

Online Farbmessung mittels bildgebendem Spektrometer

Kai-Uwe Vieth, Erich Enderle, Matthias Burkhard

Fraunhofer Institut Informations- und Datenverarbeitung (IITB)

Fraunhoferstr. 1, 76131 Karlsruhe

eMail: kai-uwe.vieth@iitb.fraunhofer.de

URL: <http://www.iitb.fraunhofer.de>

Zusammenfassung

Einsparpotenzial und häufigere Qualitätskontrollen waren die Motivation ColorControl zu entwickeln. Die Kombination von Bildverarbeitung und Spektroskopie erlaubt eine Farbmessung an Kunststoffgranulaten trotz Weißbruch, Schatten etc. statt an aufwändig gefertigten Messplättchen. Die Ergebnisse von ColorControl sind einerseits mit denen konventioneller Spektrographen vergleichbar und andererseits bezüglich ihrer Reproduzierbarkeit so gut, dass bereits einige Systeme im industriellen Einsatz sind. Das IITB ist derzeit dabei das Anwendungsfeld auch über das der Kunststofffarbmessung hinaus zu erweitern.

Aufgabe und Motivation

Beim Kauf von z. B. Lego-Steinen erwartet jeder wie selbstverständlich, dass die Farbe konstant ist. Eine Farbabweichung fällt sofort auf und würde den Käufer höchstwahrscheinlich zu einem Umtausch veranlassen oder er würde eine Preisreduktion verlangen.

Um den Anbieter vor genau dieser Problematik zu schützen, wird die Farbe der Ausgangs-, Zwischen- oder Endprodukte kontrolliert. Eine wirtschaftlich sinnvolle Prüfung erfolgt zu dem Zeitpunkt ab dem sichergestellt ist, dass sich die Farbe nicht mehr verändert. Das wäre bei Kunststoffen direkt hinter dem Extruder oder einen Schritt später, wenn das extrudierte Material granuliert wird. Unsere Messmethode setzt bei letzterem Schritt an und ist somit den bislang in der Industrie eingesetzten Messverfahren wirtschaftlich deutlich überlegen bei gleichwertiger Messqualität.

Zur Prüfung der Farbe wird üblicherweise aus dem Kunststoffgranulat ein Messplättchen geformt und dieses anschließend mittels Spektrometer vermessen. Für diesen Vorgang werden ca. 30-45 min benötigt währenddessen ggf. Ausschuss produziert wird. Das Fraunhofer IITB hat ein Verfahren entwickelt mit dem die Farbmessung bereits direkt am Granulat erfolgt, wodurch die Messzeit auf ca. zwei Minuten reduziert wird, die Häufigkeit der Messkontrollen erheblich erhöht werden kann und gleichzeitig der Ausschuss signifikant reduziert wird.

Farbe

Lange ist bekannt, dass sich jeder Farbeindruck durch das Mischen von drei unterschiedlichen Lichtern oder Farbanstrichen nachstellen lässt. Die für das Mischen erforderliche Menge einer jeden Primärfarbe hängt von der Empfindlichkeit des Empfängers ab. Aufwändige Untersuchungen unter festgelegten Prüfbedingungen wurden unabhängig voneinander von Guild und Wright durchgeführt. Gemessen wurde die Empfindlichkeit mit Hilfe von Spektralfarben wie folgt: Eine Hälfte eines zweigeteilten Beobachtungsfeldes wurde mit Licht einer Spektralfarbe, deren Wellenlänge sukzessive von 380 bis 780 nm geändert wurde,

beleuchtet. Die andere Hälfte wurde mit Licht beleuchtet, das sich aus drei unterschiedlichen monochromatischen Spektralfarben – rot (700,0 nm), grün (546,1 nm) und blau (435,8 nm) – zusammensetzt, wobei zum Nachstellen einiger Farben es notwendig war eine der Primärfarben der zu prüfenden Spektralfarbe hinzuzufügen [Berger-Schunn94]. Ergebnis war der 2° Normalbeobachter. Kurze Zeit später empfahl die CIE (Commission International de l'Éclairage) die Verwendung virtueller Primärfarben X , Y , Z , die sich nicht nachstellen lassen und deren Normspektralwertkurven $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ stets positiv sind und deren $\bar{y}(\lambda)$ Kurve mit der sogenannten Hellempfindlichkeitskurve des Auges übereinstimmt. Es ergibt sich folglich aus dem Produkt von Lichtquelle $S(\lambda)$, Reflexionskurve $R(\lambda)$ und Augenempfindlichkeit, in diskretisierter Form über den sichtbaren Wellenlängenbereich aufsummiert beispielhaft für X :

$$X = \sum_{380}^{780} S(\lambda) \times R(\lambda) \times \bar{x}(\lambda) \cdot$$

