

Einführung in xDNA

Hintergrund

Zwei physikalische Phänomene, die das Verhalten einfallender Lichtwellen bestimmen, können genutzt werden, um die Beschaffenheit eines Mediums (oder einer Beschichtung) messtechnisch zu erfassen. Das erste Phänomen ist die Tatsache, dass alle Medien dispersiv sind. Dies bedeutet, dass ihre Fähigkeit, auftreffendes Licht zu brechen, (die so genannte Brechzahl) von der Wellenlänge des Lichts abhängt, sich also beispielsweise zwischen blauem (400 nm) und rotem Licht (700 nm) unterscheidet. Die wahrgenommene Farbe des Mediums (also seine Absorptionsfähigkeit) hat hierauf keinen Einfluss. Auch ein als schwarz oder glänzend wahrgenommenes Medium (wie etwa ein Spiegel) weist Dispersion auf, da das Licht nicht direkt an der Oberfläche, sondern im Medium reflektiert oder absorbiert wird.¹ Das zweite Phänomen ist die Streuung des Lichts in einem Medium. Dieses Verhalten lässt sich auf unterschiedliche Weise beschreiben, hängt jedoch wiederum von der Wellenlänge des Lichts ab. Blaues Licht wird anders gestreut als rotes.

Alle Medien streuen Licht in gewissem Maße, selbst durchsichtig erscheinendes Glas. Das von einem Medium (oder einer Beschichtung) gestreute Licht lässt sich mit einem hochempfindlichen Spektrofotometer messen. Die winzigen Abweichungen zwischen den Streupunkten des blauen und roten Lichts geben Aufschluss über die Beschaffenheit des Mediums. Wichtig ist in diesem Zusammenhang auch, dass Energie nicht verloren geht. Ist man mit den Eigenschaften der Lichtenergie vertraut, so kann man äußerst komplexe Untersuchungen an einem Medium vornehmen, indem man das zurückgeworfene Licht und dessen Eigen-

schaften misst. Wenn Licht auf ein Medium trifft, wird es reflektiert, gebrochen, gestreut oder absorbiert, in jedem Fall aber bleibt seine ursprüngliche Energie erhalten.²

Das vielleicht einfachste anwendbare Modell ist die so genannte Effective Medium Theorie die auf dem Elektromagnetismus beruht. Sie besagt, dass ein Medium unabhängig von seiner Komplexität als homogene Einheit betrachtet werden kann. Beispielsweise lässt sich eine Lackierung aus 3 Schichten und 9 Inhaltsstoffen beschreiben, als handle es sich um eine einzige Substanz. Dabei arbeitet man mit einem Mittelwert der Inhaltsstoffe, die nach ihrer Verteilung durch die Schichten, nach der Stärke der Schichten und der Beschaffenheit der dazwischen liegenden Grenzflächen gewichtet werden. Das Streuverhalten einer Beschichtung wird durch ihre Rezeptur, d. h. die Mischformel und den Schichtenaufbau, bestimmt. Ändert sich die Rezeptur, und damit etwa die Partikelverteilung bei gleichbleibender mittlerer Partikelgröße, so ändert sich auch das Streuverhalten.

¹ Letztlich geht es hier um die Permittivität (Dielektrizitätskonstante) des dispersiven Mediums. Die komplexe Brechzahl (Brechung + Absorption) verhält sich proportional zur Quadratwurzel der Permittivitätszahl.

² In diesem Bereich spielen noch zahlreiche weitere physikalische Phänomene, wie etwa die Polarisation, eine Rolle, deren Erörterung an dieser Stelle aber zu weit führen würde. Der Sonderfall der Interferenz wird nachfolgend im Zusammenhang mit Effektpigmenten behandelt.

Unter Anwendung der Effective Medium Theorie kann man das Streuverhalten von Licht relativ einfach beschreiben, indem man den Streuabstand im Verhältnis zum Ausstrahlungspunkt auf dem Medium in einem Koordinatensystem abbildet. Die Streuweite in eine bestimmte Richtung (vorwärts, rückwärts oder seitlich) lässt sich als Vektor darstellen, dessen Betrag vom Anteil der Lichtenergie abhängt, die nicht absorbiert, sondern reflektiert (gestreut) wird. Indem man eine solche Rechnung für jede Wellenlänge vollzieht, lässt sich das dispersive Verhalten des Mediums bestimmen. Ein Medium, das alle Wellenlängen gleichmäßig in alle Richtungen streut, wird als ideal diffus bezeichnet. Diese Eigenschaft erreicht der Werkstoff Spectralon™ in hohem Maße. Gut präpariert erscheint er unter allen Beleuchtungsgeometrien und Beobachtungswinkeln als diffus weiß, und auch bei sehr flacher Lichteinstrahlung kommt es zu keinem Glanzeffekt. Am einfachsten lässt sich das Streuverhalten in verschiedene Richtungen erfassen, indem man für jede Wellenlänge unter jedem Beobachtungswinkel einen gebundenen Vektor von der Mitte des Mediums zum Sensor des Messgeräts zeichnet. Der Betrag des Vektors entspricht der gemessenen Energie. Summiert man nun Wellenlänge für Wellenlänge die Vektoren der einzelnen Beobachtungswinkel, so erhält man einen Gesamtvektor pro Wellenlänge. Dieses Verfahren der Vektoraddition unter Anwendung der Effective Medium Theorie bezeichnen wir als „X-Rite Digital Numerical Analysis“ (xDNA™). Es wird nachfolgend näher erläutert.

