen sich mögliche korrosionsbedingte Schädigungsprozesse infolge einer ungenügenden Passivschichtausbildung im späteren Betrieb und damit eine aufwendige Nacharbeit vermeiden. Mittels der Prüfmethode lassen sich aber auch Imperfektionen der Passivschicht ermitteln, die etwa auf Ausscheidungen basieren, in deren Folge es zu chromverarmten Gefügebereichen kommt

Diese können durch eine übliche Qualitätssicherung, etwa durch Ermittlung der Legierungszusammensetzung mittels RFA nicht erkannt werden, da die Werte damit nur über einen größeren Bereich ermittelt werden. Die Messung über chromverarmte Bereiche und chromreichen Ausscheidungen wird in der Regel die erwartete mittlere Werkstoffzusammensetzung ergeben. Die für die Korrosionsbeständigkeit relevanten Unterschiede in der Verteilung der Legierungselemente können auf diese Weise also nicht dargestellt werden. Mittels des Korrosionsschnelltests auf der Grundlage von DIN 50024 ist dies jedoch möglich. Die Prüfung kann damit u.a. suboptimale Werkstoffzustände aus der Wärmebehandlung, der schweißtechnischen Verarbeitung oder der Oberflächenbearbeitung anzeigen. Zur weiteren Abklärung der konkreten Ursachen von Passivierungsstörungen sind dann im Bedarfsfall weitergehende Untersuchungen erforderlich (Abbildung 5).

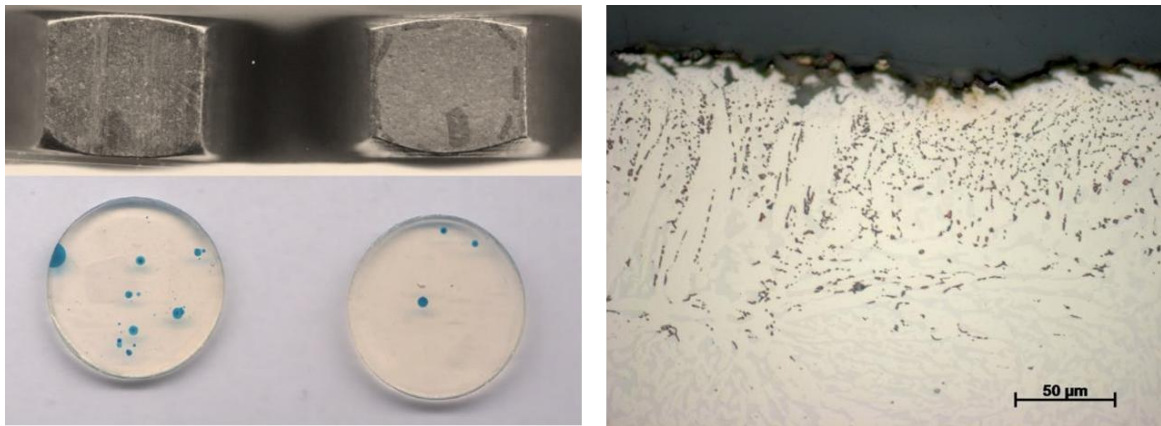


Abbildung 5: Nachweis einer unvollständigen Passivschichtausbildung mittels KorroPad®-Prüfung, links: Prüfergebnis an den Muttern, rechts: Metallographischer Schliff durch die Randzone einer Mutter mit Ausscheidung von Sigma-Phase

Die Prüfungen mit kurzen Prüfzeiten von 15 Minuten ermöglichen eine zerstörungsfreie Inline-Qualitätskontrolle und Überwachung von Produktionsabläufen bei der Herstellung von Bauteilen und Komponenten. Die Prüfmethode eröffnet damit auch neue Handlungsoptionen für eine Qualitätsüberwachung vor, während und nach der Montage von Anlagenkomponenten, die es im Hinblick auf die Sicherstellung einer werkstoffgerechten Verarbeitung unter Korrosionsschutzaspekten bislang nicht gab (Abbildung 6). Damit stellt die KorroPad®-Prüfung gerade für Offshore-Prozesse eine gute Möglichkeit dar, durch frühzeitiges Erkennen von Abweichungen in der Verarbeitung, spätere kostenintensive Nacharbeiten bzw. Korrosionsschäden und den dann notwendigen Austausch von Komponenten zu vermeiden.



