

Spektrales Farbvorhersagemodell

für den Rasterdruck auf Basis
der wellenlängenabhängigen Flächendeckung

Dipl.-Math. Michael Dattner

1. Gutachter: **Prof. Dr.-Ing. Peter Urban**
2. Gutachter: **Prof. Dr. rer. nat. Stefan Brües**

Arbeit zur Erlangung des akademischen Grads
Doktor der Ingenieurwissenschaften

Bergische Universität Wuppertal
Fachbereich E Druck- und Medientechnologie

15. September 2010

Diese Dissertation kann wie folgt zitiert werden:

urn:nbn:de:hbz:468-20110519-095444-2

[<http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=urn:nbn:de:hbz:468-20110519-095444-2>]

Nach unserer bisherigen Erfahrung sind wir zum Vertrauen berechtigt, dass die Natur die Realisierung des mathematisch denkbar Einfachsten ist.

Albert Einstein

Dank

Größter Dank gebührt Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Urban für die Unterstützung meines Promotionsvorhabens, Herrn Prof. Dr.-Ing. Jorge Rodriguez für die Sensibilisierung für das Thema der Farbvorhersage und Prof. Dr. rer. nat. Stefan Brües für die Begutachtung dieser Arbeit.

Dem gesamten Labor-Team des Fachbereichs E Druck- und Medientechnologie danke ich für die außergewöhnliche technische Unterstützung bei der Erstellung und Auswertung der für diese Arbeit unentbehrlichen Proben. Meiner Wissenschaftlichen Hilfskraft, Herrn Daniel Bohn B.Sc., danke ich für sein konstruktives Zuhören und die Unterstützung bei der grafischen Visualisierung.

Meiner Frau Barbara Dattner widme ich diese Arbeit, weil sie mich durch ihre unerschütterlich positive Lebenseinstellung bei der Verwirklichung meiner Ziele unterstützt.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| Abstract / Kurzfassung | 1 |
| 1 Einleitung | 3 |
| 2 Notation | 5 |
| 3 Farbmétrische Grundlagen | 7 |
| 3.1 Farbreiz | 8 |
| 3.2 Farbmessung | 13 |
| 3.2.1 Normlichtarten | 13 |
| 3.2.2 Referenzweißstandard | 14 |
| 3.2.3 Messgeometrie | 14 |
| 3.2.4 Standardbeobachter | 15 |
| 3.2.5 Messtechnische Umsetzung | 16 |
| 3.3 Farbvalenzen | 17 |
| 3.4 Farbvergleiche | 19 |
| 4 Existierende Modellansätze | 21 |
| 4.1 Anfänge der Rastertonvorhersage | 22 |
| 4.1.1 Murray-Davies | 22 |
| 4.1.2 Demichel | 22 |
| 4.1.3 Neugebauer | 24 |
| 4.2 Berücksichtigung der Lichtstreuung | 24 |
| 4.2.1 Yule und Nielsen | 24 |
| 4.2.2 Clapper und Yule | 25 |
| 4.2.3 Implementierung der Punktspreizfunktion | 25 |
| 4.3 Berücksichtigung der Farbspreizung | 26 |
| 4.4 Abstrakte Herangehensweise | 28 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 5 | Der wellenlängenabhängige Flächendeckungsansatz | 31 |
| 5.1 | Optisch wirksame Flächendeckung | 31 |
| 5.2 | Die wellenlängenabhängige Flächendeckung | 37 |
| 5.3 | Das Modell | 40 |
| 6 | Konsolidierung | 41 |
| 6.1 | Kubelka und Munk | 43 |
| 6.2 | „Druckpunkt mit Rand“ als Spezialfall | 46 |
| 6.3 | Erweiterung | 47 |
| 7 | Übereinanderdruck | 49 |
| 7.1 | Mit angedruckten Sekundär- und Tertiärfarben | 49 |
| 7.2 | Ohne angedruckte Sekundär- und Tertiärfarben | 53 |
| 8 | Validierung | 56 |
| 8.1 | Ergebnisse im Bogenoffset-Verfahren | 56 |
| 8.2 | Die Vorgehensweise | 59 |
| 8.3 | Versuchsumgebung im Bogenoffset | 62 |
| 8.3.1 | Druckmaschine | 62 |
| 8.3.2 | Bedruckstoff | 63 |
| 8.3.3 | Druckplatten | 63 |
| 8.3.4 | Raster | 63 |
| 8.3.5 | Druckfarbensätze | 65 |
| 8.3.6 | Feuchtmittel und Farbschichtdicke | 66 |
| 8.3.7 | Einfluss fehlender Sekundär- und Tertiärfarbremissionen | 69 |
| 8.4 | Ergebnisse in weiteren Druckverfahren | 71 |
| 9 | Fehlerdiskussion | 75 |
| 9.1 | Reproduzierbarkeit der Messungen | 75 |
| 9.1.1 | Bestimmung der Druckpunktrandlänge | 75 |
| 9.1.2 | Spektrale Farbmessung | 75 |
| 9.2 | Prozess- und Materialschwankungen | 78 |
| 9.2.1 | Bedruckstoff | 78 |
| 9.2.2 | Prozess und Farbe | 78 |
| 9.3 | Fehlerfortpflanzung | 78 |

| | |
|--|------------|
| 10 Zusammenfassung | 84 |
| 11 Ausblick | 86 |
| 12 Anhang | 88 |
| 12.1 CIE | 88 |
| 12.1.1 ΔE_{ab}^* -Formel | 88 |
| 12.1.2 ΔE_{2000}^* -Formel | 88 |
| 12.2 Kleinste Fehlerquadratsumme | 88 |
| 12.3 Verwendete Software | 90 |
| 12.3.1 Tabellenkalkulation | 90 |
| 12.3.2 Bildbearbeitung | 90 |
| 12.3.3 Bildauswertung und -analyse | 90 |
| 12.4 Farbabweichungstabellen | 91 |
| Abbildungsverzeichnis | 103 |
| Tabellenverzeichnis | 104 |
| Literaturverzeichnis | 105 |

Abstract

„A spectral colour prediction model for halftone prints based on the wavelengths-dependent-area-coverage“

An application oriented colour prediction model, which considers the effects of light scattering and ink spreading on the perception of halftone prints without empirical parameters is proposed in this document. This model considers all current process specific parameters and underlying physical phenomena by extending the area coverage approach of NEUGEBAUER. The new vectorial (wavelengths dependent) area coverage approach considers the complete spectral information of halftone patches without reducing it to one single area coverage value.

All necessary information is included in specific single colour halftone patches, because all mentioned physical phenomena are most distinctive at an area coverage with maximum edge length of its raster elements. Furthermore, the characteristic effective wavelengths-dependent-area-coverage of a e.g. 50% halftone patch $A_{eff}^{50\%}(\lambda)$ is directly related to all other nominal area coverages. This enables the calculation of excellent spectral predictions for colour halftone prints by weighting the characteristic $A_{eff}^{50\%}(\lambda)$ with the relative edge length of raster elements regarding the corresponding nominal area coverage.

The super positioning of inks is considered in the calculations by using an extra physically founded parameter, which includes changes of the area coverage ratio and the ink film thickness at the subsequently printed colours.

The expected colour prediction error between measured and calculated values in the CIE $-L^*a^*b^*$ -colour space is $1,05 \Delta E_{ab}^*$ -units in average over all considered area coverage combinations.

Kurzfassung

Das hier vorgestellte, praxisorientierte, spektrale Farbvorhersagemodell berücksichtigt jegliche Effekte von Lichtstreuung und Farbspreizung auf die Wahrnehmung von Rasterdrucken. Dabei wird auf empirische Parameter verzichtet und dennoch alle prozessspezifischen Größen sowie die zugehörigen physikalischen Zusammenhänge eingebunden. Dies geschieht im Rahmen einer Erweiterung des Flächendeckungsansatzes nach NEUGEBAUER, indem sämtliche spektrale Informationen der Rastertonfelder in den wellenlängenabhängigen Flächendeckungsansatz einfließen.

Alle relevanten Informationen sind dabei in den Spektraldaten eines Rastertonfelds mit möglichst großer Randlänge der druckenden Elemente enthalten, weil hier die angesprochenen optischen Effekte am stärksten ausgeprägt sind. Diese maximale Druckpunktrandlänge ist rasterspezifisch beispielsweise bei einem Flächendeckungsgrad von 50% vorzufinden, was wiederum zu dem charakteristischen wellenlängenabhängigen Flächendeckungsverlauf $A_{eff}^{50\%}(\lambda)$ führt. Da die Druckpunktrandlänge genauso wie die wellenlängenabhängige Flächendeckung in einem direkten Zusammenhang mit der nominellen Flächendeckung steht, ermöglicht ein entsprechender funktionaler Zusammenhang die Modellierung. Der Ansatz beruht demnach auf einer Gewichtung der $A_{eff}^{50\%}(\lambda)$ gemäß der nominellen flächendeckungsabhängigen Druckpunktrandlänge.

Für die Modellierung des Übereinanderdrucks wird in diesem Ansatz ein zusätzlicher, ebenfalls physikalisch begründeter Übereinanderdruckparameter eingebunden. Mittels dieses Parameters werden Änderungen bei den Farbschichtdicken und den Flächendeckungsanteilen der nachfolgend gedruckten Farben berücksichtigt.

Der zu erwartende, mittlere Farbabstand zwischen gemessener und berechneter Farbvalenz liegt bei $1,05 \Delta E_{ab}^*$ -Einheiten über alle betrachteten Flächendeckungskombinationen.

Kapitel 1

Einleitung

In der vorliegenden Arbeit wird ein neues spektrales Farbvorhersagemodell vorgestellt, das auf empirische Parameter verzichten kann.

Anhand der spektralen Auswertung von gedruckten 50% Rastertonfeldern können sämtliche Lichtstreu- und Farbübertragungseffekte implizit bei der Berechnung der zu erwartenden Remission bezüglich aller übrigen Flächendeckungsgrade im einfarbigen Rasterdruck berücksichtigt werden. Auch der Übereinanderdruck mehrerer Primärfarben lässt sich auf dieser Basis modellieren, was die spektrale Farbvorhersage ermöglicht. Sämtliche erforderlichen Parameter sind physikalisch begründet, können aber auch praxisrelevant numerisch bestimmt werden.

Zunächst werden in dieser Arbeit farbmetrische Grundlagen vorgestellt, auf denen sämtliche nachfolgende Überlegungen basieren. Eine kurze Einführung in die Zusammenhänge der Farbwahrnehmung verdeutlicht, was bei der wissenschaftlichen Betrachtung der Farbempfindung zu berücksichtigen ist, und wie eine reproduzierbare messtechnische Erfassung von Farben erfolgt. Darauf aufbauend werden existierende Rasterton-Vorhersagemodelle vorgestellt, die zur Einordnung der vorliegenden Arbeit dienen. Von den Anfängen in den 1930er Jahren bis hin zu aktuellen, hoch komplexen Ansätzen finden alle aufgeführten Theorien ihre direkte oder indirekte Berücksichtigung bei der Entwicklung des neuen Modells.

Viele der heutigen Farbvorhersagemodelle binden wahrnehmungsrelevante Einflussgrößen des Druckprozesses sowie Lichtstreuungs- und Farbspreizungseffekte ein. Dies geschieht über eine Vielzahl von oft empirischen Parametern, deren Abschätzung oft schwierig bzw. mit sehr hohem Erhebungsaufwand verbunden ist. Im Gegensatz dazu kann der hier vorgestellte wellenlängenabhängige Flächendeckungsansatz ohne empirische Parameter arbeiten. Dabei beschreibt er die optische Wirkung sämtlicher relevanter Effekte und bietet die Möglichkeit diese Informationen in ein spektrales Farbvorhersagemodell einfließen zu lassen.

Ausgehend von einem idealisierten, kreisrunden Druckpunkt mit einem ebenfalls idealisierten helleren Rand erfolgt die Konsolidierung des Modells, dass die tatsächliche Erscheinung von Druckpunkten auf dem Bedruckstoff berücksichtigt. Die Erweiterung zeigt darüber hinaus, wie sämtliche Informationen bezüglich der individuellen Dichte von einer Vielzahl an Teilbe-

reichen eines Druckpunkts statt durch Mikrodensitometrie durch eine spektrale Auswertung eines 50% Rastertonfelds erfasst werden.

Die Validierung belegt anhand umfassender Untersuchungsergebnisse die Qualität des neuen Farbvorhersagemodells, woraufhin die abschließende Fehlerdiskussion die Belastbarkeit der vorgestellten Ergebnisse bestätigt.

Anmerkung 1.1 *Kursiv geschriebene Passagen in dieser Arbeit dienen der Einordnung des umgebenden Inhalts im Gesamtdokument, wenn sie nicht explizit als Beispiel, Satz oder Anmerkung gekennzeichnet sind.*

Kapitel 2

Notation

In diesem Kapitel werden alle Abkürzungen und verwendete Zeichen vorgestellt.

| Zeichen | Definition / Erklärung | Seite |
|----------------------------|---|-------|
| a | Flächendeckungsgrad bzw. -anteil | 22 |
| $A_{eff}^a(\lambda)$ | wellenlängenabhängige effektive Flächendeckung | 35 |
| $A_{effRod}^a(\lambda)$ | effektive Flächendeckung nach RODRIGUEZ | 34 |
| $A_a(\lambda)$ | wellenlängenabhängige Flächendeckung | 37 |
| AM | amplitudenmodulierte Rasterung | 63 |
| $\beta(\lambda)$ | relative spektrale Remission (Reflexionsgrad) | 9 |
| $\beta_a(\lambda)$ | Remission bezüglich Rasterton nomineller Flächendeckung a | 22 |
| $\widehat{\beta(\lambda)}$ | berechnete Remission | 22 |
| $\beta_{cmy}(\lambda)$ | Remission eines Bunttonrasterfeldes | 24 |
| $\beta_{VT_i}(\lambda)$ | Volltonremission | 22 |
| $\beta_R(\lambda)$ | Remission des theoretischen Druckpunktrandes nach PAUL | 46 |
| bzw. | beziehungsweise | 3 |
| CIE | Commission Intrenationale de L'Eclairage | 13 |
| D | Dichte | 68 |
| \tilde{D} | relative Dichte | 27 |
| ΔA | Schwankungen in der wellenlängenabh. Flächendeckung | 79 |
| $\Delta\beta$ | Schwankungen in den Bezugfeldremissionen | 79 |
| $\Delta\beta_{cmy}$ | mittlere Schwankungen in den Remissionen | 79 |
| ΔE_{ab}^* | (euklidischer) Farbabstand im CIE $-L^*a^*b^*$ -Farbraum | 19 |
| ΔE_S | spektrale Metrik | 38 |
| ΔE_{2000}^* | aktueller Farbabstand im CIE $-L^*a^*b^*$ -Farbraum | 19 |
| $\Delta\gamma$ | Schwankungen im Übereinanderdruckparameter | 79 |
| $\Delta\lambda$ | Diskretisierungsschrittweite / Wellenlängenbereichsbänder | 17 |
| $\delta(x), \delta(y)$ | ortsabhängige Schichtdickenanpassung | 68 |
| $\widehat{\delta_i(x, y)}$ | berechnete ortsabhängige Schichtdickenanpassung | 68 |