xDNA

xDNA ist ein mathematisches Verfahren, mit dem Spektraldaten mehrerer Messwinkel in einem zwei- oder dreidimensionalen Diagramm dargestellt werden. Die Vektoren der einzelnen Winkel werden jeweils nach dem Reflexionsfaktor gewichtet und addiert. So entsteht eine Folge von Koordinatenpunkten im zwei- oder dreidimensionalen Raum, von denen jeder einer Wellenlänge des Lichts entspricht.

Die gewichtete Vektorsumme wird außerdem um die Vektorgesamtlänge einer ideal weißen Lambertschen Fläche skaliert, um hinreichende Vergleichbarkeit mit typischen Reflexionswerten zu gewährleisten. Das xDNA-Koordinatensystem umfasst die Glanzrichtung (z-Achse), die zur Glanzrichtung orthogonale Projektion der Beleuchtungsrichtung (y-Achse) sowie das Kreuzprodukt beider Richtungen (x-Achse).

Zur Beschreibung einer Messrichtung dienen:

- der Beleuchtungswinkel im Verhältnis zur Normalen,
- der zum Glanz versetzte Messwinkel („aspecular angle“ oder Effektwinkel) und
- der Messwinkel im Azimut zur Beleuchtungsrichtung.

Bei der Angabe einer Messrichtung werden die Winkelmaße durch „as“ und „az“ getrennt. Eine mit einem Beleuchtungswinkel von 45°, einem Effektwinkel von 25° und einem Azimutwinkel von 90° vorgenommene Messung würde beispielsweise als „45as25az90“ bezeichnet. Die xyz-Koordinaten der Messrichtung ψ as Φ az θ sind demzufolge $(\sin(\Phi) \cdot \sin(\theta), \sin(\Phi) \cdot \cos(\theta), \cos(\Phi))$.

Beispiel einer xDNA-Messung

Tabelle 1 zeigt die Spektraldaten und entsprechenden xDNA-Koordinaten einer gemessenen Farbprobe.

Tabelle 1: Spektraldaten und zugehörige xDNA-Koordinaten aus 10 Messwinkeln

WL	45as-15az0	45as15az0	45as25az-90	45as25az0	45as25az90	45as45az0	45as60az-54.7	45as60az54.7	45as75az0	45as110az0	x	y	z
400	34.1	98.5	8.1	43.2	6.9	4.8	1.5	1.4	1.3	1	-0.08	5.62	24.89
410	28.6	75.9	5.4	40.9	4.8	6.5	1.5	1.4	1.5	1	-0.04	5.09	20.55
420	33.4	49.6	4	30.9	3.5	7.2	1.3	1.3	1.7	1	-0.03	3.52	16.28
430	49.1	31.3	3.5	21	3.2	6.6	1.1	1.1	1.8	1	-0.02	1.70	14.56
440	75.5	21.4	4.2	13.9	3.7	5.2	0.9	0.9	1.7	1	-0.03	-0.13	15.82
450	112.6	18.1	5.8	9.8	5.1	3.8	0.8	0.8	1.5	1	-0.04	-1.94	19.91
460	153.6	21.1	8.5	8.3	7.4	2.9	0.8	0.8	1.3	0.9	-0.06	-3.46	25.94
470	184.9	29.8	12.1	9	10.4	2.3	0.8	0.8	1.1	0.9	-0.10	-4.29	31.95
480	197	44.7	16	11.9	13.6	2	0.9	0.9	1	0.9	-0.14	-4.06	36.64
490	185.2	67.3	19.2	17.5	16.4	2.1	1	1	1	0.9	-0.16	-2.52	39.47
500	158.4	93.6	20.4	25.9	17.4	2.4	1.1	1.1	1.1	0.9	-0.17	-0.15	40.74
510	127.5	117.8	19.4	36.2	16.5	3.1	1.3	1.2	1.1	0.9	-0.17	2.43	40.98
520	99.4	132.8	17.1	46.6	14.5	4.2	1.5	1.4	1.2	0.9	-0.16	4.66	40.15
530	77.6	131.3	14.3	53.1	12.1	5.7	1.6	1.5	1.4	0.9	-0.13	5.91	37.46
540	60.6	119.5	11.6	54.3	9.8	7.1	1.6	1.5	1.5	0.9	-0.11	6.31	33.40
550	46.8	101.1	9.3	50.7	7.9	8.3	1.6	1.5	1.7	0.9	-0.09	6.08	28.41
560	37.4	82.6	7.5	44.1	6.4	8.7	1.4	1.4	1.9	0.9	-0.06	5.44	23.62
570	31.2	67	6.1	37	5.2	8.5	1.3	1.2	1.9	0.9	-0.06	4.67	19.58
580	27.8	53.8	5.1	30.5	4.4	7.7	1.1	1.1	1.8	0.9	-0.04	3.85	16.32
590	27	43.1	4.3	24.8	3.7	6.7	1	1	1.7	0.9	-0.03	3.07	13.85
600	29.2	34.8	3.8	20.2	3.3	5.8	0.9	0.9	1.6	0.9	-0.03	2.33	12.29
610	35.2	28.3	3.7	16.5	3.2	4.9	0.8	0.8	1.4	0.8	-0.03	1.55	11.65
620	44.9	23.8	3.7	13.7	3.3	4.2	0.7	0.7	1.3	0.8	-0.02	0.81	11.91
630	58.6	20.7	4.1	11.6	3.6	3.6	0.7	0.7	1.1	0.8	-0.03	0.02	13.05
640	76.1	18.4	4.8	9.8	4.2	3.1	0.7	0.7	1	0.8	-0.03	-0.83	14.90
650	98.5	18.5	6	8.8	5.2	2.7	0.7	0.7	1	0.8	-0.05	-1.70	17.93
660	124.1	20.2	7.5	8.4	6.6	2.4	0.7	0.7	0.9	0.8	-0.05	-2.59	21.73
670	150.6	24	9.5	8.7	8.3	2.2	0.7	0.7	0.9	0.8	-0.07	-3.38	26.12
680	175.1	29.6	11.7	9.6	10.2	2.1	0.8	0.8	0.9	0.9	-0.08	-3.97	30.62
690	194.4	37.5	14.1	11.3	12.2	2	0.8	0.8	0.9	0.9	-0.11	-4.28	34.88
700	213	47.5	17	13.7	14.6	2.1	0.9	0.9	0.9	0.9	-0.14	-4.42	39.54

