



## Beschichtbarkeit vorhersagen

### Kontaktwinkel- und Oberflächenspannungsergebnisse als Grundlage für die gezielte Entwicklung von Beschichtungsformulierungen

Dr. Andrew Mellor<sup>1</sup>, Petra Della Valentina<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Krüss GmbH, <sup>2</sup>BYK Chemie

Eine wirksame und zuverlässige Methode, um die Beschichtungsleistung zu bewerten und vorherzusagen, ist entscheidend für die Entwicklung neuer Materialien und die Qualitätskontrolle. Insbesondere bei Mehrschichtsystemen führt nur eine sorgfältige Feinabstimmung der einzelnen Komponenten für gute Benetzung und Beschichtungshaftung.

Mit geeigneten Messmethoden ist es möglich, das Verhalten von Mehrschichtsystemen in Bezug auf die Beschichtbarkeit im Voraus einzuschätzen. Eine solche Methodik verhilft dazu, Additive auszuwählen und den Zeit- und Kostenaufwand für neue Formulierungen erheblich zu reduzieren.

In dieser Studie wurden Kontaktwinkel- und Oberflächenspannungsmessungen einer (ausgehärteten) Fahrzeuggrundierung bzw. eines (flüssigen) Basislacks verwendet, um das System Beschichtung/Substrat vollständig zu beschreiben. Die vorgestellte Analyse umfasst Größen, die aus den vorgenannten Messungen berechnet wurden, d. h. die freie Oberflächenenergie (mit polaren und dispersiven Anteilen), die Adhäsionsarbeit, den Spreitkoeffizienten, die Grenzflächenspannung und der "Wetting Envelope". Mithilfe der Ergebnisse konnte ein mit Polyether-Makromer modifiziertes Polyacrylat-Additiv zur Optimierung der Substratbeschichtbarkeit erfolgreich eingesetzt werden.

Das Interesse an der Entwicklung höherwertiger, "intelligenter" Materialien ist in den letzten zehn Jahren stark gewachsen [1-3]. Bei der Herstellung solcher Materialien werden häufig funktionelle Beschichtungen verwendet, um bestimmte Eigenschaften selektiv zu verbessern oder sogar situationsbedingte Reaktionen zu ermöglichen. Aus diesem Grund wurde eine breite Palette von Beschichtungen für zahlreiche Anwendungen entwickelt, darunter selbstreini-

gende, korrosionshemmende, antimikrobielle, reibungsmindernde, umweltfreundliche, superhydrophobe/hydrophile und oleophobe/oleophile Beschichtungen, um nur einige zu nennen.

In jüngerer Zeit sind Alltagsgegenstände, die mehrere funktionelle Beschichtungen aufweisen, immer häufiger geworden [4]. Mit der zunehmenden Komplexität dieser mehrschichtigen Verbundwerkstoffe steigt auch die Herausforderung, die Kompatibilität zwischen den einzelnen Beschichtungen sicherzustellen. Da alle Schichten (entweder direkt oder indirekt) miteinander verbunden sind, ist es oft hilfreich, die so genannte Kompatibilitätskette im Endprodukt zu berücksichtigen.

In der Industrie werden verschiedene Beschichtungsstoffe in der Regel von unterschiedlichen Lieferanten bezogen und oft auf unterschiedlichen Grundlagen entwickelt, d. h. auf Wasserbasis oder auf Lösungsmittelbasis. Daher werden häufig Zusatzstoffe verwendet, um die Eigenschaften zu optimieren und die Kompatibilitätskette aufrechtzuerhalten.

#### Der Aufbau von mehrlagigen Beschichtungen

Die Bestimmung der am besten geeigneten Additive in der richtigen Menge ist herausfordernd und in der Regel mit zeitaufwändigen Trial-and-Error-Verfahren verbunden. Messungen mit geeigneten Methoden erleichtern die Vorhersage des Benetzungsverhaltens und der Beschichtungsfähigkeit und reduzieren die Kosten und den Zeitaufwand für Neuformulierungen erheblich.