Tabelle 2.1: Zeichen

| Zeichen | Definition / Erklärung | Seite |
|--|--|-------|
| $\Delta\vartheta$ | Schwankungen in den Druckpunktrandlängen | 80 |
| DFS | dreifarbig aufgebautes Schwarz | 23 |
| DIN | Deutsches Institut für Normung | 7 |
| FM | frequenzmodulierte Rasterung | 63 |
| $\forall \lambda \in [\dots]$ | für alle λ in $[\dots]$ | 9 |
| $\gamma(\lambda)$ | integrativer Übereinanderdruckparameter | 40 |
| $\Gamma_i(\lambda)$ | farbspezifischer Übereinanderdruckparameter | 40 |
| „gemessen“ | nach spektraler Auswertung direkt berechnet | 37 |
| I | Gewichtungsfaktor im Schichtdickenmodell | 68 |
| ISF | Farbspreizfunktion in Formeln $\tau_{(x,y)}(\lambda)$ | 27 |
| $i(x)$ | Lichtstrahlintensität nach Yule-Nielsen (\downarrow) | 43 |
| $j(x)$ | Lichtstrahlintensität nach Yule-Nielsen (\uparrow) | 43 |
| $\hat{K}(\lambda)$ | Absorptionskoeffizient | 43 |
| L^*, a^*, b^* | Koordinaten im CIE $-L^*a^*b^*$ -Farbraum | 17 |
| λ | Variable für Wellenlängen | 8 |
| nm | 1 Nanometer = 10^{-9} m | 3 |
| $\phi(\lambda)$ | Farbreizfunktion | 9 |
| PSF | Punktspreizfunktion (Streuung im Papier) | 25 |
| Ψ | Menge der Indizes relevanter Remissionen | 24 |
| PSO | Prozess Standard Offset | 31 |
| Q | Gewichtungsfaktor im Schichtdickenmodell | 68 |
| ■ | (q.e.d.) was zu beweisen war | 46 |
| $s(\lambda)$ | spektrale Empfindlichkeit des Empfängersystems | 32 |
| $S(\lambda)$ | relative spektrale Strahlungsverteilung von Lichtquellen | 9 |
| $\hat{S}(\lambda)$ | Streukoeffizient | 43 |
| $\tau_{(x,y)}(\lambda)$ | ortsabhängige Transmission | 27 |
| $\vartheta(a)$ | druckpunktrandlängenabhängiger Gewichtungsfaktor | 37 |
| vgl. | vergleiche | 18 |
| $\Theta_{(P,k)}(\lambda)$ | Streuungsquotient | 54 |
| $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ | Normspektralwertfunktionen 2° | 17 |
| $\bar{x}_{10}(\lambda), \dots$ | Normspektralwertfunktionen 10° (Großfeld) | 17 |
| X, Y, Z | Normvalenzen | 17 |

Tabelle 2.1: Zeichen (Fortsetzung)

Kapitel 3

Farbmetrische Grundlagen

Die Definition der Farbe nach DIN 5033, Teil I: „Farbe ist diejenige Gesichtsempfindung eines dem Auge strukturlos erscheinenden Teiles des Gesichtsfelds, durch die sich der Teil bei einäugiger Beobachtung mit unbewegtem Auge von einem gleichzeitig gesehenen, ebenfalls strukturlosen angrenzenden Bezirk allein unterscheiden kann.“ [DIN92].

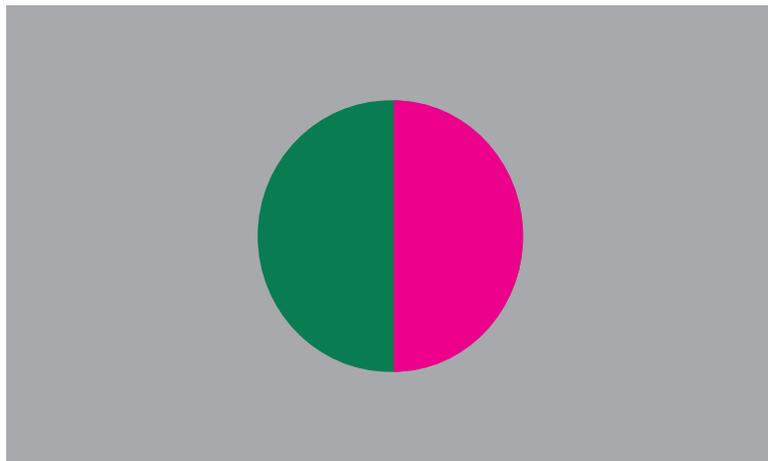


Abbildung 3.1: Strukturlose, aneinander angrenzende Farbfelder in neutralem Umfeld für den Farbenvergleich

Die Farbmetrik ist die Lehre von den Maßbeziehungen der Farben untereinander. Sie setzt demgemäß voraus, dass man die Farben durch Maß und Zahl eindeutig beschreiben und dies wiederum, dass man sie messen kann [Ric80].

Es gibt jedoch keine physikalische Größe, die mit der Farbempfindung in einem derart einfachen Zusammenhang steht wie beispielsweise in der Akustik die Schallwellen mit der Hörempfindung. Die Akustik beschäftigt sich nicht mit dem Zustandekommen einer Hörempfindung, sondern ausschließlich mit den Schallwellen, die als physikalische Reize Hörempfindung auslösen können [Lan93].

Die aufgeführte Definition der Farbe grenzt deshalb die Gesichtsempfindung „Farbe“ ge-

genüber allen anderen möglicherweise gleichzeitig auftretenden Seh Wahrnehmungen ab. So gehört beispielsweise die Wahrnehmung der Oberflächenbeschaffenheit (Textur) nicht zum definierten Begriff „Farbe“, was durch die Anforderung „dem Auge strukturlos erscheinend“ ausgeschlossen wird. Die Anforderung „bei einäugiger Beobachtung mit unbewegtem Auge“ schließt den Einfluss der Raumwahrnehmung und die Wahrnehmung des Glanzes aus der Gesichtsempfindung „Farbe“ aus [Ric80].

Wenn man trotz Ausschaltung der genannten Wahrnehmungen an zwei so beobachteten Flächenteilen (Abbildung 3.1) einen Unterschied sehen kann, so kann dieser Unterschied nur durch die verschiedenen Farben beider Flächenteile verursacht sein [Ric80].

Diesen Sachverhalt berücksichtigend, werden in diesem Kapitel der physikalische Farbreiz und seine Wechselwirkung mit der Farbempfindung vorgestellt. Darüber hinaus werden alle Anforderungen dargelegt, unter denen, in Anlehnung an die Definition von Farbe, die Farbempfindung wissenschaftlich zu betrachten ist.

3.1 Farbreiz

Im Wellenlängenbereich von $\lambda = 380 \text{ nm}$ bis 780 nm ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$) befindet sich das für das menschliche Auge sichtbare Spektrum elektromagnetischer Strahlung. Dieser für den Farbreiz verantwortliche Bereich ist zwischen der kurzwelligeren UV-Strahlung und der langwelligeren Infrarotstrahlung eingebettet (Abbildung 3.2).

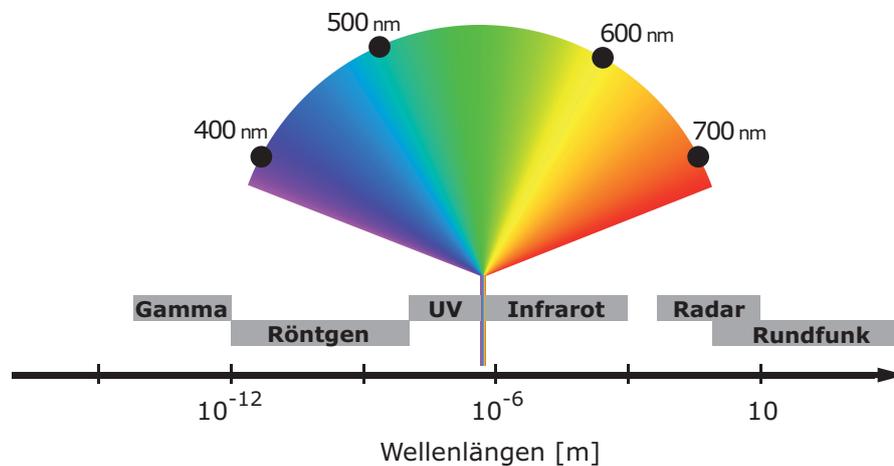


Abbildung 3.2: Elektromagnetische Strahlung

Der Farbreiz entsteht durch die in den Zapfen der Netzhaut absorbierte, elektromagnetische Strahlungsleistung des sichtbaren Lichts und ist demnach die physikalische Ursache für die Farbempfindung.

Physikalisch wird die den Farbreiz bildende Strahlung durch ihre spektrale Zusammensetzung innerhalb des sichtbaren Wellenlängenbereichs beschrieben. Demnach wird er in der Farbmeterik durch eine skalare Funktion der Wellenlänge repräsentiert. Die so genannte Farbreizfunktion $\phi(\lambda)$ ist als relative spektrale Strahlungsverteilung dimensionslos und wie in

Gleichung (3.1) dargestellt definiert [Lan93]:

$$\phi(\lambda) := S(\lambda) \cdot \beta(\lambda) \quad \forall \lambda \in [380 \text{ nm}, \dots, 780 \text{ nm}] . \quad (3.1)$$

Dieses $\phi(\lambda)$ ist im Falle eines betrachteten Selbstleuchters gleich dessen relativer spektraler Strahlungsverteilung $S(\lambda)$. Im Falle nicht selbst leuchtender Körper, wozu Druckerzeugnisse in der Regel zählen, wird der Farbreiz durch das Produkt aus relativer spektraler Strahlungsverteilung der beleuchtenden Lichtquelle $S(\lambda)$ und dem spektralen Remissionsgrad $\beta(\lambda)$ (vgl. Kapitel 3.2.5, Seite 16) der Oberfläche bestimmt. Man spricht dann vom Farbreiz einer Körperfarbe [Urb05], [Lan93], [Ric80].

Betrachtet man die für die Entstehung des Farbreizes verantwortlichen Zapfen und Stäbchen auf der Netzhaut, erkennt man deutlich, wie unterschiedlich diese auf der Netzhaut verteilt sind. Die Zapfendichte ist in der Fovea (Sehgrube) am größten, und die Stäbchen haben ihre höchste Dichte im Stäbchenring, der die Fovea mit etwas Abstand umfasst (Abbildung 3.3).

Auf der Netzhaut sind also neben den Stäbchen (R, nach dem englischen „rods“ für Stäbchen), die hauptsächlich für das skotopische Sehen in der Dämmerung und bei Nacht verantwortlich sind, drei verschiedene Arten von Zapfen für das eigentliche Farbsehen vertreten: S-Zapfen (short wavelength receptor) mit ihrem Absorptionsmaximum bei einer Wellenlänge von etwa 420 nm; M-Zapfen (medium wavelength receptor) und L-Zapfen (long wavelength receptor) haben ihr Absorptionsmaximum bei etwa 534 nm bzw. 563 nm (Abbildung 3.4) [Bow81].

Die Fovea, ca. 1 mm im Durchmesser, enthält nur Zapfen in einer sehr dichten, regelmäßigen und hexagonalen Anordnung. Im Zentrum der Fovea gibt es nur M- und L-Zapfen (bis zu 250.000 pro mm^2), die zum Sehgrubenrand auf 50.000 pro mm^2 und weiter zum Rand der Netzhaut auf 5.000 pro mm^2 abnehmen. Die S-Zapfen haben ihre größte Dichte am Sehgrubenrand (bei 1°) mit 2.000 pro mm^2 und nehmen zum Rand der Netzhaut auf 500 pro mm^2 ab [Fun06].

Die Stäbchen, die in der Fovea nicht vorhanden sind, haben ihre größte Dichte von ca. 150.000 pro mm^2 in einem Ring um die Sehgrube (bei 17°) und nehmen zum Netzhautrand auf 80.000 pro mm^2 ab [Fun06]. Alle Stäbchen haben dabei dasselbe Empfindlichkeitsspektrum mit einem Absorptionsmaximum bei 498 nm [Bow81].

Die Absorptionskurven der Zapfen zeigen, wie die einzelnen Zapfentypen auf Licht bestimmter Wellenlänge reagieren. Aber sie beschreiben nicht, wie der Eindruck von Helligkeit und Farbe entsteht. Ein Zapfen wird in demselben Ausmaß stärker angeregt, wenn die Intensität des einfallenden Lichts zunimmt, oder wenn sich die Wellenlängen des einfallenden Lichts in Richtung seines Absorptionsmaximums verschieben. Das heißt, ein einzelner Zapfen kann nicht zwischen Farb- oder Helligkeitsveränderung unterscheiden. Es wird nicht signalisiert, von welcher Wellenlänge die Anregung ausgeht [Fun06].

Erst die Kombination von mindestens zwei Zapfentypen, die unabhängig von einander reagieren und deren Absorptionskurven sich überschneiden, ermöglicht es, zwischen Farbe und Helligkeit zu unterscheiden. Beispielsweise liefert die (gewichtete) Subtraktion der M- und L-Absorptionskurven die Sensitivitätskurve dieses Zweizapfensystems. Die resultierenden Wer-

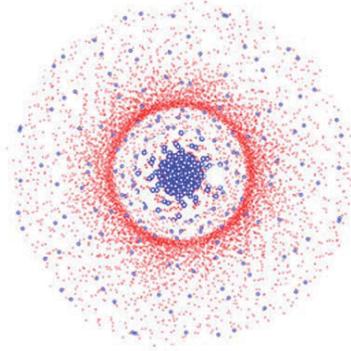


Abbildung 3.3: Schematische Darstellung der Verteilung von Zapfen (blaue Kreise) und Stäbchen (rote Punkte) auf der Netzhaut [Fun06]

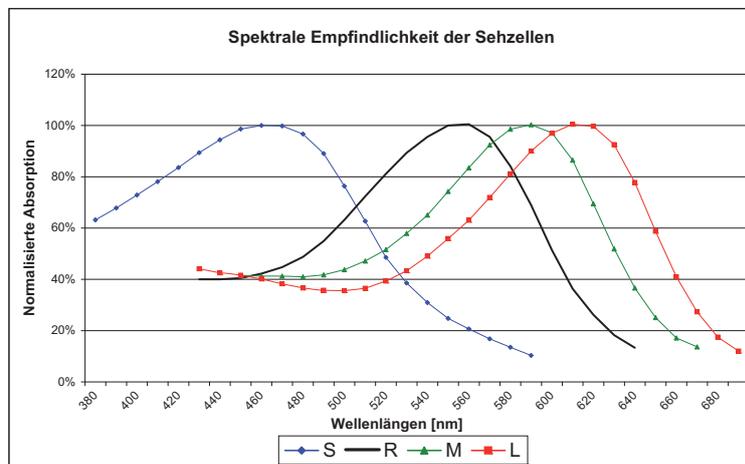


Abbildung 3.4: Spektrale Empfindlichkeit der Stäbchen (R) und Zapfen im kurzwelligen (S) Blau-, im mittelwelligen (M) Grün- und im langwelligen (L) Rotbereich des Lichts, jeweils relativ zur maximalen Empfindlichkeit der Sehzelle dargestellt [Bow81]

te sind sowohl positiv als auch negativ und teilen dadurch den gesamten Spektralbereich eindeutig in zwei unterscheidbare Farbbereiche auf (Abbildung 3.5) [Fun06].