Aufgrund der Größe der Farbplättchen werden die Empfindlichkeitskurven des 10° Normalbeobachters verwendet. Details und Weiterentwicklungen sind in zahlreichen Werken beschrieben, z. B. in Ebner (2007), Lee (2005), Sharma (2003), Malacara (2002).

Farbkonstanz

Damit der Mensch Farbkonstanz bzw. Farbunterschiede nicht nur qualitativ, sondern auch quantitativ beurteilen kann, wurde 1976 von der CIE der L*a*b*-Farbraum empfohlen, da dieser den Forderungen der Gleichabständigkeit entspricht. Bei der Umrechnung von XYZ zu L*a*b* ist die Beleuchtungsart anzugeben und zu berücksichtigen. So wird in Europa meist die Normlichtart D65 verwendet. Im Gegensatz zu RGB wird bei L*a*b* die Helligkeit von der Farbinformation getrennt. Der euklidische Abstand ΔE im L*a*b*-Farbraum beschreibt Farbabweichungen und dient somit auch als Maß für die Gerätegenauigkeit. Dabei erreichen moderne Farbmeßgeräte für die Kurzzeitreproduzierbarkeit eine Genauigkeit von ca. 0,1 und eine Langzeitreproduzierbarkeit von 0,5. Im Weiteren wird nur die Kurzzeitreproduzierbarkeit betrachtet.

Konventionelle Farbmessung

Kunststofffarbmessungen werden in der Industrie auf konventionellem Wege mit Hilfe eines Spektrophotometers an Messplättchen durchgeführt. Für die Versuche am IITB wurde ein Minolta Spektrophotometer CM-3610 eingesetzt, welches typisch für Farbmessungen in der Industrie ist. Es besitzt eine d/8-Messgeometrie, d. h. das von der Xenon-Blitzlampe abgestrahlte Licht wird von der Innenwand der Ulbrichtschen Kugel diffus gestreut und beleuchtet die zu messende Probe gleichmäßig. Das von der Probe (Messblende auf 4-25 mm Ø einstellbar) unter einem Winkel von 8° zur Senkrechten reflektierte Licht durchläuft die Kammer für Transmissionsmessungen, wird dann vom optischen System zur Messung der Probe empfangen und auf den Sensor geführt, wo das Licht im Wellenlängenbereich von 360 bis 740 nm in Komponenten mit 10 nm Abstand

zerlegt und auf die Abschnitte der Sensorzeile projiziert wird. Mit dem vorliegenden Spektrophotometer sind Messungen mit Glanzeinschluss und Glanzausschluss möglich. Für die Kunststoffindustrie ist die Messung mit Glanzeinschluss von Interesse.

Farbmessung mit ColorControl

Die Herstellung eines Messplättchens benötigt ca. 30-45 min. Soll diese Zeit und der in dieser Zeit evt. entstehende Ausschuss nahezu vollständig eingespart

werden, muss die Farbe direkt am Granulat gemessen werden. Das bedeutet jedoch, dass ein Spektrophotometer, welches eine ebene gleichmäßige Fläche verlangt, nicht geeignet ist. Farbmessungen am Granulat erfordern die Berücksichtigung von unebenen Flächen, Schattenwürfen, Weißbrüchen und des Hintergrundes. Dies hat eine Sensorik zur Folge, die einerseits Bildverarbeitung ermöglicht und andererseits den vollen Umfang einer spektralen Datenverarbeitung bietet – eine Kombination, die das ColorControl vom IITB bietet.