In der Automobilindustrie sind mehrlagige Beschichtungssysteme seit einiger Zeit gang und gäbe. Im klassischen wird entsprechend Abbildung 1 zunächst eine kathodische Tauchlackierung (CED-Coating) auf ein blankes

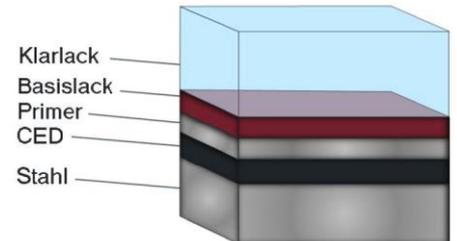


Abb. 1: Schematische Darstellung des Querschnitts eines fertigen Karosserieteils mit mehreren Coating-Schichten. [5]

Stahlteil aufgetragen. Dann wird eine Grundierung aufgebracht, gefolgt von einem pigmentierten Basislack, um die gewünschte Farbgebung zu erreichen. Zum Schluss werden der Oberfläche mit einem Klarlack die gewünschten Eigenschaften (Glanz, Verlauf, Abriebfestigkeit, Struktur usw.) verliehen [5].

Um dabei die Kompatibilität zwischen Grundierung und Basislack zu und somit gute Beschichtbarkeit zu gewährleisten, muss zumeist die freie Oberflächenenergie der ausgehärteten Grundierung erhöht werden. In der Vergangenheit war dies nur sehr schwer zu erreichen. Neuere Entwicklungen zeigen jedoch, dass dies mithilfe von Polyether-Makromer-modifizierten Polyacrylaten möglich werden kann [6].

#### Oberflächenanalytische Parameter, welche die Kompatibilität zwischen Beschichtungslagen beschreiben

Die Grundlage für eine gute Beschichtbarkeit ist das Benetzungsverhalten der beiden Schichten, d. h. des Systems Substrat-Flüssigkeit. In dieser Arbeit werden Oberflächenspannungs- (OFS) und Kontaktwinkelmessungen der Beschichtung bzw. des Substrats verwendet, um das System vollständig zu beschreiben. Dazu gehören auch die aus den genannten Messungen berechnete Ergebnisse: freie Oberflächenenergie (surface free energy, SFE) mit ihren polaren und dispersiven Anteilen, der Adhäsionsarbeit

(work of adhesion, WoA), des Spreitkoeffizienten, der Grenzflächenspannung (GFS; häufig auch als "Grenzflächenenergie" bezeichnet) und der "Wetting Envelope".

Viel Aufmerksamkeit wurde der Bewertung von Beschichtungen in Bezug auf die Adhäsion gewidmet, d. h. der Tendenz einer Beschichtung und eines Substrats, miteinander in Kontakt zu bleiben. Hierfür wird in der Regel die WoA zwischen dem Substrat und der Beschichtung herangezogen.

Die Beschichtungsfähigkeit beschreibt, wie reibungslos ein Substrat mit einer Flüssigkeit beschichtet werden kann. Ähnlich wie bei der Adhäsion ist die Fähigkeit, die Beschichtbarkeit eines Substrats schnell und einfach zu beurteilen, ein wichtiges Instrument für die Entwicklung und Formulierung von Beschichtungsmaterialien.

Die WoA beschreibt das Gleichgewicht der an der Grenzfläche wirkenden Kräfte, nämlich OFS, SFE und GFS. OFS und SFE können als ein Maß dafür beschrieben werden, wie ungünstig eine Vergrößerung der Oberfläche für Flüssigkeiten bzw. Feststoffe ist. Daher kann die WoA als Kriterium dafür angesehen werden, wie stark sich die beiden Phasen an einer Grenzfläche einer Trennung widersetzen.

Auf diese Weise stellt die GFS die Verringerung dieses Widerstands dar, die sich aus einer etwaigen Ungleichheit in der Chemie der beiden Materialien ergibt, d. h. aus ihrem polaren/nicht-polaren Verhältnis. Mit anderen Worten: Ein höherer WoA-Wert deutet auf eine geringere Wahrscheinlichkeit der Delamination an einer Grenzfläche hin [7].

Da WoA im Wesentlichen die Wahrscheinlichkeit beschreibt, mit der sich eine Beschichtung von einer Oberfläche ablöst, wird dieser Wert üblicherweise als Vorhersagewert für die Beschichtungsleistung im Allgemeinen verwendet. Dieser Ansatz funktioniert oft gut, hat aber auch seine Grenzen. Insbesondere sagen uns die WoA-Werte nichts über die Größe von OFS und SFE im Verhältnis zueinander.