Die Gegenfarbbereiche haben in diesem Fall ihre Maxima im grünen bzw. roten Wellenlängenbereich. Beim Weißpunkt (Abbildung 3.5) werden die beiden Zapfentypen mit der gleichen Intensität angeregt. Wenn sich also nur die Intensität des einfallenden Lichts ändert, bleibt der Differenzbetrag der beiden Absorptionskurven gleich, da sich die Erregung bei beiden Zapfen im gleichen Umfang ändert. Ändert sich jedoch die Wellenlänge des einfallenden Lichts, so kommt es zu einer Veränderung dieses Werts. Eine Farbverschiebung kann somit von einer Helligkeitsveränderung unterschieden werden [Fun06].

Berücksichtigt man auch die übrigen Zapfensystemkombinationen, liegt es nahe, dass die Informationen bezüglich der von den verschiedenen Zapfentypen absorbierten Strahlungsleistungen in insgesamt vier unabhängige Farbsignale und ein Helligkeitssignal transformiert werden [Fun06]. Auf die beiden Gegenfarbpaare Rot und Grün sowie Gelb und Blau, ergänzt durch das unbunte Paar Weiß und Schwarz für das Helligkeitssignal, führte schon Leonardo

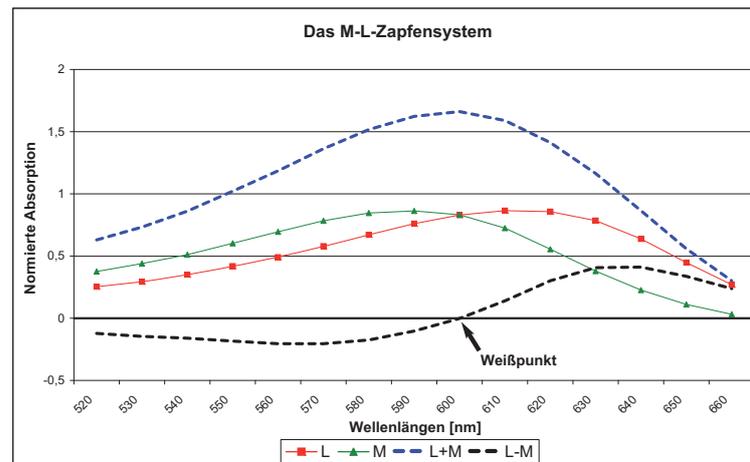


Abbildung 3.5: Addition und Subtraktion der M- und L-Absorptionskurven [Fun06]

da Vinci bei der Beschreibung des Farbkörpers die Gesamtheit aller Farben zurück [Ric96].

Gegenfarbpaare dienen auch im CIE $-L^*a^*b^*$ -Farbraum (vgl. Kapitel 3.3, Seite 17) als Koordinatenachsen und ermöglichen, ergänzt durch das Helligkeitssignal, die Unterscheidung von Farbtönen. Es ist zum Beispiel möglich, zu Rot ein Gelb oder zu Blau ein Rot zu mischen. Dabei entsteht der Eindruck von einem gelblichen Rot oder einem rötlichen Blau. Wenn aber zu Rot ein Grün oder zu Blau ein Gelb gemischt wird, hat man nicht den Eindruck von einem grünlichen Rot oder gelblichen Blau [Fun06].

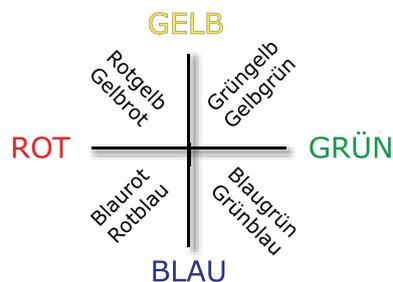


Abbildung 3.6: Gegenfarbpaare [Fun06]

Die gewichtete Summe der absorbierten Strahlungsleistung aller Zapfen („L+M+S“) wird als Helligkeit interpretiert. Ist die Anregung aller Zapfentypen vergleichbar („ $L \approx M \approx S$ “), sieht man die Körperfarben Weiß, Grau oder Schwarz in Abhängigkeit von der Lichtintensität. Die Rot-Grün-Unterscheidung wird durch die Gegenfarbbereiche Rot und Grün („L-M+S“) ermöglicht, während durch „L+M-S“ die Blau-Gelb-Unterscheidung erreicht wird [Fun06].

Welche Farbempfindung ein physikalischer Reiz aber nun tatsächlich auslöst, lässt sich allein mit Mitteln der physikalischen Optik nicht klären. Das Zustandekommen der visuellen Wahrnehmung ist das Ergebnis der komplexen Wechselwirkung zwischen Farbreiz und Farbempfindung. So können verschiedene Farbreize gleiche Farbempfindungen auslösen, aber ebenso kann derselbe Farbreiz zu sehr unterschiedlichen Farbempfindungen führen [Lan93].

Anhand folgender Beispiele sollen die angesprochenen Wechselwirkungen erläutert werden.

Die klassischen Wechselwirkungen, die direkt auf das Umfeld der fixierten Bereiche des Gesichtsfelds zurückgeführt werden, sind der farbige Simultankontrast, die Helligkeitskonstanz sowie die laterale Hemmung der Netzhaut. Diese sind insbesondere die Ursache dafür, dass Farbmessung und Abmusterung unter definierten Bedingungen erfolgen müssen (vgl. Kapitel 3.2.3, Seite 14).

Beispiel 3.1 (Farbiger Simultankontrast) Legt man ein in zwei Teile geschnittenes graues Papier jeweils auf eine gelbe und auf eine blaue Unterlage, so werden die zwei Teile unterschiedlich aussehen. Auf der gelben Unterlage erhält das Grau einen optisch bläulichen, auf der blauen einen optisch gelblichen Ton [Lan93].

Beispiel 3.2 (Helligkeitskonstanz) Das zweidimensionale Bild in Abbildung 3.7 (links) wird als ein dreidimensionales Schachbrett interpretiert, auf dem links eine Säule steht, deren Schatten aufgrund einer links oben befindlichen Lichtquelle auf das Schachbrett fällt. Bei den beiden Feldern, die blau eingekreist sind, wird das untere Feld als das hellere eingestuft. Doch tatsächlich ist die Leuchtdichte (vgl. Kapitel 3.2.5, Seite 16) der beiden Felder gleich [Bac08].

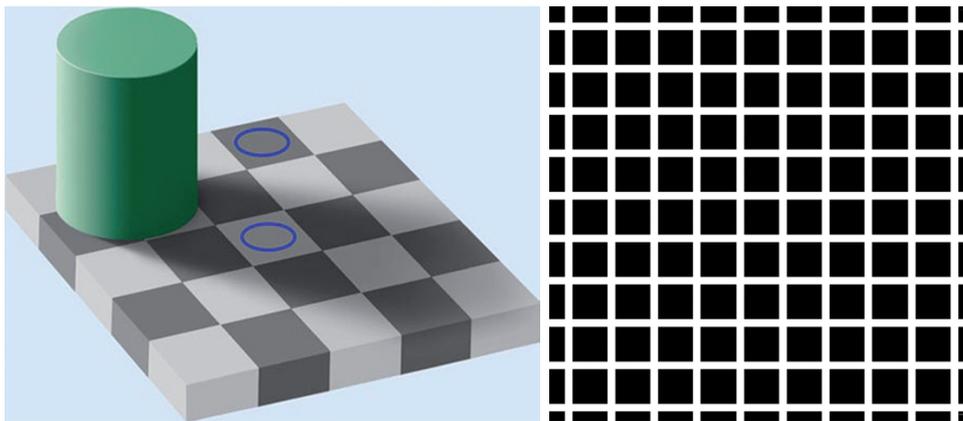


Abbildung 3.7: Optische Täuschungen am Beispiel der Helligkeitskonstanz [Bac08] (links) und des Hermann-Gitters (rechts)

Beispiel 3.3 (Laterale Hemmung der Netzhaut) Bei Betrachtung des Hermann-Gitters in Abbildung 3.7 (rechts) fallen graue Flecken an den Kreuzungen auf, die verschwinden, sobald man den Blick direkt auf sie richtet [Bac08].

Durch die chromatische Adaptionfähigkeit des menschlichen Auges müssen Messung und Abmusterung von Farben neben der Berücksichtigung des Umfelds auch unter Vorgaben bezüglich der Beleuchtungsart erfolgen wie folgendes Beispiel zeigt.

Beispiel 3.4 (Chromatische Adaption des Auges) Ist das Auge in unterschiedlichen Zuständen der chromatischen Adaption, reagiert es unterschiedlich auf denselben Farbreiz.

Nutzt man die Tatsache, dass sich beide Augen unabhängig voneinander chromatisch adaptieren können, und betrachtet helle Körperfarben abwechselnd mit einem beispielsweise grün adaptierten und einem normal adaptierten Auge, so liefert das grün adaptierte Auge vorübergehend eine rötlichere Farbempfindung als das normal adaptierte [Ric80]. (Eine Grünadaptation erreicht man, indem man einen kräftig grün gefärbten selbstleuchtenden Körper ein bis zwei Minuten lang mit einem Auge fixiert.)

Durch dieses Beispiel wird demnach die Notwendigkeit der Berücksichtigung von Metamerieeffekten deutlich. Nach DIN 5033, Teil 1 heißen zwei Farbreize mit unterschiedlichen Farbreizfunktionen *metamer*, wenn sie unter einer Lichtart zu gleichen Farbvalenzen (vgl. Kapitel 3.3, Seite 17) führen, unter einer anderen aber nicht. Zwei *unbedingt gleiche* Proben weisen ein gleiches spektrales Reflexionsverhalten auf und sehen bei jeder Lichtart und für jeden Beobachter gleich aus [DIN92].

Um diesen Einflüssen der Metamerieeffekte zu entgehen, wird in dieser Arbeit der Ansatz der spektralen Farbvorhersage verfolgt, wobei die anschließende Umrechnung in Farbvalenzen nur deshalb erfolgt (vgl. Kapitel 3.3), um die Güte der Simulation in der Validierung (vgl. Kapitel 8) auf Basis der Farbabstandstheorie (vgl. Kapitel 3.4) beschreiben zu können.

Um alle potentiell verfälschenden Einflüsse auf das Farbempfinden bei der wissenschaftlichen Betrachtung bestmöglich auszuschließen, müssen die Untersuchungen unter eindeutig definierten Bedingungen, wie sie im folgenden Kapitel vorgestellt werden, erfolgen.

3.2 Farbmessung

Für die wissenschaftliche Betrachtung der Farbempfindung wurde 1971 von der Internationalen Beleuchtungs-Kommission (CIE, für „Commission Internationale de L’Eclairage“) eine offizielle Empfehlung zur Farbmessung herausgegeben [CIE71]. Schon 1924 wurde im Rahmen der sechsten CIE-Tagung beschlossen, eine Studiengruppe für die Entwicklung von Grundnormen der Farbmessung einzusetzen [CIE24]. Ein CIE-Expertenausschuss für Farbmessung erarbeitete daraufhin Empfehlungen über Normlichtarten, über Messgeometrien inklusive Referenzweißstandard, über farbmetrische Normalbeobachter und das Normvalenzsystem [CIE63], [CIE31], [CIE59]. Schließlich erfolgte die Empfehlung zur Überführung des Normvalenzsystems in das CIE $-L^*a^*b^*$ Koordinatensystem als Annäherung an die empfindungsgemäße Gleichabständigkeit im dreidimensionalen Farbraum. Definitionen des Farbabstands ΔE für die empfundene Größe des Unterschieds zwischen zwei gegebenen Farben liefern ein mathematisches Maß für den empfindungsgemäßen Farbabstand [CIE86].

3.2.1 Normlichtarten

Für die farbmetrische Betrachtung darf insbesondere der Einfluss undefinierter Beleuchtung auf die Farbwahrnehmung die messtechnischen Ergebnisse nicht verfälschen. Mit Hilfe von

definierten Normlichtarten sollen daher die einzelnen Phasen des natürlichen Tageslichts und andere Lichtquellen unter Laborbedingungen reproduzierbar wiedergegeben werden.

In der Druckindustrie beschränkt man sich meist auf die Lichtart $D50$. Sie ist, wie auch die meisten anderen Normlichtarten, durch die relative spektrale Strahlungsverteilung $S(\lambda)$ zwischen 300 nm und 780 nm in 5 nm Schritten festgelegt (Abbildung 3.8) [CIE71].

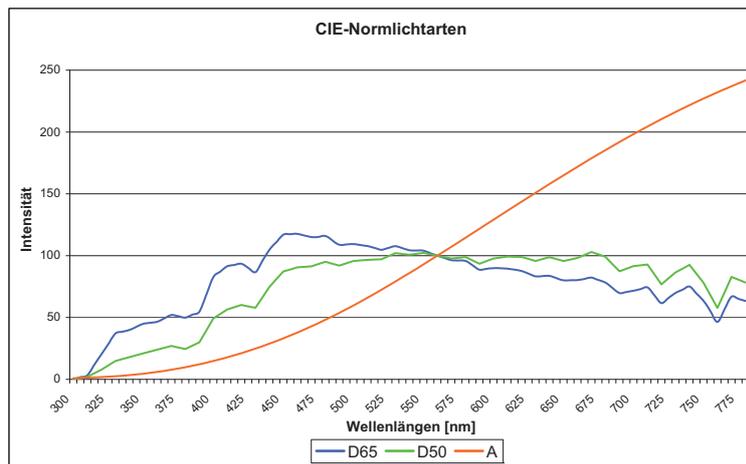


Abbildung 3.8: Relative Strahlungsverteilungsfunktionen der Normlichtarten D65, D50 und A

3.2.2 Referenzweißstandard

Es wird empfohlen, die vollkommen mattweiße Fläche als Bezugsfläche bei der Messung des Remissionsgrads zu nehmen. Die vollkommen mattweiße Fläche ist durch verlustfreie Zurückwerfung aller auffallender Strahlen bei gleichzeitiger idealer Streuung gekennzeichnet, daher kommt ihr der Remissionsgrad $\beta(\lambda) = 1,0 \quad \forall \quad \lambda \in [380 \text{ nm}, \dots, 780 \text{ nm}]$ zu [CIE71]. In der Praxis kommen in diesem Zusammenhang zum Beispiel Bariumsulfat- oder Arbeitskacheln zum Einsatz, die diese Anforderungen weitestgehend erfüllen.

3.2.3 Messgeometrie

In dieser Arbeit beziehen sich alle Remissionswerte auf die $45^\circ/0^\circ$ -Messgeometrie für die Auflichtmessung von Farben. Es werden die Proben, wie auch der Weißstandard zur Kalibrierung des Messsystems, unter 45° (ringförmig) beleuchtet, während die Messung senkrecht (0°) zur Probenoberfläche erfolgt. Dadurch bleiben ein eventuell vorhandener Glanz oder eine Struktur der Oberfläche bei der Messung nahezu ohne Einfluss. Weitere Messgeometrien sind beispielsweise in der DIN 5033 Teil 8 definiert [DIN92], [CIE71].

Standardisierte Rahmenbedingungen bei der Farbmessung sind an die Vorgaben bei der zu reproduzierenden Abmusterung angelehnt. Insbesondere kann die gerade angesprochene Messgeometrie in modernen Abmusterungskabinen unter dem Aspekt der Glanzminimierung weitgehend nachgestellt werden.

Anders gelagert ist die Berücksichtigung der schwinkelabhängigen Farbwahrnehmung.

3.2.4 Standardbeobachter

Bei den nachstehenden Überlegungen wird davon ausgegangen, dass dem Betrachter für den Vergleich und die Beurteilung der Farben homogene Farbflächen auf neutralem Grund präsentiert werden. Das heißt, alle Rezeptoren auf der Netzhaut werden (im Fall zweier gleicher Proben in Abbildung 3.1) in einem definierten Bereich demselben Lichtreiz ausgesetzt.

