

Farbtonübereinstimmung bei Lacken aus dem Dekor- und Industrielackbereich.

Renate Hiesgen und Georg Meichsner, Hochschule Esslingen

Erschienen in Farbe und Lack 115, Heft 4 (2009), Seite 132 bis 135.

1 Einleitung

Gängige Qualitätsansprüche bezüglich des Erscheinungsbildes beschichteter Oberflächen machen die farbmetrische Qualitätssicherung von Farben notwendig. Häufig führen allerdings unterschiedliche Auffassungen über die Farbtonübereinstimmung und die Farbtonkonstanz zu Unstimmigkeiten zwischen Kunden und Lieferanten. Es darf auch nicht übersehen werden, dass aus kaufmännischem Interesse die Gelegenheit zur Reklamation gerne genutzt wird, wenn sich die Möglichkeit aufgrund leichter technischer Mängel bietet.

Seit langer Zeit verwendet man zur Abmusterung farbiger Oberflächen Farbton-Musterkarten, wie etwa die RAL-Farbkarten, den NCS-Farbfächer, das Munsell Book of Colors und andere. Nach aktuellen Diskussionen (s. F & L, 12/2008) soll in der vorliegenden Arbeit am Beispiel von RAL-Farben gezeigt werden, wie man die Streuung von Farbörtern schätzt und wie groß die zu erwartende Streuung der Farbörter handelsüblicher RAL-Farben ist.

2 Farbtonübereinstimmung bei Automobil-, Dekor- und Industrielacken

Lediglich für Automobillackierungen sind Farbtoleranzen genormt. Die DIN 6175-1 gilt für Unilackierungen [1]. Zahlreiche vor Gericht ausgetragene Auseinandersetzungen über die Farbtonübereinstimmung reparierter, also nachlackierter Karosserieteile mit dem Rest der Automobilkarosse führten bereits 1973 unter Federführung der Versicherungsgesellschaft Allianz zur Gründung eines Ausschusses „Erarbeitung der Zumutbarkeit von Farbdifferenzen bei Serien- und Reparaturlackierungen von PKW“, der die sogenannte *Allianznorm* (DIN 6175-1) erarbeitete. Diese Norm basierte ursprünglich auf der CIE-Farbtabelle. Die VdL-Richtlinie 10: „Zulässige Farbtoleranzen für unifarbene Pulverlacke bei Architekturanwendungen“ lehnt sich an diese Norm an [2].

2008 wurde DIN 6175-1 durch einen neuen Entwurf auf die DIN99-Farbabstandsformel [3] mit einem zugehörigen, für kleine Farbabstände gleichabständigen DIN99-Farbenraum umgestellt. In DIN 6175-1 von 2008 werden Farbabstände von $dE_{99} = 0,3$ für die Abnahme ausgelieferter Lackprodukte vorgeschlagen. Nach der Lackierung dürfen die verschiedenen Stellen eines Autos untereinander $dE_{99} = 0,45$ nicht überschreiten. Bei der Reparaturlackierung wird ein Farbabstand $dE_{99} = 0,6$ zur vorhandenen Lackierung akzeptiert, der bei einer optischen Trennung der lackierten Flächen durch Sicken, Zierleisten oder Hohlräume nochmals verdoppelt werden darf.

Im Dekor- und Industrielackbereich existiert keine Normung. Als Bezug verwendet man häufig die oben erwähnten Farbton-Musterkarten. Allenfalls bei größeren Chargen gibt es Vereinbarungen zwischen Kunden und Lieferanten über den einzuhaltenden Farbabstand. Allerdings ist in diesem Bereich die Situation auch völlig anders als beim Automobillack. Beim Kraftfahrzeuglack hat eine Automobilfirma eine überschaubare Anzahl von Lacklieferanten und auch von Standorten an denen lackiert wird, einschließlich der Zulieferer für Anbauteile. Dadurch ist es möglich, dass Arbeitsstandards zur Farbabmusterung mit einer relativ hohen Farbtontreue erstellt und an die Beteiligten in der Prozesskette verteilt werden. Sogar ein Abgleich von Farbmessgeräten mit derselben Master-Vorlage ist in dieser Situation möglich. Im Dekor- und Industrielackbereich hat ein Lacklieferant mitunter mehrere Zwischenhändler und eine kaum überschaubare Anzahl von Endkunden. In einer solchen Situation ist ein Abgleich von Messgeräten oder eine Belieferung mit „engen“ Arbeitsstandards nicht möglich.