Abbildung 6: KorroPad®-Prüfung an einer Schweißnaht mit deutlichen Anzeigen einer instabilen Passivschicht im Bereich der Wärmeinflusszone durch unzureichende Nacharbeit

Das Verfahren ist in vielen Branchen bereits etabliert, aber bisher fehlte zur Vereinbarung verbindlicher Abnahmekriterien zwischen Lieferanten und Abnehmer die Beschreibung in einer Norm. Diese Lücke konnte nunmehr geschlossen werden, so dass eine weitere Verbreitung und Akzeptanz erwartet wird. Weiterhin bietet sich nunmehr auch die Möglichkeit, dass Prüfverfahren in Produktnormen zu implementieren.

I.3 Handlungsempfehlungen zum Korrosionsschutz

I.3.1 Bewertung der atmosphärischen Korrosivitätsdaten zur Festlegung der Korrosionsschutzanforderungen und Sicherstellung der Dauerhaftigkeit

Innerhalb des Vorhabens sollten die im Teilprojekt PtX-Wind (AP 5.4) an insgesamt 7 maritimen Standorten ermittelten atmosphärischen Korrosivitätsdaten aufbereitet und bewertet werden. Zukünftig sollen diese in die nationale und später ggf. europäische Normung zur Bemessung des Korrosionsschutzes unter Offshore Bedingungen einfließen.

Die Auswertung der erhobenen Daten zeigte, dass die Verwendung allgemein beschreibender Standortmerkmale einschlägiger Normen zu anderen Korrosivitätskategorien in maritimen Bereichen führt als die direkte Bestimmung der Korrosivität mittels ausgelagerter Referenzprüfkörper.

So wird z.B. für unlegierten Stahl unter Offshore Bedingungen die Kategorie CX nur in der Wasserwechselzone sowie in Bereichen mit unmittelbarer Einwirkung von Spritzwasser beobachtet. Außerhalb dieser beiden Bereiche liegt die festgestellte Korrosivität von Offshore-Atmosphären bei C4 und in küstennahen Onshore-Bereichen bei C3. Gegenüber Zink und Zinküberzügen liegt die Korrosivität der maritimen Atmosphären sogar nur im Grenzbereich zwischen C2 und C3, solange auch hier eine unmittelbare Spritzwassereinwirkung ausgeschlossen ist. Aus den an Referenzprüfkörpern an unterschiedlichen Standorten ermittelten Ergebnisse lassen sich demnach andere Anforderungen an die Bemessung des Korrosionsschutzes ableiten als in diversen Regelwerken ausgeführt.

Bei den einschlägigen Korrosivitätsnormen auf Basis der DIN EN ISO 9223 bis 9226 [5-8] zur Feststellung der Anforderungen an den Korrosionsschutz handelt es sich um ein internationales Normenwerk. Hinsichtlich der dort aufgeführten Annahmen zur Korrosivität in maritimen Atmosphären und den zugrundeliegenden Abtragungsraten weichen diese von den innerhalb des Projektes für die Nord- und Ostsee sowie deren küstennahen Zonen erhobenen Daten ab. Eine Anpassung der internationalen Normenwerke ist nicht angezeigt, da in anderen Regionen bedingt durch signifikant höhere Jahresmitteltemperaturen und durch zusätzliche Belastungen aus industriellen Verbrennungsprozessen fossiler Energieträger ganz andere Korrosivitätsbedingungen vorliegen können. Insofern sollen die im Rahmen des Vorhabens erhobenen Daten zunächst als Grundlage für die Anpassung nationaler Regelwerke und Richtlinien für den Korrosionsschutz von Offshore-Anlagen dienen. Im Nachlauf des Vorhabens wird zusammen mit ergänzenden Daten aus anderen Projekten eine Integration in ein europäisches Normungsprojekt für die Beschreibung korrosiver Beanspruchungen in maritimen Atmosphären angestrebt, die dann die Grundlage für die Bemessung des Korrosionsschutzes liefert.

Nach den vorliegenden Datenerhebungen bieten auch Zink- und Zinklegierungsüberzüge einen sehr guten und langzeitigen Korrosionsschutz in maritimer Umgebung. Die Abtragungswerte von Zink liegen deutlich unter den Erwartungswerten der einschlägigen Normen. Außerhalb dauerfeuchter Bereiche und der Spritzwasserzone lässt sich mit entsprechenden bemessenen Überzügen ein Korrosionsschutz über 50 Jahre sicherstellen, ohne dass es zwingend einer zusätzlichen organische Beschichtung bedarf. Auch hier wirkt sich offensichtlich der Rückgang der SO₂-Gehalte in der

Atmosphäre deutlich aus. Die chloridbedingte Erhöhung der Korrosionsrate gegenüber dem Binnenland ist an den maritimen Standorten zwar tendenziell zu erkennen, liegt aber maximal eine Korrosivitätsklasse höher. Insofern können auch für Offshore-Produktionsanlagen geeignete metallene Überzüge für den Korrosionsschutz Anwendung finden. Für die Auswahl und die Bemessung der Dauerhaftigkeit müssen wie bei allen Korrosionsschutzmaßnahmen die konkreten Anforderungen und die konstruktive Ausführung Berücksichtigung finden.

