Überschrift

Radikalen auf der Spur

Stichwort

ESR-Spektroskopie

Teaser

Radikale sind die frühest möglichen Boten einer einsetzenden Fotodegradation organischer Matrices. Ihre quantitative Erfassung kann daher Rückschlüsse sowohl auf die Bewitterungsstabilität von Beschichtungen als auch die Fotoaktivität von Pigmenten in Bindemittelmatrices ermöglichen. Eine hochsensible Methode zur Detektion radikalischer Prozesse ist die ESR-Spektroskopie.

Autorenzeile

Matthias Wanner und Ulrich Christ

Haupttext

Beschichtungssysteme für Außenanwendungen müssen auf Bewitterungsstabilität geprüft werden. Da Freibewitterung recht zeitaufwendig ist, werden in der industriellen Praxis auch künstlich beschleunigte Bewitterungstests durchgeführt. Im letzten Jahrhundert wurden einige bedeutende Erfolge bei der Verbesserung der Korrelation solcher Tests mit der Freibewitterung erzielt. Allerdings hat sich gezeigt, dass die selbst durch nur moderate Intensivierung von Bewitterungsparametern bewirkte Beschleunigung solcher Tests zu überraschend deutlichen Abweichungen von den Freibewitterungsbefunden führen kann. Im Gegensatz dazu beeinflusst die Verwendung von hochempfindlichen Detektionsmethoden den Degradationsmechanismus nicht. Werden solche Methoden eingesetzt, kann dies zu einer kürzeren Bewitterungsdauer beitragen, wenn die Ergebnisse dieser Detektionen zuverlässige Schlussfolgerungen auf den Degradationsfortschritt zulassen, noch bevor das makroskopische Schadensbild ausgebildet wird.

Derartige hochsensible Methoden sind für die industrielle Praxis dann geeignet, wenn sie bereits verfügbar, in der Anwendung nicht zu komplex, wirtschaftlich einsetzbar und ihre Daten zuverlässig interpretierbar sind. Wir glauben, dass die Elektronenspinresonanz(ESR)-Spektroskopie eine solche Methode sein könnte.

Zwischenüberschrift: ESR-Spektroskopie: Hintergrund

Da die ESR-Spektroskopie Radikale detektiert, die als frühest mögliche Boten bei fotooxidativen Prozessen anzusehen sind, könnte die ESR-Spektroskopie zur Frühphasendetektion von bewitterungsinduziertem Abbau und der Fotoaktivität von Beschichtungen eingesetzt werden.

Abb. 1 veranschaulicht beispielhaft die Relevanz eines auf radikalische Spezies empfindlichen Nachweises für die Überwachung von Fotodegradationsprozessen in ihren frühesten Stadien.

(Abb. 1)

Da in Anwesenheit von Luftsauerstoff und Wasser Fotodegradationsprozesse umso rascher voranschreiten, je höher die Konzentration reaktiver Radikale ist, sollte der aus ESR-Spektren zu entnehmende Umfang der Radikalpräsenz mit der Fotodegradationsgeschwindigkeit korrelieren. Bei der ESR-Spektroskopie wirkt ein Magnetfeld in Kombination mit Mikrowelleneinstrahlung auf die bei Radikalen vorliegenden, ungepaarten Elektronen-Spinzustände ein. Deren Wechselwirkung mit einem Magnetfeld B₀ führt dabei zu einer Energieaufspaltung ΔE (Zeeman-Effekt), da Spezies mit ungepaarten Elektronen einen zur Ausrichtung von B₀ parallelen (m_s = -1/2) oder antiparallelen (m_s = +1/2) Spin aufweisen können. Eine zusätzliche Mikrowelleneinstrahlung mit diskreter Frequenz v führt zu einer B₀-abhängigen Absorption dieser Energie, deren Größe durch die Resonanzbedingung $\Delta E = h v = g \mu_B B_0$ gegeben ist (h: Planck-Konstante; g: g-Tensor, im ideal isotropen Fall ("freies Elektron") g = 2,00; μ_B : Bohr-Magneton (natürliche Einheit des magnetischen Moments des Elektrons)). Abb. 2 zeigt schematisch den experimentellen Aufbau eines CW-(continuous wave)-ESR-Spektrometers. Aufgrund der Feldmodulation wird das Spektrum als erste Ableitung des Signals erhalten. Idealerweise zeigen isotrope Signale daher Punktsymmetrie. Zur Temperatureinstellung wird elektronisch gesteuert Flüssigstickstoff verdampft.