Bei RAL-Farbkarten wird ein Farbabstand zum Urmuster von $dE^* < 0,5$ angegeben. Zu dieser dadurch vorgegebenen Streuung muss zusätzlich die durch die Präzision der Messgeräte vorgegebene Vergleichbarkeit (Inter-Instrument-Agreement) von $dE^* = 0,3$ hinzugerechnet werden. Zusätzlich hat man eine vom Lackmaterial und der Applikation abhängige Streuung von ca. 0,1 bis 0,5 zu berücksichtigen. Durch Aufsummieren dieser Streuungen erhält man eine Präzision von $dE^* = 0,9$ bis 1,3. Diese stellt die Untergrenze der möglichen Toleranz dar, eine höhere Präzision ist ohne zusätzliche Maßnahmen wie Abgleich unterschiedlicher Messgeräte und aufwändige Ermittlung von engen Farbtonstandards nicht möglich.

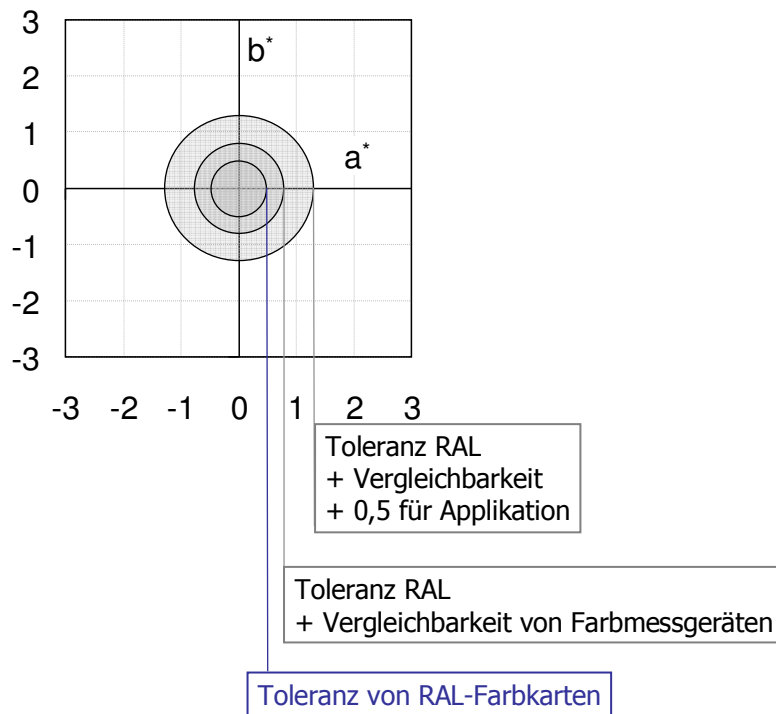


Abb. 1: Untergrenze der möglichen Toleranz – durch Aufsummieren der Präzision der RAL-Musterkarten und der Messgeräte sowie Streuung aus dem Lackierverfahren erhält man eine Präzision von $dE^* = 0,9$ bis $1,3$.

Der im CIELAB-System definierte Farbabstand dE^* ist jedoch wegen der nicht-Gleichabständigkeit des CIELAB-Farbraumes bei kleinen Farbabständen nicht besonders aussagekräftig. Der Farbabstand dE^* wird bei einem hellen Pastellton ganz anders empfunden, als bei dem entsprechenden brillanten Farbton. Zur Bewertung muss hier auf eine der bekannten Farbabstandsformeln zurückgegriffen werden.

