

Effektpigmente: Eine Herausforderung für die optische Messtechnik

Egbert Buhr*, Alfred Schirmacher**, Andreas Höpe***

Einleitung

Farbe ist für Menschen die wohl auffälligste subjektive Stoffeigenschaft. Bereits den Frühmenschen war diese visuelle Qualität bekannt, deren Wahrnehmung allen Primaten eigen ist. So wurde 2008 in Südafrika eine ca. 100.000 Jahre alte steinzeitliche „Malerwerkstatt“ entdeckt [1]. Auch heutzutage spielt Farbe in der Gestaltung unserer Umwelt eine wichtige Rolle. Jedes Jahr präsentiert uns die *Mode* die neuen *Farben* der Saison. Farben dienen zur Regelung des Verkehrs. Ohne bunte Farben wäre unsere Welt trist und öde.

Es ist wichtig festzustellen, dass Farbe ein physiologischer Sinneseindruck ist, wie z. B. auch Tasten oder Riechen. D. h. Farbe ist keine immanente physikalische Eigenschaft eines Gegenstandes, wie z. B. seine Masse oder Wärmeleitfähigkeit. Die physiologische Wahrnehmungskette ist hierbei folgende: Das vom betrachteten Gegenstand reflektierte Licht trifft auf das Auge und löst hierbei einen Farbreiz aus. Dieser Farbreiz beruht auf der spektralen Zusammensetzung des empfangenen Lichts, d. h. er ist abhängig von der verwendeten Lichtquelle und dem spektralen Reflexionsvermögen des betrachteten Objektes. Die Anregung der licht- und farbempfindlichen Zellen in der Netzhaut führt zu einer Farbvalenz, die über den Sehnerv an das Gehirn weitergeleitet wird. Die eigentliche Farbempfindung, die wir dann mit einem Gegenstand verknüpfen, entsteht erst im Gehirn [2]. Liegt z. B. eine Farbfehlsichtigkeit vor, so kann der Farbeindruck des betroffenen Menschen auch ein ganz anderer sein. Auch viele Tiere mit ihren teilweise erheblich abweichenden visuellen Systemen, nehmen Farbe ganz unterschiedlich als wir Menschen wahr. Im Folgenden soll mit Farbe immer die Körperfarbe, auch Gegenstandsfarbe, Objektfarbe, bzw. Oberflächenfarbe genannt, einer nicht selbstleuchtenden Fläche bezeichnet werden, die durch Reflexion von Licht an einem Körper entsteht.

Die genannten Zusammenhänge machen die mathematisch-physikalische Beschreibung von Farbe schwierig und aufwendig, da auch die spezifischen Eigenarten der menschlichen Wahrnehmungskette nachgestellt werden müssen.

Diesem Umstand wird versucht über die verschiedenen Farbmaßsysteme Rechnung zu tragen, welche die Farbe eines Objektes mithilfe von quantifizierbaren Zahlenwerten kennzeichnen [3].

Generell können farbige Flächen je nach Tageszeit und Lichteinfall sehr unterschiedlich wirken. Die Änderungen basieren hierbei auf der unterschiedlichen spektralen Zusammensetzung des Tageslichts und den winkelabhängigen Glanz- und Struktureigenschaften von Oberflächen. Ganz besonders deutlich ist dies bei auf dem Interferenzeffekt basierenden Effektpigmenten der Fall: Deren visuelles Erscheinungsbild, im englischen mit *Visual Appearance* bezeichnet, kann sich bei variierendem Beobachtungswinkel und unterschiedlichen Lichtverhältnissen komplett verändern. Man spricht hierbei von sogenannten Flop-Lacken, wobei man zwischen Hell-Dunkel-Flop und Farb-Flop unterscheiden kann [4].

Generell kann man sagen, dass Farbe und visuelle Effekte einen entscheidenden Anteil am Verkaufserfolg eines Produktes haben, denn Farben wecken Emotionen und verschiedene Neuromarketingstudien belegen, dass ca. 95 % aller Kaufentscheidungen emotional geprägt sind [5]. Deshalb spielt eine moderne Farbgestaltung unter Nutzung aktueller Effektpigmente im Produktdesign eine entscheidende Rolle, denn durch den Einsatz solcher Pigmente kann Gegenständen eine höhere Attraktivität verliehen werden. Daher findet man moderne Effektpigmente heutzutage in vielen, teilweise sehr unterschiedlichen Industrieprodukten, wie z. B. in Autolackierungen, Häuserfassaden, Kosmetikartikeln, oder sogar bei Pralines, wie dies in Bild 1 zu sehen ist.

Pigmente

Als Pigmente, aus dem Lateinischen kommend von *pigmentum* für „Färbestoff, Schminke“, bezeichnet man aus Teilchen bestehende, im Anwendungsmedium praktisch unlösliche Substanzen, die als Farbmittel oder wegen anderer spezieller physikalischer und chemischer Eigenschaften als funktionale Farbzentren verwendet werden [6].