(Abb. 2)

Zwischenüberschrift: Anwendung in der Lackforschung

Die Literatur der letzten drei Jahrzehnte beschreibt einige Anwendungen der ESR-Spektroskopie als Instrument zur Charakterisierung von Beschichtungen und deren Bestandteilen [1-2]. Allerdings treten hierbei einige Probleme auf, die erklären können, warum sich diese Technik in der Lackindustrie bisher nicht etablieren konnte:

1. ESR-Spektrometer sind traditionell teuer und voluminös. Heute bietet der Markt jedoch kompakte und preiswerte Geräte an, insbesondere wenn diese bautechnisch auf die Detektion organischer Radikale beschränkt sind.

2. Die Lebensdauer von Radikalen, die durch Bestrahlung einer Beschichtung unter Umgebungsbedingungen gebildet werden, ist für die Detektion zu kurz. Dem kann jedoch entweder durch *in-situ*-Erzeugung der Radikale und Nachweis bei niedriger Temperatur oder durch Zugabe eines Spin-Trapper begegnet werden.

3. Da typische ESR-Probenröhrchen Innendurchmesser unter 3 mm aufweisen, ist die reproduzierbare Probenvorbereitung schwierig. Als Proben können jedoch dünne Streifen von Beschichtungen verwendet werden, die auf "ESR-inerten" Substraten aufgebracht werden. Bei bekannter Probenfläche und Schichtdicke kann quantitativ gemessen werden, wenn die erhaltene Signalintensität auf einen internen Standard bezogen wird.

Zwischenüberschrift Beispiel 1: Monitoring bei Bewitterung

Nachfolgend ist kurz dargestellt, wie die ESR-Spektroskopie zur Überwachung der bewitterungsinduzierten Degradation von Beschichtungssystemen eingesetzt werden kann. Diese wird vorwiegend durch drei Prozesse vorangetrieben, die in organischen Matrices durch Einwirkung von Sauerstoff, Wasser und (UV)-Licht-Bestrahlung ablaufen:

1. Lichtinduzierte radikalische Oxo-Funktionalisierung

- 2. Nachvernetzende Kondensationsreaktionen
- 3. Fragmentierung der Polymerketten.

Während der Bewitterung können diese Vorgänge gleichzeitig, aber auch in zeitlicher Staffelung ablaufen. Experimentelle Befunde [3] deuten darauf hin, dass diese Prozesse ihren chronologischen Schwerpunkt bei Bewitterung tendenziell in der Abfolge 1, 2, 3 ausbilden. Dies wird durch ein vereinfachtes Modell ausgedrückt, das in Abb. 3 dargestellt ist.

Anfänglich kann eine organische Beschichtungsmatrix als ein eher hydrophobes System aufgefasst werden, in dem Molekülsequenzen mit überwiegend kovalentem Charakter relativ häufig sind. In Gegenwart von Sauerstoff induziert UV-Licht eine radikalische Oxofunktionalisierung, die entweder intramolekular (vgl. Abb. 1) oder intermolekular (vgl. Abb. 3) auftreten kann. Da dieser Prozess die Anzahl der Kohlenstoffatome verringert, die

leicht oxidiert werden könnten, sollte die durch ESR-Spektroskopie nachgewiesene probenflächennormierte Radikalintensität I/A anfangs relativ groß sein und während des Fortschreitens der Fotooxidation abnehmen (vgl. Abb. 3, Schritt 1). Dieser erste Schritt der Fotooxidation ("Induktion") kann zudem auch durch Detektion anderer degradationsrelevanter Parameter überwacht werden, die bereits in den frühen Stadien der Fotodegradation ansprechen. Einer hiervon ist Δ S, der den Umfang des durch Thermozyklisierung, Wasseraufnahme und/oder UV-Einstrahlung induzierten Aufbaus von inneren Spannungen beschreibt. Da die Molekülketten im Zuge der bei den ersten Oxofunktionalisierungen bewirkten Bildung intramolekularer Wasserstoffbrückenbindungen (Abb. 3, Schritt 1) an Flexibilität verlieren, sollte Δ S in der Induktionsphase zunehmen. Somit ist der Induktionsschritt der Fotodegradation typischerweise nicht nur von einer Abnahme der Radikalintensität I/A begleitet, sondern auch von einer mäßigen Erhöhung der inneren Spannungen.