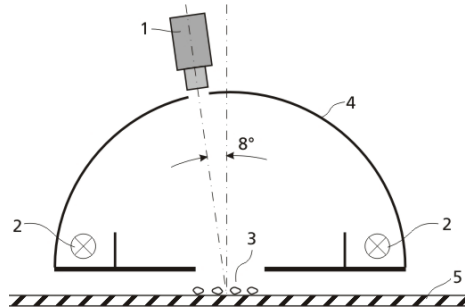


Abbildung 1 Schematischer Aufbau von ColorControl. 1: Bildg. Spektrograph, 2: Lampe, 3: Granulat, 4: Ulbricht-Halbkuugel, 5: Messtisch

Farbmessung mit RGB-Zeilenkamera

Zu Beginn der Entwicklung von ColorControl bestand die Idee die Farbe mittels RGB-Zeilenkamera zu bestimmen, da die Abteilung Sichtprüfsysteme des IITB, die ColorControl entwickelt hat, ausschließlich mit diesem Kamerateyp arbeitet. Dies wäre eine günstigere Alternative zum bildgebenden Spektrographen mit selbstverständlich dem Nachteil, wie aus der Farbtheorie bekannt, dass mit dem RGB-Farbraum nicht jede Farbe dargestellt werden kann. Während der Entwicklung haben sich die Anforderungen geändert, sodass eine höhere Messqualität gewünscht war und um die Farbe eindeutig mittels Pigmentzufuhr anzupassen, war und ist die Kenntnis der Spektralkurve vonnöten. Folglich wurde dieser Weg verworfen.

Aufbau von ColorControl

Der Aufbau von ColorControl ist dem des Minolta Spektrophotometers recht ähnlich, s. Abbildung 1. Das Granulat wird mit Hilfe einer speziell entwickelten, breitbandigen Beleuchtung über eine Ulbrichtsche Halbkuugel diffus und homogen beleuchtet. Die Sensorik ist ebenfalls unter 8° zur Senkrechten angebracht, unterscheidet sich jedoch vom konventionellen Spektrophotometer.

Die Datenaufnahme erfolgt an Hand eines bildgebenden Spektrographen. Dabei gelangt das reflektierte Licht einer Zeile durch ein Objektiv auf eine Beugungsoptik, um in schmalbandige, z. B. 5 nm, Wellenlängenbereiche aufgeteilt zu werden. Die

Ortsinformation der beleuchteten Zeile befindet sich auf der Horizontalen des zweidimensionalen Sensors. Die spektrale Information erstreckt sich über die Vertikale des Sensors, so dass mit einer Zeilenaufnahme beispielsweise 60 Bildzeilen für den Wellenlängenbereich von 400 bis 700 nm entstehen. Der prinzipielle Aufbau eines bildgebenden Spektrographen ist in Abbildung 2 dargestellt. Während einer Belichtung wird von der Szene lediglich eine Zeile aufgenommen. Die Szene, d. h. das Probenmaterial, fährt mittels Messtisch unterhalb der Ulbrichtschen Halbkugel kontinuierlich senkrecht zur Messzeile des bildgebenden Spektrographen. Aufgrund der Bewegung und kontinuierlichen Aufnahme entsteht ein zweidimensionales räumliches Bild. Das Datenvolumen enthält folglich in der dritten Dimension die spektrale Information.

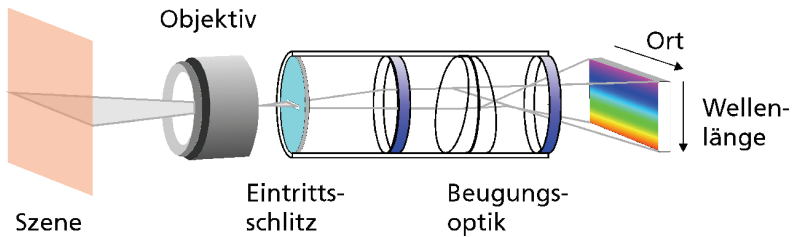


Abbildung 2 Schematische Darstellung eines bildgebenden Spektrographen

Messvorgang und Farbwertberechnung in ColorControl

Die Messung beginnt mit dem Auftragen der Granulate. Die Schüttdichte der Granulate soll immer ungefähr gleich sein, da Experimente gezeigt haben, dass sich die Schüttdichte, wenn auch nur gering, Einfluss auf das Ergebnis hat. Da es bei diesen Messungen auf relative und nicht absolute Farbwerte ankommt, ist der Einfluss der Schüttdichte, sofern konstant gehalten, vernachlässigbar.