Beispiel einer xDNA-Messung

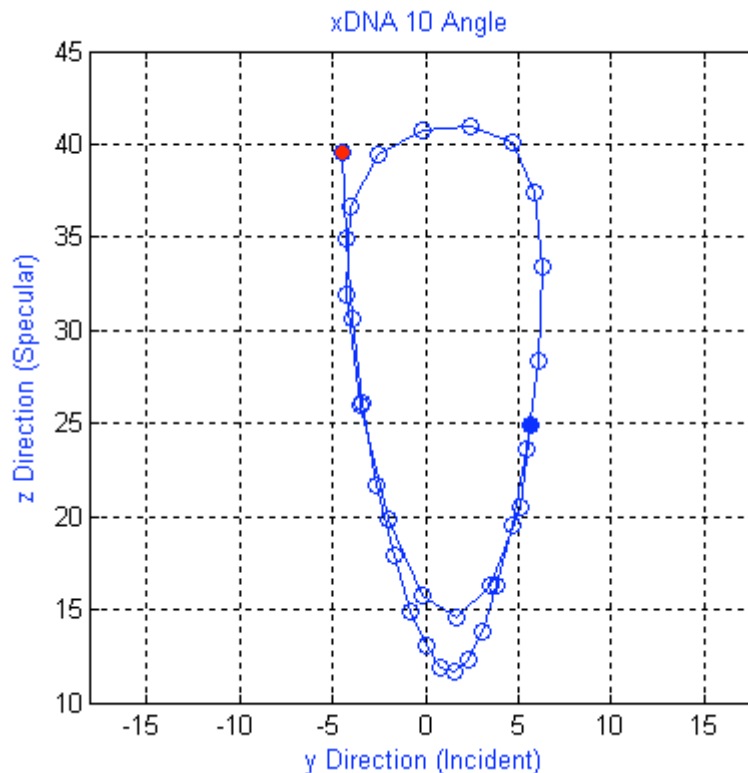
Tabelle 2 zeigt die xyz-Koordinaten in den verschiedenen Messrichtungen. Gewichten wir nun diese Koordinaten nach den Reflexionswerten bei 700 nm aus dem vorherigen Beispiel, so erhalten wir: $x = 17 \times (-0,42) + 14,6 \times (0,42) + 0,9 \times (-0,71) + 0,9 \times (0,71) = -1,01$ sowie entsprechend $y = -32,94$ und $z = 294,99$. Werden diese Werte anschließend noch durch die Vektorgesamtlänge einer ideal weißen Fläche (7,46), so ergeben sich die in Tabelle 1 gezeigten Werte.

Tabelle 2: xyz-Koordinaten nach Messrichtung

	45as-15az0	45as15az0	45as25az-90	45as25az0	45as25az90	45as45az0	45as60az-54.7	45as60az54.7	45as75az0	45as110az0
x	0.00	0.00	-0.42	0.00	0.42	0.00	-0.71	0.71	0.00	0.00
y	-0.26	0.26	0.00	0.42	0.00	0.71	0.50	0.50	0.97	0.94
z	0.97	0.97	0.91	0.91	0.91	0.71	0.50	0.50	0.26	-0.34

Abbildung 1 zeigt die yz-Projektion der xDNA-Werte der gleichen Probe.