(Abb. 3)

Der zweite Schritt beinhaltet – insbesondere unter Temperatureinwirkung – nachvernetzende Kondensationsreaktionen. Hierbei könnten auch Wasserstoffbrücken durch starrere Ether- oder Estergruppen ersetzt werden. Tatsächlich wird im Zuge dieser "Anbahnungsphase" tatsächlich eine weitere Zunahme der inneren Spannungen beobachtet, während I/A auf einem relativ niedrigen Niveau bleibt.

Schließlich beeinflussen fortlaufende Thermozyklen, Wasseraufnahme und Einstrahlung das nun relativ starre Polymernetzwerk derart, dass die zunehmenden inneren Spannungen die Fragmentierung der Polymerketten unterstützt. Dieser dritte Schritt impliziert die Lokalisierung des Beschichtungsabbaus und stellt daher die Initiierung des späteren makroskopischen Defekts dar. Die Fragmentierung von Polymerketten führt jedoch typischerweise zu einer Verminderung von inneren Spannungen (Abb. 3, Schritt 3) sowie zur Bildung von Doppelbindungen an den von der Kettenfragmentierung betroffenen Kohlenstoffatomen. An solchen Doppelbindungen können sich jedoch leicht einstrahlungsinduzierte radikalische Reaktionen vollziehen. Daher sollte man erwarten, dass beim Eintritt in die Lokalisierungsphase nicht nur eine Δ S-Verminderung, sondern auch eine I/A - Erhöhung auftritt, so dass der Eintritt bewitterter Proben in diese Phase durch die entsprechenden Veränderungen dieser Parameter indiziert werden sollte.

Abb. 4 zeigt die I/A-Ergebnisse von vier während einer künstlichen Bewitterung nach SAE J 2527 untersuchten Automobil-(Modell)-Beschichtungssystemen, von denen sowohl ausschließlich die Klarlacke (gestrichelte Linien) als auch die Gesamtaufbauten (durchgezogene Linien) bewittert worden waren.

(Abb. 4)

Zwei dieser Systeme stellten kommerzielle Systeme dar (3, 4 und 7, 8), während ein System auf Richtrezepturen basierte (1, 2), und das vierte System (5, 6) ein bewusst schwach beständig konzipiertes System war.

Abb. 4 zeigt, dass 5, 6 – die keine Lichtschutzadditive enthalten – anfänglich große I/A-Werte aufweisen, die während der ersten Bewitterungsphase (bis 50 MJ/m²) auf etwa ein Drittel des Ausgangswertes abnehmen. Obwohl die Testformulierungen 1, 2 einen deutlich niedrigeren anfänglichen I/A-Wert als 5, 6 aufweisen, zeigen auch diese eine rasche Verminderung von diesem Maximum auf niedrigere Werte. Dem steht die Situation der kommerziellen Systeme gegenüber. Hier tritt das erste I/A-Maximum signifikant verzögert auf, was die Wirksamkeit des UV-Schutzsystems anzeigt.

Nach Durchlaufen des ersten (z.T. initialen) I/A-Maximums zeigen alle Systeme in ihrer jeweiligen Bewitterungsspätphase einen zweiten Anstieg der I/A-Werte auf. Bei 5, 6 ist dieser I/A – Zuwachs gewissermaßen das letzte "Lebenszeichen" dieser beiden Beschichtungen. Bei der Entnahme nach 120 MJ/m² zeigte sich, dass 5, 6 durch die Bewitterung mittlerweile vollständig zerstört worden waren. Dieser Befund lässt sich gut mit der Annahme von kettenfragmentierungsbedingter Doppelbindungsbildung harmonisieren, da diese in der Tat einen Anstieg von I/A bewirken sollte.

Bei System 2 wurden nach Einwirkung von 720 MJ/m² kleine Risse sichtbar. Dies bekräftigt, dass die Ausbildung eines zweiten I/A-Maximums als letztes "Lebenszeichen" eines organischen Beschichtungssystems angesehen werden kann. Bei genügend dicht gelegenen Entnahmezeitpunkten, könnte daher der zweite I/A-Anstieg als ein Frühphasenindikator für ein sich aktuell ausbildendes Beschichtungsversagen angesehen werden.

Bei 7, 8 und 4 liegt diese Indikation offenbar nach Einwirkung einer UV-Dosis von 720 MJ/m² vor. Demnach kann die ESR-Spektroskopie nicht nur zur Begleitung des Degradationsmechanismus verwendet werden, sondern auch zur Verkürzung der Bewitterungsdauer.