Da die Farbrezeptortypen L-, M- und S-Zapfen wie auch die Stäbchen sehr ungleichmäßig auf der Netzhaut verteilt sind (Abbildung 3.3 und Ausführungen in Kapitel 3.1, Seite 9), ist es bei gleichbleibendem Licht für die Farbwahrnehmung relevant, welcher Bereich der Netzhaut dem Lichtreiz ausgesetzt ist. Abbildung 3.9 zeigt, wie sich das Verhältnis der verschiedenen Zapfen und Stäbchen zueinander ändert, wenn Netzhautbereiche verschiedener Winkel um die Fovea involviert sind, wodurch wiederum die Farbempfindung beeinflusst wird. Es muss daher unterschieden werden, ob Messwerte auf 2°- oder 10°-Standardbeobachterbedingungen basieren. Das heißt, der Bereich der Abmusterung ist auf eine Zone von 2° bzw. 10° um die Sehachse festgelegt, so dass diese Zone ausschließlich vom Lichtreiz der zu vergleichenden Proben getroffen wird (Abbildung 3.10) [Fun06].

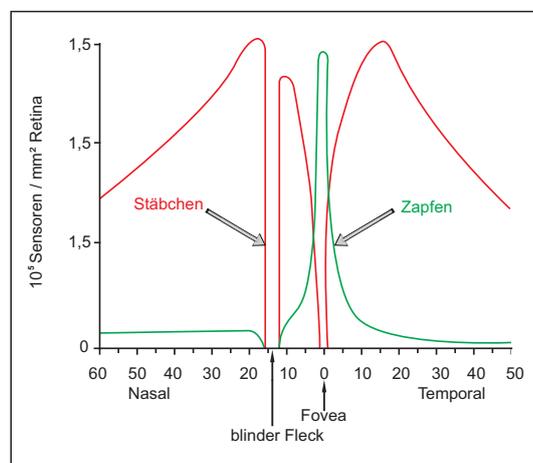


Abbildung 3.9: Dichteverteilung der Zapfen und Stäbchen in Abhängigkeit der Winkeldifferenz zur Fovea [Bie91]

Im Messgerät spielt bei den Beobachtungsbedingungen die Größe des Messfelds nur insofern eine Rolle, als dass laut DIN 16536-2 eine Mindestgröße in Abhängigkeit der vorliegenden Rasterfrequenz festgelegt ist [DIN95]. Die Berücksichtigung des veränderten Wahrnehmens der Proben ist innerhalb der zur Farbabstandsberechnung nötigen Farbvalenzen über die 2°- und 10°-Normspektralwertfunktionen gelöst (vgl. Kapitel 3.3, Seite 17). Alle Valenzen in dieser Arbeit beziehen sich auf den 2°-Standardbeobachter

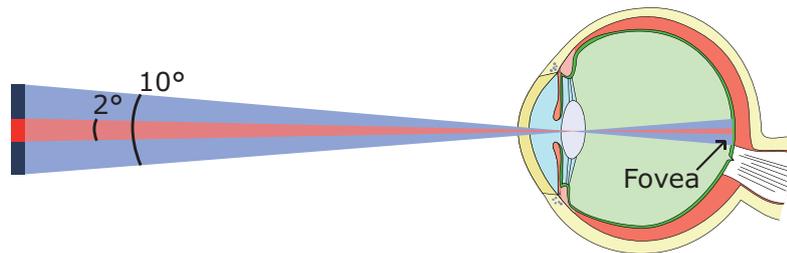


Abbildung 3.10: Involvierte Netzhautbereiche um die Fovea bei 2°- und 10°-Standardbeobachterbedingungen [Fun06]

3.2.5 Messtechnische Umsetzung

Eine Messung mit einem Spektralphotometer geschieht in der Weise, dass gemäß der vorgestellten Messgeometrie das Licht einer Lichtquelle auf eine Probe trifft, und bei der Messung die Rückstrahlung durch ein Prisma oder Gitter spektral zerlegt wird [Hae84]. Jedem Spektralband ist ein eigener Sensor in der Photodiodenzeile zugeordnet, der diesbezüglich die Leuchtdichte (Lichtstärke [cd] pro Fläche [m²]) misst (Abbildung 3.11).

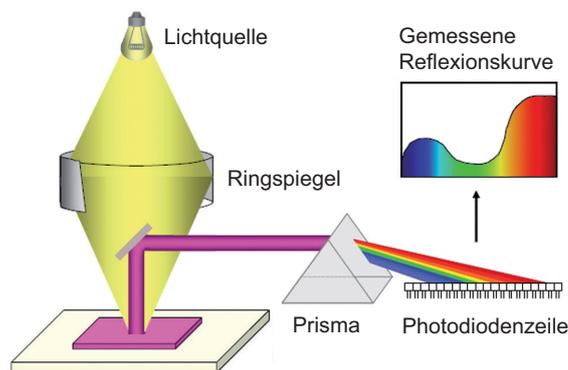


Abbildung 3.11: Farbmessung mit Prisma und Photodiodenzeile [Bul06]

Misst man die Leuchtdichte einer matten Oberfläche bei einer bestimmten Beleuchtung über alle Wellenlängen λ im relevanten sichtbaren Bereich und dividiert sie durch die Leuchtdichte der unter derselben Beleuchtung gemessenen vollkommen mattweißen Fläche (Referenzweiß), so erhält man den Leuchtdichtefaktor $\beta(\lambda)$ der betreffenden Oberfläche [Lan93]. Der Leuchtdichtefaktor wird auch als spektraler Reflexions- oder Remissionsgrad bezeichnet und im weiteren Verlauf dieser Arbeit kurz Remission genannt.

Wären die Messproben vollkommen matt, so wäre das Ergebnis unabhängig von der Beleuchtungsrichtung sowie von der Richtung, unter der gemessen wird. Da jedoch reale Oberflächen mehr oder weniger glänzen und auch außerhalb des Glanzwinkels die Strahlungsdichte nicht völlig unabhängig von der Beleuchtungs- und Messrichtung ist, ergeben sich bei verschiedenen Messanordnungen (Messgeometrien) unterschiedliche Ergebnisse. Deswegen ist bei der Angabe von Remissionen immer, neben der Angabe des gewählten Standard-Beobachters

und analog zur definierten Farbarmusterung mit dem Auge, auch die Angabe der zur Bestimmung angewendeten Messgeometrie erforderlich [Lan93].

Die Werte für Remissionen $\beta(\lambda)$ von Proben liegen für vollkommen matte und nicht fluoreszierende Oberflächen definitionsgemäß immer zwischen 0 und 1. Die in Kapitel 3.1 eingeführte Farbreizfunktion $\phi(\lambda)$ kann dabei, unabhängig von der ursprünglichen Messbeleuchtung, für beliebige Lichtarten berechnet werden, solange keine fluoreszierenden Proben (vgl. Kapitel 11, Seite 86) verwendet werden.

Die zur Farbabstandsberechnung nötigen Farbvalenzen werden unter Verwendung dieser Farbreizfunktion im folgenden Kapitel vorgestellt.

3.3 Farbvalenzen

Farbvalenzen haben ihren Ursprung in den Primärvalenzen. Es gelingt, jede Farbvalenz als Summe dreier Primärvalenzen zu beschreiben, wobei gelegentlich negative Summanden auftreten können. Diese Primärvalenzen sind frei wählbar, müssen aber als linear unabhängige Vektoren einen Farbraum aufspannen können [Ric80].

Um die angesprochenen negativen Summanden zu vermeiden, werden diese real existierenden Primärvalenzen (oft R, G, B als Bezugsfarbvalenzen) durch virtuelle Normvalenzen ersetzt. Mit diesen Normvalenzen X, Y, Z kann jede Farbvalenz mit positiven (virtuellen) Normfarbwertanteilen beschrieben werden [Ric80]. Dieses Normvalenzsystem ist international durch die Normspektralwertfunktionen $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ der CIE eindeutig festgelegt [CIE71].

Betrachtet man also Farbvalenzen als das physiologische Äquivalent des physikalischen Farbreizes $\phi(\lambda)$, wird dieser Zusammenhang durch die funktionale Darstellung über die Normvalenzen beschrieben. Sie sind wie in den Gleichungen 3.2 dargestellt definiert:

$$\begin{aligned} X &:= k \cdot \sum_{\lambda} \phi(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) \cdot \Delta\lambda \\ Y &:= k \cdot \sum_{\lambda} \phi(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) \cdot \Delta\lambda \\ Z &:= k \cdot \sum_{\lambda} \phi(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) \cdot \Delta\lambda \end{aligned} \tag{3.2}$$

mit

$$k := 100 / \sum_{\lambda} S(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) \cdot \Delta\lambda$$

als Normierungsfaktor, der sicherstellt, dass die Normvalenz Y einer Referenzweißremission bei jeder Normlichtart gleich 100 ist und mit $\Delta\lambda$ als Diskretisierungsschrittweite der Zerlegung des sichtbaren Spektrums in zum Beispiel 10 nm Schritten [Ric80].

Das geometrische Ergebnis einer Farbvalenz ist demnach als Farbort in einem Farbraum definiert. Dabei existieren unterschiedliche Geometrien zur Darstellung der Gesamtheit der

Farborte, aber das für alle Farbräume grundlegende Farbsystem ist vereinbarungsgemäß das Normvalenzsystem X, Y, Z [Ric80].

Wie groß der Unterschied zweier Farben ist, lässt sich jedoch anhand der euklidischen Abstände in diesem Normvalenzsystem nicht exakt beurteilen. Auf Basis der abgeleiteten Normfarbwertanteile

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}$$

und

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$

lässt sich beispielsweise zeigen, dass Farbproben, die von einer bestimmten Farbe bezüglich verschiedener Richtungen des Farbraums empfindungsgemäß denselben Farbabstand haben nicht zu einem Kreis rund um die gewählte Farbe in diesem x - y -System führen, sondern in Form einer Ellipse angeordnet sind. Darüber hinaus sind diese Ellipsen unterschiedlich groß, je nachdem, wo die gewählte Farbe im Farbraum liegt. Diesen Sachverhalt hat MACADAM erstmals aufgezeigt, weshalb man von den so genannten MACADAM-Ellipsen im zweidimensionalen x - y -System spricht (Abbildung 3.12) [Sch02]. Unter zusätzlicher Berücksichtigung der Leuchtdichtevariation Y ergeben sich entsprechende Ellipsoide im dreidimensionalen Y, x, y -Farbraum [Mac49].

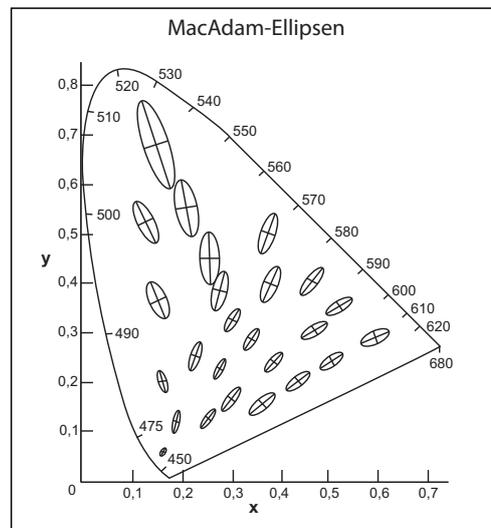


Abbildung 3.12: Normfarbtafel mit den Schwellenellipsen nach MACADAM [Mac35] (Die Ellipsen sind gegenüber dem Maßstab der Koordinaten x, y zehnfach vergrößert.)

Diese MACADAM-Ellipsen berücksichtigend, ist das CIE $-L^*a^*b^*$ - Farbsystem eine mathematische Transformation des Normvalenzsystem X, Y, Z , mit der die empfindungsgemäße Farbcharakterisierung besser dargestellt werden kann [Sch02]. Im CIE $-L^*a^*b^*$ - Farbsystem sollen gleiche euklidische Abstände empfindungsgemäß gleichen Farbabständen entsprechen. Jede wahrnehmbare Farbe im Farbraum ist durch den Farbort mit den Koordinaten L^*, a^*, b^* definiert. Jede Farbvalenz ist durch die Helligkeit (L^*), rot-grün-Wert (a^*) und blau-gelb-Wert (b^*) in Anwendung des Gegenfarbenmodells (vgl. Kapitel 3.1, Seite 11) bestimmt [Ric80].

Bei Zahlenangaben für die Farbvalenzen, die sich auf visuelle Gleichheitsurteile beziehen sollen, sind die durch die CIE festgelegten Normspektralwertfunktionen $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ zu verwenden. Diese Funktionen definieren den „farbmetrischen Normalbeobachter CIE 1931“ [CIE71]. Hier wird aus Gründen der vorgestellten Verteilungsunterschiede von Zapfen und Stäbchen auf der Netzhaut der „farbmetrische 10°- (Grossfeld)-Normalbeobachter CIE 1964“ über separate Normspektralwertfunktionen $\bar{x}_{10}(\lambda), \bar{y}_{10}(\lambda), \bar{z}_{10}(\lambda)$ definiert.

Die Farbvalenzen im CIE- $L^*a^*b^*$ Farbraum werden daraus folgendermaßen berechnet:

$$L^* := 116 \cdot \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_n}} - 16 \quad (3.3)$$

$$a^* := 500 \cdot \left(\sqrt[3]{\frac{X}{X_n}} - \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_n}} \right) \quad (3.4)$$

$$b^* := 200 \cdot \left(\sqrt[3]{\frac{Y}{Y_n}} - \sqrt[3]{\frac{Z}{Z_n}} \right), \quad (3.5)$$

mit X_n, Y_n und Z_n als Normvalenzen der betreffenden Lichtart, also $\beta(\lambda) = 1 \quad \forall \quad \lambda \in [380 \text{ nm}, \dots, 780 \text{ nm}]$ in den Gleichungen (3.2).

Ist dabei der Quotient unter der Wurzel kleiner als 216/24389 wird die gesamte Wurzel durch

$$\frac{1}{16} \cdot \left(\frac{24389}{27} \cdot \frac{P}{P_n} + 16 \right) \quad (3.6)$$

ersetzt, wobei P im betreffenden Fall für X, Y bzw. Z steht.

3.4 Farbvergleiche

Beziehungen zwischen Farbvalenzen werden durch die Farbvalenzmetrik beschrieben. Als Farbvalenzmetrik für den CIE- $L^*a^*b^*$ -Farbraum wurde bis 1994 der euklidischen Abstand ΔE_{ab}^* zweier Farborte zur empfindungsgemäßen Farbcharakterisierung verwendet. Dann wurde beispielsweise unter der Bezeichnung ΔE_{2000}^* eine Anpassung dieser Formel eingeführt, die der tatsächlichen empfindungsgemäßen Farbabstands-Charakterisierung besser entspricht [CIE01], [Luo01]. Beide Größen werden in dieser Arbeit zur Einordnung der Ergebnisse herangezogen. Die verwendeten Formeln befinden sich im Anhang (vgl. Kapitel 12.1, Seite 88).