3 Farbabstände und Toleranzräume

Große Farbabstände ($dE^* > 10$) lassen sich durch den CIELAB-Farbraum ausreichend gut beschreiben, bei kleineren ist CIELAB jedoch nicht mehr empfindungsgemäß gleichabständig. Bei $dE^* < 10$ benötigt man Farbabstandsformeln wie CMC, CIE 94 oder CIEDE2000, die den CIELAB-Farbraum in einem Mikrokosmos um den betrachteten Farbort nichteuklidisch verzerren, was die mathematische Behandlung kompliziert (s. Abb. 2). Daneben lässt sich die DIN99 Farbabstandsformel anwenden, die einen eigenen Farbraum besitzt.

Toleranzräume (CMC, CIE 94 und CIEDE2000) im CIELAB-Farbenraum sind Ellipsoide, deren Größe und Ausrichtung vom jeweiligen Farbort abhängig ist [4]. Der Farbabstand dE ist kein fester Wert, sondern von seiner Richtung und der Position des Farbortes abhängig.

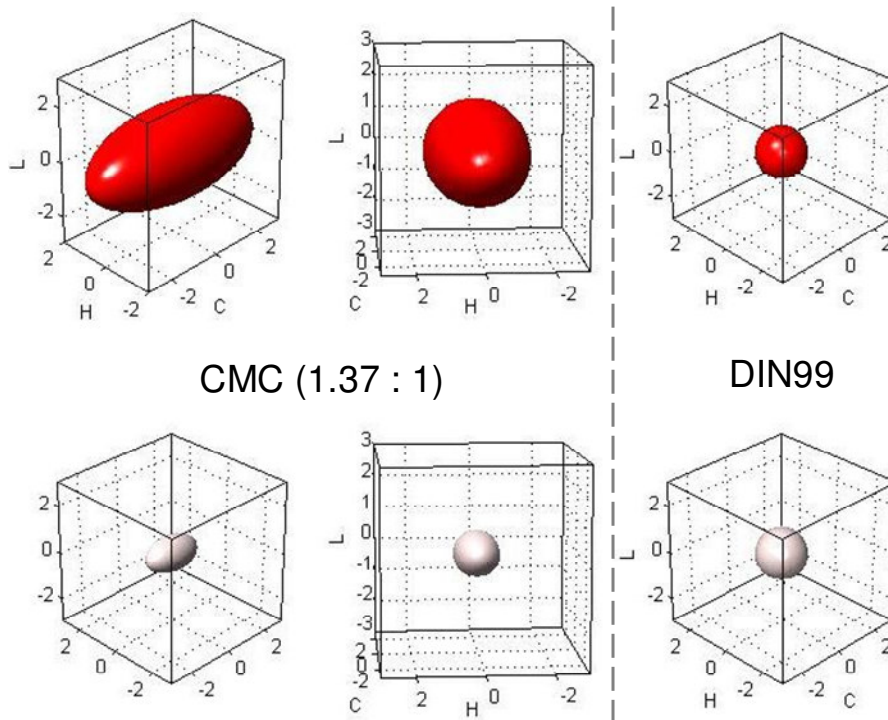


Abb. 2: Größe des CMC (1.37 : 1)- und des DIN99-Toleranzraumes in LCH-Koordinaten für dE_{CMC} bzw. $dE_{99} = 1$ bei einem pastelligen Rot (unten) und einem brillanten Rot (oben).

Toleranzräume in DIN99 sind dagegen kugelförmig und für alle Farbörter gleich groß (s. Abb. 2), der Farbabstand dE_{99} hat Vektorcharakter. Damit genügt die Angabe eines Wertes für dE_{99} . Trotz dieses Vorteils gegenüber dem CIELAB-Farbenraum findet die DIN99-Farbabstandsformel in der Praxis kaum Anwendung.