Zwischenüberschrift Beispiel 2: Ermittlung der Pigmentauswirkungen

TiO₂ wird häufig als Weißpigment in Beschichtungen verwendet. Insbesondere in seiner Anatasmodifikation unterstützt es jedoch den Fotoabbau der organischen Matrix, da diese fotokatalytische Aktivität zeigt (Absorptionsmaximum bei 385 nm). Rutil ist weniger aktiv, aber selbst auf Rutil basierende Pigmente werden oberflächenmodifiziert, wenn eine Neutralität bei UV-Einwirkung angestrebt wird. Umgekehrt gibt es kommerziell erhältliche Anatas-Pigmente, die zur Beschichtung von Oberflächen mit selbstreinigender, fotooxidativer Wirkung gegen Schmutz oder schädliche gasförmige Verbindungen wie Formaldehyd oder NO₂ vorgesehen sind. In der folgenden Studie wurden zwei fotokatalytisch aktive TiO₂-Pigmente ("AEROXIDE TiO₂ P 25" (Evonik), "KRONOClean 7000" (Kronos)) sowie zwei stabilisierte TiO₂-Pigmente ("TRONOX R-KB-4" (Tronox), "KRONOS 2310" (Kronos)) als 4 Gew.-%ige Dispersion in einer transparenten Basislackformulierung ("MIPA WBL Mischlack 000 fablos") als Bindemittelmatrix untersucht.

Im Gegensatz zum experimentellen Ansatz für Beispiel 1 kann hier das Ausmaß der Radikalbildung in Proben ohne vorhergehende Bewitterung zur Abschätzung der (Pigment-)Aktivität ausreichen. Die Radikallebensdauer bei Raumtemperatur ist für die quantitative ESR-Detektion in Gegenwart von Luft eigentlich zu kurz. Um jedoch ein reales Bild über den degradationsfördernden Effekt solcher Pigmente zu erhalten, müsste die Detektion dennoch im Bereich der Beschichtungsnutzungstemperatur erfolgen, da die Geschwindigkeit radikalischer Fotooxidation erheblich von der Migrationsgeschwindigkeit primärer Radikale – und damit auch von der Verfügbarkeit von flüssigem Wasser – abhängt.

Ein Ausweg ist der Einsatz von "Spin Trappern", die primäre Radikale "einfangen" und in diesem Zustand eine auch bei Raumtemperatur genügend lange Lebensdauer aufweisen. N-Oxide sind solche Verbindungen, und DMPO (5,5-Dimethyl-1-pyrrolin-N-oxid) ist eines dieser N-Oxide. Seine "Spin-Trapping-Eigenschaft" ist in Abb. 5 (links) beispielhaft gegenüber einem Hydroxylradikal gezeigt:

(Abb. 5)

Da DMPO bei höheren Temperaturen jedoch nicht langzeitstabil ist, sollte die Probenvorbereitung (und die Probenlagerung vor der Detektion) nicht nur bei nicht zu hellem Licht, sondern auch bei niedrigeren Temperaturen durchgeführt werden. Hier wurden 1,25 Gew.-% DMPO zu den Bindemittel/TiO₂-Formulierungen gegeben, homogen dispergiert und bei 5 °C außen auf dünne Borosilikatglasröhrchen (ø 1,5 mm) aufgebracht. Zur ESR-Detektion wurde eine Cr³⁺-Referenzampulle in das Probenröhrchen eingeführt, das mit einem an dessen oberen Ende angebrachten Drahtes in eine ESR-Kapillare geschoben wurde (siehe Abb. 5, rechts).

Nun wurde die Probe (i) ohne und (ii) während der UV-Einwirkung in situ bei 22 °C gescannt. Spektrum (i) wurde vom Spektrum (ii) abgezogen, was für alle vier Pigmentformulierungen Quartettsignale ergab. Abb. 6 (links) zeigt das Ergebnis der Doppelbestimmung (nach Subtraktion des Refenzspektrums), das für "TRONOX R-KB-4" (1, 2) erhalten wurde, sowie das resultierende gemittelte Spektrum (res). Gemäß Abb. 5 sollte sich das Quartett aus der Wechselwirkung des ungepaarten Elektrons mit dem N- und (α -)H-Kern erklären lassen, da an diesen Kernen mit erhöhter Spindichte im SOMO (single occupied molecular orbital) zu rechnen ist. Da ¹⁴N und ¹H durch Kernspins von I = 1 bzw. I = 1/2 charakterisiert sind, sollte aber eigentlich ein Sextett (= Triplett von Dubletts) erhalten werden (vgl. Abb. 6, Mitte) [4]:

 $n = \Pi \ 2N_iI_i + 1 = (2 \cdot 1 \cdot 1 + 1) \cdot (2 \cdot 1 \cdot 1/2 + 1) = 6$ (N: Anzahl identischer Kerne, I: Kernspin des Isotops).