Grundsätzlich gilt, dass die CIE den Wert $\Delta E = 1$ als den Wert festgesetzt hat, den ein Normalbeobachter als kleinste Farbabweichung überhaupt sehen kann. Als Anhaltspunkte gelten die in Tabelle 3.4 aufgeführten Wahrnehmbarkeitsschwellen bei ΔE_{ab}^* -Werten [Urb05]:

| ΔE_{ab}^* -Werte | Effekt |
|--------------------------|------------------------------|
| < 1 | nicht wahrnehmbar |
| 1 bis 3 | schwer wahrnehmbar |
| 3 bis 6 | wahrnehmbar, aber akzeptabel |
| > 6 | nicht akzeptabel |

Tabelle 3.1: ΔE , Wahrnehmbarkeitsschwellen im CIE- $L^*a^*b^*$ -Farbraum

Damit sind die relevanten farbmtrischen Grundlagen geschaffen, die in den folgenden Farbvorhersagemodellen ihre Anwendung finden.

Kapitel 4

Existierende Modellansätze

Zur Veranschaulichung des modernen Rasterdrucks dient eine Technik, die als Pointillismus bekannt wurde (Abbildung 4.1). Der Pointillismus (nach dem französischen Verb „pointiller“ zu Deutsch „mit Punkten darstellen“) ist eine Weiterentwicklung des Impressionismus in der Malerei und wurde um 1885 von Georges Seurat in Frankreich begründet. Beim Pointillismus werden Farben nicht als Flächen, sondern in mosaikartig aneinander gereihten Punkten und Strichen aufgetragen. Erst im Auge des Betrachters verschmelzen diese einzelnen Punkte zu Gegenständen und Flächen, wobei sich die resultierenden Farben aus den verwendeten Farben optisch (additiv) mischen [Tes10].

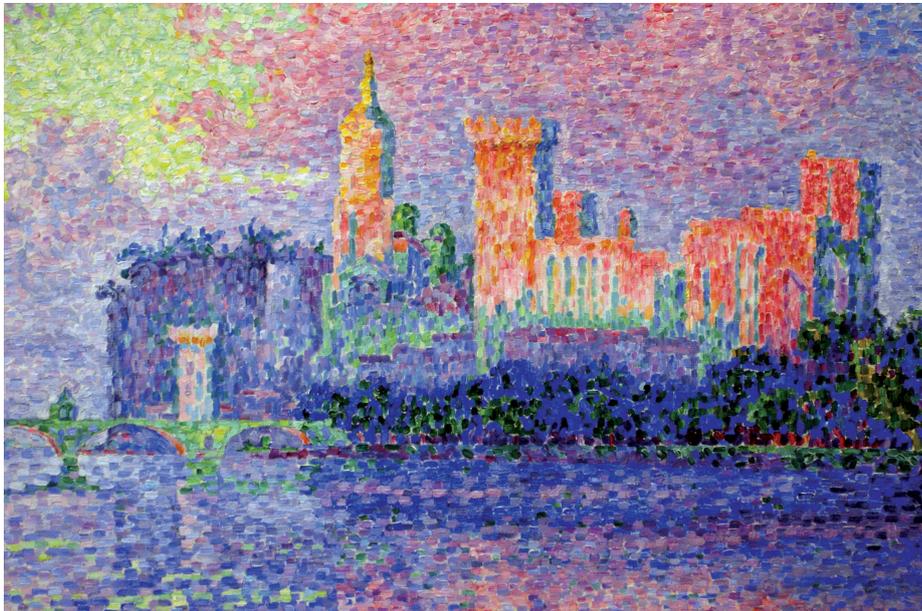


Abbildung 4.1: Pointillismus: „Der Papstpalast in Avignon“ von Paul Signac (1900) [Sig06]

Die autotypische Farbmischung in Rasterdruckverfahren entsteht dem gegenüber durch das Zusammenwirken additiver und multiplikativer (subtraktiver) Farbmischung.

Die additive Komponente entsteht beim Mehrfarben-Rasterdruck dadurch, dass die Ras-

terpunkte der Primärfarben sehr klein sind und außerdem so eng benachbart liegen, dass das Auge diese nicht mehr optisch auflösen kann. Somit werden eng benachbarte Teile der Netzhaut gleichzeitig von Strahlen verschiedener spektraler Zusammensetzungen getroffen, die sich zu einem untrennbaren Farbreiz addieren [Hae84]. Es entsteht der Eindruck einer gleichmäßig gefärbten Fläche, deren Farbe demnach die additive Mischfarbe der nicht mehr aufgelösten Flächenelemente ist [Ric80]. Im Pointillismus kommt dieser Effekt bei der Betrachtung mit ausreichend großem Abstand zum Tragen.

Die multiplikative Mischung der Farben findet auf dem Bedruckstoff statt: Lasierende Farben wirken wie Filter, durch die das auftreffende Licht auf den Bedruckstoff gelangt. Dort wird es diffus gestreut und gegebenenfalls erneut durch eine oder mehrere Farbschichten spektral beeinflusst, bevor es in das Auge des Betrachters gelangt [Hae84].

Aus der Platzierung und Überlappung von druckenden Elementen verschiedener Farbauszüge (Abbildung 4.2) ergibt sich aus einer heute typischen acht-Bit Auflösung pro Primärfarbe mit Cyan, Magenta und Gelb die Anzahl von 256^3 datentechnisch unterscheidbaren Farben. Dabei lässt sich der zu erwartende, resultierende Farbreiz bzw. die Farbempfindung vorausberechnen, also „vorhersagen“. Durch die begrenzte Unterschiedsempfindlichkeit des Auges ergeben sich indessen nur etwa eine Millionen Farben, die sich unter günstigsten Beobachtungsbedingungen tatsächlich unterscheiden lassen [Ric80].

In diesem Kapitel werden exemplarisch die Anfänge der Rastertonvorhersage und einige für die spätere Modellkonsolidierung relevante Ansätze vorgestellt.

4.1 Anfänge der Rastertonvorhersage

4.1.1 Murray-Davies

Die Farbempfindung aus Kapitel 3.1 hängt im Fall des einfarbigen Rasterdrucks direkt von den Remissionen des unbedruckten $\beta_{PW}(\lambda)$ und des bedruckten Bedruckstoffs $\beta_{VT}(\lambda)$ sowie von dem Anteil der gedeckten Fläche ab [Mur36], [Lan95]. Die zu erwartende, resultierende Remission $\widehat{\beta}_a(\lambda)$ eines Rasterfeldes mit einem Flächendeckungsanteil a kann mit folgender Formel (4.1) nach MURRAY-DAVIES berechnet werden:

$$\widehat{\beta}_a(\lambda) := a \cdot \beta_{VT}(\lambda) + (1 - a) \cdot \beta_{PW}(\lambda) \quad \forall \lambda \in [380 \text{ nm}, \dots, 780 \text{ nm}] . \quad (4.1)$$

Für die Berechnung von Mischfarben müssen aber die einzelnen Farbauszüge und deren gegenseitige Überdeckung (Abbildung 4.2) berücksichtigt werden. Der nun folgende Ansatz nach DEMICHEL bedient diese Forderung.

4.1.2 Demichel

Dadurch, dass die verwendeten Raster vom Auge nicht mehr optisch aufgelöst werden können, spielt es rein theoretisch keine Rolle, wie die druckenden Elemente angeordnet sind, sondern

es ist analog zu MURRAY-DAVIES nur der jeweilige Flächendeckungsanteil relevant. Daher wählt DEMICHEL eine rein statistische Herangehensweise, um die gegenseitige Überdeckung verschiedener Farbschichten beim Übereinanderdruck (Abbildung 4.2) zu beschreiben. Er betrachtet die Flächendeckungsanteile a_c , a_m und a_y der Primärfarben Cyan, Magenta und Gelb als die Wahrscheinlichkeit, mit der an einer bestimmten Stelle die entsprechende Primärfarbe vorzufinden ist [Dem24]. Demgegenüber stehen $(1 - a_c)$, $(1 - a_m)$ beziehungsweise $(1 - a_y)$ für die Wahrscheinlichkeit, mit der an dieser Stelle die jeweilige Primärfarbe nicht vorzufinden ist.

Durch die entsprechende Multiplikation dieser Wahrscheinlichkeiten können die Flächendeckungsanteile f_i für alle möglichen Primärfarbkombinationen durch die in den Formeln (4.2) dargestellten Zusammenhänge berechnet werden [Dem24].

$$\begin{aligned}
 f_{PW} &:= (1 - a_c) \cdot (1 - a_m) \cdot (1 - a_y) \\
 f_c &:= a_c \cdot (1 - a_m) \cdot (1 - a_y) \\
 f_m &:= (1 - a_c) \cdot a_m \cdot (1 - a_y) \\
 f_y &:= (1 - a_c) \cdot (1 - a_m) \cdot a_y \\
 f_r &:= (1 - a_c) \cdot a_m \cdot a_y \\
 f_g &:= a_c \cdot (1 - a_m) \cdot a_y \\
 f_b &:= a_c \cdot a_m \cdot (1 - a_y) \\
 f_{DFS} &:= a_c \cdot a_m \cdot a_y
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

Die Indizes der Flächendeckungsanteile PW , c , m , y , r , g , b und DFS stehen für unbedruckten Bedruckstoff, für die Primärfarben Cyan, Magenta bzw. Gelb, für die Sekundärfarben Rot (Übereinanderdruck von Magenta und Gelb), Grün (Übereinanderdruck von Cyan und Gelb) bzw. Blau (Übereinanderdruck von Cyan und Magenta) und für die Tertiärfarbe Dreifarben-schwarz (Übereinanderdruck von Cyan, Magenta und Gelb).

Demnach ist beispielsweise der Flächendeckungsanteil f_{PW} vom unbedruckten Bedruckstoff das Produkt der Wahrscheinlichkeiten, mit denen, in Abhängigkeit der jeweiligen Flächen-deckung, keine der Primärfarben vorzufinden sind.

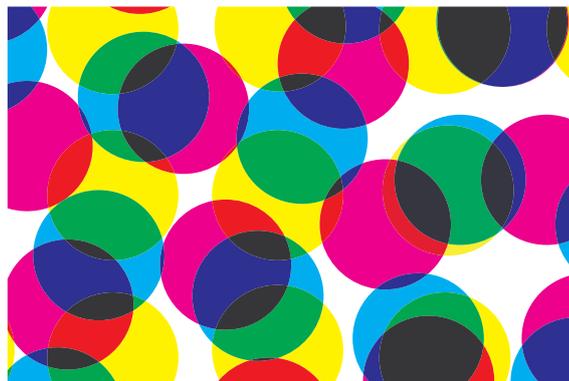


Abbildung 4.2: Der Übereinanderdruck von drei Primärfarben idealisiert dargestellt [Her06].

Die Ergebnisse dieser rein statistischen Herangehensweise kommen im folgenden Ansatz nach NEUGEBAUER zum Einsatz.

4.1.3 Neugebauer

NEUGEBAUER nutzt diese Formeln (4.2), um unter Kenntnis der Remission von Bedruckstoff und aller Primär-, Sekundär- sowie Tertiärfarben die zu erwartende resultierende Remission $\widehat{\beta_{cmy}}(\lambda)$ eines Rasterfeldes im CMY-Mehrfarbenrasterdruck mittels der Formel (4.3) zu berechnen:

$$\widehat{\beta_{cmy}}(\lambda) := \sum_{i \in \Psi} f_i \cdot \beta_{VT_i}(\lambda) \quad \forall \lambda \in [380 \text{ nm}, \dots, 780 \text{ nm}] . \quad (4.3)$$

Hier sind $\beta_{VT_i}(\lambda)$ mit $i \in \Psi = \{PW, c, m, y, r, g, b, DFS\}$ gemäß obiger Notation die Remission von unbedrucktem Bedruckstoff, den Volltönen der Primär- und Sekundärfarben bzw. der Tertiärfarbe *DFS* [Neu37].

Diese Vorgehensweise lässt sich auf eine beliebige Anzahl von Primärfarben erweitern, sie vernachlässigt jedoch sämtliche Effekte, die unter anderem durch das Zusammenwirken von Licht, Druckpunkt und Bedruckstoff in den Halbtönen auftreten.

Anmerkung 4.1 *Ein zusätzliches, reines Schwarz wird hauptsächlich im Mehrfarbendruck verwendet, um den technologischen Aufwand des Druckens von drei Buntfarben zur Erzeugung von Schwarz bzw. eines Gauwerts durch die direkte Verwendung der Farbe Schwarz zu reduzieren, hochwertige Buntfarben einzusparen und vor Allem, um den Druckprozess zu stabilisieren [Brü00].*

Im Folgenden steht also weiterhin der CMY-Mehrfarbedruck im Zentrum der Betrachtungen.

4.2 Berücksichtigung der Lichtstreuung

4.2.1 Yule und Nielsen

YULE-NIELSEN begegnen den gerade genannten unvermeidbaren Effekten (vgl. Kapitel 4.1.3, Seite 24), indem sie den nach ihnen benannten YULE-NIELSEN-Faktor einführen. Aus physikalischer Sicht wird die bedruckstoffspezifische mittlere Weglänge des Lichts im Bedruckstoff berücksichtigt [Yul51]. Bei der Berechnung der zu erwartenden, resultierenden Remission $\widehat{\beta_{cmy}}(\lambda)$ eines bunt aufgebauten Rastertonfeldes, wie in Gleichung (4.4) dargestellt, handelt es sich um die mit einem Parameter n erweiterte NEUGEBAUER-Gleichung.

$$\widehat{\beta_{cmy}}(\lambda) := \left(\sum_{i \in \Psi} f_i \cdot \sqrt[n]{\beta_{VT_i}(\lambda)} \right)^n \quad \forall \lambda \in [380 \text{ nm}, \dots, 780 \text{ nm}] \quad (4.4)$$

Da sich die mittlere Weglänge des Lichts bei unterschiedlichen Flächendeckungen unterschiedlich auswirkt, muss der YULE-NIELSEN-Faktor für jedes Rasterfeld individuell bestimmt werden. Als Mittelwert über eine größere Anzahl an Testfeldern angenähert, stellt dieser Ansatz dennoch eine deutliche, aber rein empirische Verbesserung gegenüber dem reinen NEUGEBAUER-Ansatz (mit $n = 1$) dar.

4.2.2 Clapper und Yule

Eine weitere Anpassung bezüglich der Berücksichtigung des Verhaltens von Licht im „Farbe-Bedruckstoff-System“ ist der CLAPPER-YULE-Ansatz. Dieser beinhaltet die analytische Betrachtung von Streuung, interner Reflexion und Absorption im Bedruckstoff und Farbe bei Rasterdrucken. Die gesamte remittierte Strahlung wird als Summe vieler individuell beeinflusster Strahlungsanteile (r_1, r_2, \dots, r_n) betrachtet [Yul53]. In Abbildung 4.3 ist dieser Zusammenhang vereinfacht dargestellt.

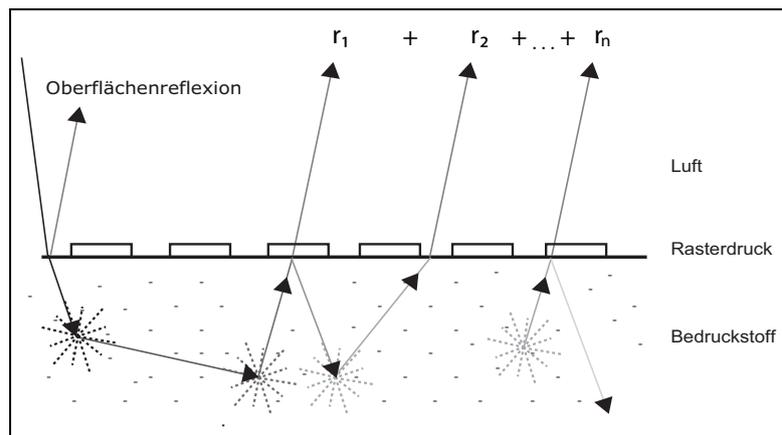


Abbildung 4.3: Diffuse Streuung des Lichts in Bedruckstoff

CLAPPER-YULE konnten damit zeigen, dass die optische Dichte eines Rasterdrucks stark vergrößert sein kann gegenüber dem nach MURRAY-DAVIES berechneten, rein geometrischen Wert [Ber97].

