

Umweltfreundlicher Korrosionsschutz mit Hilfe von Polymerdispersionen

Mit einem neuen Screening-Verfahren lässt sich das Korrosionsschutzvermögen schnell bewerten

1K-Korrosionsschutzbeschichtungsstoffe auf Basis von Polymerdispersionen kamen bisher im Korrosionsschutz bei hohen Salzbelastungen aufgrund ihrer begrenzten Schutzwirkung nicht zum Einsatz. Am Fraunhofer IPA wurden jetzt im Rahmen eines Forschungsvorhabens die komplexen Zusammenhänge zwischen Materialeigenschaften von Polymerdispersionen, daraus hergestellten Beschichtungsstoffen und Beschichtungen und dem Korrosionsschutz untersucht. Hieraus leiten sich zusätzliche potenzielle Einsatzmöglichkeiten dieser umweltfreundlichen Bindemittelklasse für den Korrosionsschutz sowie Ansatzpunkte zur Verbesserung der Korrosionsschutzeigenschaften ab. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde auch ein neues Screening-Verfahren zur schnellen Bewertung des potenziellen Korrosionsschutzvermögens von Polymerdispersionen entwickelt.

Ulrich Christ und Rolf Nothhelfer-Richter

Polymerdispersionen – eine interessante Bindemittelklasse für den Korrosionsschutz

Mit einer Jahresproduktionsmenge von über 100.000 t in Deutschland haben Korrosionsschutzbeschichtungen für Anwendungen wie u.a. im Stahl-, Anlagen- und Containerbau, im Chemie- und Tankanlagenbau, im Straßen- und Schienenverkehr, im Energieanlagenbau sowie im Fahrzeugbau eine erhebliche wirtschaftliche Bedeutung. Durch die mit Korrosion verbundenen hohen wirtschaftlichen Verluste hat die Forschung und Entwicklung im Bereich der Korrosionsschutzbeschichtungen nach wie vor eine hohe Priorität, wobei heute der Umwelt- und Arbeitsschutz neben der Produktperformance einen hohen Stellenwert besitzt.

Seit vielen Jahrzehnten haben sich lösemittelbasierte organische Beschichtungen zum Korrosionsschutz von Stahl bewährt, wobei als wichtigste Bindemitteltechnologie für Grundbeschichtungen 2K-Epoxid-Systeme gelten. Inzwischen erreichen wasserverdünnbare EP-Systeme zwar das Eigenschaftsniveau der lösemittelbasierten Beschichtungen, nachteilig sind aber die durch die Topfzeit begrenzte und meist schlecht erkennbare Verarbeitungsdauer und damit verbundene mögliche Anwendungsfehler, die Entsorgungskosten, sowie die notwendige Kennzeichnung hinsichtlich Arbeitshygiene und Arbeitsschutz. Aus diesen Gründen verlangen die Anwender einfach zu handhabende und universell verarbeitbare Ein-Komponenten-Alternativen, wie Produkte aus Polymerdispersionen. Grundbeschichtungen auf Basis von Polymerdispersionen

haben jedoch noch Schwächen im Korrosionsschutzvermögen im Vergleich zu wasserbasierten reaktionshärtenden 2K-EP-Systemen.

Der Korrosionsschutz von Beschichtungen hängt wesentlich von deren Barrierewirkung gegenüber Wasser, Sauerstoff und Elektrolyten und von der Nasshaftfestigkeit der Beschichtung ab [1-3]. Beschichtungen aus Polymerdispersionen sind im Vergleich zu lösemittelbasierten Bindemitteln im Allgemeinen aufgrund der aus der Emulsionspolymerisation stammenden Schutzkolloide und Elektrolyten/Ionenfracht hydrophiler. Diese Bestandteile können zu einer weniger homogenen, diskontinuierlichen Polymerfilmstruktur mit (Mikro)-Poren beitragen, womit auch die Aufnahme von korrosionsfördernden Stoffen in den Polymerfilm und deren Transport in die Grenzfläche zum Metall erleichtert werden kann. Die Homogenität der Polymerfilme hängt auch stark von den Bedingungen bei der Filmbildung ab, insbesondere von Temperatur, rel. Feuchte und Luftaustausch. Vom Standpunkt des Korrosionsschutzes müssen bei Beschichtungen alle Diffusionswege abgedichtet werden, die den Eintrag von Wasser, Elektrolyten und Sauerstoff zur Stahloberfläche hin begünstigen. Dies sind einerseits vertikale Diffusionswege entlang inhomogener Filmstrukturen zur Stahloberfläche und andererseits laterale Diffusionswege, ausgehend von Verletzungen oder Schwachstellen, entlang der Grenzfläche Stahloberfläche/Beschichtung.

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens am Fraunhofer IPA (siehe Kasten) wurden mögliche Wege untersucht, wie die Schwächen der Polymerdispersionen für Korrosionsschutzbeschichtungen überwunden werden können. Dabei wurde ein neues Screening-Verfahren entwickelt, um das potenzielle Korrosionsschutzvermögen von Beschichtungen aus Polymerdispersionen schnell bewerten zu können.