* Dr. Egbert Buhr, Fachbereich „Bild- und Wellenoptik“, E-Mail: egbert.buhr@ptb.de

** Dr. Alfred Schirmacher, Arbeitsgruppe „Reflexion und Transmission“, E-Mail: alfred.schirmacher@ptb.de

*** Dr. Andreas Höpe † ehemals Arbeitsgruppe „Reflexion und Transmission“

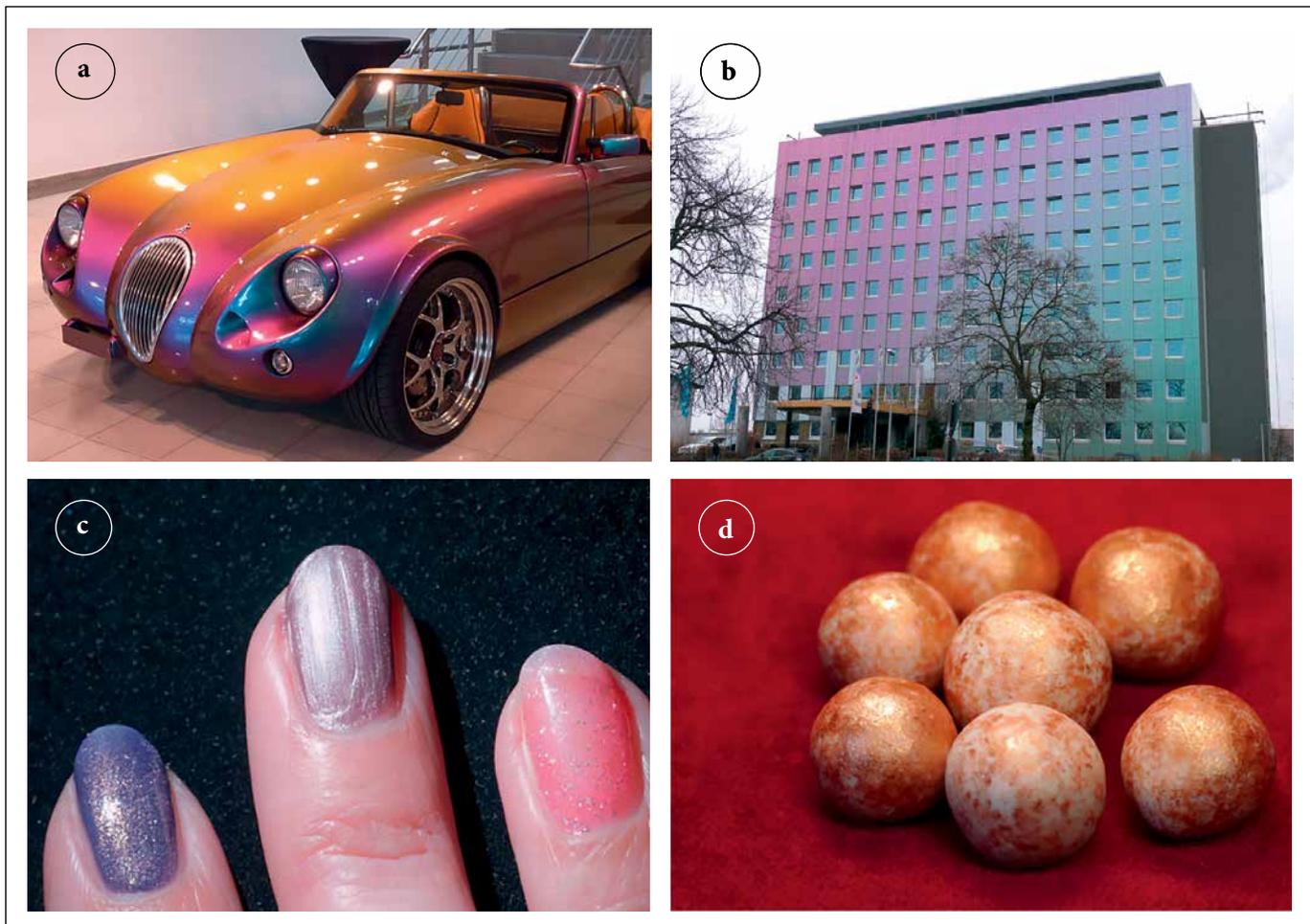


Bild 1:
 a) Roadster mit ChromaFlair®-Effektpigmentlackierung, b) Verwaltungsgebäude in Braunschweig verkleidet mit Alucobond®-spectra-colours-Verbundplatten, c) Effektpigmente im Nagellack, d) Praliné mit Effektpigmentüberzug

In der Natur vorkommende anorganische Pigmente sind schon seit prähistorischen Zeiten bekannt. Schon die Menschen der Steinzeit benutzen mineralische Pigmente für die ersten Höhlenzeichnungen. Sie erkannten, dass sie mit unterschiedlichen Erdsorten farbig malen konnten. Eisenoxidhaltige Erden liefern gelbrote bis braunrote, Kalk und Gips weiße, Manganoxide sowie Holz- und Knochenkohle schwarze Farbtöne.