DIN99 bietet wegen der Vektordefinition des Farbabstandes nicht zu unterschätzende Vorteile bei der statistischen Prozesskontrolle (SPC) durch die Farbmeterik. Die Einführung der SPC wäre besonders bei der Erarbeitung von Farbtonmusterkarten aber auch zur Verbesserung der Qualitätskonstanz ein wichtiges Werkzeug. Da ein Farbabstand dort ausgehend von einem Bezug in alle Richtungen gleich ist, genügt es auf

Qualitätsregelkarten den Farbabstand zu einem Bezug sowie die Streuung zu überwachen.

4 Untersuchung handelsüblicher Lacke

Untersucht wurden handelsübliche RAL-Farbtöne, zu denen sechs bis zwölf Proben verschiedener Hersteller vorlagen. Dabei handelte es sich hauptsächlich um Industrielacke, aber auch um Dekorlacke (insgesamt 58, s. Tab. 1). Die Proben wurden durch mehrfaches Tauchen auf Musterkarten appliziert (der Untergrundeinfluss war dadurch ausgeschlossen).

Tab. 1: Untersuchte RAL-Farben

RAL Nr.	Bezeichnung	Anzahl Proben
1021	Rapsgelb	8
3000	Feuerrot	11
3003	Rubinrot	5
5010	Enzianblau	8
5014	Taubenblau	7
6002	Laubgrün	8
6005	Moosgrün	11

Die Farbabstände der Lackierungen zum Mittelwert der jeweiligen RAL-Farbe stellte man mit der DIN99-Farbabstandsformel dar. Der Mittelwert liegt dabei jeweils im Koordinatenursprung. Da in DIN99 die Größe des Toleranzraumes kugelförmig und nicht vom Farbort abhängig ist, lässt sich die Streuung aller von uns untersuchten Farbtöne in einer einzigen Statistik durch Betrachtung aller Farbtonabweichungen vom jeweiligen Mittelwert untersuchen. Dazu wurde das Prognoseellipsoid berechnet, in das im Mittel 95% aller untersuchten Farbabstände fallen (s. Abb. 3). Dieses Prognoseellipsoid stellt eine typische, zurzeit bei handelsüblichen Produkten auftretende Farbtonstreuung fest.

Zur Berechnung des Prognoseellipsoids bildet man zunächst die dreidimensionale Kovarianzmatrix V (Gl. 1).

$$\text{Gl. 1} \quad V = \begin{pmatrix} v_{11} & v_{12} & v_{13} \\ v_{21} & v_{22} & v_{23} \\ v_{31} & v_{32} & v_{33} \end{pmatrix}$$

Darin sind die Varianzen und die Kovarianzen der Messung enthalten, die auf fünf signifikante Stellen genau angegeben werden sollten.

Die Varianzen (Gl. 2, Gl. 3, Gl. 4) sind wie folgt definiert:

$$\text{Gl. 2} \quad v_{11} = \text{var}(a^*) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (a_i^* - \bar{a}^*)^2$$

$$\text{Gl. 3} \quad v_{22} = \text{var}(b^*) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (b_i^* - \bar{b}^*)^2$$

$$\text{Gl. 4} \quad v_{33} = \text{var}(L^*) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (L_i^* - \bar{L}^*)^2$$

Hierin bedeutet n die Anzahl der gemessenen Farbörter und \bar{a}^* , \bar{b}^* , \bar{L}^* die Mittelwerte der Farbkoordinaten.

