

Farbgenauigkeit in Perfektion



Quelle: Lucky AI - stock.adobe.com

DIGITALISIERUNG // SOFTWARE UND DIGITALE ZWILLINGE UNTERSTÜTZEN DAS
KOMPLEXE FARBMANAGEMENT IN DER AUTOMOBILBESCHICHTUNGSINDUSTRIE.
DIE BASIS BILDET MULTIDIMENSIONALE VARIABLENANALYSE.

Carlos Vignolo, Christoph Schulte, BASF Coatings

Nicht nur die Farbe an sich, sondern auch die wahrgenommene Farbharmonie des gesamten Autos ist eines der wichtigsten Entscheidungskriterien, wenn Verbraucher ein neues Auto wählen. Um die Farbharmonie des Autos zu gewährleisten, hilft es, digitale Tools zu kombinieren. Damit lässt sich die aufgesprühte Farbe in Automobillackierlinien überwachen. Ein ganzheitlicher Ansatz reicht von der Auswahl des Farbreferenzpanels oder Masterpanels bis hin zu realisierbaren Farbverbesserungen auf der Grundlage des Echtzeit-Feedbacks und der Trendanalyse aus der Lackierlinie.

Für den Anwendungsfall farbiger Anbauteile zeigt der Beitrag außerdem, wie sich die Farbharmonie des gesamten Autos vorhersagen lässt. Es gibt Softwarelösungen, die für smarte Fabriken mit hohem Datenvolumen und Cloud-Services vorbereitet sind.

Der vorgestellte Ansatz ermöglicht einen Echtzeitzugriff sowohl auf automatisierte Messungen, die in der Lackierlinie durchgeführt werden, als auch auf manuelle Messungen. Der Beitrag zeigt, wie sich Farbmessungen mit zusätzlich gemessenen Oberflächendaten wie Aussehen oder Schichtdicke verbinden lassen. Alle Daten stehen für eine detaillierte Analyse zur Verfügung, und eine minimal benötigte Zahl an Schlüsselindikatoren reicht, um die Ergebnisse zu analysieren.

Leitfaden für eine typische Anwendung

Die digitale Transformation ist die größte Herausforderung für Industrien weltweit und eine wichtige Säule in den meisten Geschäftsstrategien. Auf verschiedene Arten von Daten zuzugreifen und sie in Beziehung zu setzen, ermöglicht es Herstellern, ihre Effizienz, Produktivität und letztendlich die Kundenzufriedenheit zu verbessern. Die Korrelation von Daten von Lieferanten, Laboren und End-of-line-Farbmessungen ist der Schlüssel, um Test- und Laboraufwand zu reduzieren und letztendlich die Anzahl der Korrekturzyklen zu verringern und daher die Kunden zufriedener zu machen.

Es gibt viele Softwarelösungen, die die digitalen Anstrengungen von Kunden unterstützen, jedoch konzentriert sich keine auf die Bedürfnisse der Automobilbeschichtungsindustrie. Aus diesem Grund haben wir eine Software entwickelt, die den aktuellen Zustand in der Produktion überwacht und einen einfachen Überblick über die laufenden Produkte und Prozesse gibt.

Konkret geht es bei der Qualitätskontrolle von Farbe häufig nur um die grundlegenden Fragestellungen. Die Beantwortung von auf den ersten Blick simplen Fragen ist im Regelfall ausreichend für eine abschließende Beurteilung der Lackierqualität, darunter sind Fragen wie: Erfüllt die Farbe die Erwartungen in der Produktionslinie? Wie kann ich meine Erwartungen an die Leistung der Linie in messbare Größen umwandeln? Erfüllt die aktuelle Lackcharge die Kundenspezifikation? Liegen alle Messungen oder nur etwa 90 Prozent innerhalb der Spezifikation? Bedeutet letzteres immer noch, dass die Linie den Anforderungen entspricht? Wie lässt sich die Leistung eines bestimmten Materials in der Linie bewerten? Und wie lässt sich sofort die Ursache eines Problems identifizieren, um gegebenenfalls die entsprechenden Maßnahmen zur Verbesserung der aktuellen Situation zu ergreifen? Dieser Artikel stellt einen Leitfaden für den typischen Anwendungsfall in der Automobilindustrie zur Einführung neuer Außenfarben vor. Dabei geht er auf alle oben genannten Fragen ein und identifiziert die „Key Performance Indicators“ für die Farben in der Serienproduktion. Daher zeigt er einen maßgeschneiderten Werkzeugkasten für die Automobilbeschichtungsindustrie, um die digitale Reise zu beginnen und die richtigen Werkzeuge für die umfassende Analyse von Beschichtungsdaten bereitzustellen.