Aus heutiger, industrieller Sicht ist ein Pigment ein fein aufgeteilter und unlöslicher Feststoff mit der Hauptfunktion, das Erscheinungsbild des verwendeten Mediums zu verbessern oder es zu färben. Pigmente werden dem Medium immer durch physikalisches Mischen beigegeben, dies unterscheidet sie von Farbstoffen, die in ihrem Medium löslich sind.

Pigmente können nach den optischen Prinzipien ihrer Wechselwirkung mit Licht unterschieden und in verschiedene Klassen eingeteilt werden. Wichtige Pigmentklassen sind Weiß-, Bunt-, Schwarz- und Effektpigmente, die alle wegen ihrer speziellen farbgebenden Eigenschaften eingesetzt werden. Bei den Effektpigmenten

kann in einer ersten, vereinfachten Einteilung noch zwischen Metalleffekt- und den sogenannten speziellen Effektpigmenten unterschieden werden.

Der Begriff „spezielle Effektpigmente“ umfasst die Gruppen der Perlglanzpigmente und der allgemeinen Interferenzpigmente, welche, insbesondere bei aktuellen Pigmententwicklungen, nicht scharf abgegrenzt werden können. Perlglanzpigmente sind Effektpigmente, die aus transparenten Plättchen mit hohem Brechungsindex bestehen. Sie erzeugen durch die spezielle Form der Mehrfachreflexion des transmittierten Lichts an mehreren Pigmenten einen perlenähnlichen Effekt, bei dem die auftreffende Strahlung verteilt reflektiert wird, wodurch der Eindruck einer mit der Tiefe abnehmenden diffusen Helligkeit entsteht. Für das Auge ergibt sich so eine scheinbar dreidimensionale Glanzcharakteristik, die aus der Tiefe des Objektes zu kommen scheint. Interferenzpigmente dagegen sind Effektpigmente, deren farbgebende Wirkung ganz oder vorwiegend auf dem Effekt der Vielstrahlinterferenz von Licht an dünnen, hochbrechenden Schichten beruht. Interferenzpigmente können dabei sowohl auf transparenten oder auch nichttransparenten Plättchen basieren.

Die heute verwendeten Pigmente lassen sich somit grob in fünf verschiedene Klassen einteilen:

- 1.) Weißpigmente: Die Pigmente streuen das gesamte auftreffende Licht nahezu verlustfrei in alle Richtungen durch diffuse, ungerichtete Reflexion.
- 2.) Buntpigmente: Die Pigmente streuen einen Teil des Lichtes diffus und absorbieren wellenlängenselektiv einen anderen Teil des Lichtes.
- 3.) Schwarzpigmente: Die Pigmente absorbieren alle Wellenlängen des für das menschliche Auge sichtbaren Spektralbereiches.
- 4.) Metalleffektpigmente: Die aus dünnen Metallplättchen, vorwiegend Aluminium, bestehenden Metalleffektpigmente sind lichtundurchlässig und reflektieren das gesamte auftreffende Licht durch spekulare, gerichtete Reflexion. Die Pigmentpartikel wirken dabei wie Mikrospiegel und führen bei paralleler Ausrichtung im Anwendungsmedium zu einem spiegelnden Metallglanz, dem Metallic-Effekt.
- 5.) Spezielle Effektpigmente: Perlglanz- bzw. Interferenzpigmente deren optische Wirkung auf der Mehrfachreflexion an überwiegend flächig ausgebildeten und ausgerichteten transparenten, semitransparenten oder lichtundurchlässigen Partikeln beruht.

Weiß-, Bunt- und auch Schwarzpigmente weisen typische Durchmesser im Bereich von 100 nm bis zu 1 µm auf. Ihre Größe liegt damit zum Teil im Bereich der Wellenlänge des sichtbaren Lichtes, welches den Bereich von 380 nm bis 780 nm überdeckt. Einige Schwarzpigmente wie z. B. Rußpigmente, liegen mit ihren Durchmessern jedoch auch zum Teil auch deutlich darunter. Effektpigmente besitzen dagegen Teilchendurchmesser, die zumeist im Bereich von 5 µm bis 100 µm, in einigen Fällen auch darüber, liegen. Sie sind damit, bezüglich der mittleren Plättchendurchmesser, wesentlich größer als die Wellenlänge des sichtbaren Lichtes. Die Dicke der Plättchen liegt, von einigen Ausnahmen abgesehen, unter 1 µm ebenso wie die Dicke der Interferenzschichten. Demzufolge weisen Effektpigmente in der Regel ein hohes Aspektverhältnis auf (Verhältnis der lateralen Ausdehnung einer Struktur zu ihrer Höhe), welches bis zu 200 betragen kann.