## Experimenteller Teil

### Proben und ihre Vorbereitung

Als feste Proben wurden Edelstahlplatten zunächst mit einer typischen lösungsmittelbasierten Grundierung für Kraftfahrzeuge beschichtet. Bei zwei der

drei Proben wurde die Primerlösung durch die Zugabe von 0,1% BYK-310 bzw. 0,3% BYK-3560 modifiziert. Nach der Beschichtung wurde jede Probe an der Luft ausgehärtet (20 Min., 140 °C) und danach mit einem roten Basislack auf Wasserbasis sprühbeschichtet. Der Lack wurde dabei mit einer Spritzpistole mit einem Gradienten der Trockenschichtdicke von 0 µm bis 20 µm, sodass die Dicke des Basislacks an jeder Probe von 0 µm bis 20 µm vertikal anstieg. Nach dem Auftragen des Basislacks wurden alle drei Proben fotografiert und die relative Beschichtungsleistung (Deckkraft, Verteilung, Färbung) wurde visuell geprüft.

### Kontaktwinkel- und Oberflächenspannungsmessungen und deren Auswertung

Nach dem Aushärten des Primers, aber vor dem Auftragen des Basislacks, wurden an jeder Probe Kontaktwinkelmessungen mit einem KRÜSS DSA100 mit 5 verschiedenen Testflüssigkeiten von polar bis unpolar durchgeführt. Die SFE-Eigenschaften, einschließlich der polaren (p) und dispersiven (d) Komponenten des Festkörpers (solid; s) und der Flüssigkeit (liquid; l), wurden anschließend nach dem OWRK-Modell [8-10] berechnet:

$$\sigma_{ls} = \sigma_l + \sigma_s - 2 \left( \sqrt{\sigma_l^d \sigma_s^d} + \sqrt{\sigma_l^p \sigma_s^p} \right) \quad (1)$$

wobei  $\sigma_{ls}$ ,  $\sigma_l$  und  $\sigma_s$  die GFS, OFS bzw. SFE ausdrücken.

Die gesamte statische Oberflächenspannung des Basislacks wurde mit einem KRÜSS Force Tensiometer-K100 nach der Du-Nuöy-Ringmethode bestimmt. Danach wurde ein KRÜSS Drop Shape Analyzer-DSA100 für Kontaktwinkelmessungen desselben Basecoats auf einem flachen, homogenen, unpolaren Substrat mit bekannter SFE (PDMS-Sylgard184) verwendet. Da es keine polaren Wechselwirkungen gibt, kann das OWRK-Modell vereinfacht werden, um den unpolaren Anteil der OFS des Basislacks zu bestimmen. Anschließend wurde die polare Oberflächenspannungskomponente über die folgende einfache Beziehung berechnet

$$\sigma^p = \sigma^{gesamt} - \sigma^d, \quad (2)$$

wobei  $\sigma^{gesamt}$ ,  $\sigma^p$  und  $\sigma^d$  die Gesamtwerte sowie die polaren bzw. dispersiven OFS-Komponenten bezeichnen.

Alle oben genannten Bestimmungen von SFE und OFS wurden automatisch von der KRÜSS ADVANCE Software im Sessile Drop Modus durchgeführt. Mit den Daten der SFE und der OFS berechnete das Adhäsionsanalyse-Tool der ADVANCE-Software automatisch Werte und Iso-Plots für die Adhäsionsarbeit (WoA), die Grenzflächenspannung (GFS), den Spreitkoeffizienten (S) und den theoretischen Kontaktwinkel für alle gegebenen Beschichtungs-/Substratkombinationen.

## Ergebnisse

### Visuelle Bewertung der SFE/OFS-Ergebnisse für die Kontrollprobe und BYK-310

Zur Untersuchung der relativen Leistung des Primer-Additivs BYK-310 mit einer bestimmten Basislackformulierung wurden Testplatten hergestellt, indem ein Standardprimer sowohl mit (BYK-310) als auch ohne (Control) Additiv auf ein Stahlsubstrat aufgetragen wurde. Nach dem Auftragen wurde die Grundierung ausgehärtet, um einen festen Untergrund zu bilden. Der gewählte (rote) Basislack wurde dann auf die nun verfestigte Grundierungsschicht aufgesprüht.