Neben der Korrosivität einer Atmosphäre, die die Umgebungsbedingungen in ihrer summativen Wirkung beschreibt, ist zwingend auch immer die konstruktive Ausführung von Komponenten und Anlagen zu beachten. So unterscheiden sich direkt bewitterte (beregnete) Bereiche von nicht direkt bewitterten Bereichen (etwa unter einer Überdachung) mitunter wesentlich. Je nach Werkstoff können sich solche Bereiche völlig unterschiedlich auswirken. Insbesondere deckschichtbildende Metalle (nichtrostende Stähle, Aluminium, Zink) können ohne freie Beregnung durch die Aufkonzentration von Chloriden auf der freien Oberfläche meist geringfügige, in Spaltbereichen aber auch deutlich ausgeprägte Korrosionsangriffe aufweisen, die unter freier Bewitterung nicht beobachtet werden. So können auch die Unterseiten von Konstruktionsteilen stärker von Korrosion betroffen sein als die direkt beregneten Oberseiten. Weiterhin ist auf einen guten Wasserablauf zu achten, um dauerfeuchte Bereiche zu vermeiden.

Die Höhenlage über LAT hat nach den hier durchgeführten Untersuchungen in den Bereichen oberhalb von 20 m keinen wesentlichen Einfluss auf die Korrosivität. In der Literatur wird verschiedentlich über einen entsprechenden Höheneinfluss berichtet [9]. Ein wesentlicher Einfluss wird aber auch dort nur für Bereiche bis etwa 20 m Höhe berichtet, so dass vermutet werden kann, dass in der Betrachtung hier ggf. temporäre Spritzwasserbereiche miterfasst wurden. Auf dieser Grundlage kann eingeschätzt werden, dass für eine Offshore-Produktionsanlage ab einer Höhenlage von 20 m über LAT vorliegende Erfahrungswerte zum Korrosionsschutz aus dem Bereich der Küstenlinie einen guten Anhaltspunkt für die Bemessung des Korrosionsschutzes bieten. Gleichzeitig lassen sich im Bereich der Küstenlinie dann auch ggf. zusätzliche Bedarfe an Untersuchungen mit hinreichender Sicherheit auf den Offshore-Bereich übertragen.

I.3.2 Werkstoffauswahl von nichtrostenden Stählen unter Offshore-Bedingungen

Neben den unter I.2.1 berichteten Ergebnissen zur Beurteilung des Korrosionsschutzes durch Überzüge und Beschichtungen, bedarf die für viele chemische Prozesse bedeutsame Gruppe der nichtrostenden Stähle einer gesonderten Betrachtung. Das ergibt sich daraus, dass die werkstoffspezifischen Anforderungen durch die normative Bestimmung der Korrosivität der Atmosphäre nicht in dem Maße abgedeckt werden, wie die für eine geeignete Legierungsauswahl nichtrostender Stähle erforderlich ist. Daher gibt es für diese Stähle gesonderte Auswahlkriterien, die in Beständigkeitslisten mit Schwerpunkt für die chemischen Industrie aufgeführt sind [10]. Im Rahmen dieses Vorhabens wurden nur Anforderungen durch Außenkorrosion betrachtet. Hierzu finden sich im europäischen Regelwerk der DIN EN 1993-1-4 [11] mit Schwerpunkt auf Tragwerke aus nichtrostenden Stählen auch Hinweise zur Werkstoffauswahl unter maritimen Bedingungen.