Beiträge zum Korrosionsschutz durch singuläre Eigenschaften der Polymerdispersion und durch Einflüsse von Aktivpigmenten und Füllstoffen

Die Eigenschaften von Beschichtungen aus Polymerdispersionen werden von der Dispersion selbst sowie den Füllstoffen und Aktivpigmenten wesentlich bestimmt. Für die Entwicklung von Beschichtungsstoffen sind sowohl Kenntnisse der Filmeigenschaften aus den Dispersionen allein (Klarlacke) wie auch die der pigmentierten Systeme wichtig.

Zum Stand der Technik der Polymerdispersionen

Polymerdispersionen werden überwiegend durch Emulsionspolymerisation hergestellt. Dieses Verfahren hat gegenüber der Lösungspolymerisation Vorteile, wie u.a. das höhere Molekulargewicht, der hohe Feststoffgehalt von 50 % und die niedrige Viskosität. Als wichtigste Polymerisationstechnik hat sich die Core-Shell-Emulsionspolymerisation bewährt, die gewöhnlich durch einen Zweistufenprozess abläuft, wobei in der ersten Stufe der Kern und in der zweiten Stufe durch Eintrag weiterer Monomere in den Reaktor die Schale polymerisiert wird. Idealerweise bestehen Polymerdispersionen für Korrosionsschutzbeschichtungen aus Core-Shell-Partikeln mit einem harten

Kernpolymer, das der Beschichtung hohe Härte und gute Beständigkeit verleiht, und einem weichen Schale-Polymeren, das gute Koaleszenz- und Interdiffusionseigenschaften für die Filmbildung aufweist. Verbesserungen in der Korrosionsschutzwirkung wurden u.a. durch Einbau von korrosionsinhibierenden funktionellen Gruppen und Hybrid-Dispersionen durch Verwendung sehr hydrophober Copolymerer [4-7]. Polymerdispersionen sind meistens anionisch stabilisiert.

Beitrag von Aktiv- und Barrierepigmenten

Der Beitrag der aktiven Korrosionsschutzpigmente, besonders in wasserverdünnbaren Beschichtungsstoffen und ihre spezifischen Wechselwirkungen mit dem Bindemittel, ist seit vielen Jahren Gegenstand umfangreicher Untersuchungen. Große Bedeutung als aktive Korrosionsschutzpigmente haben Zinkphosphate, modifizierte Zinkphosphate sowie neuerdings auch zinkfreie Produkte auf Basis von Erdalkaliphosphaten [8-11]. Aktivpigmente sollen den Korrosionsprozess des Metalls unterbinden, wenn Korrosionsstimulatoren bei unzureichender Barrierewirkung, bei Fehlstellen in der Beschichtung oder durch Verletzung der Beschichtung die Metalloberfläche erreicht haben [12].

Als Barrierepigmente bzw. Füllstoffe werden meist lamellare Partikel wie Glimmer, Talkum und Eisenglimmer eingesetzt. Sie verlängern im Idealfall die Diffusionswege für Wasser, Sauerstoff und Elektrolyte [13].

Trotz vieler Entwicklungsschritte bei den Rohstoffen konnte bisher mit Polymerdispersionen als Bindemittel kein Durchbruch für den schweren Korrosionsschutz erzielt werden, der dem Stand der wasserverdünnbaren EP-Beschichtungen nahe kommt [13]. So zeigen z.B. Korrosionsschutzbeschichtungen aus wasserbasierten EP-Harzen bei der Salzsprühnebelprüfung nach 720 h eine Unterwanderung von ≤ 1 mm, erfüllen damit z.B. Anforderungen des schweren Korrosionsschutzes nach DIN EN ISO 12944-2/-6 nach Korrosivitätskategorie C4 I und C5 I m, während Acrylat-basierte Dispersionen oft bereits nach 120 h Salzsprühnebeleinwirkung eine stärkere Unterwanderung aufweisen. Jedoch haben sich Korrosionsschutzbeschichtungen auf Basis von Polymerdispersionen an Objekten, wie z.B. Hochspannungsmasten, bewährt, wo keine permanente Salzeinwirkung herrscht.

Wie kann der Lackhersteller aus der Vielfalt der Polymerdispersionen die richtige für sein Anforderungsprofil an den Beschichtungsstoff auswählen?

Aus der Vielfalt an marktverfügbaren Polymerdispersionen kann nicht ohne weiteres auf deren Eignung als hochwertiges Bindemittel zur Formulierung von Beschichtungsstoffen für den Korrosionsschutz geschlossen werden. Die meisten Polymerdispersionen, die für die Herstellung von Korrosionsschutzbeschichtungen ausgelobt sind, basieren auf Styrol-Acrylat- bzw. Acrylat-Copolymeren und viele dieser Produkte unterscheiden sich nur wenig in von den Herstellern genannten technischen Daten, z.B. Festkörpergehalt,

Stabilisierungsart (anionisch), pH-Wert. Daher müssen für die Eignung der Polymerdispersionen für Korrosionsschutzbeschichtungen vor allem Unterschiede im chemischen Aufbau, in der Polymermorphologie und der kolloid-physikalisch-chemischen Stabilisierung, was die Stabilität gegenüber Aktiv- und Barrierepigmenten beeinflusst, verantwortlich sein. Verständlicherweise sind solche Informationen ureigenes Know-how der Rohstoffhersteller und damit dem Lackhersteller im Allgemeinen nicht zugänglich. Zur Prüfung der Eignung und zur Auswahl der „richtigen“ Polymerdispersionen für die Entwicklung von Korrosionsschutzbeschichtungsstoffen müssen daher Basis-Formulierungen mit Aktiv- und Barrierepigmenten auf ihre resultierenden Filmeigenschaften bzw. Barriereigenschaften untersucht werden.