Während des Auftragens wurde die Dicke des Basislacks bei jeder Probe von oben (~0 µm) nach unten (~20 µm) variiert. Bei der visuellen Inspektion der fertig beschichteten Dicke der Beschichtung Testplatten (siehe Abbildung 2) ist sofort ersichtlich, dass die Zugabe von 0,1 % BYK-310 die Beschichtbarkeit der Primerschicht selbst bei relativ hohen Schichtdicken deutlich beeinträchtigt.

Um das Verhalten an der Grenzfläche zwischen Primer und Basislack besser zu verstehen und damit zu erklären, wurde die freie Oberflächenenergie der beiden ausgehärteten Primerschichten, d. h. im festen Zustand, durch Kontaktwinkelmessungen bestimmt, ebenso wie die Oberflächenspannungseigenschaften des Basislacks (siehe Tabelle 1)

Aus den Werten in Tabelle 1 geht hervor, dass die Zugabe von BYK-310 eine fast vernachlässigbare Auswirkung auf die Gesamt-OFS des ausgehärteten Primers hat. Eine häufig verwendete Faustregel zur Beurteilung der Beschichtungsleistung besagt: "Wenn die Gesamt-SFE eines Substrats gleich oder größer ist als die Gesamt-OFS einer Flüssigkeit, dann wird eine gute Benetzung erreicht."

Leider ist diese Faustregel unzuverlässig; in diesem Fall lässt sich der Unterschied in der Beschichtungsfähigkeit der beiden Proben nicht auf diese Weise erklären. Beide Proben weisen SFE-Werte auf, die unterhalb der OFS des Basislacks liegen. Anhand der Daten in Tabelle 1 ist es möglich, zwischen den beiden Proben auf der Grundlage des Verhältnisses von polar zu dispersiv zu unterscheiden, wobei jedoch nicht unmittelbar ersichtlich ist, welches Substrat zu einer besseren Leistung führt.

Daraus können wir schließen, dass der Vergleich der OFS- und SFE-Eigenschaften eines Beschichtungs-/Substratsystems nicht ausreicht, um die Beschichtbarkeit vorherzusagen.

**Weitere Bewertung der haftungsbezogenen Parameter für die Kontrollprobe und BYK-310**

Glücklicherweise reichen die OFS- und SFE-Daten allein aus, um eine ganze Reihe von abgeleiteten Parametern zu berechnen, die ein detaillierteres Bild der Substrat/Beschichtungs-Grenzfläche vermitteln, ohne dass weitere Daten erhoben werden müssen. WoA, GFS und Spreitkoeffizient (S) sind für die Beurteilung der Beschichtungsleistung besonders wichtig. Tabelle 2 zeigt die berechneten Benetzbarkeitsparameter für die Systeme Control/Basecoat und BYK-310/Basecoat.

WoA-Werte werden häufig als Kriterium zur Charakterisierung der allgemeinen Beschichtungsleistung herangezogen; dieser Ansatz weist jedoch einige Mängel auf. Dies wird deutlich, wenn man die WoA-Werte der beiden Primer/Basecoat-Systeme vergleicht (Tabelle 2).

Zwar stimmt der Trend bei der WoA mit der beobachteten Beschichtbarkeit übereinstimmt, aber die Werte unterscheiden sich lediglich um 2,3 %. Nach dieser Analyse müsste davon ausgegangen werden, dass beide Systeme in Bezug auf die Haftung ähnlich abschneiden, was aber nicht der tatsächlichen relative Beschichtungsfähigkeit der beiden Substrate entspricht. Darüber hinaus zeigen die GFS-Werte zwar einen signifikanten Unterschied zwischen den Proben Control und BYK-310, aber der Trend geht in die falsche Richtung, d. h. die GFS des Control-Systems ist höher (was landläufig auf eine schlechtere Kompatibilität hindeuten sollte als die von BYK-310. Es ist erwähnenswert,