Abbildung 1: xDNA-Kennlinie



Geometrien

Das xDNA-Verfahren eignet sich für jede mehrwinklige Messgeometrie. Die erforderliche Messanordnung hängt von den physikalischen Eigenschaften der Probe ab. Diffuse Oberflächen lassen sich schon aus einem einzigen Messwinkel präzise erfassen, während man bei Beschichtungen mit Metallikeffekten bisher drei positiv zum Glanzwinkel versetzte Effektwinkel für ausreichend hielt. Handelt es sich aber um Perlglanz- oder Interferenzeffekte, so sind in jedem Fall zusätzlich zur herkömmlichen Mehrwinkelgeometrie noch weitere Messrichtungen erforderlich.

Aspekte von xDNA-Messungen

xDNA-Messungen erfassen im Wesentlichen zwei Aspekte einer Farbprobe: ihre Wirkung und ihre Beschaffenheit.

- Wirkung: Das xDNA-Spektrum zeigt, wie die Farbe wahrgenommen wird.
- Beschaffenheit: Die Form des xDNA-Spektrums entspricht den optischen Eigenschaften der gemessenen Oberfläche.

Statt von der Beschaffenheit zu sprechen, könnte man auch sagen, dass die Form des xDNA-Spektrums die Farb Rezeptur widerspiegelt. Sind beispielsweise die xDNA-Kurven zweier Farbproben formgleich, liegen aber verschieden im Raum, so liegt eine unterschiedliche Farbwirkung vor, die nicht auf die Farb Rezeptur, sondern auf das Farbauftragsverfahren zurückzuführen ist.

Transformation der xDNA-Daten

Die xDNA-Messwerte lassen sich auf verschiedene Weise umrechnen, um noch weitere Informationen daraus abzuleiten. Mögliche Anwendungen sind:

- Unterscheidung zwischen rezeptur- und verfahrensbedingten Abweichungen in Zweifelsfällen
- Überwachung der Fertigungsverfahren
- Kompensation normaler Rezepturschwankungen durch Verfahrensänderungen.

Der Unterschied zwischen rezeptur- und verfahrensbedingten Abweichungen ist nicht immer so eindeutig, wie es scheinen mag. Letztlich ist die gemessene Farbe das Endergebnis eines Wechselspiels zwischen beiden Faktoren. Beispielsweise wirken sich Abweichungen der mittleren Flake- oder Partikelgröße auf das Auftragsverhalten aus, auch wenn das Verfahren selbst unverändert bleibt. Außerdem können einige Additive für Kfz-Lackierungen, wie etwa pyrogene Kieselsäure, die Unterscheidung zwischen rezeptur- und verfahrensbedingten Eigenschaften erschweren. Pyrogene Kieselsäure wird eingesetzt, um die Ausrichtung der Metallik-Flakes in einer Lackierung zu optimieren. Eine Auswirkung auf das Farbergebnis ist nicht beabsichtigt, und die Brechzahl dieses Zusatzstoffs unterscheidet sich kaum von gängigen Lösemitteln. Die einzige messbare Auswirkung der pyrogenen Kieselsäure ist also die Flake-Anordnung. Stellt man eine entsprechende Abweichung zwischen zwei xDNA-Profilen fest, so gilt es zu prüfen, ob sie auf Änderungen beim Auftragsverfahren, wie etwa der Ausflussrate oder Zerstäubungstechnik, oder eben auf pyrogene Kieselsäure zurückzuführen ist.

Wurden Einstellungen der Lackieranlage geändert, so unterscheiden sich die messbaren Auswirkungen natürlich von System zu System. Bei zwei formgleichen, aber verschieden im Raum liegenden xDNA-Kurven kann man zwar auf Verfahrensunterschiede schließen. Zur genauen Eingrenzung der Ursache aber (z. B. geänderte Einstellungen, neue Anlagen, pyrogene Kieselsäure oder Schwankungen der Umgebungsbedingungen, wie etwa der Luftfeuchtigkeit) reichen rein optische Kriterien nicht aus.

Translation, Rotation und Skalierung

Um Formvergleiche zwischen xDNA-Spektren anzustellen, arbeitet X-Rite mit drei linearen Transformationen: der Translation (Verschiebung), Rotation und Skalierung. Alle diese Abbildungsverfahren werden relativ zu einer Referenz vorgenommen. Der Translationsvektor, die Rotationsmatrix und der Skalierungsfaktor werden gemeinsam berechnet, wobei das abgebildete xDNA-Spektrum mit Hilfe eines Prokrustes-Algorithmus nach der Methode der kleinsten Quadrate an das xDNA-Referenzspektrum angepasst wird. Zu Vergleichszwecken werden außerdem die Zwischenergebnisse nach der Translation und Rotation verschoben, um sie mittig an der Referenz auszurichten.

Der Translationsvektor xT eines xDNA-Spektrums ist der gemittelte dreidimensionale Versatz aller Wellenlängen zur Referenz. Seine Einzelkomponenten sind xTx , xTy und xTz . Ein verschobenes xDNA-Spektrum, das mittig an der Referenz ausgerichtet wird, wird $xDNA_t$ genannt. Eine Translationsbeziehung zwischen den Kurven zweier Proben lässt meist auf eine Verfahrensänderung bei gleichbleibender Rezeptur schließen. Beispielsweise kann eine Änderung der Ausflussrate oder Zerstäubungstechnik bei der Lackieranlage vorliegen, die sich auf die Größe und kinetische Energie der Lacktröpfchen und damit auch auf deren Lage am Bauteil auswirkt.