Im folgenden Ansatz werden diese Ergebnisse wahrscheinlichkeitstheoretisch dargestellt, wobei die Streuung des Lichts nicht mehr im Einzelnen betrachtet wird, sondern die Wahrscheinlichkeit der verschiedenen durch Streuung beeinflussten Lichtwege für den Ansatz genutzt wird.

4.2.3 Implementierung der Punktspreizfunktion

ROGERS generalisiert das CLAPPER-YULE-Modell, indem er die Streuvorgänge des Lichts im Bedruckstoff mittels einer Punktspreizfunktion (PSF) wahrscheinlichkeitstheoretisch beschreibt und dies für die Berechnung der zu erwartenden Remission eines gedruckten Rasterfelds verwendet [Rog00]. RUCKDESCHEL und HAUSER haben die Basis für derartige Streumodelle geschaffen. Ihre experimentellen Ergebnisse zeigen, dass die Verteilung der spezifischen Ausstrahlung beispielsweise durch eine angepasste Gauss-Verteilung, wie in Gleichung (4.5) dargestellt, für einige Papiere beschrieben werden kann [Rod82], [Hau78].

$$PSF(x, y) = \frac{1}{k\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\left(\frac{x - \hat{x}}{k}\right)^2} \cdot e^{-\left(\frac{y - \hat{y}}{k}\right)^2} \quad (4.5)$$

Diese Formel beschreibt, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Lichtstrahl, der an einer Position (\hat{x}, \hat{y}) in den Bedruckstoff eingedrungen ist, an der davon abweichenden Position (x, y) wieder austritt (Abbildung 4.4). Die Konstante k beschreibt dabei die Lichtdiffusion, also die mittlere Weglänge des Lichts im Bedruckstoff [Ber97]. Eine einfache Methode, die tatsächliche *PSF* mikroskopisch zu bestimmen, wird von UKISHIMI [Uki10] vorgestellt.

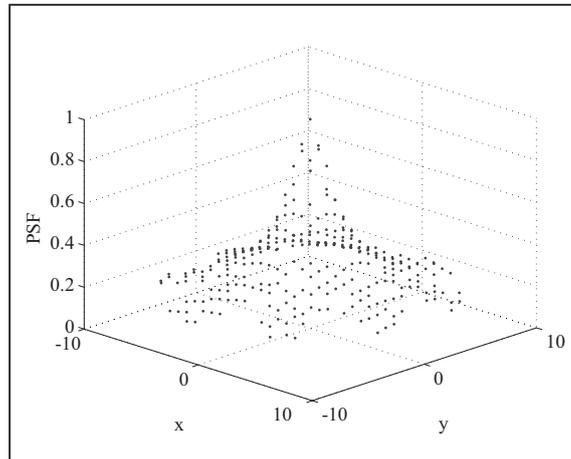


Abbildung 4.4: Dreidimensionale Darstellung einer Punktstreuungsfunktion [Uki10].

Aber auch bei diesen Ansätzen wird davon ausgegangen, dass die Farbe in homogener Schichtdicke auf dem Bedruckstoff verteilt ist. Sie dienen als Grundlage, um im Folgenden auch die tatsächliche Struktur der Druckpunkte zu berücksichtigen.

4.3 Berücksichtigung der Farbspreizung

Schon BEHLER hat in seinen experimentellen Untersuchungen der Farbspaltungsströmung die Struktur von Druckpunkten untersucht. Er zeigt, dass auch unter idealen Spaltungsbedingungen (zum Beispiel bei der Trennung zweier Glasplatten mit einer dazwischen befindlichen Flüssigkeit) die Kontur des verbleibenden Flüssigkeitstropfens keineswegs konzentrisch bleibt. Es kommt zu einer Auffingerung der Berandung („Viscous Fingering“) [Beh93], wie man sie auch bei mikroskopischer Betrachtung von Rasterdrucken findet (Abbildung 4.5).

Durch Mikrodensitometrie ist es möglich, sehr hoch aufgelöst die Dichten von verschiedenen Teilbereichen des Druckpunkts zu messen und in einer Matrix abzulegen (Abbildung 4.6). EMMEL und HERSCH untersuchen dies zunächst bezüglich des Inkjet-Druckverfahrens. Statt sich auf eine konstante Transmission für die bisher als homogen angenommene Farbschicht zu beschränken, approximieren sie die gefundene Dichteverteilung mittels einer parabolischen Funktion. Sie entwickeln eine Farbspreizfunktion (*ISF*, nach der englischen Bezeichnung „Ink Spread Function“) und verwenden diese wie ein Gitter von Dichtewerten bzw. Transmissionswerten $\tau_{(x,y)}(\lambda)$ für die Berechnung der zu erwartenden Remission der Druckpunkte [Her02].

Alle Lichtstrahlen, die die Oberfläche des Drucks an den Positionen (\hat{x}, \hat{y}) treffen, erfah-

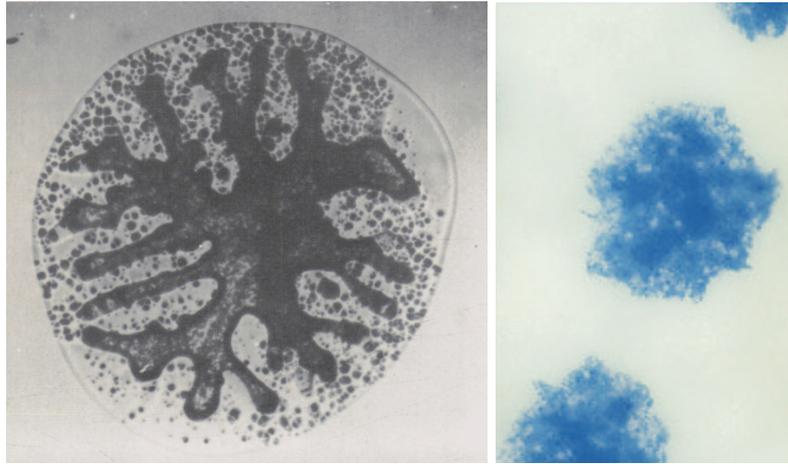


Abbildung 4.5: Farbspaltungseffekte [Beh93] (links) und Mikroskopische Betrachtung eines Rasterpunktes [Pau97] (rechts)

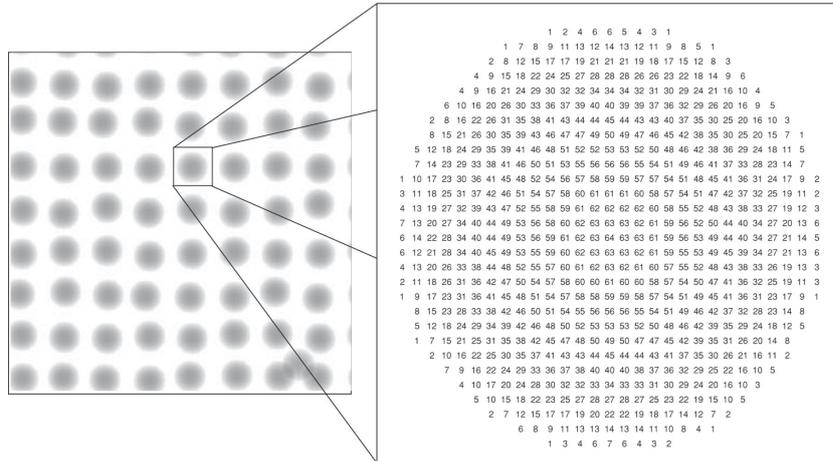


Abbildung 4.6: Dichteverteilung innerhalb eines Druckpunktes (Inkjet) [Her02]

ren demnach eine ortsabhängige Abschwächung $\tau_{(\hat{x},\hat{y})}(\lambda)$, gemäß der auf die gesamte Oberfläche erweiterten Transmissionsmatrix. Daraufhin wird die bedruckstofftypische Lichtstreuung berücksichtigt: Alle Strahlen, die laut passender *PSF* an der Position (x, y) den Bedruckstoff verlassen, haben eine Leuchtdichte, die sich aus ihrer jeweiligen Abschwächung $\tau_{(\hat{x},\hat{y})}(\lambda)$ und der Remission $\beta_{PW}(\lambda)$ zusammensetzt. Abschließend wird diese Leuchtdichte der ortsabhängigen Abschwächung $\tau_{(x,y)}(\lambda)$ ausgesetzt, was zu der resultierenden Leuchtdichte der Strahlen bezüglich dieser Position führt. In Gleichung (4.6) ist dargestellt, wie Integrale für jede beliebige Position (x, y) deren gesamtes Umfeld mathematisch einbinden.

$$\widehat{\beta_{(x,y)}}(\lambda) = \tau_{(x,y)}(\lambda) \cdot \beta_{PW}(\lambda) \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tau_{(\hat{x},\hat{y})}(\lambda) \cdot PSF(x - \hat{x}, y - \hat{y}) \cdot d\hat{x} \cdot d\hat{y} \quad (4.6)$$

$$\forall \lambda \in [380 \text{ nm}, \dots, 780 \text{ nm}]$$

Für den Übereinanderdruck wurde nach HERSCH und SINGLA für jede Farbkombination eine

individuelle Farbannahmefunktion für die jeweils nachfolgend gedruckte Farbe entwickelt [Sin06]. Die Einbindung dieser Funktionen in den Ansatz von EMMEL und HERSCH ist ebenfalls möglich [Her06]. In Abbildung 4.7 ist dargestellt, wie diese Farbannahmefunktionen in die Modellierung einfließen.

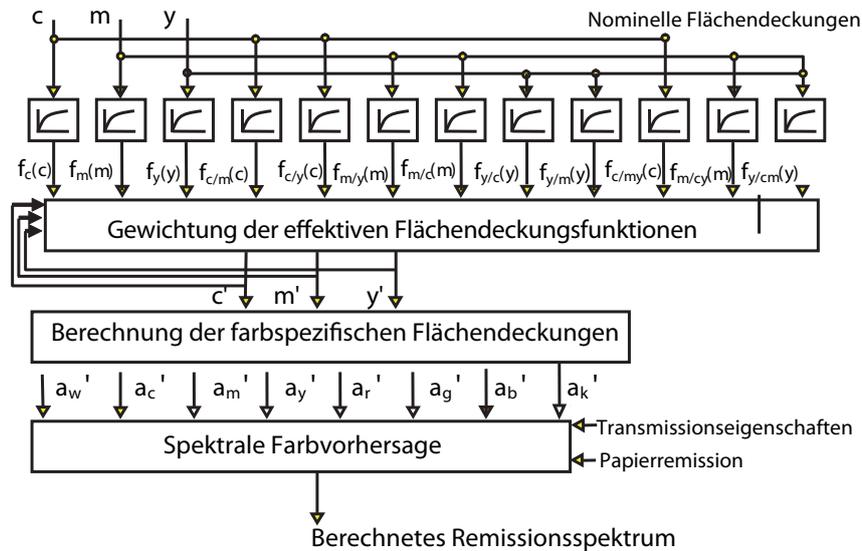


Abbildung 4.7: ISF als Erweiterung des NEUGEBAUER Modells [Her09]

Damit ist die Reihe der hoch komplexen, weitgehend empirisch ausgerichteten und mit hohem Aufwand auf Nutzerseite verbundenen Modelle beendet. Abschließend wird in diesem Kapitel der Ansatz von PAUL vorgestellt. Mit seiner abstrakten Herangehensweise, alle auftretenden Effekte durch einen theoretischen Rand gewisser Breite um den eigentlichen Druckpunkt herum zu modellieren, legt er indirekt den Grundstein für den Ansatz der vorliegenden Arbeit.

4.4 Abstrakte Herangehensweise

PAUL zeigt, wie man die Lichtstreuung im Bedruckstoff im Zusammenwirken mit gedruckten Rasterpunkten ganz ohne wahrscheinlichkeitstheoretische Überlegungen berücksichtigen kann: Modellierung der Farbspreizungs- und Lichtstreuungseffekte durch einen abstrakten und rein empirischen Optimierungsansatz.

Er stützt sich dabei auf den Ansatz von GÖLLING, die die auftretenden Effekte durch kreisförmige Punkte mit Ringen unterschiedlicher Schichtdicke und Breite simuliert. Dabei geht man davon aus, dass der innere Teil von Rasterpunkten die Schichtdicke des Volltons hat, ein (theoretischer) Rand um diesen Punkt herum jedoch nur die halbe Schichtdicke aufweist. Durch Variieren des Kreis- und Ringdurchmessers wird versucht, die gemessenen Farbwerte von gerasterten Primärfarben rechnerisch anzunähern [Goe81].

Des Weiteren berücksichtigt PAUL, dass bei gedruckten Punkten unterschiedlicher Größe die optisch wirksame Farbschichtdicke bei kleinen Punkten deutlich niedriger ist als bei großen Punkten. Die Farben erscheinen bei stark vergrößerter Betrachtung von kleineren Punkten heller als bei großen Punkten (Abbildung 4.8) [Pau97]. Anhand von Mikrofarbmessungen konnte ENGELDRUM zeigen, dass die optisch wirksame Farbschichtdicke von gedruckten Punkten eine Funktion des Flächendeckungsgrads ist [Eng94].

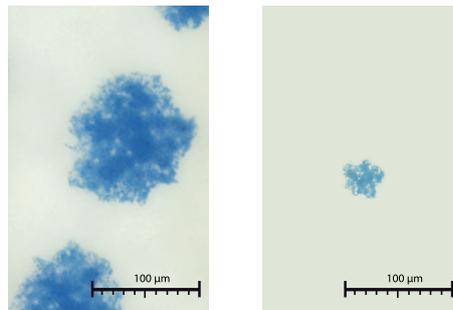


Abbildung 4.8: Rasterpunkte unterschiedlicher Größe [Pau97]

Diese Ergebnisse führen PAUL zu folgender modellhaften Beschreibung von gerasterten Primärfarben. Der Rasterpunkt ist auf einer Fläche, die jener auf der Druckform entspricht, mit einer bestimmten Schichtdicke gedeckt. Diese Schichtdicke hängt von der Größe der Punkte ab, die beim Druck mit konventioneller Rasterung wiederum direkt von dem Flächendeckungsgrad abhängt. Neben diesem Anteil gibt es zusätzlich noch einen Rand, der eine deutlich niedrigere Schichtdicke als der Punkt aufweist (Abbildung 4.9).

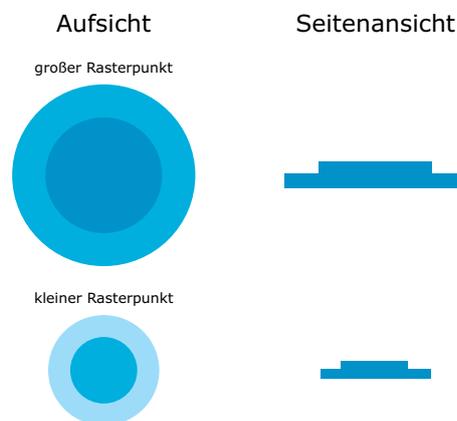


Abbildung 4.9: Abstrahierte Rasterpunkte [Pau97].