Ein neues Screeningverfahren unter Anwendung üblicher Prüfverfahren hilft für eine schnelle Auswahl und Bewertung

Aus o.g. Ausführungen wird klar, dass eine Bewertung des potenziellen Korrosionsschutzvermögens von Polymerdispersionen nur unter Einbezug der Beiträge der Füllstoffe und Aktivpigmente auf das Gesamtsystem möglich ist. Im Rahmen eines Forschungsvorhabens am Fraunhofer IPA wurde ein neues Screening-Verfahren zur Bewertung des Korrosionsschutzvermögens von Polymerdispersionen entwickelt. Dabei wurden 16 verschiedene handelsübliche Styrol-Acrylat-Dispersionen unter Variation der Pigmentierung und Additivierung im Hinblick auf die Korrosionsschutzwirkung untersucht. Auf Basis der im Korrosionsschutz für den Stahlbau wichtigsten Anforderungen, nämlich einer hohen Beständigkeit unter Salzbelastung, gute Nasshaftfestigkeit und Schwitzwasserbeständigkeit, wurden die Standard-Prüfverfahren eingesetzt, die jedem Lackentwickler zur Verfügung stehen. Das Fraunhofer IPA Screening-Verfahren besteht aus einer beschleunigten Trocknungs- und Alterungsphase mit anschließend jeweils 72 stündigem Salzsprüh- bzw. Kondenswassertest an halbtransparenten Beschichtungen, das schon nach einer Woche erste Aussagen zur Korrosionsbeständigkeit macht. Beschichtungen mit geringem Korrosionsschutzpotenzial werden schnell identifiziert, die Entwickler können sich auf die „guten“ Systeme konzentrieren. Diese Prüfmethodik kommt insbesondere kleineren und mittleren Unternehmen, die im Allgemeinen mit begrenzten Untersuchungsmöglichkeiten ausgestattet sind, zugute.

Vorgehensweise – Experimentelles

Die Beschichtungsstoffe wurden als Klarlack (inkl. Filmbildehilfsmittel und notwendige Additive), als inert pigmentierte sowie als pigmentierte Variante mit Aktivpigmenten formuliert (Abb. 1).

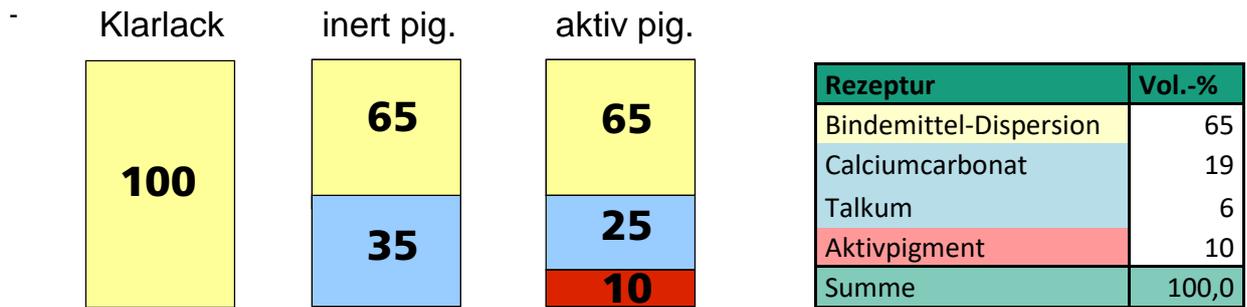


Abb. 1: Rezepturschema der Klarlacke und der inert bzw. aktiv pigmentierten Beschichtungen (Angaben in Volumenprozent (PVK) bezogen auf Trockenschicht)

Die Beschichtungsstoffe wurden unter Normklimabedingungen (23 °C/50 % r.F.) mit einer Spiralrakel appliziert. Danach wurden die Probebleche für drei Tage im Normklima getrocknet und anschließend 16 h bei 40 °C gealtert, wodurch eine erhebliche Zeitraffung erreicht wurde (Abb. 2). Die mittlere Trockenschichtdicke betrug $50 \pm 15 \mu\text{m}$ für unpigmentierte (Klarlacke) und $80 \pm 20 \mu\text{m}$ für pigmentierte Beschichtungssysteme.

Die beiden Prüfungen Salzsprühnebel- (DIN EN ISO 9227) und Kondenswassertest (DIN EN ISO 6270-1) wurden ca. 4 h nach Entnahme der Proben aus dem Ofen gestartet.

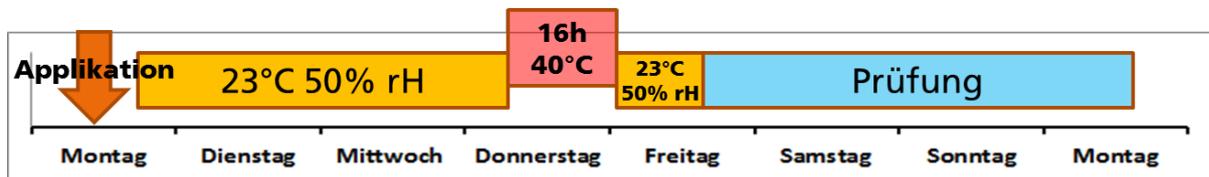


Abb. 2: Standard-Trocknungs- und Prüfschema „F40“

Ausgewählte Bleche wurden bis zu 720 h weiter geprüft. Nach der Belastung wurden die Proben beurteilt nach Rostgrad, Blasenbildung, kathodischer Delamination (weißliches Anlaufen) sowie Unterwanderung am Ritz.