Alle Spektren werden jedoch von einem Quartett dominiert. In Anbetracht dessen, dass die äußeren Linien dieser Quartette eine geringere Intensität aufweisen als die inneren, könnte man diesen Befund durch die Annahme ähnlicher Kopplungskonstanten a für N- und H-Kerne im Radikalmolekül erklären (vgl. Abb. 6, rechts).

Die resultierenden Spektren aller vier Systeme wurden zur quantitativen Bestimmung der durch UV-Einwirkung erzeugten Radikalintensität verwendet. Da ESR-Spektren die erste Ableitung der Absorptionsspektren darstellen, werden die Intensitäten durch Zweifachintegration (Int²) der experimentellen Spektren erhalten. Zur Bewertung der Zuverlässigkeit der erhaltenen Daten wurden die vier Beschichtungsformulierungen zudem auch 520 h Bewitterung gemäß ISO 4892-2 + A + B1: 2013 ausgesetzt. Vor und nach dieser Bewitterung wurde die Proben farbmetrisch charakterisiert, was zu ΔL (D65/10 °) Werten führte, die mit dem Ausmaß der durch die Einwirkung dieser Bewitterung erzeugten Kreidung korrelieren. Fig. 9 zeigt die Ergebnisse dieser Detektionen im Vergleich zu den ESR-Ergebnissen, die aus den vier pigmentierten Proben erhalten wurden.

(Abb. 7)

Erwartungsgemäß liefern beide Nachweisverfahren auf die mit den "aktiven" Pigmenten "AEROXIDE TiO₂ P 25" und "KRONOClean 7000" formulierten Beschichtungen den Befund höherer Werte gegenüber den Beschichtungen, die mit den passivierten TiO₂-Produkten formuliert worden waren. Darüber hinaus scheint eine grobe Korrelation zwischen Int² und ΔL zu bestehen (vgl. Abb. 7, rechts), was darauf schließen lässt, dass hier die ESR-Detektion (Dauer etwa 4 Minuten) vergleichbare Ergebnisse liefert wie die nach 520 h Bewitterung erhaltene farbmetrische Detektion, obwohl der Effekt auf Beschichtungen, die mit stabilisierten Pigmenten versehen sind, noch genauer untersucht werden muss. Möglicherweise sind die negativen ΔL -Werte eine Folge des Umstands, dass das nicht lichtschutzadditivierte Bindemittel Vergilbung zeigt, die aber im Fall der Anwesenheit von fotoaktiven Pigmenten infolge Kreidung farbmetrisch positiv überkompensiert wird. Eventuell könnte der Einsatz höher als 4 Gew.-% pigmentkonzentrierter Proben zu einer noch besseren Korrelation zwischen Int² und ΔL führen.

Diese Studie legt nahe, dass die ESR-Spektroskopie ein wertvolles Instrument nicht nur zur Aufklärung der Degradationszustandsverläufe von Beschichtungen während einer Bewitterung, sondern auch zum Kurzzeit-Screening der Fotooxidationsneigung von (pigmentierten) Bindemittelmatrices ist.

Ergebnisse auf einen Blick

□ Die ESR-Spektroskopie detektiert Radikale, die die frühest möglichen Boten eines einsetzenden Fotoabbaus organischer Matrices sind.

□ Neueste technische Verbesserungen hinsichtlich Probenpräparation und Spektrometer ermöglichen eine quantitative Radikaldetektion bei moderaten Kosten.

□ Insbesondere in Kombination mit anderen sensiblen Beschichtungsdetektionsverfahren können mittels der ESR-Spektroskopie die jeweils durchlaufenen Bewitterungsphasen von Beschichtungen bestimmt und anhand des Verlaufsmusters auf den Eintritt der beschichtungsversagensrelevanten Phase der Defekt-Lokalisierung rückgeschlossen werden. Hierdurch kann eine Verkürzung der Bewitterungsdauer um etwa 50 % erreicht werden.