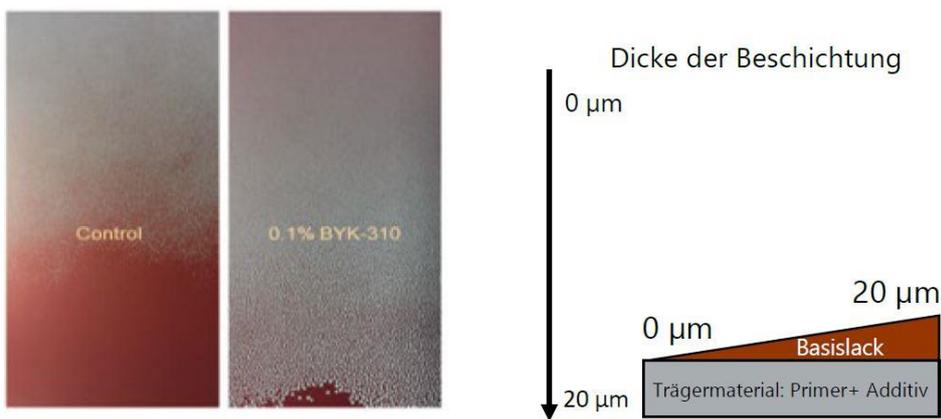


Abb. 2: links: Fotos der beiden Proben nach dem Auftragen und Aushärten der Primerschicht, ohne und mit BYK-310-Zusatz, und anschließender Spritzbeschichtung mit einem roten Basislack unterschiedlicher Dicke (20 - 0 µm). rechts: Schematische Darstellung des Schichtdickenverlaufs für jede Probe von oben (0 µm) nach unten (20 µm) [5]

Tab. 1: OFS- (oben) und SFE-Daten (unten) des Basislacks bzw. zweier Proben. Polare (p) und disperse (d) Komponenten sind ebenfalls angegeben, wobei die Gesamtpolarität in % angegeben ist[5].

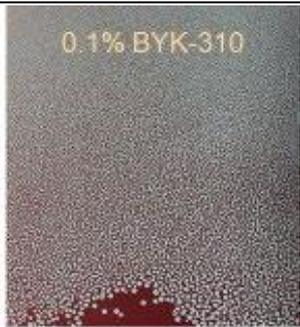
**Daten zur Beschichtung**

Muster	$\sigma^{ges}$ [mN/m]	$\sigma^d$ [mN/m]	$\sigma^p$ [mN/m]	Polarität (%)
Grundierung (Rot)	29,30	22,40	6,90	23,55

**Substrat-Daten**

Muster	$\sigma^{ges}$ [mN/m]	$\sigma^d$ [mN/m]	$\sigma^p$ [mN/m]	Polarität (%)
Primer-Control	26,80	22,60	4,20	15,67
Grundierung + 0,1% BYK-310	20,40	20,20	5,20	20,47

Tab. 2: Berechnete WoA-, GFS-, S- und Kontaktwinkelwerte (theoretisch) für die Kombinationen Control/Basislack und BYK-310/Basislack. Bilder der einzelnen Proben sind unten angefügt [5].

Grenzfläche zwischen Basecoat und		
	Primer-Control	Primer + 0,1% BYK-310
WoA	55,77 mN/m	54,52 mN/m
GFS	0,33 mN/m	0,18 mN/m
S	-2,83 mN/m	-4,08 mN/m
$\theta$	25,41°	30,59°
		

dass in der Automobilindustrie ein GFS-Wert von weniger als 1 mN/m als akzeptabel angesehen wird, was bei beiden Proben der Fall ist.

**Spreitkoeffizient als zuverlässiger Prädiktor für die Beschichtungsleistung**

Der Spreitkoeffizient eines Beschichtungs-/Substratsystems wird im Allgemeinen als Indikator für die Beschichtungsleistung übersehen. In diesem Fall jedoch scheinen die S-Werte für die beiden Systeme der beobachteten Beschichtbarkeit gut zu folgen, sowohl in Bezug auf den allgemeinen Trend als auch auf die relative Differenz (-144 % bei Zugabe von BYK-310). Dies sollte aber nicht allzu überraschend sein, wenn man bedenkt, wofür S steht.

Im Gegensatz zu WoA ist S ein direktes Maß dafür, wie sich Kräfte, die der Benetzung förderlich sind (SFE), und solche, die der Benetzung abträglich sind (OFS, GFS), die Waage halten. In vielerlei Hinsicht kann dies als eine quantitative Version der oben erwähnten Faustregel angesehen werden, d. h. "wenn S größer als Null ist, wird eine gute Benetzung erreicht".