Darüber hinaus geht der Artikel kurz auf den digitalen Zwilling für Beschichtungsprodukte und -prozesse ein, also auf die digitale Darstel-

lung der realen Produkte oder Prozesse. Durch die Einführung eines digitalen Zwillings stehen alle relevanten Daten für den Prozess sofort zur Verfügung. Dies ermöglicht es dem Benutzer, Lösungen für die Verlängerung des Produktlebenszyklus, Verbesserungen in der Fertigung und im Prozess sowie die Produktentwicklung und Prototypentests zu untersuchen [1].

Design neuer Farben

Zunächst soll der reguläre Prozess der Einführung neuer Außenbeschichtungen für Automobilbeschichtungen betrachtet werden. Basierend auf dem geplanten Fahrzeugmodell, dem Design und den aktuellen Kundenbedürfnissen oder gesellschaftlichen Trends definiert die Designer der Automobilhersteller das erste Farbziel. Die gewünschte Farbidee wird normalerweise durch Collagen unterstützt, welche die charakteristische Atmosphäre um die Farbe herum beschreiben. *Abb. 1* zeigt ein Beispiel einer Collage für den initialen digitalen Zwilling. In diesem Fall handelt es sich um eine Simulation der resultierenden Farbe und Textur, nachdem die Vorlage mit einem Spektralphotometer im Farblabor gemessen wurde.

Die Kommunikation mit dem Kunden oder Antragsteller kann sehr effizient und innerhalb kurzer Zeiträume erfolgen, wenn der digitale Zwilling den realen Farbton gut und verlässlich abbildet. Daher muss die Software, wenn das Design digital ausgedrückt werden soll, nicht nur in der Lage sein, Farbe und Textur zu rendern, sondern das Resultat muss auch visuell verifiziert werden können. Diese Funktion ist essentiell und bildet die Grundlage für jede digitale Farbaktivität.

Ein langer Weg

Ein schlechter digitaler Zwilling bedeutet Zeit- und Arbeitsaufwand für den Lackhersteller. Ein guter digitaler Zwilling besteht hingegen aus genauen Multiwinkel-Farbmessungen einschließlich Texturinformationen und wird in einem branchenweit akzeptierten Format geliefert. Die Daten sollten für relevante Farblabors weltweit zugänglich sein und zu der gleichen visuellen Darstellung auf dem Bildschirm führen. Ein einfacher Zugang zum digitalen Zwilling beschleunigt den Prozess und reduziert die Möglichkeit, dass es verlorene Daten oder Missver-

Ergebnisse auf einen Blick

- Ein ganzheitlicher Ansatz für das Farbmanagement in der Automobilindustrie ermöglicht es, während des gesamten Prozesses den Überblick zu behalten.
- Die wichtigsten Softwarelösungen, die den operativen Teil des Prozesses unterstützen, Definition und Empfehlung für Farbtoleranzen werden vorgestellt.
- Ein entscheidender Teil zur Prozess- und Produktoptimierung ist die Verwendung von Farblinienmessungen als Kundenfeedback.
- Das Problem der Charakterisierung der aufgesprühten Farben ist komplex und umfasst mehrere Messgeometrien und Anbauteile.
- Die richtigen Leistungskennzahlen zu verwenden ist entscheidend, um zu verstehen, was verbessert werden muss.