Ergebnisse des Screenings

Erwartungsgemäß bestanden die meisten der geprüften Systeme die 72 h Kondenswasserklimabelastung und hielten auch bis zu 720 h dieser Belastungen stand. Ein Versagen nach Kondenswassertest ist kritischer zu bewerten als Versagen nach dem Salzsprühnebeltest, da Beschichtungen für den Korrosionsschutz häufiger kondensierender Feuchte als Salzbelastungen ausgesetzt sind. Als häufigste Schadensbilder wurden Blasenbildung und Unterrostung beobachtet, die Ursache dafür liegt eher am Bindemittel als an der Pigmentierung.

Besonderes Augenmerk wurde auf die Beständigkeit im Salzsprühnebeltest gelegt, weil für Polymerdispersionen dort das höchste Entwicklungsdefizit besteht. Deshalb wurde auch

großer Wert auf die Variation der Dispersions-Bindemittel gelegt, die Variation der Pigmentierung und der Additivierung wurde auf das Wesentliche begrenzt.

Nur wenige Formulierungen überstehen die Belastung von 72 h Salzsprühstest (Abb. 3). Von den dort positiv geprüften Systemen sind einige dabei, die Schwächen im Kondenswassertest hatten. Dies wird in der Tabelle durch Achtung-Symbole angezeigt. Bei keiner der getesteten Polymerdispersionen konnte mit inert pigmentierten Systemen eine gute Korrosionsschutzwirkung erzielt werden. Guter Korrosionsschutz wird bei den meisten untersuchten Systemen mit aktiven Korrosionsschutzpigmenten ggf. in Kombination mit einem Korrosionsinhibitor erreicht.

Dieser Prüfbefund führt zu Reduktion der möglichen Bindemittel/Formulierungen, bzw. schließt die Polymerdispersionen mit negativem Kondenswassertest-Ergebnis als geeignetes Bindemittel für weitere Entwicklungsschritte aus. Eine Reduzierung der Bindemittel für die weiteren Prüfungen kann auch durch andere Prüfkriterien, z.B. mangelnde Lagerstabilität, erfolgen.

Bm/Pig	0	11	21	22.01	22.03	23.01	23.03
	Klarlack	Inert *	ZPA *	ZMP	ZMP *	ZCP ^{plus}	ZCP ^{plus} *
1	fl.	fl.	fl.	Def		Def./R	
2	fl.		R.				
3		fl.					
4		fl.	R.				
5		fl.	R.				
6	Blasen		R.				R.
7	fl.		fl.				
8			n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.
9	R.	fl.	R?				
10	Def	fl.					
11						Blasen	
12	Def	fl.				Def./R.	
13		Def.		R.		Def. k.Z.	Def.
14		fl.					
15	fl.	fl.					n. v.
16		fl.					R./Def.

* Mit Inhibitor

KW nicht bestanden

	keine Korrosion
	Kathodische Zone > 1 cm
	deutliche Korrosion
n.v.	nicht verträglich
	nicht geprüft
Erklärungen für Abkürzungen:	
R.	Ritz
k.Z.	kathodische Zone
Def.	Defekt
fl.	flächig

Abb. 3: Ergebnisse des Salzsprühstest-Screenings; im Salzsprühstest gute Systeme wurden markiert, wenn der Kondenswassertest schlechte Ergebnisse brachte.

Die Barrierewirkung gegen korrosionsfördernde Substanzen (Chloride und Sulfate) wird von der Art des Bindemittels, der Schichtdicke, den Verfilmungsbedingungen sowie durch zusätzliche – praxisübliche – Deckschichten beeinflusst. Diese Deckschichten wurden im Projekt durch einen transparenten Klebstreifen ersetzt. Das Klebeband verhindert den vertikalen Transportweg von Korrosionsstimulanzen, behindert aber den Zutritt von Sauerstoff nur wenig. Abb. 4 zeigt die Bandbreite der Korrosionserscheinungen (oben bei Dispersion 5 sehr ausgeprägt, während unten bei Dispersion 11 deutlich weniger), die durch die am rechten Rand aufgetragene

Deckschicht deutlich reduziert sind. Die Formulierung halbtransparenter Beschichtungen ermöglicht das Erkennen vieler Korrosionsphänomene schon im Frühstadium.