Der Vorteil der Berechnung von S gegenüber einem direkten Vergleich von SFE und OFS besteht darin, dass hier das Gleichgewicht von adhäsiver und kohäsiver Arbeit an der Grenzfläche sowie die polaren/unpolaren Verhältnisse der einzelnen Komponenten automatisch berücksichtigt werden. Auf dieser Grundlage kann S als wertvoller Parameter für

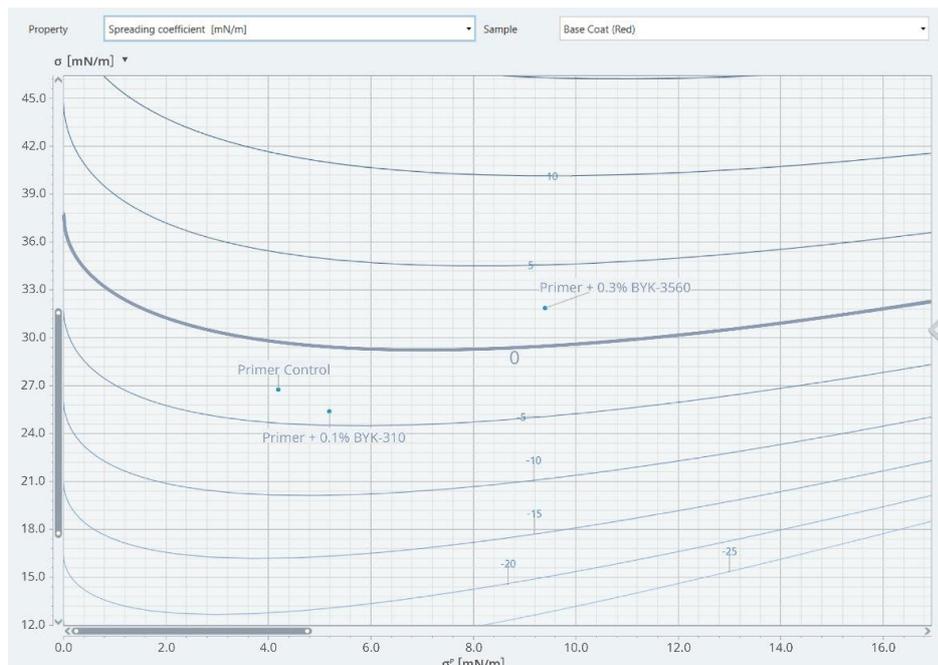


Abb. 3: Iso-Plot des Spreitkoeffizienten, der die Daten für die Kombinationen Control/Grundierung und BYK310/Grundierung zeigt. Die Iso-Linien stellen den Wert von S im gesamten Diagramm dar [5].

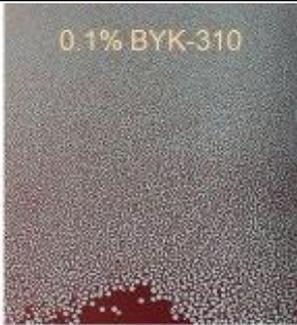
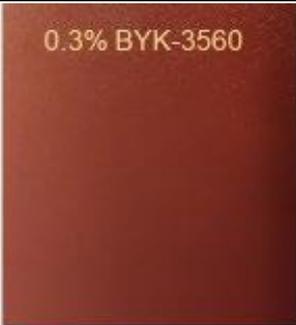
die Bewertung der Beschichtungsleistung verwendet werden.

Die Formulierung/Reformulierung einer einzelnen Beschichtung kann ein langwieriger Prozess sein, bei dem viele potenzielle Kandidaten in Frage kommen. Vor diesem Hintergrund ist die Verwendung eines Iso-Plots zur Darstellung aller Systeme im Verhältnis zueinander besonders nützlich. Durch die visuelle Darstellung der Informationen lassen sich die besten Kandidaten für die weitere Entwicklung leicht identifizieren.

Abbildung 3 zeigt ein solches Iso-Diagramm für den Spreitkoeffizienten des gewählten Basislacks für Control und BYK-30.