**Interferenzpigmente –
Wie die Farben entstehen**

Die Farbe von Interferenzpigmenten hängt von der Schichtdicke der Metalloxidbeschichtung und dem Einstrahlungs- und Betrachtungswinkel ab. Beide Parameter bestimmen die effektive optische Weg-

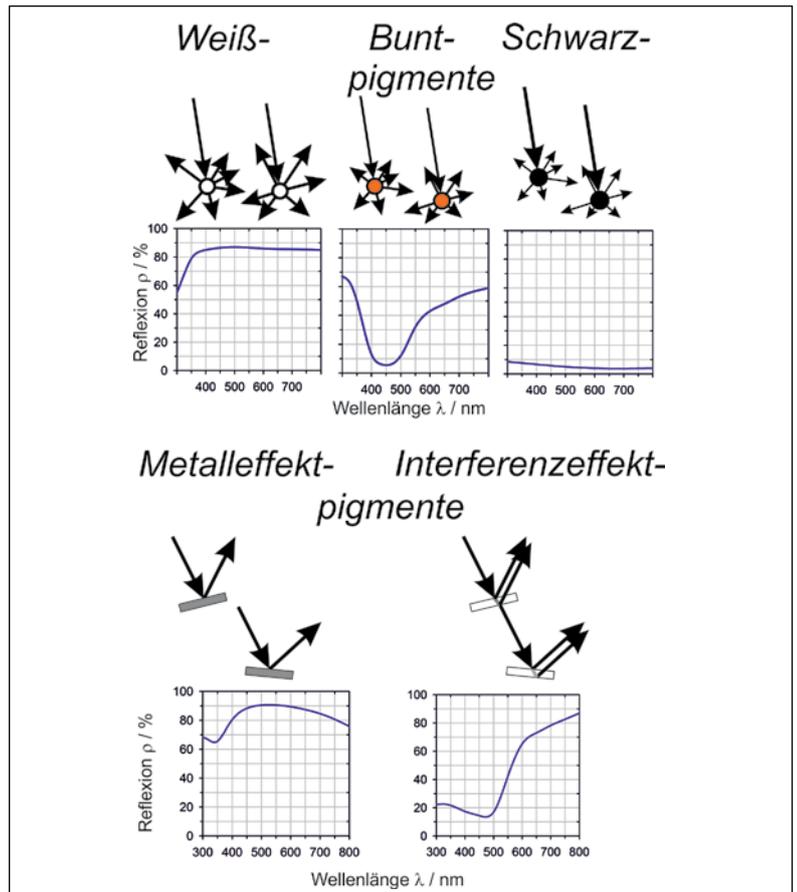


Bild 2: Schematische Diagramme zum spektralen Verhalten verschiedener Pigmenttypen

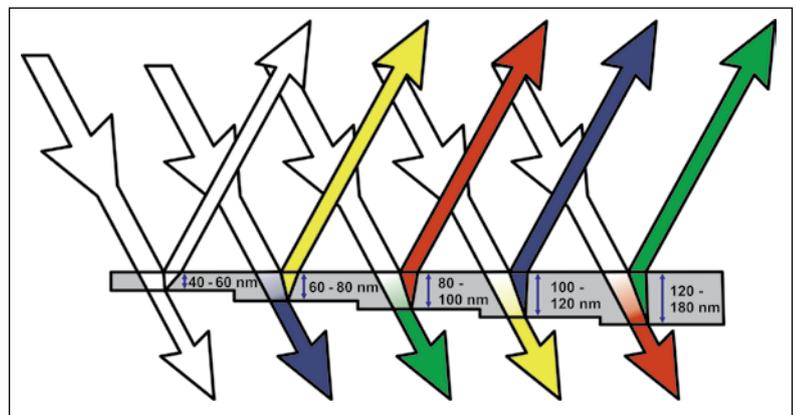


Bild 3: Die Schichtdicke der Metalloxidbeschichtung und der kombinierte Einstrahlungs- und Betrachtungswinkel bestimmen die optische Weglänge und somit die sich ergebenden Interferenzfarben in Reflexion und Transmission

längendifferenz für das einfallende weiße Licht zwischen oberer und unterer Grenzfläche und die somit auftretenden Interferenzfarben, siehe Bild 3.

Interferenzpigmente zeigen somit einen ausgeprägten „Farbflop“. Die Winkelabhängigkeit der Farbe wird hierbei auch als Goniochromasie bezeichnet. Richtig bunt geht es zu, wenn ein Interferenzpigment auf einen bereits bunten Untergrund aufgebracht wird. Die Transparenz der Pigmente lässt die Untergrundfarbe durch-

Bild 4:
Merck-Xirallic®-Solaris-Red-Effektpigmente appliziert auf einem mit Standard-Absorptionspigmenten hellblau lackierten Metallblech. In Richtung des Glanzwinkels auf der rechten Seite zeigt sich der langsame Aufbau der winkelabhängigen Interferenzfarbe.