Die bei der beobachteten Streuung vorhandene Abhängigkeit unter den Farbkoordinaten ist durch die Kovarianzen (Gl. 5, Gl. 6, Gl. 7) definiert:

$$\text{Gl. 5} \quad v_{12} = v_{21} = \text{cov}(a^*, b^*) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (a_i^* - \bar{a}^*) \cdot (b_i^* - \bar{b}^*)$$

$$\text{Gl. 6} \quad v_{13} = v_{31} = \text{cov}(a^*, L^*) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (a_i^* - \bar{a}^*) \cdot (L_i^* - \bar{L}^*)$$

$$\text{Gl. 7} \quad v_{23} = v_{32} = \text{cov}(b^*, L^*) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (b_i^* - \bar{b}^*) \cdot (L_i^* - \bar{L}^*)$$

Der Raum, in dem man bei einer Messung einen Farbort im Mittel mit der Vertrauenswahrscheinlichkeit $(1-\alpha)$ erwartet, ist ein Ellipsoid mit dem mittleren Farbort $(\bar{a}^*, \bar{b}^*, \bar{L}^*)$ als Zentrum. Die Gleichung dieses Prognoseellipsoids (Gl. 9) enthält die

Koeffizienten g_{ik} , die gleichzeitig die Elemente der zu V inversen Matrix $G = V^{-1}$ (Gl. 8) sind.

$$\text{Gl. 8} \quad G = V^{-1} = \begin{pmatrix} g_{11} & g_{21} & g_{31} \\ g_{12} & g_{22} & g_{32} \\ g_{13} & g_{23} & g_{33} \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} \text{Gl. 9} \quad & g_{11} \cdot (a^* - \bar{a}^*)^2 + g_{22} \cdot (b^* - \bar{b}^*)^2 + g_{33} \cdot (L^* - \bar{L}^*)^2 \\ & + 2 \cdot g_{12} \cdot (a^* - \bar{a}^*) \cdot (b^* - \bar{b}^*) + 2 \cdot g_{23} \cdot (b^* - \bar{b}^*) \cdot (L^* - \bar{L}^*) \\ & + 2 \cdot g_{13} \cdot (a^* - \bar{a}^*) \cdot (L^* - \bar{L}^*) \leq (n+1) \cdot \frac{F_{3;n-3;1-\alpha}}{n} \cdot \frac{(n-1) \cdot 3}{n-3} \end{aligned}$$

Durch das Prognoseellipsoid lässt sich die Streubreite einer Verteilung beschreiben. Innerhalb des Prognoseellipsoids liegen im Mittel $100 \cdot (1 - \alpha)\%$ der Grundgesamtheit. Zur Schätzung seiner Größe verwendet man die F-Verteilung [5]. Abweichend davon wendet man in DIN 55600 zur Schätzung der Signifikanz von Farbabständen die Chi-Quadrat-Verteilung an [6]. Dies ist jedoch nur bei bekannter und nicht bei geschätzter Kovarianzmatrix zulässig, also wenn beispielsweise die Streuung der Farbörter als bekannt vorausgesetzt werden kann. Dies kann bei einer Pigmentproduktion angenommen werden, bei der die Prozesslage stabil ist und die Streuung aus sehr vielen Produktionschargen ermittelt wurde. Im hier vorliegenden Fall ist die Kovarianzmatrix aus einer Stichprobe mit 58 Proben geschätzt, weshalb die Fisher-Verteilung angewandt werden muss.

Die Prognoseintervalle für die Koordinaten einer weiteren Messung sind festgelegt durch Gl. 10, Gl. 11 und Gl. 12.

$$\text{Gl. 10} \quad \bar{a}^* \pm \sqrt{(n+1) \cdot \frac{v_{11}}{n} \cdot F_{3;n-3;1-\alpha} \cdot \frac{(n-1) \cdot 3}{n-3}}$$

$$\text{Gl. 11} \quad \bar{b}^* \pm \sqrt{(n+1) \cdot \frac{v_{22}}{n} \cdot F_{3;n-3;1-\alpha} \cdot \frac{(n-1) \cdot 3}{n-3}}$$

$$\text{Gl. 12} \quad \bar{L}^* \pm \sqrt{(n-1) \cdot \frac{v_{33}}{n} \cdot F_{3;n-3;1-\alpha} \cdot \frac{(n-1) \cdot 3}{n-3}}$$