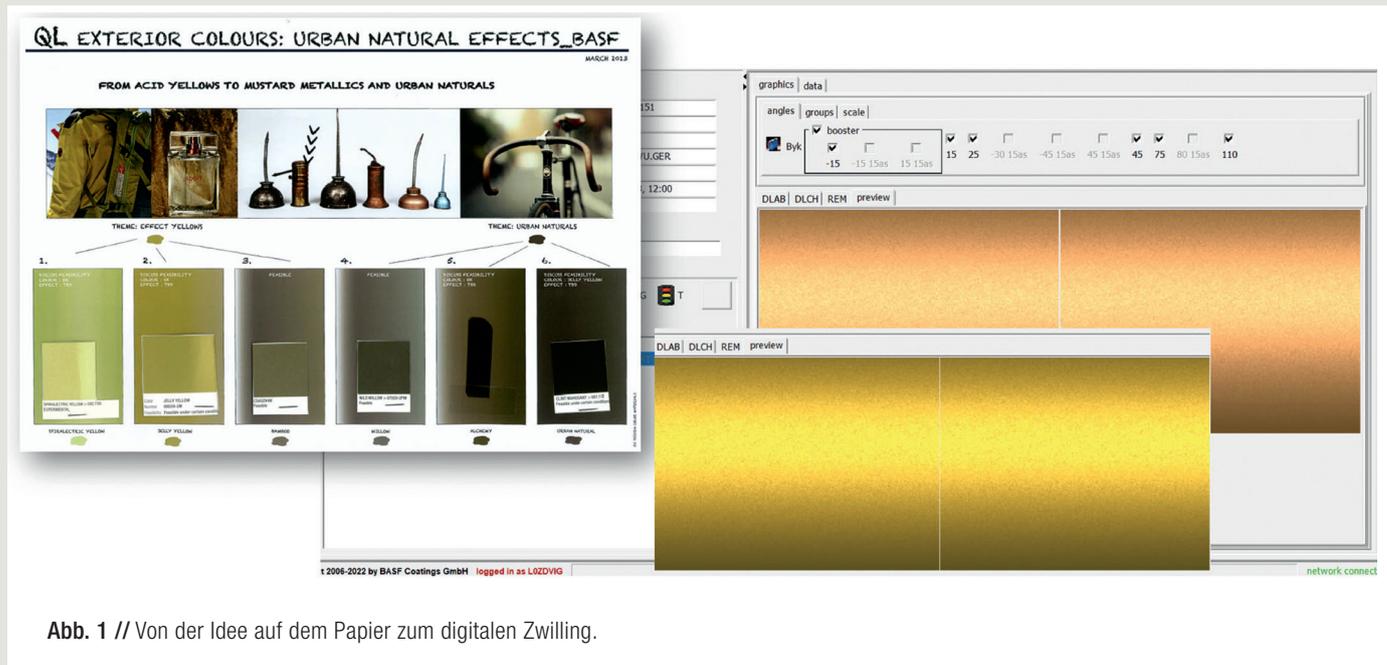


Abb. 1 // Von der Idee auf dem Papier zum digitalen Zwilling.



Abb. 2 // Typischer Ablaufplan bei der Einführung neuer Farbbeschichtungen in der Automobilindustrie.

ständnisse aufgrund unterschiedlicher Versionen des digitalen Zwillings gibt. Die Erzeugung und Verteilung des digitalen Zwillings ist nur der Anfang eines langen und steinigen Wegs zum Beginn der Produktion (start of production, SoP) in der Automobilindustrie. Normalerweise beginnt dies viele Jahre im Voraus und setzt die Meilensteine für die zukünftige Leistung des Produkts.

Abb. 2 stellt schematisch die Reise zur Serienproduktion dar: Nach der Definition des ersten lackierten Panels in der Designphase ist es notwendig, alle anderen Eigenschaften der Farbe gemäß der Kundenspezifikation zu überprüfen: Aktuelle Automobillacke werden in mehreren Schichten aufgetragen. Diese schützen das Fahrzeug vor Korrosion, Steinschäden, UV-Licht usw. Am Ende dieser Phase entsteht das neue mögliche Farbziel.

Nachdem die gewünschte Farbe simuliert und aufgetragen wurde, ist es erforderlich, die resultierende Farbe mit einer Software-Hardware-Lösung zu kontrollieren. Basierend auf mehr als 20 Jahren Erfahrung im Feld bietet die „ColorCARE-Software“ die besten Ergebnisse: Alle Farbtoleranzmodelle, die die Farbspezifikation abbilden, die Wahl des besten digitalen Masters durch Clusteranalyse und die aktuelle Möglichkeit von Cloud-Lösungen als Fortentwicklung geben den Farbexperten die richtigen Werkzeuge.