Ein verschobenes Spektrum $xDNA_t$ nach den ersten beiden Rotationen wird $xDNA_a$ genannt. Zu einer solchen Beziehung zwischen zwei Kurven kommt es in der Regel durch eine Wechselwirkung zwischen der Struktur und dem Auftragsverfahren. Beispielsweise lässt sich auf diese Weise eine Umverteilung der Partikelgröße oder eine geänderte Ausrichtung der Partikel feststellen, die auf ein neues Verfahren zurückzuführen ist.

Die Rotation besteht aus drei Einzelvorgängen in der folgenden Reihenfolge:

1. Eine Rotation auf der xy-Ebene (xR-Azimutwinkel)
2. Eine Rotation auf der xz-Ebene (xR-Polarwinkel)
3. Eine Rotation auf der yz-Ebene (xA-Abgleich)

Das Ergebnis der Skalierung eines Spektrums $xDNA_a$ wird $xDNA_s$ genannt.

Rezepturänderungen lassen sich von Fall zu Fall besser mit dem $xDNA_a$ - oder dem $xDNA_s$ -Spektrum untersuchen. Beispielsweise kann es vorkommen, dass zwei Proben mit ausschließlich verfahrensbedingten Abweichungen deutliche $xDNA_a$ -Unterschiede aufweisen. Erst mit dem skalierten $xDNA_s$ -Spektrum lässt sich dann die Rezeptur als Problemursache ausschließen. Umgekehrt kann man sich Fälle vorstellen, wo die $xDNA_s$ -Unterschiede bei deutlichen Rezepturabweichungen minimal sind, etwa bei verschiedenen diffusen Grautönen.

Analog zur DNA im biologischen Sinne lässt sich das Verhältnis zwischen einem untransformierten $xDNA$ - und einem skalierten $xDNA_s$ -Spektrum mit dem Unterschied zwischen dem Phänotyp und Genotyp vergleichen. Der Phänotyp eines Lebewesens ist nicht allein auf seine genetischen Anlagen, sondern auch auf Umwelteinflüsse zurückzuführen. Ebenso werden die $xDNA$ -Eigenschaften einer Oberfläche durch deren Aufbau ($xDNA_s$) und durch Umgebungsfaktoren (also das Lackierverfahren) beeinflusst.

(Fortsetzung ...)

Translation, Rotation und Skalierung

(Fortsetzung)

Bei xDNA-Transformationen sind neben den abgebildeten Spektren auch die Transformationsparameter zu berücksichtigen. Derzeit ermitteln Mehrwinkelgeräte $L^*a^*b^*$ -Farbwerte für jeden Winkel und arbeiten außerdem mit dem Flop Index – einem Verfahren zur Bestimmung relativer Helligkeitsunterschiede in der Nähe des Glanz- und Gegenwinkels. Die Parameter xT , xA und xS stehen alle in Beziehung zu den Reflexionsabweichungen zwischen den verschiedenen Winkeln, liefern aber andere Erkenntnisse als der Flop Index.

Theoretisch könnte man den Flop Index einer Metallik-Beschichtung reduzieren, indem man den Lack unter trockeneren Bedingungen appliziert oder mit kleineren Flakes arbeitet. Solche Änderungen ließen sich dann eher mit xT , xA und xS als nur mit dem Flop Index feststellen.

Umgekehrt hat natürlich auch der Flop Index seinen Nutzen. Mehrwinkelmessungen eignen sich für Oberflächen, die je nach dem Blickwinkel unterschiedliche Reflexionen verursachen. Ein einzelner Wert kann hier nicht alle relevanten Informationen erfassen. Andererseits haben Kennzahlen oder Farbabstandsformeln den Vorteil, komplexe Sachverhalte einfach, aber dennoch relativ aussagekräftig auszudrücken.

Farbmetrische Formeln

Nachfolgend werden Verfahren vorgestellt, mit denen sich herkömmliche Farbabstandsformeln auf das xDNA-Koordinatensystem ausweiten lassen. Weiterhin besprechen wir Formeln, die Reflexionswerte direkt berücksichtigen, und umreißen Anwendungsmöglichkeiten dieser verschiedenen Formeln für räumlich transformierte xDNA-Daten.

Die dF-Formel

Um aus Spektraldaten Farbwerte abzuleiten, arbeitet man mit verschiedenen Gewichtsungsverfahren (z. B. CIE Lab, dE , dE_{94} , dE_{2000} sowie Kompensationsverfahren für Beleuchtung und Beobachtung). Entsprechend können auch die Farbabstände eines dreidimensionalen xDNA-Spektrums bestimmt werden. Mögliche Verfahren zur Ausweitung herkömmlicher Formeln auf höherdimensionale Spektren sind:

1. Berechnung der Farbwerte und Farbabstände für die Einzelebenen x , y und z , etwa nach XYZ oder $L^*a^*b^*$. Bildung der Quadratwurzel aus der Quadratsumme der Farbabstände für die Einzelebenen.
2. Berechnung der XYZ-Daten für die Einzelebenen x , y und z . Verwendung dieser Werte als xyz -Komponenten vektorwertiger XYZ-Daten, um anschließend die Beträge der dreidimensionalen XYZ-Vektoren zu berechnen. Aus den eindimensionalen XYZ-Beträgen lassen sich nun $L^*a^*b^*$ - und Farbabstandsdaten ableiten.