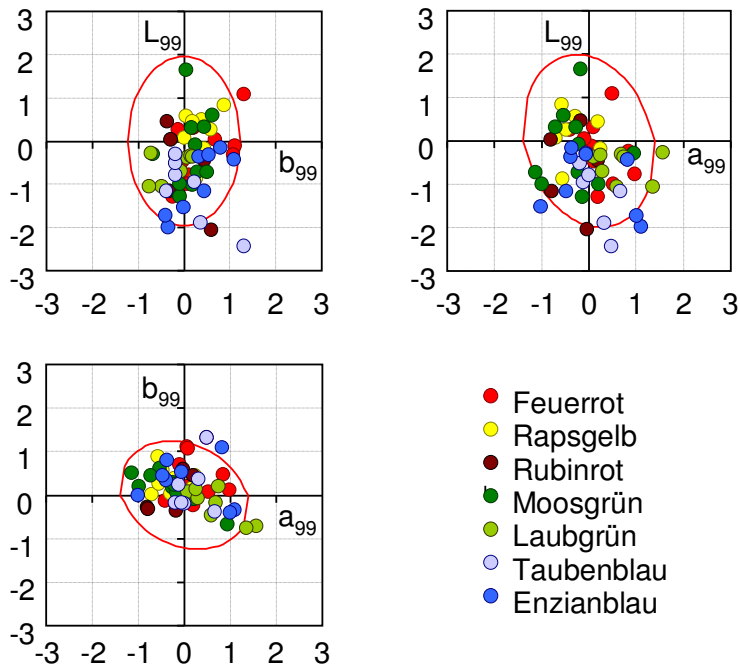


Abb. 3: Streuung der Farbörter von handelsüblichen Lackmustern von RAL-Farben und Projektionen des Prognoseellipsoids in die Ebenen des DIN99-Koordinatensystems (rote Kurve), in dem im Mittel 95% der Farbörter der RAL-Farbtöne erwartet werden.

Bei einer dreidimensionalen Darstellung des Prognoseellipsoids der untersuchten RAL-Farben erkennt man ein Ellipsoid mit zwei etwa gleich langen kurzen Halbachsen und einer nicht ganz doppelt so langen Halbachse, die annähernd parallel zur Richtung der Helligkeitsachse verläuft. Man kann von einer annähernd stochastischen Streuung ausgehen.

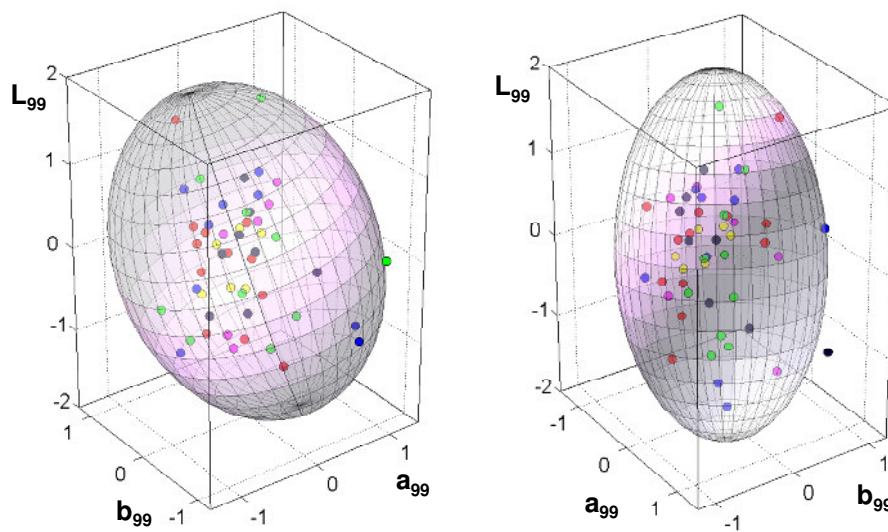


Abb. 4: Dreidimensionale Darstellung des Prognoseellipsoids marktverfügbarer RAL-Farben

5 Vergleichbarkeit und Streuung

Tab. 2: Prognoseintervalle aus der DIN99 Farbabstandsformel bei geschätzter Kovarianzmatrix.