Farbqualitätskontrolle bis zur Serieneinführung

Bei der Durchführung von Tests und dem Feintuning für das endgültige Produktionsrezept werden viele Muster erzeugt, bis das finale

machbare Farbziel festgelegt ist. Im realen Fall weicht die neue Farbe von der ursprünglichen Farbe aufgrund erforderlicher Änderungen in den Anwendungseinstellungen oder der Zusammensetzung ab. Da man sich tatsächlich nicht von der genehmigten Farbgestaltung entfernen will, müssen die neuen Muster mit der ursprünglichen Farbe verglichen werden. Hierfür ist die beste Methode, eine Metrik basierend auf dem objektiven Standard des Kunden festzulegen. Dafür ist das Wissen über die Farbtoleranzen des Kunden erforderlich. Wie bereits erwähnt, ist es wichtig, eine Farbsoftware zu haben, die in der Lage ist, die Art und Weise zu beschreiben, wie der Kunde den Unterschied wahrnimmt, um das Ergebnis der visuellen Bewertung vorherzusagen. Idealerweise werden bei allen Beteiligten die gleichen mathematischen Kriterien für die Bewertung verwendet. Angenommen, eine solche Software existiert, welche die Akzeptanzgrenzen (S) für die Kundenakzeptanzgrenzen für jede Farbkoordinate (x) und jeden Betrachtungswinkel (Φ) berechnet. Eine Normalisierung (mathematisch gesehen) ist gegeben durch Gleichung 1:

$$^{(1)} \langle dx \rangle_{\phi} = \frac{dx * |}{S_x * |}_{\phi}$$

$$-1 \leq \langle dx \rangle \leq 1$$

Demzufolge ist das empfohlene Diagramm der Farbunterschiede x dasjenige, das diesen Akzeptanzbereich von ±1 zeigt (Abb. 3). Automatisch wird die berechnete euklidische Farbdistanz für drei Farbkoordinaten unter der Quadratwurzel von 3 liegen, also bei etwa 1,7

(Gleichung 2), wenn alle Farbunterschiede innerhalb dieser visuell akzeptierten Grenzen liegen:

$$(2) \quad \langle dE \rangle_{\phi} = \sqrt{\langle dL \rangle^2 + \langle da \rangle^2 + \langle db \rangle^2} < 1.7$$

Gleichung 2 ist das Ergebnis von Gleichung 1 für $x = L, a, b$ bei jedem Winkel ϕ .

Anders gesagt: Nachdem die visuell vereinbarten Akzeptanzgrenzen des Kunden gefunden oder berechnet sind, wird der Farbunterschied normalisiert. Akzeptiert werden Farbabstände zum ursprünglichen Ziel, die kleiner als 1,7 gemäß Gleichung 2 sind.

Am Ende des Prozesses zur Erstellung des machbaren Farbziels werden die Musterbleche lackiert und der digitale Master ausgewählt. Dieser entspricht dem digitalen Zwilling, also der digitalen Darstellung der Farbe und der mathematischen Definition der akzeptierten Farbabweichungen, die für alle zukünftigen Farbkontrollen einschließlich der Serienproduktion in der Linie verwendet wird. Die Methode, die normalerweise zur Suche nach dem zentralen digitalen Masterblech verwendet wird, ist die Clusteranalyse. Denn das Ziel besteht darin, den größtmöglichen Cluster ähnlicher Farben zu finden. Die eingesetzte Farbqualitätssoftware sollte diese Funktionalität enthalten.

Farbmonitoring der Lackierergebnisse

Der Produktionsstart in der Kundenlinie bringt neue Herausforderungen an die Farbqualität mit sich. Obwohl die erste Farbcharge hergestellt und durch das Besprühen eines flachen Blechs kontrolliert wird, muss in der Kundenlinie mit sehr komplexen Geometrien wie zum Beispiel Autokarosserien und Stoßfängern umgegangen werden. Darüber hinaus wird die Farbe wahrscheinlich mit verschiedenen Robotern aufgetragen (z.B. auf der rechten oder linken Seite der Lackierstraße), wobei das Ziel eine gleichmäßige Filmdicke auf horizontalen und vertikalen Teilen ist.