□ Weiterhin kann die ESR-Spektroskopie als Kurzzeit-Screeningmethode zur Bestimmung der Fotooxidationsneigung von (pigmentierten) Bindemittelmatrices eingesetzt werden.

Danksagung

Das IGF-Vorhaben 17045 N / 2 der Forschungsvereinigung DFO e.V. 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.

Literatur

- [1] Y. He et al., "Characterization of photo-degradation of a polyurethane coating system by electron spin resonance", Prog. Org. Coat. 42 (2001) 75-81
- K. Sokamoto et al, "New evaluation methods of UV absorbers for paints by using EST spectrometer" Polym. Paint Col. J. 177 (1987) 683 - 685
- [3] H. Oehler, M. Wanner, "Ermittlung von Indikatoren zur frühen Erkennung von bewitterungsbedingten Lackschäden mittels eines degradationsbegleitenden Prüfansatzes", Schlussbericht zum IGF-Vorhaben 17045N, 17.02.2016
- [4] G.R. Eaton et al., "Quantitative EPR", SpringerWienNewYork, 2001, p. 4

Abbildungen

Abb. 1: Einige mögliche Reaktionen während der Bestrahlung einer organischen Beschichtung unter Einwirkung von Wasser und Sauerstoff



Abb. 2: Schematischer Aufbau eines CW-ESR-Spektrometers







Abb. 4: ESR-Ergebnisse von vier Fahrzeug-(Modell)-Systemen, die während der Belichtung mit SAE J 2527 erhalten wurden; gestrichelt: I/A-Daten allein der Klarlacke; durchgezogen: I/A-Daten der zugehörigen Gesamtsysteme; abgebrochene Linien bedeuten, dass das jeweilige System aufgrund von Delamination (3, 1) oder aufgrund offensichtlicher Beschichtungsschäden (5, 6) aus der Studie entfernt wurde.



Abb. 5: "Spin-Trapping" von DMPO (links) und Schema des Probenaufbaus, der zur ESR-Charakterisierung von mit TiO₂ formulierten Testbeschichtungen (rechts) verwendet wurde



Abb. 6: ESR-Spektren, die während der UV-Bestrahlung der "TRONOX R-KB-4"-Probe erhalten wurden. Unter der Annahme von $a(N) \approx a(H) \approx 1,5$ mT kann das das experimentelle Spektrum dominierende Quartett sowie sein Intensitätsverhältnis (etwa 1: 2: 2: 1) erklärt werden



Abb. 7: Ergebnisse der Fotodegradation der vier durch ESR erhaltenen pigmentierten Proben während der ersten vier Minuten der *in-situ*-Bestrahlung (Int²) und durch kolorimetrischen Nachweis nach 520 h Einwirkung von ISO 4892-2 + A + B1: 2013 (Δ L(D65/10 °))

Autorenvita und Foto

Dr. Matthias Wanner, Fraunhofer IPA, Jahrgang 1971, studierte Chemie an der Universität Stuttgart. Nach der Promotion und einem Postdoc-Aufenthalt am Centre of Functional Nanostructures (CFN) der Universität Karlsruhe war er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Forschungsinstitut für Pigmente und Lacke e.V. tätig, das seit 2009 in das Fraunhofer-Institut IPA integriert ist. Sein Hauptinteresse liegt auf Kurzzeittests, deren Entwicklung und Validierung – insbesondere im Bereich der Charakterisierung von durch (thermozyklische) Wassereinwirkung, Fotooxidation und korrosive Medien bewirkte Beschichtungsdegradation.



Dr. Ulrich Christ studierte Chemie mit Schwerpunkt Polymerchemie an der Universität Stuttgart und wurde am Forschungsinstitut für Pigmente und Lacke e. V. (FPL) / Universität Stuttgart mit einer Dissertation zum Korrosionsschutz mit Beschichtungen unter der Anleitung von Prof. Dr. W. Funke zum Dr. rer. nat. promoviert. Nach über 20 Jahren Industrietätigkeit in der Leitung der Entwicklung und Anwendungstechnik im Bereich der Lackrohstoffe (Degussa/Evonik) und der Lackindustrie (FreiLacke) kam er 2008 an das FPL zurück und leitet dort nach Integration in das Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA die lackchemische Anwendungstechnik. Seine Forschungsschwerpunkte sind der Korrosionsschutz mit Beschichtungen, funktionelle Beschichtungen und Kurzzeitprüfungen zum Langzeitschutz von Beschichtungen.