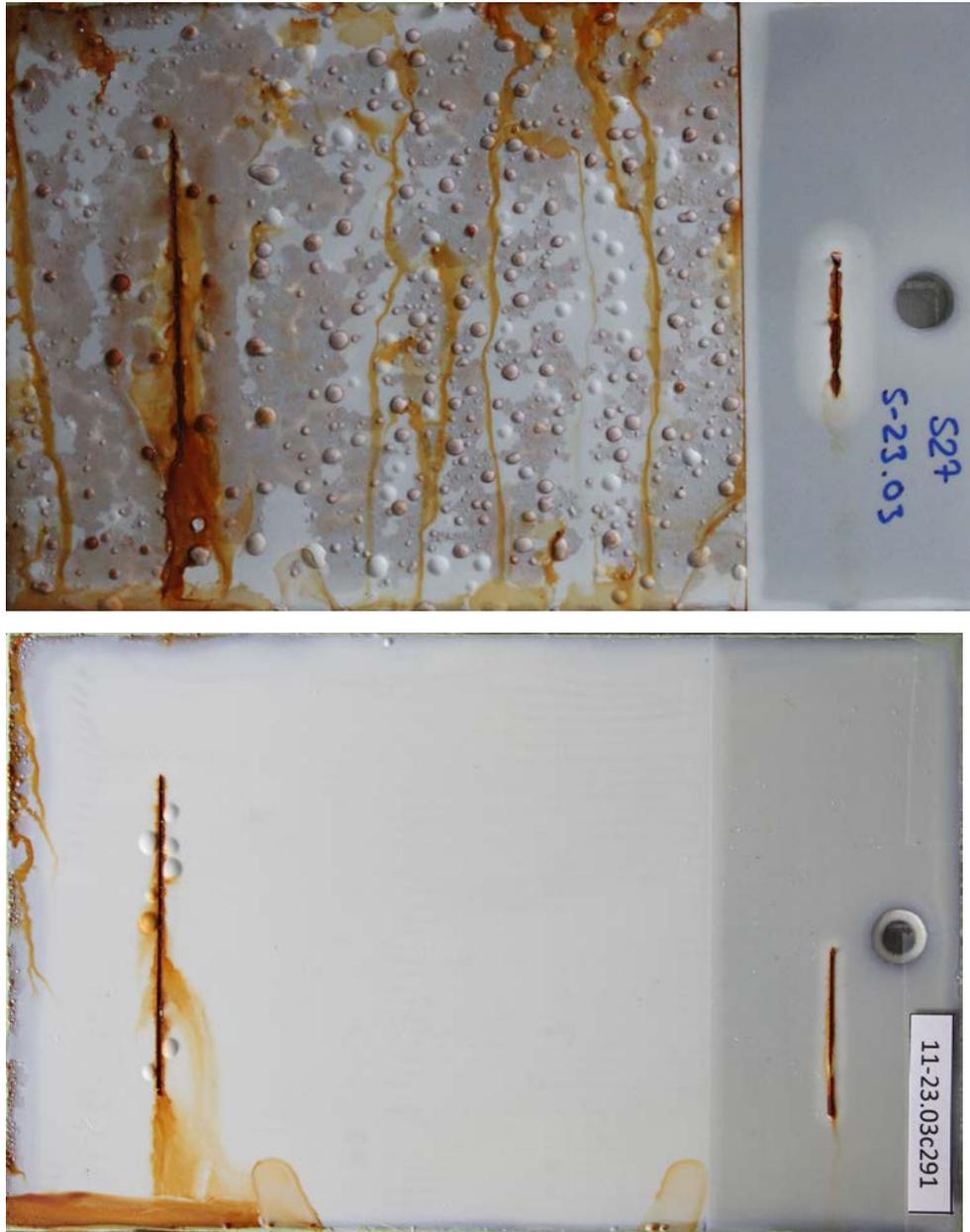


Abb. 4: Mittels des am Fraunhofer IPA entwickelten Screenings lässt sich das Korrosionsschutzvermögen von Beschichtungen schnell erkennen. Am rechten (dunkleren) Streifen des Prüfblechs ist als Ersatz für einen Decklack ein Klebeband aufgeklebt, das mit einem Ritz zur Beurteilung der kathodischen Delamination versehen wurde.

Ein weiteres wichtiges Kriterium für die Korrosionsschutzwirkung ist die von Verletzungen ausgehende kathodische Delamination, die durch die verminderte Haftung eine nachfolgende Korrosion begünstigt. In Abb. 4 ist diese Front rechts als helle Zone um den Ritz sichtbar; bei Verwendung von deckenden Pigmenten ist dies nur mit aufwändiger Analytik (z.B. Raster-Kelvin-Sonde) detektierbar. Auch hier ist die Auswahl

der Art der Polymerdispersion und der dazu passenden Pigmente und Additive entscheidend für die Ausbreitungsgeschwindigkeit dieser Zone.

Analytische Ursachenforschung

In Ergänzung zu der Schnellbewertung mittels des beschriebenen Screening-Verfahrens wurden auch aufwändigere Untersuchungsmethoden, wie die Bestimmung der Sauerstoffpermeation, die Elektrochemische Impedanzspektroskopie (EIS) und rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen (REM), eingesetzt. Damit konnten nicht nur die Ergebnisse des Screenings bestätigt werden, sondern auch Wirkmechanismen erkannt und erklärt werden.

Permeationsuntersuchungen

An Proben mit auf einem Teil der Prüffläche aufgeklebten Klebeband konnte gezeigt werden, dass die Sauerstoffdiffusion die Ausbreitung der kathodischen Front bestimmt und dass der Diffusionsweg des Sauerstoffs vertikal durch die Beschichtung geht. Dieser Befund wird auch bestätigt durch Untersuchungen mit Schichtdickenvarianten und Mehrfachlagen mit dem Klebeband. In Abb. 5 wird die Ausbreitung der kathodischen Front mit der Sauerstoff-Permeabilität der Beschichtungen verglichen. Es zeigt sich, dass bei hoher Sauerstoffpermeationsrate eine breite Delaminationsfront sichtbar wird. Pigmentierte Systeme zeigen eine Abnahme der Diffusionsrate um ca. den Faktor drei, was deutlich höher ist als die PVK von 35 % und somit die Barrierewirkung der Pigmente belegt. Der Vergleich mit einem EP-System (lösemittelbasiert) zeigt, dass die Barrierewirkung dieser Beschichtung um mehr als eine Dekade höher ist; die Unterwanderung ist dort nicht messbar gering.