Offensichtlich ist die Erwartung des Kunden, dass die Farbe in allen Messpunkten mit dem Farbziel im Rahmen der Spezifikation übereinstimmt. Allerdings gibt es, wie bei vielen Prozessen, keine homogene Farbverteilung auf der beschichteten Oberfläche. Das bedeutet, dass nach dem Messen des lackierten Objekts an verschiedenen Positionen unterschiedliche Ergebnisse erhalten werden. Die Komplexität ergibt sich zusätzlich aus den mehrdimensionalen Farbmessungen. Der Stand der Technik besteht darin, Effektlacke in mindestens 5 Geometrien oder Betrachtungswinkeln zu messen und auch Texturwerte einzubeziehen. Dennoch muss die Leistung des Materials in der gegebenen Linie einfach qualifiziert werden. Wie bereits erwähnt, ist die zentrale Fragestellung, ob die Farbe als „in Ordnung“ bezeichnet wird. Idealerweise wird der Kunde mit einfachen, leicht verständlichen Metriken konfrontiert, vergleichbar mit gängigen Bewertungssystemen. Numerisch gesehen geht es darum, die folgenden Prozessvariablen zu quantifizieren:

- Farbgenauigkeit
- Farbpräzision
- Farbharmonie

Die Genauigkeit bezieht sich darauf, wie nah eine Messung dem Zielwert kommt. Die Präzision bezieht sich darauf, wie nahe Messungen desselben Objekts beieinander liegen. Daher ist die Präzision unabhängig von der Genauigkeit. Schließlich bedeutet Farbharmonie die Bewertung der Farbunterschiede an den Kontaktpunkten zwischen Kunststoffteilen (normalerweise den Stoßfängern) und den Autokarosserien (normalerweise den Kotflügeln).

Wenn eine dieser Eigenschaften – Genauigkeit, Präzision oder Harmonie – nicht den Kundenerwartungen entspricht, kann die Farbe nicht als „in Ordnung“ erklärt werden. Oder etwa doch? Mit anderen

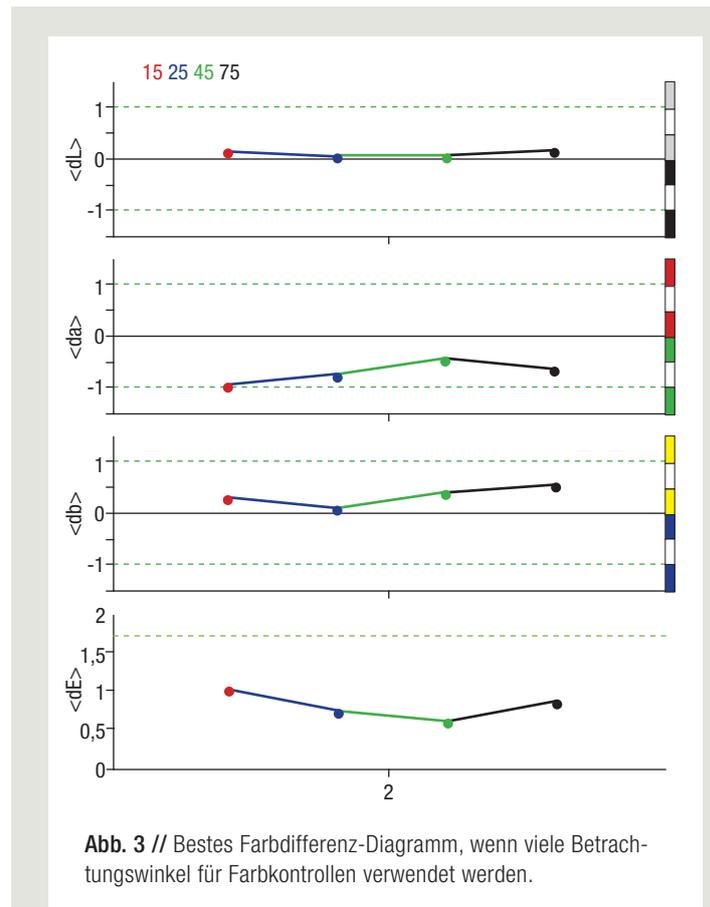


Abb. 3 // Bestes Farbdifferenz-Diagramm, wenn viele Betrachtungswinkel für Farbkontrollen verwendet werden.

Worten, um die einfache Frage „Wie gut läuft die Farbcharge in der Kundenlinie?“ zu beantworten, muss die Gesamtdefinition der Farbgenauigkeit, Präzision und Harmonie für eine multivariate Farbverteilung berücksichtigt werden. Auf diese Weise müssen die grundlegenden Eigenschaften im Messprozess statistisch abgeschätzt werden, einschließlich der Erkennung von Ausreißern oder Mischphasen zwischen zwei Farbchargen.