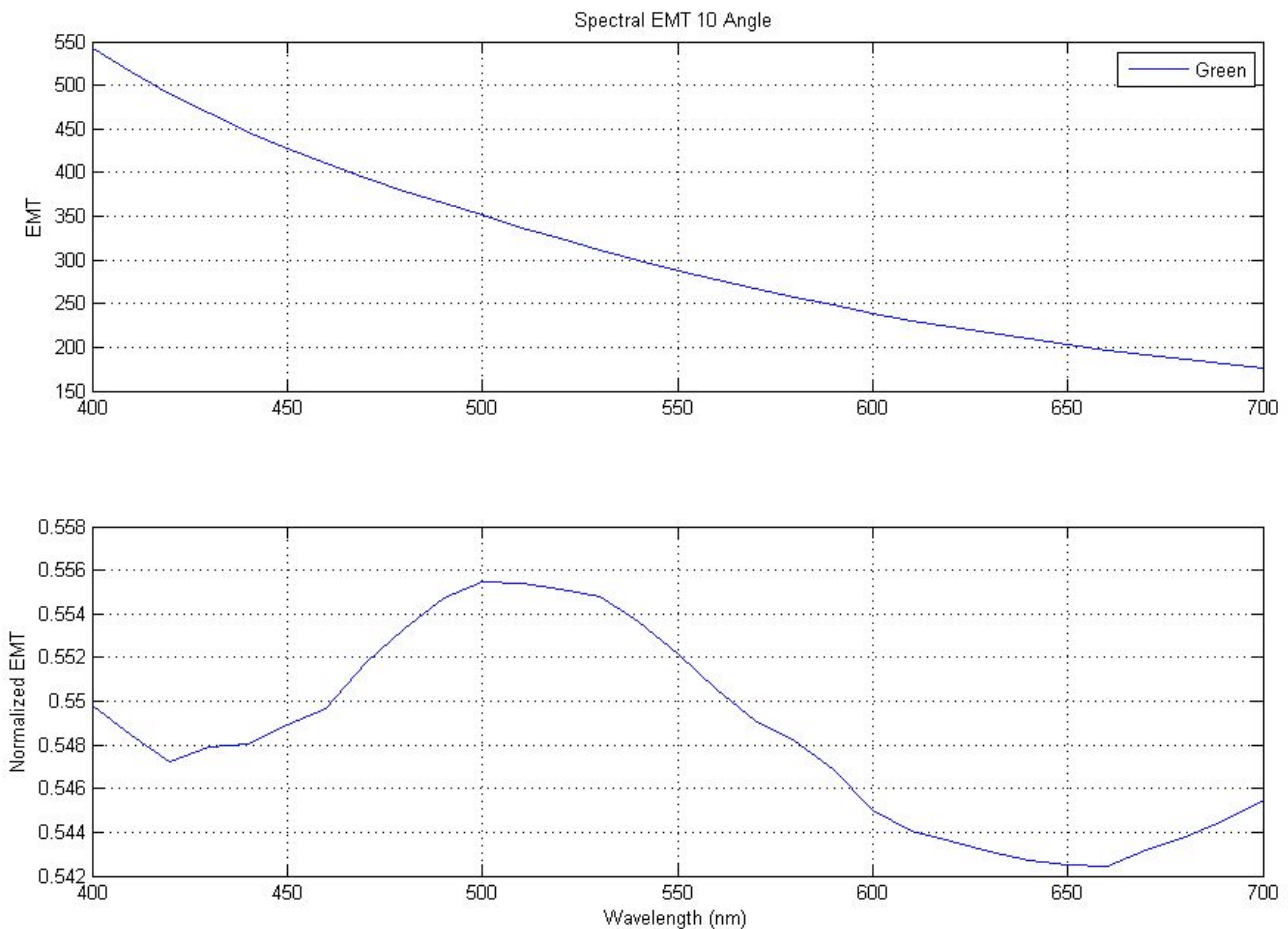
Die Farbabstandsformel, die durch die Ausweitung der konventionellen Delta E-Messung nach Verfahren 1 entsteht, nennen wir dF .

Da farbmetrische Funktionen an der menschlichen Wahrnehmung orientiert sind, könnte man vermuten, dass sie für die transformierten xDNA-Spektren $xDNA_t$, $xDNA_a$ und $xDNA_s$ nicht der optimale Ansatz sind. Dennoch eignen sich die beiden oben beschriebenen Verfahren gleichermaßen für transformierte und untransformierte xDNA-Daten.

Die Anwendung von Delta E auf die verschiedenen Spektren bezeichnen wir, entsprechend den Namen der Spektren, als dF_t , dF_a und dF_s .