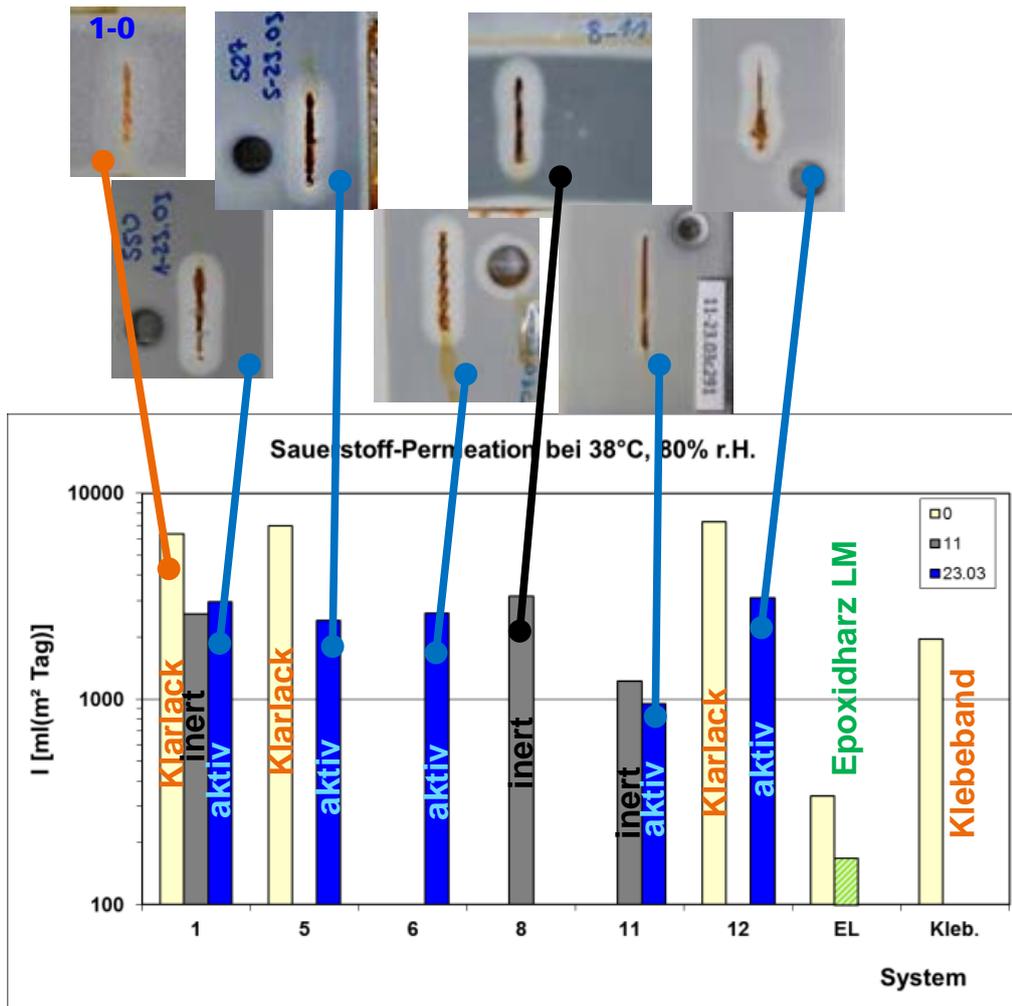


Abb. 5: Zusammenhang zwischen der Sauerstoffdiffusion durch die Beschichtung und Ausbreitung der kathodischen Delamination

Elektrochemische Impedanzspektroskopie

Mit der EIS wurde die Barrierewirkung der Beschichtungen, ausgedrückt als Porenwiderstand als Funktion der Zeit unter Einwirkung von 5 % NaCl-Lösung (analog Salzsprühtest), gemessen. Wie aus Abb. 6 zu erkennen ist, zeichnen sich Beschichtungen mit hohem Korrosionsschutz durch einen geringen Abfall der Impedanz aus, während sich ein schlechtes Korrosionsschutzvermögen schon nach etwa zwei Stunden durch einen drastischen Abfall in der Impedanz manifestiert. Diese Ergebnisse stimmen sehr gut mit denjenigen aus dem Screening mittels Salzsprüh- und Kondenswassertest überein.