An diesem Punkt lässt sich die Komplexität der Antwort auf die einfache Frage zur Farbleistung erahnen: Die gemessenen Teile müssen identifiziert und einer entsprechenden Charge zugeordnet werden. Zudem muss die Streuung dieser Punkte um das Zentrum der Verteilung nach sorgfältiger Entfernung der Ausreißer im Prozess multivariat analysiert werden. Darüber hinaus sollte das Ergebnis in einer eindimensionalen Metrik festgelegt werden, die in äquidistanten Schritten auf einer einheitlichen Skala definiert ist.

Wenn es gelingt, diese Aufgaben zu bewältigen, lässt sich die Komplexität des Umgangs mit mehrdimensionalen Farbunterschieden als einfache Bewertung (Sterne, Prozentsatz oder nur eine Zahl von 1 bis 10 usw.) ausdrücken, wie es bei vielen anderen Prozessen schon gehandhabt wird. Dadurch wird die hohe Komplexität auf ein unkompliziertes eindimensionales Ergebnis reduziert.

Qualitätskontrolle

Die Komplexität auf ein eindimensionales Ergebnis zu reduzieren, ist nicht einfach. Die Aufgabe lässt sich dennoch heutzutage durch das Verknüpfen der Farbdaten aus dem Qualitätskontrolllabor (QC) mit den Informationen über die Chargenverwendung (bspw. Andockzeitpunkt) und den Ergebnissen in der Linie umsetzen. Diese Methode gibt dem QC-Labor die Möglichkeit, den Prozess zu überwachen und somit die Mittelwerte zu steuern (Abb. 4).

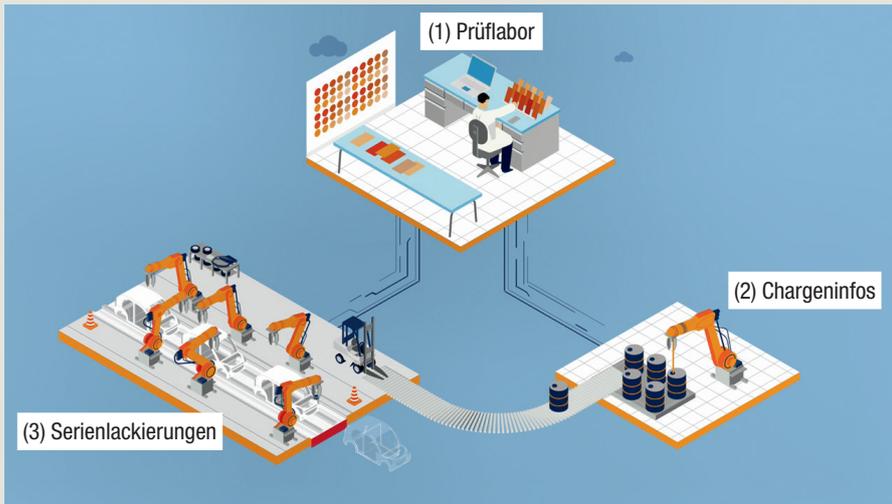


Abb. 4 // Schließen des Kreislaufs zur Produktoptimierung: Die Linienenergebnisse werden nach Ausreißerbereinigung in Echtzeit an das QC-Labor zurückgemeldet und einer bestimmten Charge zugeordnet.

Diese professionelle Überwachung gibt dem Lackhersteller die Möglichkeit, präventiv und proaktiv zu handeln, um das beste Ergebnis in kürzester Zeit zu erzielen und den besten Kompromiss für Farbgenauigkeit, Präzision und Harmonie zu finden.

Der vorgestellte Ansatz basiert grundsätzlich auf der Anzahl der Teile, die der Spezifikation entsprechen, die als Farbleistung (colorperformance, CP) quantifiziert wird. Die Berechnung des bereinigten Durchschnitts und der multivariaten Varianz der Messungen wird zur Berechnung der Einfärbungsleistung (tintingperformance, TP) verwendet, die das Ergebnis in der Linie auf der Grundlage der durchschnittlichen Linienergebnisse beschreibt. Entsprechend ist die Leistung der Linie (lineperformance, LP) als Farbvariation oder Präzision wie oben definiert.

Wenn der TP-Wert nicht gut genug ist, muss wahrscheinlich das QC-Sprühkabinenergebnis mit der Kundenlinie abgestimmt werden. Daher ist es sinnvoll, die Abstimmung mit jeder gelieferten Charge zu überwachen, um im Fall einer Abweichung proaktiv zu handeln. Dieser Abstimmungsparameter wird alignmentparameter (AP) genannt.