Vor jeder Farbgranulatmessung wird eine Weißreferenzmessung durchgeführt. Anschließend werden die Granulate in gleichmäßiger Bewegung unter der Prüfzeile des bildgebenden Spektrographen hindurchgeführt. Aus den Spektren werden Bilder im XYZ-Farbraum berechnet. Hier findet die Bildauswertung statt. Zunächst werden Histogramme im XYZ-Raum bestimmt, bei der sämtliche Bildpunkte identifiziert werden, die die Bestimmung der Farbe negativ beeinflussen. In die Klasse der nicht auswertbaren Bildpunkte gehört beispielsweise der Hintergrund, Weißbruch oder Schattenbereiche auf den zylindrisch geformten Granulaten. Sämtliche Spektren, die durch die Klasse der auswertbaren Bildpunkte definiert sind, werden gemittelt und als $L^*a^*b^*$ -Wert berechnet. RGB-Bilder werden lediglich für den Anwender zur Darstellung am Monitor erzeugt.

Messgenauigkeit und Reproduzierbarkeit von ColorControl

Die Qualität der Farbmessungen mit ColorControl muss den Anforderungen der Kunststoffindustrie genügen, was wiederum bedeutet, dass Messergebnisse von

ColorControl mit denen herkömmlicher Spektrographen, wie sie in den Laboren der Koloristen eingesetzt werden, zu vergleichen sind. Insbesondere zwei Eigenschaften der Messungen sind von Interesse. Einerseits liegt das Augenmerk auf der Messgenauigkeit einer Farbe, andererseits gilt es die Farbe über einen längeren Zeitraum, mehrere Stunden bis einige Tage, reproduzierbar messen zu können. Sämtliche Messungen am Kunststoff sind stets in Bezug auf eine Referenzmessung von Interesse, d. h. relativ und nicht absolut, entweder gemessen am Messplättchen oder am Granulat.

In Abbildung 3 sind die Spektren von zwei herkömmlichen Spektrographen, Minolta CM-3610 und Gretag Macbeth ColorEye 7000A sowie dem ColorControl dargestellt. Die Messungen erfolgten an 12 BCRA-II Keramikkacheln (**British Ceramic Research Association**). Es ist zu erkennen, dass sämtliche Messungen über den gesamten Spektralbereich sehr gute Ergebnisse liefern. So liegt der Mittelwert sämtlicher Kacheln von ΔE für ColorControl und Minolta bei 0,75 ($\sigma=0,45$), der Mittelwert von ΔE für ColorControl und Gretag Macbeth bei 0,73 ($\sigma=0,45$) und der Mittelwert von ΔE für Minolta und Gretag Macbeth bei 0,71 ($\sigma=0,43$). Es ist zu erkennen, dass zwar geräteabhängige Unterschiede zwischen jeweils zwei Spektrographen bestehen, diese aber im Vergleich zu einem dritten Gerät sehr gut miteinander korrelieren.