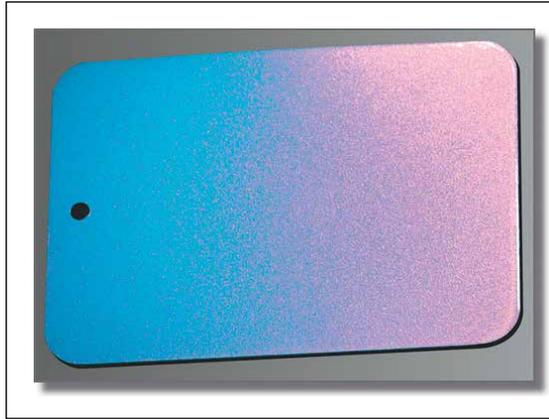


Bild 5:
Die Effekte Sparkling (1) und Coarseness (2) des Effektpigmentes Xirallic® Crystal Silver in einer vergrößerten Aufnahme auf weißem (links) und schwarzem Hintergrund (rechts).

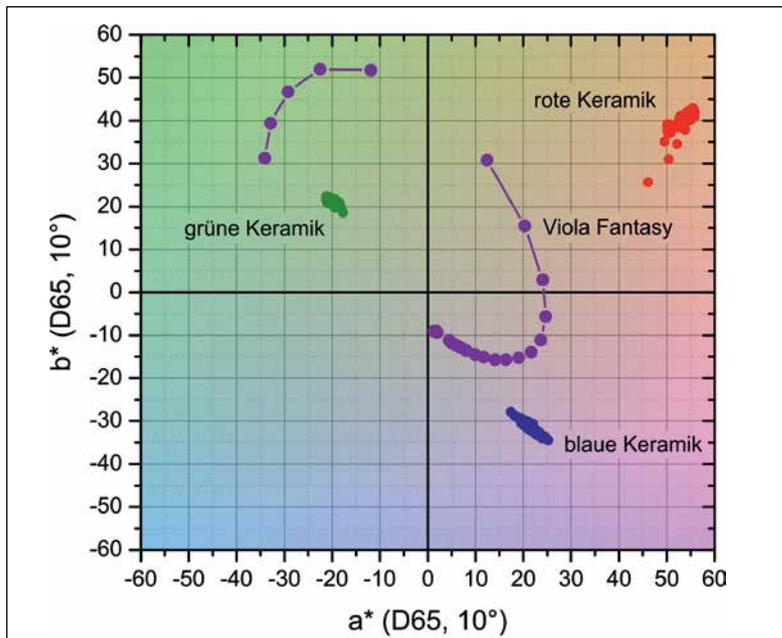
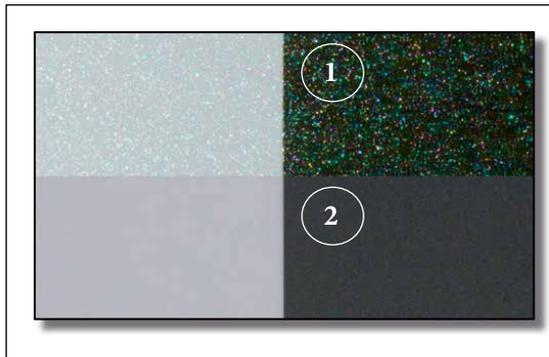


Bild 6:
CIELab Farbkoordinaten einer winkelabhängigen Reflexionsmessung an vier verschiedenen Proben: drei Keramiken der Farben rot, grün, blau und eine Effektpigmentlackierung mit Merck Colorstream® Viola Fantasy. Das untergelegte Farbschema zeigt näherungsweise die den Koordinaten entsprechende Farbe.

scheinen, im Glanzwinkel wird sie aber von der Interferenzfarbe überstrahlt, wie dies in Bild 4 zu sehen ist.

Der Effekt eines Helligkeitsunterschiedes unter verschiedenen Betrachtungswinkeln wird als Helligkeitsflop bezeichnet und ist an sich nichts Neues. Sind jedoch die einzelnen Pigmentteilchen

aufgrund ihrer planaren Reflexionsoberflächen in gerichteter Beleuchtung direkt beobachtbar, was für mittlere Teilchengrößen von 30 µm und größer der Fall ist, so ergibt dies einen Effekt, welcher mit dem Begriff *Sparkle* (Glitzern, Funkeln) bezeichnet wird (Bild 5). Ändert sich die Beleuchtung von einer gerichteten Einstrahlung, wie es an einem wolkenlosen sonnigen Sommertag der Fall ist, hin zu einer diffusen, ungerichteten Einstrahlung, wie an einem stark bewölkten Herbsttag, so verschwindet das Sparkling der Pigmente und verwandelt sich in eine Körnigkeit der Oberfläche. Dieses optische Phänomen wird als *Coarseness* (Bildkörnigkeit) bezeichnet und ist unabhängig vom Betrachtungswinkel (Bild 5).