	+	-	Δ
da_{99}	1,40	-1,40	2,79
db_{99}	1,23	-1,23	2,45
dL_{99}	1,97	-1,97	3,94

Ein sinnvoll festgelegter dE_{99} hätte einen Wert, der der längsten Halbachse der Statistik entspricht. 95% aller handelsüblichen Proben lägen in diesem Toleranzraum.

Der kleinste Wert für dE_{99} wäre der, den man durch Aufsummieren der Messunsicherheiten erhält, nämlich $dE_{99} = 0,9$ bis $1,3$. Das ist die Streubreite, mit der man rechnen muss, wenn man RAL-Farbtöne mit Farbtonkarten abmustert. Eine zwischen

Kunde und Lieferant festzulegende Spezifikation für eine Farbe sollte also nicht kleiner als $dE_{99} = 1,3$ und nicht größer als 2,0 sein.

Vergleicht man die Messunsicherheit des Prozesses mit dem Prognoseellipsoid aus der Messung marktverfügbarer RAL-Farben, so stellt man fest, dass die Streubreiten in ähnlich groß sind (Tab. 2). Die aufgrund der Messunsicherheiten erwartete Streuung tritt tatsächlich auf, sie ist der Stand der Technik bei den Farbtoleranzen der RAL-Farben.

Enger gefasste Farbtoleranzen lassen sich nur mit zusätzlichem Aufwand erzielen. Zu den zusätzlichen Maßnahmen, die getroffen werden müssen, gehört die Messgeräteüberwachung, der Abgleich von Messgeräten, die Verwendung von Master-Standards, die regelmäßig auf den zur Abmusterung verwendeten Messgeräten als Standard eingelesen werden. Da ein solcher Aufwand mit zusätzlichen Kosten verbunden ist, wird er sich nur bei Produkten lohnen, für die dieser Aufwand bezahlt werden kann. Auf jedem Fall muss einem Kunden klargemacht werden, wie präzise sich ein von ihm gewünschter Farbton einstellen lässt. Kleinere als die oben ermittelten Farbtoleranzen sind ohne diesen zusätzlichen Aufwand lediglich Wunschdenken. Ein Lackhersteller ist mit dem Handwerkszeug der SPC in der Lage auch eine engere Toleranz einzustellen. Ein Kunde muss den dafür betriebenen Aufwand auch bezahlen. Bei Kenntnis der im Prozess auftretenden Streuung wären die Risiken für alle Beteiligten kalkulierbar.

6 Literatur

[1] DIN 6175-1: „Farbtoleranzen für Automobillackierungen – Teil 1: Unilackierungen“, Juli 1986, vorgesehener Ersatz durch den neuen Entwurf vom April 2008.

[2] VdL-Richtlinie 10, „Zulässige Farbtoleranzen für unifarbene Pulverlacke bei Architekturanwendungen, VdL-Richtlinie Farbtoleranzen“, Ausgabe April 2003, Verband der deutschen Lackindustrie e.V., Karlstraße 21 60329 Frankfurt am Main, <http://www.lackindustrie.de>.

[3] DIN 6176: „Farbmetrische Bestimmung von Farbabständen bei Körperfarben nach der DIN99-Formel“, März 2001.

[4] L. Gall: „Farbmetrik und Farbrezeptierung“ in H. Kittel, Lehrbuch der Lacke und Beschichtungen, Bd. 5. (Hrsg.: J. Spille), S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 2003.

[5] I. N. Bronstein, K. A. Semendjajew, G. Musiol und H. Mühlig, Taschenbuch der Mathematik, 6. Aufl., Verlag Harri Deutsch, Frankfurt, 2005.

[6] DIN 55600: DIN Prüfung von Pigmenten - Bestimmung der Signifikanz von Farbabständen bei Körperfarben nach der CIELAB-Formel, März 2008.