Die Grundlage hierfür bilden neben Erfahrungswerten und experimentellen Ergebnisse häufig die Wirksumme, international bekannt unter PRE bzw. PREN, welche auf der Legierungszusammensetzung beruhen und aus der sich ein Ranking der Beständigkeit gegenüber chloridinduzierter Loch- und Spaltkorrosion ergibt. Dieses Ranking ist damit für atmosphärische Einsatzumgebungen im maritimen Umfeld bzw. Offshore-Umgebung durchaus von Bedeutung. Während für verschiedene Küstenbereiche Daten vorlagen, waren systematische Daten unter Offshore-Bedingungen kaum vorhanden. Im Teilprojekt PtX-Wind (AP 5.4) wurden daher neben

Überzügen und Beschichtungen auch nichtrostende Stähle auf einer Verteilerplattform ausgelagert, deren Ergebnisse im Rahmen von TransferWind näher betrachtet wurden. Die ausführliche Ergebnisdarstellung dazu findet sich im Sachbericht Teil II des Teilprojektes von PtX-Wind (AP 5.4). Die für die Regelwerksarbeit relevanten Ergebnisse lassen sich zusammenfassend wie folgt bewerten:

Auf freiberechneten Oberflächen und bei werkstoffgerechter Verarbeitung und Oberflächenausführung ist bei Wirksummen oberhalb von 24 keine technisch relevante Oberflächenkorrosion zu erwarten. Optische Beeinträchtigungen durch Verfärbungen sind aber möglich. In Bereichen, die nicht freiberechnet sind und damit eine Aufkonzentration von Chloriden möglich ist, sollten dagegen Werkstoffe mit einer Wirksumme von mindestens 30 eingesetzt werden, um eine ausreichende Korrosionsbeständigkeit sicherzustellen. Da diese Bedingung auch die Unterseiten von Konstruktionselementen oder Bauteilen betreffen kann, muss die Forderung einer höheren Wirksumme ggf. auf das gesamte Bauteil übertragen werden.

Wie aus anderen korrosiven Atmosphären bekannt, zeigte sich auch unter Offshore-Bedingungen, dass die Beständigkeit nichtrostender Stähle wesentlich durch das Verhalten der Werkstoffe in konstruktiven Spalten bestimmt wird. Eine ausreichende Sicherheit gegen relevante Spaltkorrosion in Verbindungs- oder Überlappungsbereichen bieten erst Legierungen mit einer Wirksumme über 30. Mögliche Abhilfemaßnahmen gegen Spaltkorrosion bei Werkstoffen mit geringerem Legierungsgehalt, wie etwa dauerelastische Spaltabdichtungen bzw. die Verwendung von kupferhaltigen Kontaktmaterial zu Potentialabsenkung im Spalt, sind grundsätzlich möglich, bedürfen aber unter Dauerhaftigkeitsaspekten einer gesonderten Betrachtung.

Schweißtechnische Verbindungen nichtrostender Stähle bieten den Vorteil einer spaltfreien Konstruktion und sind daher gegenüber spaltbehafteten Verbindungen zu bevorzugen. Sie sind weit verbreitet und stellen bei Verwendung geeigneter Schweißzusatzwerkstoffe, der Einhaltung einer werkstoffgerechten Verarbeitung und einer geeigneten Oberflächennachbehandlung keine Schwachstellen bzgl. der Korrosionsbeständigkeit dar. Eine den Korrosionsschutz sicherstellende Verarbeitung kann zudem mittels des KorroPad[®]-Verfahrens effizient geprüft werden.

Bei Rohrleitungen mit Prozesstemperaturen über 60 °C, die nicht vor dem Zutritt von Chloriden aus der umgebenden Atmosphäre geschützt werden können, sind nichtrostende Stahllegierungen mit Wirksummen ab 40 zu verwenden. Bei vollständig geschlossenen Umhüllungen können auch geringer legierte Werkstoffe (Wirksumme mindestens 30) eingesetzt werden, wobei das Risiko örtlicher Beschädigungen bzw. im Bereich von Übergangs- und Anschlussbereichen von Durchführungen gesondert betrachtet werden muss. Um das Risiko von Spannungsrisskorrosion unter Umhüllungen zu vermeiden, sollte bevorzugt auf Stähle mit Duplexgefüge (Austenit-Ferrit) zurückgegriffen werden. Duplexstähle weisen eine wesentlich höhere Beständigkeit gegen chloridinduzierte Spannungsrisskorrosion auf als Austenite mit ähnlicher Wirksumme. Im Bereich der Superaustenite (Wirksumme größer 40) ist das Auftreten von Spannungsrisskorrosion unter der Einwirkung maritimer Atmosphären aber auszuschließen.