Als neuer Archetypus des Sparkle-Begriffes haben sich in den letzten Jahren die Xirallic® Pigmente (*High Chroma Chrystal Effect Pigments*) der Firma Merck KGaA entwickelt. Durch die Beschichtung von Aluminiumoxidplättchen mit hochbrechenden Metalloxiden und einer optimierten Dicke und Ebenheit aller am Pigment beteiligten Schichten entstehen außergewöhnlich stark reflektierende Effektpigmente, die einen besonders intensiven Sparkle-Effekt aufweisen. Man spricht hierbei auch von sogenanntem *Living Sparkle*, welcher sich in einem scheinbaren „Tanzen“ der leuchtenden Punkte in der Probenoberfläche bei Veränderung der Beobachtungsgeometrie äußert [7, 8].

Generell gilt, dass die Farbe von Objekten mit Effektlackierung nicht mehr, wie jahrzehntelang üblich und ausreichend mit konventionellen Farbmessgeräten mit nur einer festen Messgeometrie, wie z. B. in der 45°:0° Geometrie (Einstrahlung unter 45°: Reflexionsmessung unter 0°), bestimmt werden kann. Dieser Umstand wird sehr gut durch die Grafik in Bild 6 illustriert. Dargestellt sind die winkelabhängig gemessenen Farbkoordinaten von drei verschiedenen keramischen Farbstandards der Farben rot, grün und blau, sowie eines mit dem Effektpigment Viola Fantasy der Firma Merck lackierten Blechs. Der Einfallswinkel des Lichts auf die Proben betrug hierbei immer 45° zur Oberflächennormalen. Das von den Proben reflektierte Licht wurde an 26 Positionen, in einem 5° Raster, in planaren, die Oberflächennormale enthaltenden Messgeometrien, im Winkelbereich von -70° bis +70° aufgenommen. Bei den aus absorptiven Pigmenten bestehenden Keramiken zeigt sich eine nur sehr geringe Winkelabhängigkeit der Farbe, welche größtenteils auf unterschiedlicher, winkelabhängiger Helligkeit, d. h. den Glanzeigenschaften der Oberfläche beruht. Das Effektpigment dagegen zeigt einen extremen winkelabhängigen Farb-Flop (Goniochromasie), welcher einen Farbverlauf von Grün über Rot-Gelb hin ins Blau-Violett bietet.

Aber auch die neuen Lackfarben aus der Gruppe der Effektlackierungen müssen messtechnisch

erfasst und rückgeführt werden, um eine gleichbleibende Qualität in der Produktion gewährleisten zu können. Gerade diese vielfältigen, zusätzlichen Eigenschaften stellen die Farbmess-technik vor neue Herausforderungen.

Farbmessung

Bisherige kommerzielle Farbmessgeräte charakterisieren Probenoberflächen fast ausschließlich in den eben schon erwähnten, sogenannten *in-plane* Reflexionsgeometrien. Dabei liegen die Richtungen des eingestrahlichten und des reflektierten Lichts, sowie die Oberflächennormale der Probe in einer Ebene. Diese Einschränkung entspricht jedoch in keiner Weise der täglichen Realität, bei der Oberflächen aus beliebigen Richtungen beleuchtet und betrachtet werden. Seitens der Messgerätehersteller und Anwender gibt es daher einen Trend zur erweiterten Charakterisierung bezüglich zusätzlicher Winkelkombinationen im dreidimensionalen Raum. Spitzenreiter dieser Entwicklung am Markt ist derzeit ein tragbares Mehrwinkel-Spektralphotometer mit insgesamt 19 verschiedenen Reflexionsgeometrien [9]. Hiermit scheint aber auch das Ende dieser Entwicklung im Bereich der portablen, handgeführten Geräte erreicht. Der Wunsch der Anwender geht aktuell wieder zurück zu einer geringeren Anzahl von Winkelkombinationen, denn es ist unklar, wie man aus dem Mehr an winkelaufgelösten Reflexionsdaten die für die Charakterisierung der Farbeigenschaften relevanten Informationen gewinnen kann. Daher stellt sich die Frage, welches sind „gute“, d. h. an die Messaufgabe adaptierte, optimal geeignete Messgeometrien?

Um diese Frage zu beantworten betreibt die AG 4.24 „Reflexion und Transmission“ der PTB zwei roboterbasierte Gonioreflektometer, die eine winkelaufgelöste Reflexionsmessung in beliebigen bidirektionalen Geometrien ermöglichen [10–12]. Diese beiden Apparaturen sind in Bild 7 dargestellt.