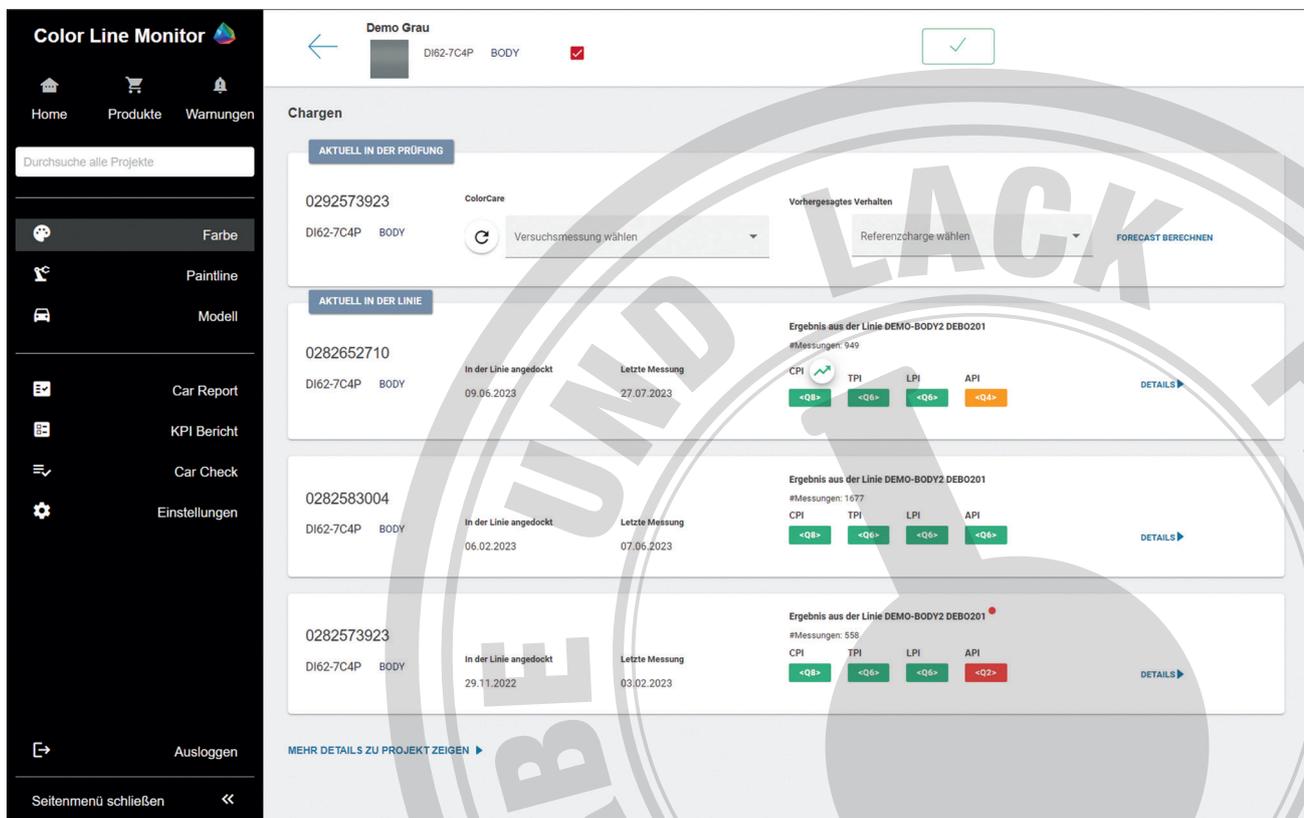


Abb. 5 // Monitoransicht der Leistung verschiedener Chargen desselben Produkts, die in verschiedenen Farblinien aufgetragen wurden.