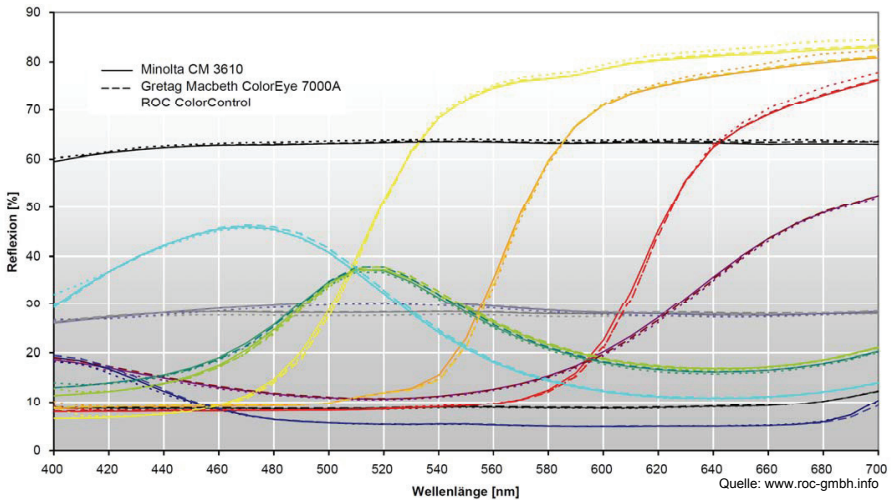


Abbildung 3 Spektrenvergleich an 12 BCRA-Kacheln

Das Ergebnis der Reproduzierbarkeit ist in Abbildung 4 anhand einer beigen Polypropylen (PP) Probe dargestellt. Hier wurde innerhalb von zwei Tagen 36 mal ein und dasselbe Granulat neu aufgeschüttet. Dabei betragen die Standardabweichungen $\sigma(\Delta L^*)=0,023$, $\sigma(\Delta a^*)=0,014$, $\sigma(\Delta b^*)=0,023$, $\sigma(\Delta E)=0,035$.

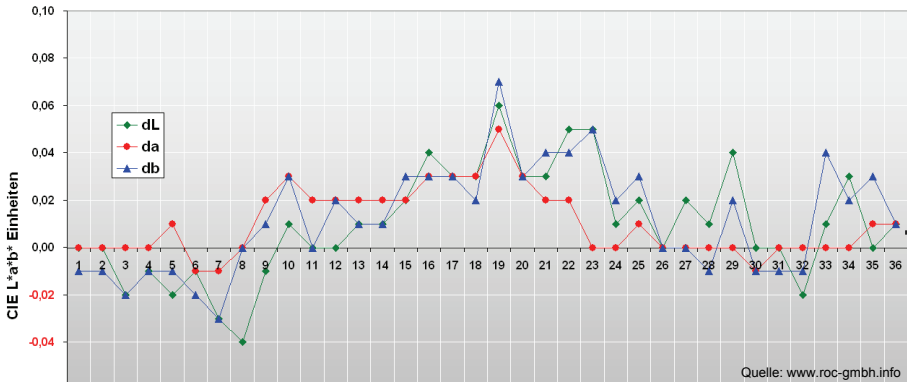


Abbildung 4 Reproduzierbarkeit mit 36 Neuaufschüttungen

Die Wiederholpräzision an typischen Granulaten wird für ColorControl mit $\Delta E < 0,2$ angegeben.

Anwendungsfelder von ColorControl

Ziel der Entwicklung von ColorControl war und ist die Farbmessung an Kunststoffgranulaten. In einem relativ konservativen Industriebereich beginnt sich ColorControl zu etablieren. Das Messprinzip ist nicht nur beschränkt auf Kunststoffgranulate, sondern auch für andere Schüttgüter geeignet, die sich nicht mit konventionellen Spektrographen bezüglich Farbe vermessen lassen. So zeigen sich erste Messungen an kristallinem Material sehr positiv, wodurch mit ColorControl bisherige aufwändige manuelle Farbmessungen von zukünftig schnellen und häufigeren Messungen ersetzt werden könnten. Wie uns mitgeteilt wurde, wäre ColorControl auch hinsichtlich konstanter Messqualität interessant, um Messfehler, die, trotz wohl definierter Vorgehensweise, durch unterschiedliche Handhabungen im Labor zustande kommen.

Literatur

1. Berger-Schunn, Anni (1994): Praktische Farbmessung, 2. überarb. Aufl., Göttingen, Zürich: Muster-Schmidt, ISBN 3-7881-4049-6
2. Ebner, Marc (2007): Color Constancy, Wiley, ISBN 978-0-470-05829-9
3. Lee, Hsien-Che (2005): Introduction to color imaging science, Cambridge University Press, ISBN 978-0-521-10313-8
4. Malacara, Daniel (2002): Color vision and colorimetry – Theory and applications, SPIE Press Monograph, Vol. 105, ISBN 0-8194-4228-3
5. Sharma, Gaurav: Digital color imaging handbook, edited by Gaurav Sharma, CRC Press LLC, ISBN 0-8493-0900-X