Effective Medium Theorie (EMT)

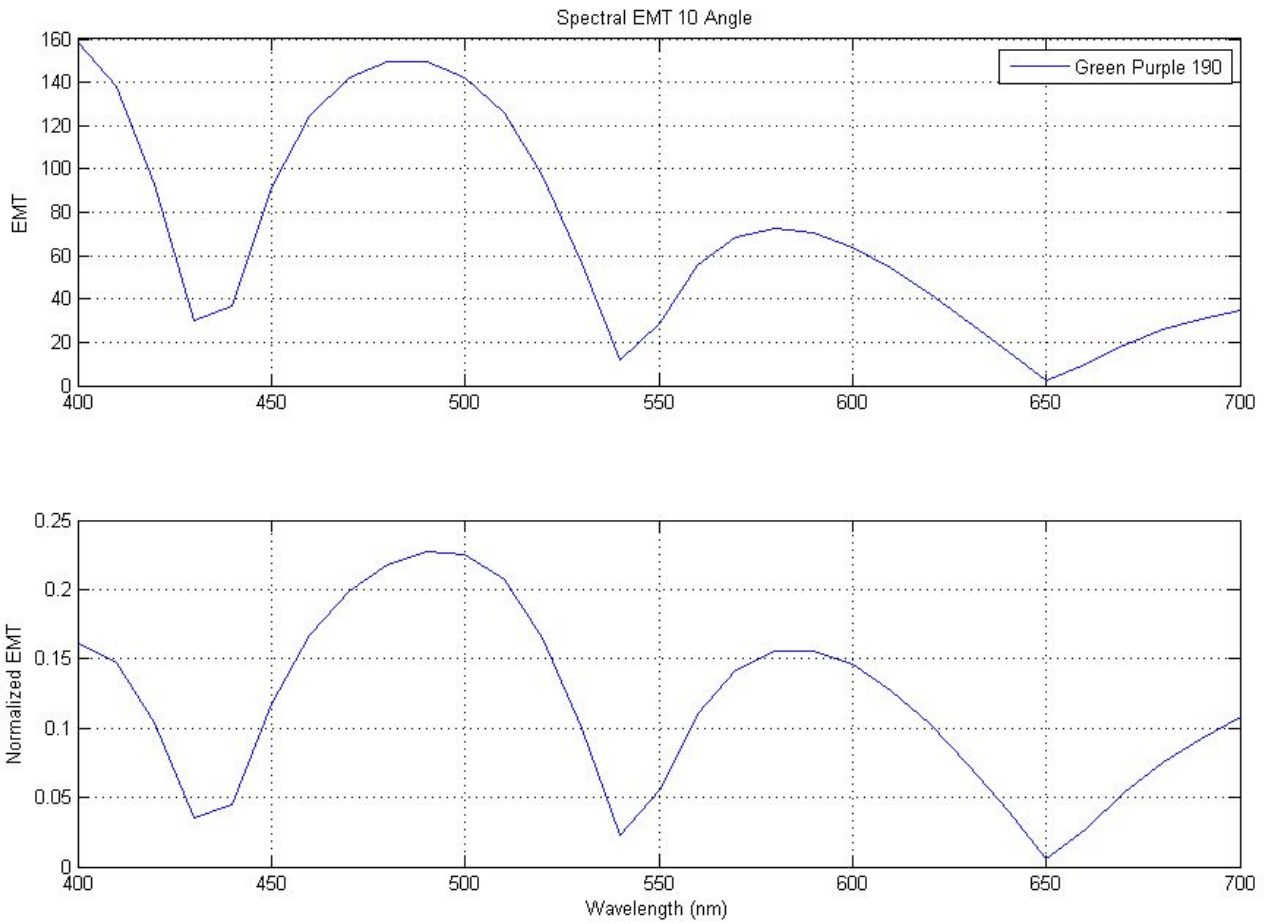
Sofern keine Einschränkung im Hinblick auf die Opazität vorliegt, lässt sich ein komplexes Medium (bzw. eine komplexe Beschichtung) unter Anwendung der Effective Medium Theorie als homogene Einheit mit einer eigenen Permittivitätszahl und charakteristischen dispersiven Eigenschaften beschreiben. Da sich die komplexe Brechzahl (Brechung + Absorption) proportional zur Permittivitätszahl verhält, kann man das Ergebnis als Dispersionskurve proportional zur Brechzahl darstellen. Nachfolgend ist die Kurve einer einfachen, homogenen, absorbierenden Beschichtung zu sehen.