Aus dieser visuellen Darstellung ist sofort ersichtlich, dass die Kontrollprobe eine bessere Leistung in Bezug auf die Streichfähigkeit aufweist, da sie näher an der Linie S=0 liegt. Es ist auch möglich, ein solches Iso-Diagramm zu verwenden, um die notwendigen Änderungen zur Verbesserung der Beschichtbarkeit zu ermitteln.

Tab. 3: Berechnete WoA-, GFS-, S- und θ-Werte (theoretisch) für alle drei Kombinationen aus Probe und Grundierung. Unter jeder Spalte befindet sich ein Bild der jeweiligen Probe [5].

Grenzfläche zwischen Basecoat und			
	Primer-Control	Primer + 0,1% BYK-310	Primer + 0,3% BYK-3560
WoA	55,77 mN/m	54,52 mN/m	61,01 mN/m
GFS	0,33 mN/m	0,18 mN/m	0,19 mN/m
S	-2,83 mN/m	-4,08 mN/m	2,41 mN/m
θ	25,41°	30,59°	0,00°
			

### Analyse einer neuen Formulierung, die anhand von S als Leitlinie optimiert wurde

Auf der Grundlage der obigen Untersuchung wurde eine neue Primerformulierung entwickelt. Diesmal wurde anstelle von BYK-310 ein Polyether-Macromer-modifiziertes Polyacrylat-Additiv mit der Bezeichnung BYK-3560 verwendet. Da alle relevanten Daten über den Basislack zuvor aufgezeichnet worden waren, konnte ein vollständiger Satz neuer Daten einfach durch Messung der SFE des neuen Primers nach der Aushärtung gewonnen werden.

Im Vergleich zur Probe Control zeigte das neue BYK-3560 Substrat einen deutlichen Anstieg der gesamten und polaren SFE, während die unpolare SFE mehr oder weniger gleich blieb. Anhand des Iso-Plots in Abbildung 3 lässt sich auf einen Blick abschätzen, dass ein solcher Anstieg der polaren SFE zu einem S-Wert führt, der etwa 200 % höher liegt als der des Systems Control.

Die anschließenden Berechnungen der verschiedenen Parameter ergaben, dass S um mehr als 185 % anstieg. Erwähnenswert ist auch, dass der WoA-Wert dieses Systems im Vergleich zu den Systemen Control und BYK-310 deutlich erhöht war, was auf eine bessere Haftung zwischen Beschichtung und Substrat für die gewählte Basecoat-Formulierung hinweist. Die GFS des BYK-3560 Systems war im Vergleich zur Probe Control zwar verbessert, aber sehr ähnlich zu der des BYK-310 Systems.

Nachdem das BYK-3560 Substrat als potenzieller Kandidat für eine verbesserte Beschichtbarkeit mit dem Basislack bestätigt worden war, wurde das ausgehärtete Substrat auf die gleiche Weise wie die anderen Proben sprühbeschichtet. In diesem Fall ergab die visuelle Inspektion der Probe eine stark verbesserte Beschichtung des Substrats, die mit dem verbesserten Wert von S übereinstimmt.

Vor allem ermöglichte die erhöhte Leistung eine vollständigere Beschichtung der Probe bei geringerer Schichtdicke. Dies wiederum macht die Verwendung von weniger Basislack insgesamt erforderlich, wodurch die Effizienz des Beschichtungsprozesses verbessert und die Kosten gesenkt werden.

### Zusammenfassung

Die Zugabe von 0,1% BYK-310 zu einer Fahrzeuggrundierung zeigte eine signifikante visuelle Reduzierung der Beschichtungsleistung (Beschichtbarkeit) für einen typischen Fahrzeugbasislack. Unter Verwendung von Werten, die aus Kontaktwinkel- und Oberflächenspannungsmessungen abgeleitet wurden, wurden die Benetzbarkeitsparameter Adhäsionsarbeit (WoA), Grenzflächenenergie (GFS) und Spreitkoeffizient (S) dieses Systems bestimmt und eine vollständige Beschreibung des Beschichtungs-Substrat-Systems erstellt.

Im Vergleich waren weder WoA noch GFS ausreichende Indikatoren für die beobachtete Beschichtbarkeit des Systems mit oder ohne BYK-310. Im Gegensatz dazu war der Unterschied in S für die beiden Proben viel ausgeprägter und lieferte einen viel klareren quantitativen Indikator für die Beschichtbarkeit.