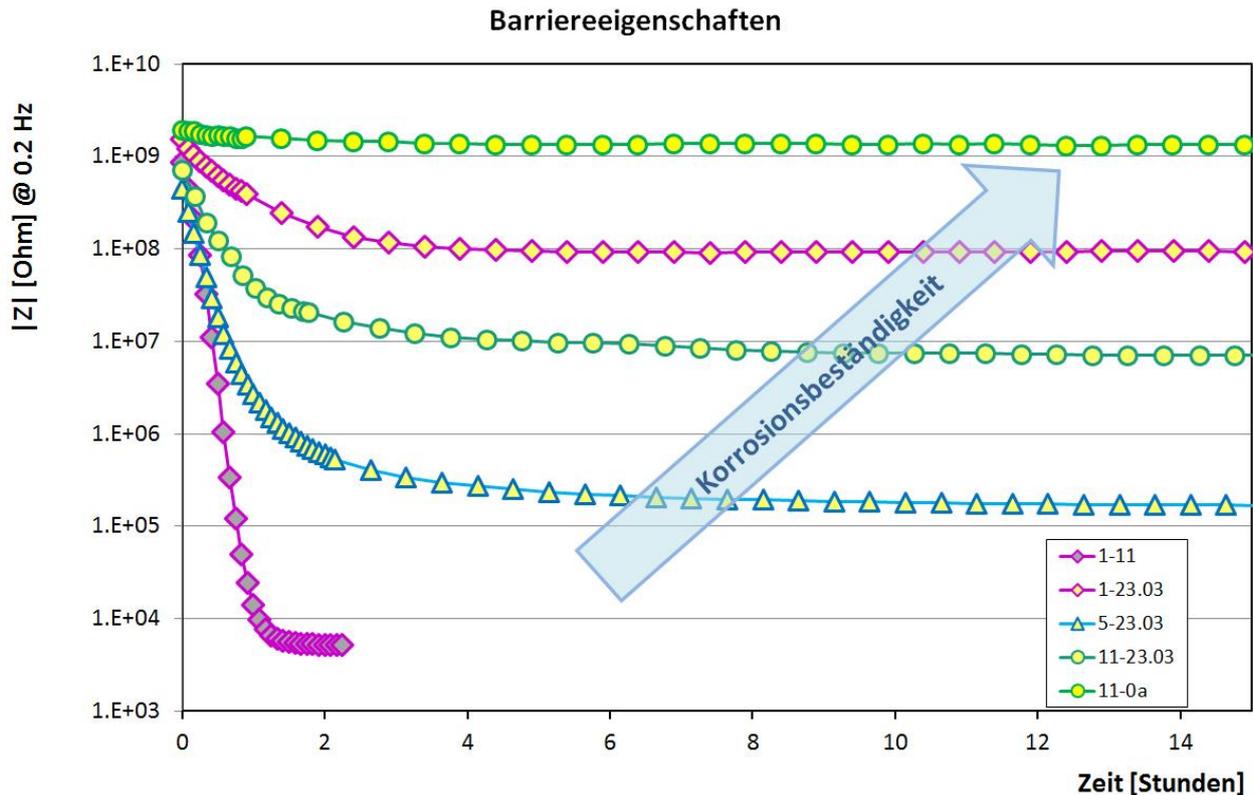


Abb. 6: Zeitlicher Verlauf der Impedanz verschiedener Beschichtungen aus Polymerdispersionen unter Einwirkung von Salzlösung (5 %ige NaCl-Lösung).

Tiefere Einblicke in den Filmquerschnitt mit dem REM

Die Untersuchungen von Querschnittsflächen in der Nähe des Substrats zeigte eine gute Benetzung bzw. Anbindung der Beschichtungsstoffe aus Polymerdispersionen auch an sehr zerklüfteten Substratoberflächen, wie in Abb. 7 erkennbar ist. Somit werden auch kleinste Spalten des gestrahlten Stahluntergrundes ausgefüllt. Diese Beschichtungen weisen vermutlich deshalb auch eine gute Haftfestigkeit auf glatten Substraten auf.

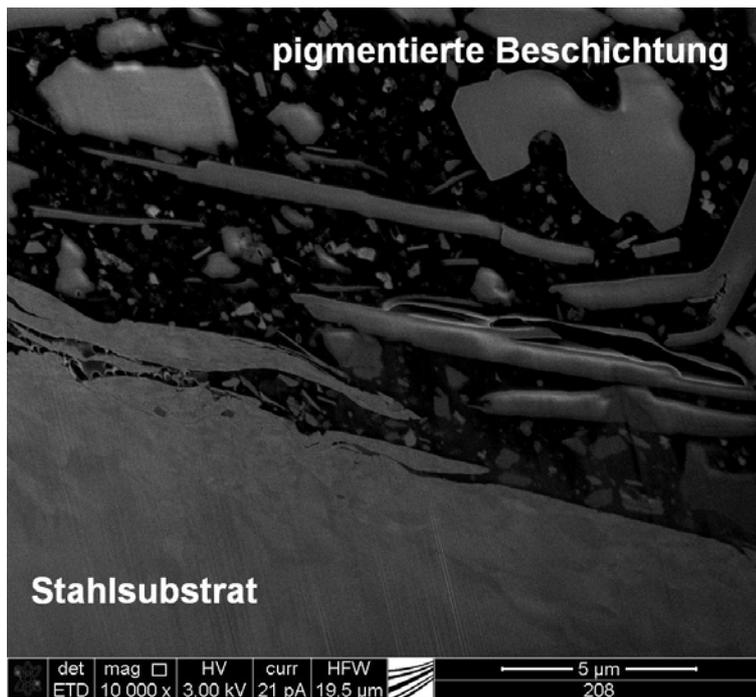


Abb. 7: REM-Aufnahme einer pigmentierten Styrol-Acrylat-Beschichtung an der Grenzfläche zum gestrahlten Stahluntergrund (unten). Auch kleinste Spalten werden vollständig ausgefüllt.