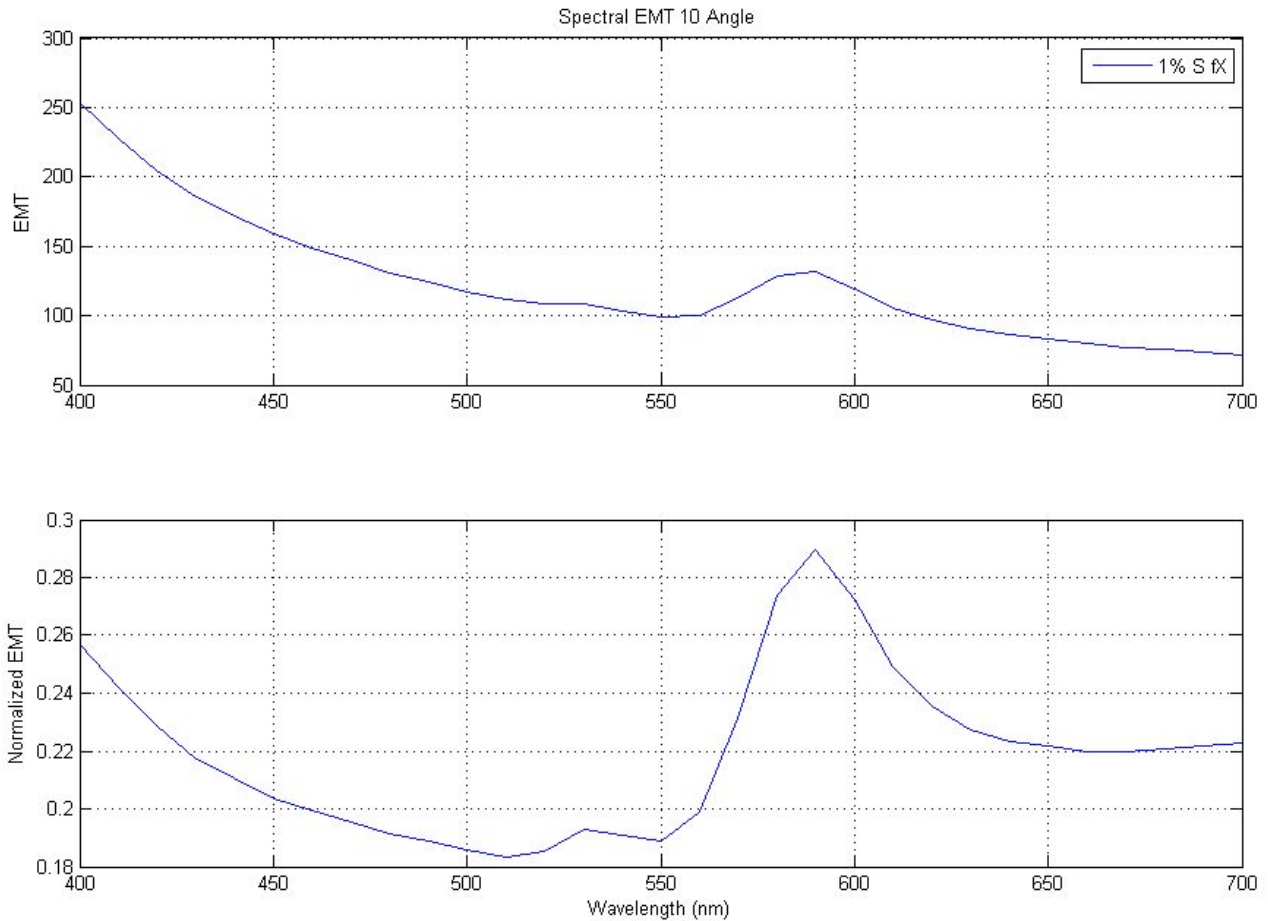
Dieses Verfahren erleichtert die Feststellung bestimmter Pigmente und zeigt auch Konzentrationsänderungen bei Pigmenten oder Additiven. Die „Breckkraft“ absorbierender Pigmente kann direkt zur Partikelgröße in Bezug gesetzt werden, der Absorptionsgrad dagegen zur mittleren freien Weglänge der Streuung und zur Gesamtfläche. So entsteht ein „dispersiveres“ EMT-Modell nach folgender Gleichung:

$$\langle \text{EMT}_{ba} \rangle = (16\pi^2 / \lambda^4) \cos^2 \theta_i \Phi_{ba}(\varphi_s) R_a(\theta_i)$$

Bei komplexeren Materialien, wie etwa Effektpigmenten, kommt es durch interferierendes Licht zu Abweichungen im Reflexionsverhalten. Die Dispersionskurven sehen dann wie folgt aus:



Betrachten wir zuletzt eine Beschichtung mit einer Mischung aus absorbierenden und Effektpigmenten. Dies führt zu einer Kombination der beiden vorherigen EMT-Profile, wobei die Ausprägung der Kurve vom Mischverhältnis abhängt:



In unserem Fall können wir auch zunächst den projizierten Betrag in der xy-Ebene sowie den Vektorbetrag des gemessenen Reflexionswerts berechnen. Anschließend bestimmen wir den Richtungscosinus in der z-Richtung des Betrags sowie in der xy-Ebene. Zur EMT-Berechnung multiplizieren wir schließlich die Richtungscosinuswerte Wellenlänge für Wellenlänge mit $\frac{16 \pi^2}{4}$.

Farbmessung für Einzelwinkel

Wie auch in der herkömmlichen Farbmessungstechnik oder beim Mehrwinkel-Spektralfotometer MA68 ist es manchmal von Interesse, die Farbwerte einzelner Winkel (etwa nach den L*a*b*-Koordinaten) zu vergleichen.

So kann etwa ein Vergleich der Differenzwinkel zeigen, wie unterschiedliche Beleuchtungsbedingungen die Farbwirkung beeinflussen.