Im Anschluss an die obige Analyse wurde ein drittes System untersucht, diesmal unter Verwendung eines mit Polyether-Macromer modifizierten Polyacrylat-Additivs (BYK-3560). In diesem Fall führte die Zugabe von 0,3 % BYK-3560 zu einer stark verbesserten Beschichtungsfähigkeit des Substrats. Bei der Untersuchung der Benetzungsparameter dieses Systems wurde nach der Zugabe von BYK-3560 ein deutlicher Anstieg von WoA beobachtet, und am auffälligsten war, dass S um 185 % gegenüber der Kontrollprobe anstieg.

Dies wiederum ermöglichte eine angemessene Beschichtung des Substrats bei geringerer Grundschichtdicke. Die Verwendung einer BYK-3560 enthaltenden Grundierung hat sich als wirksam erwiesen, um die Beschichtbarkeit einer bestimmten Basislackformulierung auf einem typischen Automobils substrat (Stahl) zu verbessern. Als direkte Folge der verbesserten Leistung kann eine visuell akzeptable Benetzung des Substrats bei geringerer Basislackdicke erreicht werden. Die hier vorgestellte Arbeit zeigt, wie die Haftungsanalyse ein wirksames Instrument sein kann, um die Entwicklung neuer Primer/Basislack-Paare anzuleiten oder die Fehlersuche bei Beschichtungsproblemen in der Zukunft zu unterstützen.

### Abkürzungen

GFS	Grenzflächenenergie zwischen einer Flüssigkeit und einem Festkörper
S	Streukoeffizient
SFE	Freie Oberflächenenergie eines Festkörpers
OFS	Oberflächenenergie einer Flüssigkeit
WoA	Arbeit der Adhäsion

### Symbole

$\theta$	Kontaktwinkel
$\sigma_l$	OFS einer Flüssigkeit
$\sigma_s$	SFE eines Festkörpers
$\sigma_{ls}$	GFS zwischen einer Flüssigkeit und einem Feststoff
Hochindex d	Dispersiver Anteil der SFE oder OFS
Hochindex p	Polarer Anteil der SFE oder OFS

### Literaturverzeichnis

- [1] P. I. Dolez, J. Mlynarek, 2016, *Smart Materials for personal protective equipment: Tendencies and recent developments*, p.497-517, Woodhead Publishing.
- [2] N. Shehata, M. A. Abdelkareem, E. T.Sayed, D. E. Egirani, A. W.Opukumo, 2021, *Smart Materials: The Next Generation, Encyclopedia of Smart Materials*, p. 1 – 12, Elsevier Inc.
- [3] J. L. Hu, 2016, *Active Coatings for Smart Materials*, p. 1-7, Woodhead Publishing.
- [4] J. J. Moore, D. Zhong, 2003, *Advanced Coatings for Structural Materials, Encyclopedia of Materials: Science and Technology (2nd Ed.)*, p. 1-12, Elsevier Science Ltd.
- [5] P. D. Valentina, Hamburg, 12/11/2019, *Anwendungsbeispiele aus der Tensiometrie*, BYK-Chemie GmbH.
- [6] „BYK-3560 und BYK-3565 ausgezeichnet!“, ALTANA, BYK Chemie GmbH, 04/09/2018

[7] S. Ebnesajjad, A. H. Landrock, 2015, *Adhesives Technology Handbook (3rd Ed.)*, p. 19-34, William Andrew.

[8] D. H. Kaelble, *Dispersion-Polar Surface Tension Properties of Organic Solids*. In: *J. Adhesion* 2 1970, P. 66- 81.

[9] D. Owens; R. Wendt, *Estimation of the Surface Free Energy of Polymers*. In: *J. Appl. Polym. Sci* 13 1969, P. 1741- 1747.

[10] W. Rabel, *Einige Aspekte der Benetzungstheorie und ihre Anwendung auf die Untersuchung und Veränderung der Oberflächeneigenschaften von Polymeren*. In: *Farbe und Lack* 77,10 1971, P. 997-1005.

## Danksagung

Unser besonderer Dank gilt unseren Partnern bei BYK für die Bereitstellung der Daten und Bilder für diesen Bericht sowie für ihre nützlichen Anregungen und die weitere Zusammenarbeit. **BYK®** ist ein eingetragenes Warenzeichen der BYK Gruppe.