II. Verwendung der Zuwendung

II.1 Darstellung der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Im Rahmen des Vorhabens sind ausschließlich Personal- und Reisekosten angefallen. Für die Sachbearbeitung des Vorhabens wurde zunächst ein wissenschaftlicher Mitarbeiter, später eine Mitarbeiterin im Mittel mit einem Umfang von 0,25 VZÄ beschäftigt. Die beschäftigte Person hat die Aufgaben des Vorhabens verantwortlich bearbeitet und im Rahmen der regelmäßigen Projektmeetings über den Projektfortschritt berichtet. Parallel zu dieser Tätigkeit war die beschäftigte Person mit Aufgaben aus dem Teilprojekt PtX-Wind (AP 5.4) betraut, so dass die für das Teilprojekt TransferWind erforderlichen Ergebnisse unmittelbar zur Verfügung standen und bewertet werden konnten.

II.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Für eine erfolgreiche Normungstätigkeit war die Beteiligung eines interdisziplinären Verbunds aus Wissenschafts- und Wirtschaftsinstitutionen erforderlich, mit dem der Antragsteller gezielt an den Vorhabensinhalten zusammenarbeiten konnte. Durch die Einbindung des Teilvorhabens in einem größeren Verbund wurde sichergestellt, dass die Normungstätigkeit zielgerichtet, wissenschaftlich fundiert und anwendungsorientiert durchgeführt wird. Die BAM hat während der Laufzeit die Partner im Verbundprojekt TransferWind und PtX-Wind zu korrosionsrelevanten und normativen Fragestellungen der Werkstoffauswahl beraten. Die Erstellung der DIN-Prüfnormen und die Beratungstätigkeit setzte eine intensive Beschäftigung mit der Thematik, eine umfassende Netzwerkarbeit und umfangreiches Fachwissen voraus. Das dafür aufzuwendende finanzielle und zeitliche Risiko konnte der Antragsteller im beantragten Umfang nicht allein leisten, weshalb die Förderung benötigt wurde.

III. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des Verwertungsplans

Innerhalb der Projektlaufzeit wurden zwei Prüfnormen erstellt und veröffentlicht. Die darin beschriebenen Methoden können zukünftig die Prüfung von Korrosionsschutzmaßnahmen und die Qualitätssicherung bei der Fertigung von Anlagen und Komponenten sicherstellen. Der geplante Transfer in die Nutzergruppen wurde damit erreicht.

Die gewonnenen Korrosivitätsdaten werden in den Europäischen Katalog zur Bewertung von Standorten aufgenommen und leisten eine wesentliche Ergänzung für den Bereich der deutschen Nord- und Ostseeküste, sowie für Offshore-Standorte in der Nordsee. Gleichzeitig sind diese Daten Grundlage für die Bemessung und Auswahl geeigneter Korrosionsschutzmaßnahmen unter Wirtschaftlichkeits-, Dauerhaftigkeit- und Umweltaspekten. Durch die Veröffentlichung wird ein vereinfachter Zugang zu den Informationen sichergestellt.

Die wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit konnte bereits durch das Verbundvorhaben „Nanopflaster“ – „Steigerung der Lebensdauer und Reduktion der Lebensdauerkosten von Offshore-Windenergieanlagen durch Nanopflaster; Teilvorhaben BAM: Ermittlung des Ermüdungs- und Korrosionswiderstands von Überzügen aus Cu-Ni-Schichten an geschweißten Bauteilen“ (7. Energieforschungsprogramm) realisiert werden. Ein weiteres Anschlussvorhaben zu Einsatz von verzinktem Stahl im Stahlwasserbau (zusammen mit BAW) befindet sich derzeit in der Antragsphase.

Durch die Bearbeitung des Vorhabens konnte das an der BAM vorhandene Wissen ausgebaut und der Kompetenzerhalt sichergestellt werden.

IV. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens während der Laufzeit

Während der Projektlaufzeit wurde weder auf nationaler noch auf europäischer Ebene ein vergleichbares Forschungsvorhaben bekannt, welches sich mit dem Transfer maritimer Korrosionsdaten und neuartiger Prüfverfahren in die Normung beschäftigt. Es sind auch keine weiteren Projekte bekannt geworden, in denen eine vergleichbar umfangreiche Datenerhebung stattgefunden hat.

V. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen nach Nr. 5 der NKBF/NABF

Table 2: Erfolgte Veröffentlichungen

Datum	Art der Veröffentlichung	Titel	Autoren
31.08.2023	Konferenzbeitrag EuroCorr 2023 Brüssel (Vortrag)	Corrosion behavior of simulated monopile foundation by S355J2 steel in artificial seawater and sediment	Khalid Zekhnini, Gino Ebell
03.09.2024	Konferenzbeitrag EuroCorr 2024 Paris (Poster)	Weathering campaigns for a marine corrosion atlas	Lando Seifert, Khalid Zekhnini, Jens Lehmann, Gino Ebell
03.09.2024	Konferenzbeitrag EuroCorr 2024 Paris (Poster)	Weathering campaigns to determine corrosivity on offshore wind turbines	Gino Ebell, Jens Lehmann, Andreas Burkert
30.01.2025	22. Tagung Korrosionsschutz in der maritimen Technik (Vortrag)	Dauerhaftigkeit von Zink an verschiedenen küstennahen Standorten	Gino Ebell, Jens Lehmann, Andreas Burkert
11.03.2025	Themenfeldtag Energie (Poster)	Korrosion und Korrosionsschutz auf offshore Power-to-X-Plattformen	Lara Eggert, Lando Seifert, Jens Lehmann, Gino Ebell, Andreas Burkert
09.09.2025	Konferenzbeitrag EuroCorr 2025 Stavanger (Poster)	Weathering Campaigns in the North Sea for an Offshore Power-to-X Project	Lara Eggert, Lando Seifert, Jens Lehmann Schlag, Gino Ebell, Andreas Burkert

Datum	Art der Veröffentlichung	Titel	Autoren
26.11.2025	43. Tagung Werkstoffprüfung 2025 (Tagungsband, Vortrag)	KorroPad® - Ein Kurzzeitprüfverfahren zur Qualitätssicherung der Oberflächenbearbeitung und Schweißnahtnachbehandlung nichtrostender Stähle	Thoralf Müller, Jens Lehmann Schlag, Andreas Burkert
28.01.2026	23. Tagung Korrosionsschutz in der Maritimen Technik (Vortrag)	Korrosionszustand hochlegierter Stähle in Offshore Umgebung nach 2-jähriger Auslagerung	Jens Lehmann Schlag, Andreas Burkert

VI. Literaturverzeichnis

- [1] **DIN 50937:2023–08** *Korrosion von Metallen und Legierungen - Gegenüberstellung von beschleunigten Korrosionsprüfverfahren und deren Eignung für unterschiedliche Anwendungsgebiete und Korrosionsschutzsysteme.*
- [2] **DIN EN ISO 9227:2024–10** *Korrosionsprüfungen in künstlichen Atmosphären - Salzsprühnebelprüfungen.*
- [3] **DIN 50023:2024–07** *Korrosion von Metallen und Legierungen - Elektrochemische Prüfverfahren: "Prüfverfahren zur Bestimmung von Deckschichtwiderständen an Zink und Zinküberzügen mittels gelartiger Elektrolyte".*
- [4] **DIN 50024:2025–07** *Korrosion von Metallen und Legierungen - Prüfverfahren unter Verwendung eines Farbindikators - Prüfverfahren zum Nachweis der Passivschichtausbildung auf nichtrostenden Stählen.*
- [5] **DIN EN ISO 9223:2012–05** *Korrosion von Metallen und Legierungen - Korrosivität von Atmosphären - Klassifizierung, Bestimmung und Abschätzung.*
- [6] **DIN EN ISO 9224:2012–05** *Korrosion von Metallen und Legierungen - Korrosivität von Atmosphären - Anhaltswerte für die Korrosivitätskategorien.*
- [7] **DIN EN ISO 9225:2012–05** *Korrosion von Metallen und Legierungen - Korrosivität von Atmosphären - Messung der die Korrosivität von Atmosphären beeinflussenden Umweltparameter*
- [8] **DIN EN ISO 9226:2012–05** *Korrosion von Metallen und Legierungen - Korrosivität von Atmosphären - Bestimmung der Korrosionsgeschwindigkeit von Standardproben zur Ermittlung der Korrosivität.*
- [9] **Enos, David G.**, "Atmospheric Corrosion in Marine Environments," *LaQue's Handbook of Marine Corrosion*, Shifler, D. A., ed., pp. 49–60, Hoboken, New Jersey: John Wiley and Sons, 2022.
- [10] **Beständigkeitsliste**, "Chemische Beständigkeit der NIROSTA®-Stähle," ThyssenKrupp Nirosta GmbH, 2003.
- [11] **DIN EN 1993-1-4::2026–04** *Eurocode 3 - Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-4: Tragwerke aus nichtrostenden Stählen; Deutsche Fassung EN 1993-1-4:2025.*