Das endgültige Gesamtbild wird durch die Überwachung der Farbharmonie an den Kontaktpunkten mit dem Leistungsparameter (colorharmony, CH) erreicht. Zusammenfassend führen wir folgende Indikatoren für die Leistung ein, die sogenannten keyperformanceindicators (KPIs), ein:

- CPI ist der Indikator für die Farbperformance der Lackcharge. Anders gesagt, die wahrgenommene Farbqualität in der Kundenlinie (Anzahl der Teile innerhalb der Prüfspezifikation).
- TPI: Der tinting performance indikator zeigt die Güte des Spektralmittelwerts aller Linienfarbtonmessungen nach der multivariaten Ausreißerbereinigung einer Lackcharge bewertet zur Tonvorlage mit Chargentoleranzen. Eine maximale Bewertung erreicht man, wenn alle prüfrelevanten Messgeometrien innerhalb der Chargentoleranzen liegen.
- LPI: Der LPI zeigt die Farbmessschwankungen einer Lackierlinie nach der Ausreißerbereinigung.
- API: Dieser Index beschreibt die Übereinstimmung zwischen dem Lackiererergebnis bei Lackhersteller und Lackierstraße bei jeder Charge.
- CHI: Der CHI quantifiziert die Farbtonübereinstimmung zwischen Karosserie und Anbauteilen an den Anbindungspunkten.

Je besser die TPI ist, desto größer sind die erlaubten Linienvariationen (LPI), um eine Kundenzufriedenheit zu erreichen, die durch eine gute CPI abgebildet wird. Zur Vereinfachung der Interpretation der Ergebnisse wird zusätzlich eine Bewertungsskala von 1 (schlechtestes Ergebnis) bis 8 (bestes Ergebnis) festgelegt. Ohne auf die Details der Software einzugehen, ist in *Abb. 5* ein typischer Überblick über eine solche Linienüberwachung mit den oben genannten Leistungsindikatoren gezeigt.

Zusammenfassung

In diesem Artikel stellen wir unsere aktuelle Idee des erforderlichen digitalen Zwillings vor, um einen klaren Überblick über den gesamten Farbmanagementprozess bei der Einführung neuer Farben im Anwendungsfall von Automobilfarben zu erhalten. Selbstverständlich lässt sich ein ähnlicher Prozess auf andere Branchen anwenden, die nach dem in *Abb. 2* dargestellten Workflow arbeiten.

Die Idee, das Produkt und den Prozess auf digitale Weise darzustellen, ist zwar vielversprechend, aber nicht immer einfach umzusetzen. Obwohl man denken könnte, es ginge einfach darum, einige Farbunterschiede zu berechnen, sind wir der Meinung, dass viel Erfahrung erforderlich ist, um wirklich zu verstehen was passiert. Das Feedback aus der Kundenlinie muss verarbeitet und kondensiert werden, ohne Informationen zu verlieren, um die richtigen Entscheidungen präventiv bei der Feinabstimmung der nächsten Farbchargen vor der Lieferung an die Kundenlinie zu treffen. Daher ist es notwendig, statistische Schlüsselkennzahlen für die Chargenleistung mit bereinigter Trendanalyse zu berechnen, um die Ergebnisse ordnungsgemäß zu überwachen. Mit anderen Worten, ein Ampelsystem zu erstellen ist einfach, sicherzustellen, dass das Resultat die reale Welt repräsentiert, ist jedoch sehr anspruchsvoll.

Kontakt // carlos.vignolo@basf.com

Literatur

- [1] https://en.wikipedia.org/wiki/Digital_twin
- [2] Melgosa, M. et al.: Optical Society America OSA Feb 2014, Vol. 22, No. 3
- [3] Meichsner, G.; Hiesgen, R.: Technical paper presented at the European Coatings Congress, Nuremberg, Germany, March 18th/19th, 2013

DR. CARLOS VIGNOLO

ist PhD-Physiker mit über 30 Jahren internationaler Erfahrung als Leiter von Color und Quality Labs bei BASF in verschiedenen Ländern. Globale Implementierung von Prozessen und Methoden für die Pigmentierungsfindung als Projektmanager bei BASF Coatings. Diverse Patente und Publikationen zum Thema Farbmanagement.



DR. CHRISTOPH SCHULTE

ist nach der Promotion im Bereich der theoretischen Chemie 2018 an der RWTH Aachen bei BASF Coatings in der Abteilung Color Science and Technology beschäftigt und mit der Entwicklung digitaler Lösungen zur Farbqualitätskontrolle betraut. Seit 2023 verantwortet er die Entwicklung digitaler Lösungen für den Geschäftsbereich Global Automotive OEM Coatings Solutions.



Mehr zum Thema!



5 Ergebnisse für Farbmanagement!
Jetzt testen: www.farbeundlack.de/360