Das Standard-Gonioreflektometer ist hierbei das nationale Normal für die Messgröße spektraler Strahlendichtefaktor in gerichteten Geometrien. Es dient der Realisierung, Bewahrung und Weitergabe der gerichteten Reflexionsskala in Form von Kalibrierungen. Die zweite Apparatur, bezeichnet mit dem Acronym ARGon³ (*3D Appearance Robot-based Gonioreflectometer*), ist ein flexibles Forschungsgerät, mit dem experimentelle Untersuchungen u. a. im Rahmen des EMRP-Projektes *Multidimensional Reflectometry for Industry* der EU [13] durchgeführt werden. Im Vergleich zum Standard-Gonioreflektometer ist dieses Gerät mit einer photometrischen Leuchtdichtekamera und einer Zeilenkamera ausgerüstet. Die Leuchtdichtekamera erlaubt mit einer speziellen

Abbildungsoptik Messungen der orts aufgelösten Leuchtdichte auf einer Längenskala bis hinab zu 28 μm auf der zu untersuchenden Probe, siehe Bild 8.

Mit der Zeilenkamera sind Messungen von kompletten Reflexionsspektren im sichtbaren Spektralbereich zwischen 380 nm und 780 nm, dem sogenannten $V(\lambda)$ -Bereich, auf einer Zeitskala von 2 Minuten möglich. Hieraus lassen sich dann Farbkoordinaten der untersuchten Proben in den unterschiedlichsten Farbraumsystemen berechnen. Eine absolute Messung in 114 Winkelkombinationen (siehe Bild 9), im Polarwinkel-

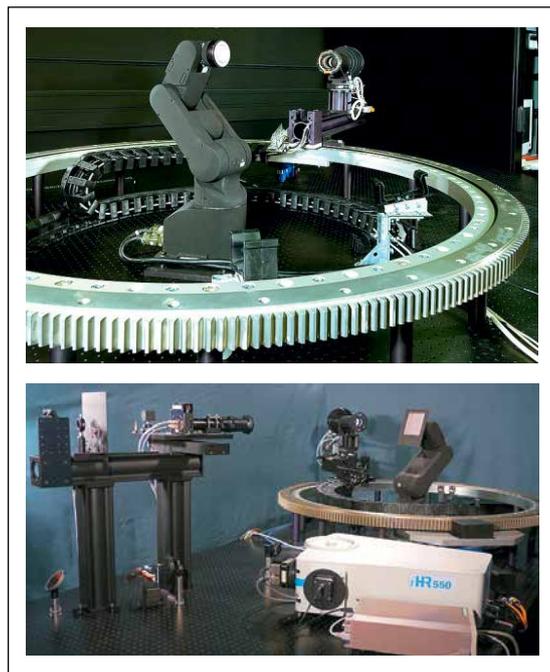


Bild 7: Die beiden roboterbasierten Gonioreflektometer der PTB, oben: Standard-Gonioreflektometer für Kundenkalibrierungen, unten: ARGon3-Messplatz für Forschungsanwendungen.

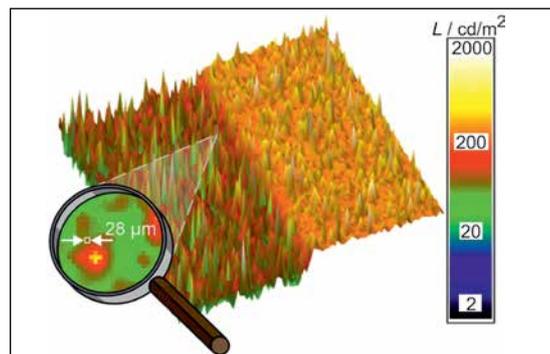


Bild 8: Visualisierung des Sparkling-Effektes von Xirona®-Volcanic-Sparks-Pigmenten als Falschfarbendarstellung der orts aufgelösten Leuchtdichte. Die „Nadeln“ zeigen die Position der Pigmente an.

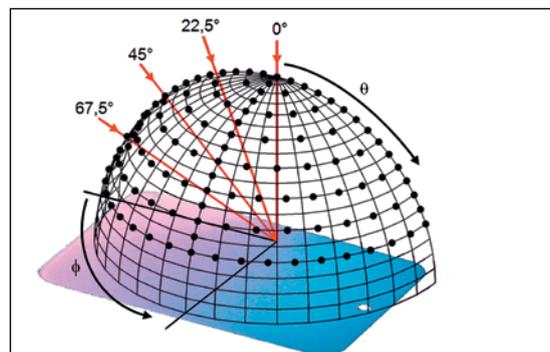


Bild 9: Beispielgeometrien zur Messung der winkelabhängigen Reflexionseigenschaften. Realisiert wurden 4 Einstrahlungsrichtungen (rote Pfeile) mit jeweils 114 Reflexionswinkeln (schwarze Punkte) im Bereich der Viertelkugel oberhalb der Probenoberfläche.

bereich 0° bis 70° gleichmäßig verteilt über den Viertelraum oberhalb der Probe dauert hierbei ca. 4 Stunden [14]. Die so erhaltenen Daten bilden die Basis für künftige Verbesserungen in der Messtechnik für Anwender und Hersteller.