Auch bei starken Vergrößerungen konnten mit dem REM keine „Zwickel“ erkannt werden. Die beobachteten „Defekte“ führen wir daher auf submikroskopische Transportwege für Ionen zurück, die aufgrund der Herstellung und der notwendigen Stabilisierung der Dispersionen wohl nicht grundsätzlich vermieden werden können. Deren Wirksamkeit kann jedoch mit Aktivpigmenten beeinflusst werden.

Ausblick

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens zeigen, dass aufgrund der komplexen Zusammenhänge weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten erforderlich sind, um das Potenzial der umweltfreundlichen 1K-Polymerdispersionen hinsichtlich vergleichbarer Korrosionsschutzeigenschaften wie bei den klassischen 2K-Systemen auszuschöpfen.

Danksagung / Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben 17239N „Neue hochwertige Korrosionsschutzbeschichtungen für Stahl aus wasserverdünnbaren Polymer-Dispersionen“ der Forschungsvereinigung „Forschungsgesellschaft für Pigmente und Lacke e.V.(FPL)“ wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Der Schlussbericht [14] ist bei der FPL erhältlich.

Die Autoren danken Frau Cornelia Englert, Frau Gloria Kicherer und Herrn Franz Balluff für die Untersuchungen sowie Herrn Rainer Schmidt für die Beratung in diesem Projekt. Das Vorhaben wurde von mehreren namhaften Lack- und Rohstoffherstellern begleitet; wir danken für die gute Zusammenarbeit.

Literatur

- [1] W.Funke, „Towards a unified view of the mechanism responsible for paint de-fects by metallic corrosion“, Ind.Eng.Chem.Prod.Res.Dev.24(3)(1985)343-347.
- [2] H. Leidheiser, W. Funke, „Water disbondment an wet adhesion of organic coatings on metals: A review and interpretation“, JOCCA 70 (5) (1987)121-132
- [3] J. Sander et al, Anticorrosive Coatings, Fundamentals and New Concepts. Vincentz Network, Hannover, 2010
- [4] R. Arnoldus, R.L. Adolph, W. M. W. Zorn, „Process in acrylic emulsion developments“, XX. Congres Fatipecc, Nice, 17-21. Sept. 1990, 81- 89
- [5] B.V. Leeuwen, „Zum Filmbildungsmechanismus von Polymerdispersionen“, Farbe u. Lack 101(1995)7, 606-609
- [6] T.F.L. McKenna et al., Novel technologies and chemistries for waterborne coatings, J. Coat. Technol. Res. (2014) 11, 131-141
- [7] R. Harrison, “New polymer dispersions for metal coatings”, European Coatings Congress, Nürnberg, 2009
- [8] R M. Hernandez, J. Genesca, J. Uruchurtu, F. Galliano, D. Landolt, „Effect of an inhibitve pigment zinc-aluminum-phosphate (ZAP) on the corrosion mechanism of steel in waterborne coatings“, POC 56(2006) 199-206
- [9] G. Grundmeier, K.J. Roschmann, „Wie funktionieren Zinkphosphat-pigmentierte Korrosionsschutzbeschichtungen“, Farbe u. Lack 112(2)(2006)24-26
- [10] A. Seth, W. J. van Ooij, P. Puomi, Z. Yin, A. Ashirgade, S. Bafna, C. Shivane, „Novel, one-step, chromate-free coatings containing anticorrosion pigments for metals – an overview and mechanistic study“, POC 58(2007) 136-145
- [11] S. Bender, M. Babutzka, L. Kirmaier, „Korrosionsschutz schnell untersuchen“, Farbe u. Lack 120 (5) (2014), S. 22-28
- [12] R. Naderi, M.M. Attar, “Cathodic disbondment of epoxy coating with zinc aluminum polyphosphate as a modified zinc phosphate anticorrosion pigment”, Progress in Organic Coatings, 69 (2010) S. 392-395

- [13] J. A. Vogelsang, Wasserhaushalt von Beschichtungen unter Temperaturwechselbedingungen. GfKORR-Jahrestagung 9.-10. November 2010, Frankfurt/M., S. 68-76
- [14] U. Christ, IGF-Vorhaben 17239N „Neue hochwertige Korrosionsschutzbeschichtungen für Stahl aus wasserverdünnbaren Polymer-Dispersionen“, Schlussbericht 2014

Ergebnisse auf einen Blick:

- Mit einer schnellen Konditionierung, halbtransparenten Beschichtungen und klassischen Korrosionstests, wie Salzsprüh- und Kondenswassertest, erhält man schon nach einer Woche erste Aussagen zur Korrosionsschutzwirkung
- Aktivpigmente sind im Allgemeinen unerlässlich bei Korrosionsschutzbeschichtungsstoffen mit Polymerdispersionen als Bindemittel
- Die Beständigkeit im Kondenswassertest muss für einen guten Korrosionsschutz höher bewertet werden als der Salzsprühtest
- Die Korrosionsschutzwirkung wird durch die Barriere gegen Sauerstoff (Permeation) und gegen Ionen (EIS-Messungen) maßgeblich bestimmt
- Beschichtungen aus Polymerdispersionen eignen sich bereits nach dem Stand der Technik für viele Korrosionsschutzanwendungen, wo keine permanente Salzeinwirkung herrscht