Die Parameter „Flächendeckungsgrad des Randes“ und das „Farbdichteverhältnis zwischen Rand und Punkt“ werden bezüglich des minimalen Fehlers zwischen gemessenen und berechneten Remissionen optimiert. Es wird gezeigt, dass die aus Farbdichtewerten berechneten Tonwertzunahmen sich als Flächendeckungsgrade eines Randbereichs verminderter Schichtdicke um einen gedruckten Punkt interpretieren lassen [Pau97].

Die Idee, den Druckpunkt als Kombination von Teilbereichen individueller Schichtdicke zu betrachten, ist nach den vorgestellten Ansätzen also nichts Neues. Aber die Berücksichtigung

der Lichtstreuung im Bedruckstoff und der tatsächlichen Schichtdickenverteilung innerhalb der Rasterpunkte ohne Mikrofarbmessung und ohne empirische Abstrahierung erfolgt zum ersten Mal in der vorliegenden Arbeit.

Es gelingt mittels spektraler Daten eines gedruckten 50% Rastertons sämtliche Informationen bezüglich der individuellen und tatsächlichen Punktstreu- und Farbstreufunktionen implizit zu berücksichtigen, und diese Informationen für alle übrigen Flächendeckungen und Flächendeckungskombinationen für die Berechnung der zu erwartenden Rastertonremission zu übertragen.

Den abstrakten Ansatz nach Paul als Spezialfall ausweisen zu können und als dessen Erweiterung die komplexe ISF- und PSF-Kombination implementiert zu wissen, ohne sie explizit bestimmt zu haben, wird dadurch möglich, dass die skalare Größe der Flächendeckung im folgenden Kapitel in die vektorielle und damit wellenlängenabhängige Flächendeckung überführt werden kann.

Kapitel 5

Wellenlängenabhängiger Flächendeckungsansatz

Die wellenlängenabhängige Flächendeckung ist eine spezielle Form der optisch wirksamen bzw. effektiven Flächendeckung. Sie bietet die Möglichkeit, ausgehend von wenigen Remissionsmessungen, die Spektralwertverläufe beliebiger nomineller Flächendeckungskombinationen der Primärfarben ohne empirische Parameter zu berechnen.

In diesem Kapitel wird ausgehend von der allgemeinen optisch wirksamen Flächendeckung die Definition der wellenlängenabhängigen Flächendeckung und ihre Einbindung in die Farbvorhersage vorgestellt.

5.1 Optisch wirksame Flächendeckung

Im Gegensatz zum Tonwert im Datensatz (nominelle Flächendeckung) oder der geometrischen Flächendeckung auf der Druckplatte ist die optisch wirksame Flächendeckung diejenige, die auf dem Druckergebnis „gemessenen“ werden kann. Die Differenz zwischen der nominellen und optisch wirksamen Flächendeckung wird als „Tonwertzunahme“ bezeichnet [Bei00] und beinhaltet sowohl mechanische Einflüsse, die durch eine tatsächliche geometrische Vergrößerung der übertragenen Druckpunkte hervorgerufen werden und den optisch, spektralen Einfluss des so genannten „Lichtfangs“ [Hüb93]. Lichtfang im Rasterdruck entsteht in diesem Zusammenhang durch die Streuung im Bedruckstoff (vgl. Kapitel 4.2.2, Seite 25) und insbesondere dann, wenn Strahlungsanteile die Grenze zwischen unbedruckter und bedruckter Fläche (und umgekehrt) durch Horizontalstreuung innerhalb des Bedruckstoffs überqueren [Hüb93].

Zwischen dem Tonwert im Datensatz und der geometrischen Flächendeckung auf der Druckplatte sind durch das Auflösungsvermögen der Druckplatten und des Druckplattenbelichters ebenfalls Unterschiede zu erwarten, die aber als gering einzustufen sind [Kip00].

Die zulässigen Tonwertzunahmen sind im Prozess Standard Offset (PSO) geregelt [bvd08]

und zur Einhaltung dieses Standards müssen individuelle Tonwertkorrekturen bei der Druckplattenbebilderung vorgenommen werden. Um jedoch die Einflüsse unterschiedlichster Tonwertkorrekturen auszuschließen, sind alle in den Versuchsreihen verwendeten Druckplatten rein linearisiert, also ohne Tonwertkorrektur, bebildert worden. Damit entspricht die geometrische Flächendeckung auf der Druckplatte dem Tonwert aus dem Datensatz, womit die nominelle Flächendeckung in der vorliegenden Arbeit sowohl für den Tonwert im Datensatz als auch für die geometrische Flächendeckung der Druckplatte steht. Eine Berücksichtigung tonwertkorrigierter Nominalflächendeckungen ist jedoch sehr leicht möglich und stellt somit keinerlei Einschränkung für die Umsetzung in der Praxis dar (vgl. Kapitel 8.3.3, Seite 63).

Die Betrachtung der optisch wirksamen Flächendeckung konzentriert sich in erster Linie auf Primärfarben. Demnach ist auch der Ausgangspunkt der wellenlängenabhängigen Flächendeckung die optisch wirksame bzw. effektive Flächendeckung A_{eff}^a nach MURRAY-DAVIS bezüglich eines einfarbig aufgebauten Rastertonfelds mit nomineller Flächendeckung a definiert. In der entsprechenden Gleichung (5.1) nach DIN 16527-3 [DIN93] stehen \tilde{D}_a und \tilde{D}_{VT} für die relativen Dichten des Rastertonfeldes mit der nominellen Flächendeckung a bzw. 100%:

$$A_{eff}^a := \frac{1 - 10^{-\tilde{D}_a}}{1 - 10^{-\tilde{D}_{VT}}} . \quad (5.1)$$

Die aufgeführten relativen Dichten sind nach DIN 16536-1 anhand von Dichtemessungen und vorgegebenen optischen Filtern (zusätzlich zum Polfilter) oder durch Remissionsmessungen (nach Systemkalibrierung auf dem Bedruckstoff ebenfalls mit Polfilter) mit mathematischen Gewichtungsfunktionen laut Gleichung 5.2 zu bestimmen. Sowohl die Lichtart der Messbeleuchtung, also das Eingangsspektrum $S(\lambda)$, als auch die farbspezifische Gewichtungsfunktion, also die relative spektrale Empfindlichkeit des Empfängersystems $s(\lambda)$, sind in dieser DIN definiert [DIN97]:

$$D := -\lg \frac{\sum_{\lambda} \beta(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot s(\lambda)}{\sum_{\lambda} S(\lambda) \cdot s(\lambda)} . \quad (5.2)$$

Durch die Vorgabe der relativen spektralen Empfindlichkeit des Empfängersystems $s(\lambda)$ wird sichergestellt, dass insbesondere der Wellenlängenbereich der Hauptabsorption der jeweiligen Farbe berücksichtigt wird. In Abbildung 5.1 ist dieser Zusammenhang am Beispiel der Primärfarbe Magenta dargestellt.

Anpassungen bei der Berechnung der A_{eff}^a (Gleichung 5.1) nach DIN 16527-3 erfolgen durch RODRIGUEZ dahingehend, dass die spektrale Empfindlichkeit des Empfängersystems $s(\lambda)$ auf eine farbspezifische Wellenlänge reduziert wird. Darüber hinaus wird nicht mehr der Bedruckstoff zur Systemkalibrierung herangezogen, sondern Referenzweiß wieder standardmäßig als Bezug für die spektralen Messungen verwendet [Rod03].

Demnach muss gegenüber der Gleichung 5.1 zunächst die Dichte des verwendeten Bedruckstoffs D_{PW} berücksichtigt werden, wobei $s(\lambda)$ für deren Berechnung ebenfalls entsprechend der jeweiligen farbspezifischen Empfindlichkeit des Empfängersystems definiert ist:

$$A_{eff}^a := \frac{10^{-D_{PW}} - 10^{-D_a}}{10^{-D_{PW}} - 10^{-D_{VT}}} . \quad (5.3)$$

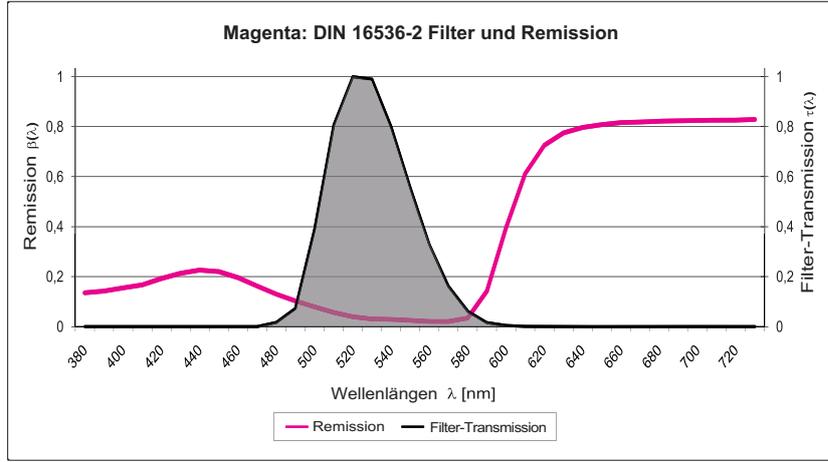


Abbildung 5.1: Spektrale Empfindlichkeit des Empfängersystems nach DIN 16536-2 zur Bestimmung der A_{eff} und die Remission der betreffenden Primärfarbe Magenta [Dat09]

Ersetzt man in Gleichung (5.3), die direkt aus der ursprünglichen MURRAY-DAVIES-Gleichung 4.1 auf Seite 22 abgeleitet ist, alle relevanten Dichten durch die jeweilige Formel nach DIN 16536-2 [DIN95], erhält man:

$$\begin{aligned}
 A_{eff}^a &= \frac{10^{-\left(-\lg \frac{\sum_{\lambda} \beta_{PW}(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot s(\lambda)}{\sum_{\lambda} S(\lambda) \cdot s(\lambda)}\right)} - 10^{-\left(-\lg \frac{\sum_{\lambda} \beta_a(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot s(\lambda)}{\sum_{\lambda} S(\lambda) \cdot s(\lambda)}\right)}}{10^{-\left(-\lg \frac{\sum_{\lambda} \beta_{PW}(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot s(\lambda)}{\sum_{\lambda} S(\lambda) \cdot s(\lambda)}\right)} - 10^{-\left(-\lg \frac{\sum_{\lambda} \beta_{VT}(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot s(\lambda)}{\sum_{\lambda} S(\lambda) \cdot s(\lambda)}\right)}} \\
 &= \left(\frac{\sum_{\lambda} \beta_{PW}(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot s(\lambda)}{\sum_{\lambda} S(\lambda) \cdot s(\lambda)} - \frac{\sum_{\lambda} \beta_a(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot s(\lambda)}{\sum_{\lambda} S(\lambda) \cdot s(\lambda)} \right) \\
 &\quad \cdot \left(\frac{\sum_{\lambda} \beta_{PW}(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot s(\lambda)}{\sum_{\lambda} S(\lambda) \cdot s(\lambda)} - \frac{\sum_{\lambda} \beta_{VT}(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot s(\lambda)}{\sum_{\lambda} S(\lambda) \cdot s(\lambda)} \right)^{-1} \\
 &= \frac{\sum_{\lambda} \beta_{PW}(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot s(\lambda) - \sum_{\lambda} \beta_a(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot s(\lambda)}{\sum_{\lambda} S(\lambda) \cdot s(\lambda)} \\
 &\quad \cdot \frac{\sum_{\lambda} S(\lambda) \cdot s(\lambda)}{\sum_{\lambda} \beta_{PW}(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot s(\lambda) - \sum_{\lambda} \beta_{VT}(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot s(\lambda)} \cdot
 \end{aligned}$$

Kürzen von $\sum_{\lambda} S(\lambda) \cdot s(\lambda)$ führt zu:

$$\begin{aligned}
 A_{eff}^a &= \frac{\sum_{\lambda} \beta_{PW}(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot s(\lambda) - \sum_{\lambda} \beta_a(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot s(\lambda)}{\sum_{\lambda} \beta_{PW}(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot s(\lambda) - \sum_{\lambda} \beta_{VT}(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot s(\lambda)} \\
 &= \frac{\sum_{\lambda} (\beta_{PW}(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot s(\lambda) - \beta_a(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot s(\lambda))}{\sum_{\lambda} (\beta_{PW}(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot s(\lambda) - \beta_{VT}(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot s(\lambda))}
 \end{aligned}$$

und Vorklammern von $S(\lambda) \cdot s(\lambda)$ ergibt:

$$A_{eff}^a = \frac{\sum_{\lambda} S(\lambda) \cdot s(\lambda) \cdot (\beta_{PW}(\lambda) - \beta_a(\lambda))}{\sum_{\lambda} S(\lambda) \cdot s(\lambda) \cdot (\beta_{PW}(\lambda) - \beta_{VT}(\lambda))}.$$

Beschränkt man sich nun auf eine Wellenlänge pro Primärfarbe, vereinfacht sich dieser Zusammenhang zu:

$$A_{effRod}^a := \frac{\beta_{PW}(\lambda) \cdot s(\lambda) - \beta_a(\lambda) \cdot s(\lambda)}{\beta_{PW}(\lambda) \cdot s(\lambda) - \beta_{VT}(\lambda) \cdot s(\lambda)} \tag{5.4}$$

mit $s(\lambda) = \left\{ \begin{array}{ll} 1 & \text{für } \lambda = 635 \text{ nm im Fall von Cyan} \\ 1 & \text{für } \lambda = 560 \text{ nm im Fall von Magenta} \\ 1 & \text{für } \lambda = 425 \text{ nm im Fall von Gelb} \\ 0 & \text{sonst} \end{array} \right\}$ [Rod03].

Abbildung 5.2 zeigt dies am Beispiel der Primärfarbe Magenta.

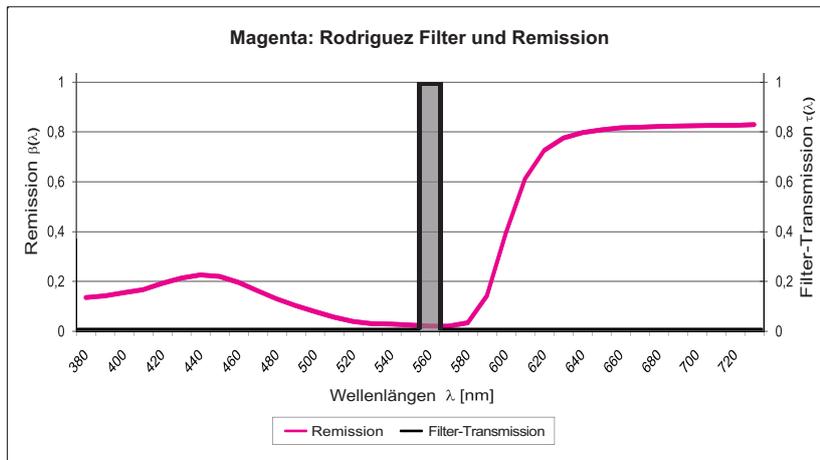


Abbildung 5.2: Spektrale Empfindlichkeit des Empfängersystems nach RODRIGUEZ zur Bestimmung der A_{effRod}^a und die Remission der Primärfarbe Magenta [Dat09]

Damit kann anhand eines spektral ausgewerteten, bunt aufgebauten Graufelds die A_{effRod}^a sämtlicher Primärfarben bestimmt werden [Rod03]. Diese Neuerung in der Prozesskontrolle steht aber nicht im Fokus der vorliegenden Arbeit. Vielmehr führt diese Anpassung nun direkt zur wellenlängenabhängigen effektiven Flächendeckung, die bei der Farbvorhersage ihre Anwendung finden wird.