Im Rahmen des EMRP-Projektes *Multidimensional Reflectometry for Industry* [13] sind damit die winkelabhängigen Reflexionsspektren von insgesamt 66 verschiedenen Effektpigmentproben gemessen worden [15, 16]. Bei den vier verschiedenen Einstrahlungsrichtungen, verbunden mit jeweils 114 Reflexionswinkeln im Bereich der Viertelkugel oberhalb der Probenoberfläche, ergeben sich somit über 30.000 Reflexionsspektren.

Zielsetzung der Untersuchungen ist die Verbesserung der Metrologie zur Materialcharakterisierung mit reduzierter Messunsicherheit. Dazu werden neue Messvorschriften und neue Standardmessartefakte entwickelt, mit denen die Industrie die visuelle Wahrnehmung der von ihr produzierten Oberflächen gezielt charakterisieren und kontrollieren kann. Solche Messungen sollten einfach auszuführen sein und die Ergebnisse müssen soweit wie möglich mit der visuellen menschlichen Wahrnehmung korrelieren. Im europäischen und internationalen Rahmen sollen die Ergebnisse in die Normung einfließen, um die allgemeine Vergleichbarkeit solcher Messungen zu gewährleisten.

Literatur

- [1] C.S. Henshilwood et al.; A 100,000-Year-Old Ochre-Processing Workshop at Blombos Cave, South Africa; *Science*; Vol. 334; No. 6053; 219–222; 2011
- [2] Mark D. Fairchild; *Color Appearance Models*; 2nd Ed.; John Wiley & Sons Ltd.; 2005
- [3] *Colorimetry: Understanding the CIE System*; ed. by J. Schanda; Wiley-Interscience NJ; 2007
- [4] W.R. Cramer; Der richtige Blickwinkel; *Farbe & Lack* 09/2006; 26–30; 2006
- [5] G. Zaltman; *How Customers Think: Essential Insights into the Mind of the Market*; Harvard Business Review Press; 2003
- [6] DIN ISO 18451-1:2015-11; Pigmente, Farbstoffe und Füllstoffe – Begriffe – Teil 1: Allgemeine Begriffe
- [7] W.R. Cramer; Ohne Glimmer, aber mit Glanz; *Farbe & Lack* 04/2003; 132–136; 2003
- [8] W.R. Cramer; Es glitzert wie am Sternenhimmel; *Fahrzeug + Karosserie* 04/12; 20–22; 2012
- [9] E. Kirchner, W. Cramer; Making sense of measurement geometries for multi-angle spectrophotometers; *Color Res. Appl.*, Vol. 37, No.3; 186–198; 2012
- [10] D. Hünerhoff, U. Grusemann, A. Höpe; New robot-based gonireflectometer for measuring spectral diffuse reflection; *Metrologia* 43; S11–S16; 2006
- [11] A. Höpe, D. Hünerhoff, K.-O. Hauer; Robot-based gonireflectometer; *Industrial Robotics: Programming, Simulation and Applications*; Low; Kin-Huat; Ed.; Pro Literatur-Verlag; Mammendorf; 623–632; 2007
- [12] A. Höpe, T. Atamas, D. Hünerhoff, S. Teichert, K.-O. Hauer; ARGon³ – „3D Appearance Robot-based Gonireflectometer“ at PTB; *Rev. Sci. Instrum.* 83(4); 045102-1–045102-8; 2012
- [13] European Metrology Research Program; Project IND52; „xD-Reflect“ Multidimensional Reflectometry for Industry; www.xdreflect.eu (letzter Aufruf: 03.12.2015)
- [14] T. Atamas, K.-O. Hauer, A. Höpe; Appearance measurements of goniochromatic colours; *Predicting Perceptions: Proceedings of the 3rd International Conference on Appearance*; 149–154; 2012
- [15] A. Höpe, A. Koo, F.M. Verdu, F.B. Leloup, G. Obein et al.; „Multidimensional reflectometry for industry“ (xD-Reflect) an European research project; *Proc. SPIE 9018; Measuring, Modeling, and Reproducing Material Appearance*; SPIE-IS&T/ Vol. 9018; 901804-1–901804-11; 2014
- [16] A. Höpe, K.-O. Hauer, S. Teichert, D. Hünerhoff, C. Strothkämper; Goniochromatic and Sparkle properties of effect pigmented samples in multidimensional configuration; *Proc. SPIE 9398; Measuring, Modeling and Reproducing Material Appearance 2015*; SPIE Proc. Vol. 9398 Appearance; 939800-1–7; 2015