Aus der oben definierten skalaren, effektiven Flächendeckung A_{effRod}^a wird die vektorielle und damit wellenlängenabhängige, effektive Flächendeckung $A_{eff}^a(\lambda)$ (Abbildung 5.3) abgeleitet, indem sie im Bezug auf jeden einzelnen Wellenlängenbereich individuell berechnet wird (Abbildung 5.4):

$$A_{eff}^a(\lambda) := \frac{\beta_{PW}(\lambda) - \beta_a(\lambda)}{\beta_{PW}(\lambda) - \beta_{VT}(\lambda)} \quad \forall \quad \lambda \in [380 \text{ nm}, \dots, 780 \text{ nm}] . \quad (5.5)$$

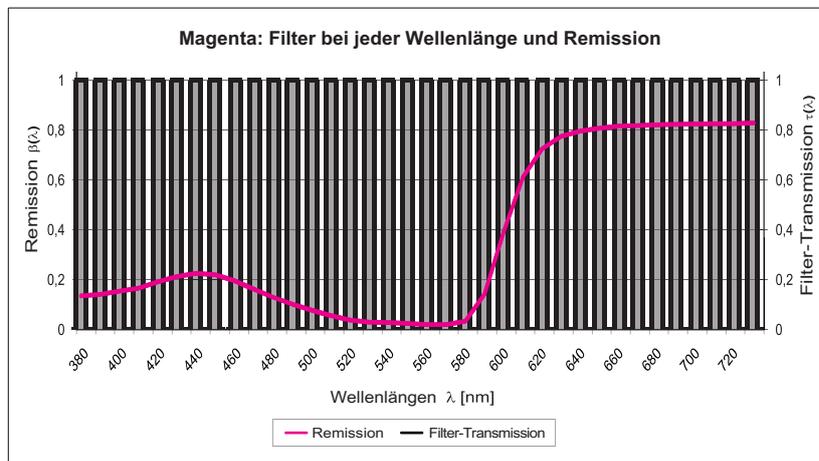


Abbildung 5.3: Spektrale Empfindlichkeit des Empfängersystems zur Bestimmung der $A_{eff}^a(\lambda)$ bezüglich jeder Wellenlänge und die Remission einer möglichen Primärfarbe Magenta [Dat09]

Ist die jeweilige wellenlängenabhängige, effektive Flächendeckung eines gedruckten Primärfarbenrasterfelds bekannt, so ist die Berechnung der Remissionswerte des Tonwerts anhand dieser $A_{eff}^a(\lambda)$ und der Remissionen des Volltons und der unbedruckten Fläche (nach der angepassten MURRAY-DAVIES-Gleichung) nahezu fehlerfrei möglich (Kapitel 8). Dies war zu erwarten, da in die Berechnung der $A_{eff}^a(\lambda)$ die spektralen Informationen des Rasterfelds eingeflossen sind. Die Berechnung der wellenlängenabhängigen, effektiven Flächendeckung allein bringt also noch keinen Vorteil im Bereich der spektralen Farbvorhersage.

Erst die offensichtliche Beziehung zwischen der nominellen Flächendeckung und der wellenlängenabhängigen, effektiven Flächendeckung bietet die Möglichkeit, ausgehend von wenigen Remissionsmessungen, sämtliche Spektralverläufe beliebiger nomineller Flächendeckungskombinationen der Primärfarben vorausberechnen zu können. Dazu sind in Abbildung 5.5 die nach der angegebenen Definition berechneten $A_{eff}^a(\lambda)$ bezüglich einfarbiger Rastertonfelder mit verschiedenen Flächendeckungen (von $a = 10\%$ bis $a = 90\%$ in 10% Schritten, am Beispiel einer Primärfarbe Magenta) dargestellt. Deutlich erkennbar ist der charakteristische

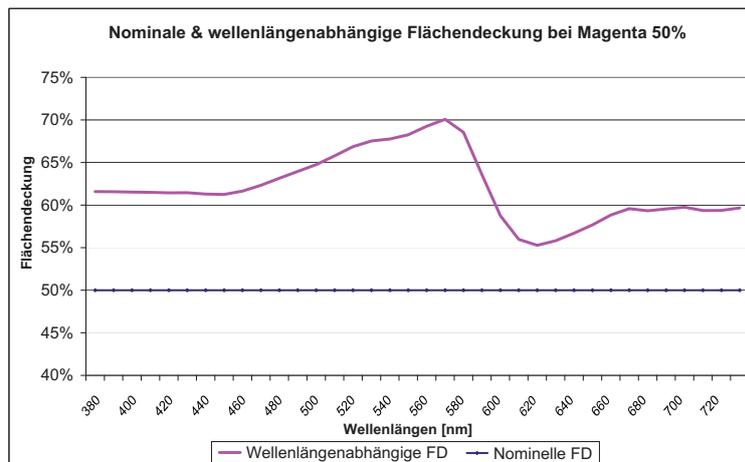


Abbildung 5.4: Gegenüberstellung der nominellen Flächendeckung $a = 50\%$ und $A_{eff}^{50\%}(\lambda)$ am Beispiel einer Primärfarbe Magenta [Dat09]

Kurvenverlauf von $A_{eff}^{50\%}(\lambda)$, der sich in allen $A_{eff}^a(\lambda)$ mit $a \in [10\%, 20\%, \dots, 90\%]$ wieder findet. Dabei ist die Charakteristik dieses Kurvenverlaufs bei allen $A_{eff}^a(\lambda)$ unterschiedlich stark ausgeprägt.

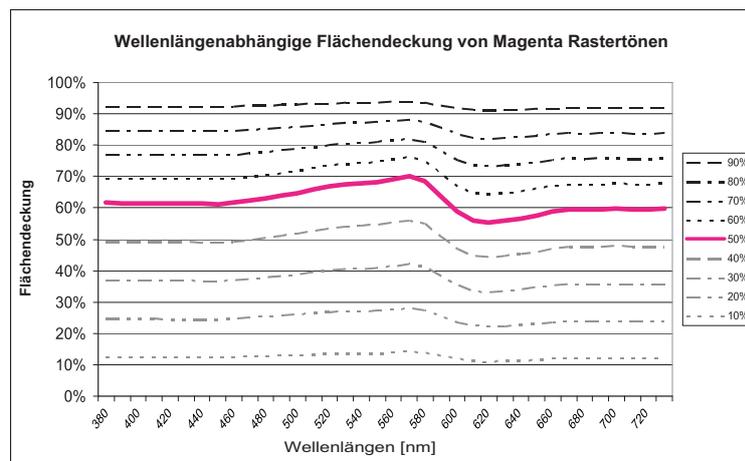


Abbildung 5.5: Berechnete, effektive, spektrale Flächendeckungsverläufe bezüglich verschiedener nomineller Flächendeckungen [Dat09]

Wie gleichmäßig und damit vorausberechenbar die „gemessenen“ $A_{eff}^a(\lambda)$ von einem abgestuften Magenta Farbverlauf mit $a \in [1\%, 2\%, \dots, 100\%]$ liegen, der im Offsetdruckverfahren auf dem Bedruckstoff APCO II/II appliziert ist, zeigt Abbildung 5.6. Erkennbare Unregelmäßigkeiten liegen (auch bei den übrigen Druckfarben) ausschließlich im Bereich geringster Absorption (hier bei $\lambda > 620$ nm, vgl. Abbildung 5.3) und sind demnach für den Einfarbindruck vernachlässigbar. Sind diese Unregelmäßigkeiten stärker ausgeprägt, muss im Hinblick auf die Modellierung des Übereinanderdrucks in Wellenlängenbereichen mit $\beta_{VT}(\lambda) > 0,9$ die $A_{eff}^a(\lambda) := A_{effRod}^a$ gesetzt werden.

Dies führt zu der eigentlichen Definition der wellenlängenabhängigen Flächendeckung.

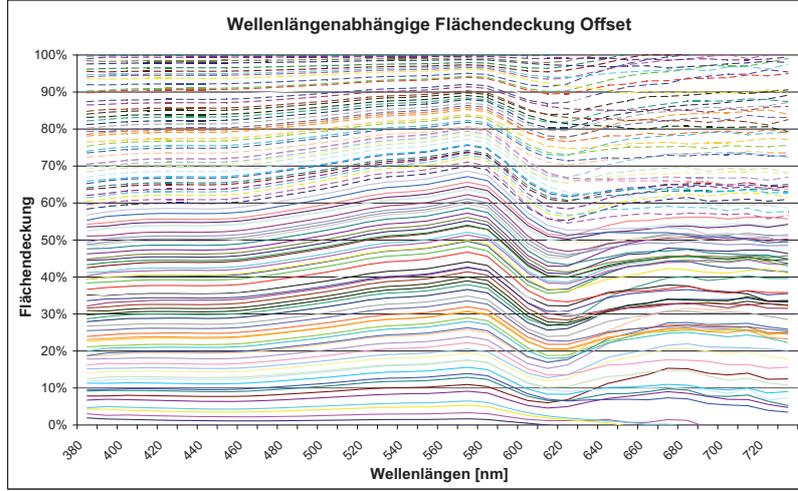


Abbildung 5.6: „gemessene“ $A_{eff}^a(\lambda)$ von 100 nominellen Flächendeckungen in Magenta im Offsetdruckverfahren gedruckt.

5.2 Die wellenlängenabhängige Flächendeckung

Für die Definition der wellenlängenabhängigen Flächendeckung wird der angesprochene injektive Zusammenhang zwischen der nominellen Flächendeckung a und $A_{eff}^a(\lambda)$ mit Hilfe des charakteristischen Kurvenverlaufs $A_{eff}^{50\%}(\lambda)$ des 50% Tonwerts formuliert (vgl. Anmerkung 8.1, Seite 65). Diese Beziehung lässt sich mathematisch wie folgt ausdrücken:

Definition 5.1 (wellenlängenabhängige Flächendeckung) Sei $A_{eff}^{50\%}(\lambda)$ die wellenlängenabhängige effektive Flächendeckung des 50% Tonwerts, sei a die nominelle Flächendeckung zu deren Basis die wellenlängenabhängige Flächendeckung $A_a(\lambda)$ berechnet werden soll und sei $\vartheta(a)$ eine von der nominellen Flächendeckung a abhängige Gewichtungsfunktion. Dann ist durch

$$A_a(\lambda) := (A_{eff}^{50\%}(\lambda) - 0.5) \cdot \vartheta(a) + a \quad \forall \lambda \in [380 \text{ nm}, \dots, 780 \text{ nm}] \quad (5.6)$$

die individuelle wellenlängenabhängige Flächendeckung bezüglich der nominellen Flächendeckung a definiert.

Hier besteht die Möglichkeit, gänzlich ohne empirische Parameter die direkte Beziehung zwischen der Randlänge der druckenden Elemente und der jeweiligen nominellen Flächendeckung über die noch nicht näher beschriebene Gewichtungsfunktion $\vartheta(a)$ auszunutzen. Mathematisch lässt sich $\vartheta(a)$ über diesen Zusammenhang folgendermaßen definieren.

Definition 5.2 (Gewichtungsfunktion) Sei R_a die individuelle freie Randlänge der druckenden Elemente (auf der Druckplatte gemessen) bezüglich der nominellen Flächendeckung a . Dann ist durch

$$\vartheta(a) := R_a / R_{50\%} \quad (5.7)$$

die Gewichtungsfunktion definiert.

Dies muss im Vorfeld anhand eines Primärfarbverlaufs einmalig durchgeführt werden, um $A_a(\lambda)$ zur Farbvorhersage ohne empirische Parameter nutzen zu können. Abbildung 5.7 zeigt, wie eine notwendige Anpassung der Mikroskopaufnahmen von der in „RoundSquare“-Rasterung [Hei07] bebilderten Druckplatte erfolgt, um mittels der Bildanalysesoftware „ImageProPlus“ (vgl. Kapitel 12.3, Seite 90) die freie Randlänge exakt ermitteln zu können.

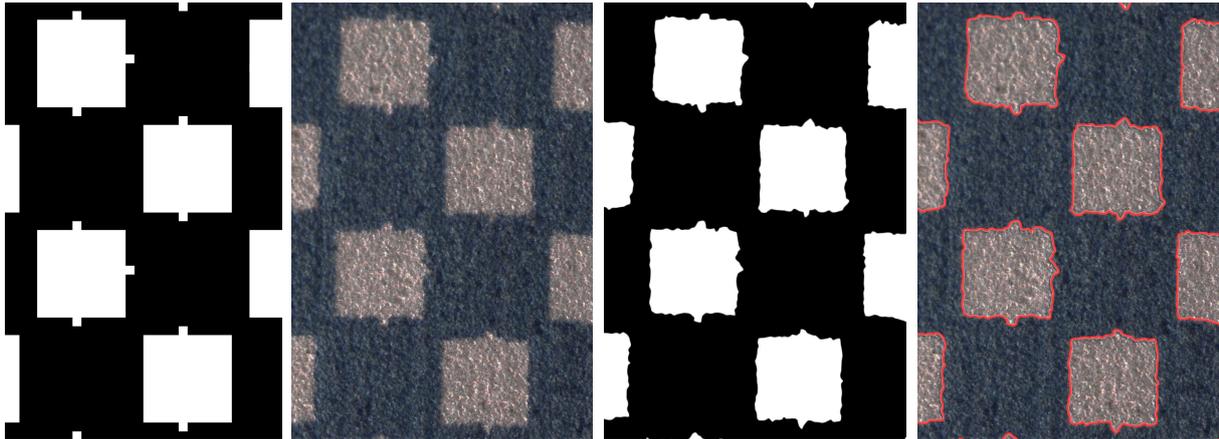


Abbildung 5.7: Druckplattenbelichtungsdatei mit 70% Flächendeckung (1. von links); 70% auf der entwickelten Druckplatte (Mikroskopaufnahme) (2. von links); für die Randlängenbestimmung angepasste Aufnahme (3. von links); ermittelter Rand auf Mikroskopaufnahme projiziert (rechts)

Dieser optophysikalisch begründete Ansatz wird durch empirische Untersuchungen bestätigt, bei denen $\vartheta(a)$ anhand einer Messreihe mit eng abgestuften Nominalflächendeckungen $a \in [1\%, 2\%, \dots, 100\%]$ in einer Primärfarbe bestimmt wird. Wie gut die empirisch ermittelten $\vartheta(a)$ mit den von der Druckpunkttrandlänge abgeleiteten Werten übereinstimmen, zeigt Abbildung 5.8. Dementsprechend vergleichbar gute Ergebnisse sind bei der Farbvorhersage (vgl. Kapitel 8.1, Seite 59) zu erwarten.

Bei der rein empirischen Berechnung von $\vartheta(a)$ muss über alle Wellenlängen und für jede Flächendeckung der optimale Wert durch Minimierung der Spektralwert-Metrik ΔE_s gefunden werden, die sich im Gegensatz zur Farbvalenzmetrik auf die Spektralwerte bezieht:

Definition 5.3 (Spektralwert-Metrik) Seien $\beta(\lambda)$ und $\widehat{\beta}(\lambda)$ Remissionen, dann ist durch

$$\Delta E_s := \sum_{\lambda} \left(\beta(\lambda) - \widehat{\beta}(\lambda) \right)^2 \quad (5.8)$$

deren spektraler Abstand ΔE_s definiert.

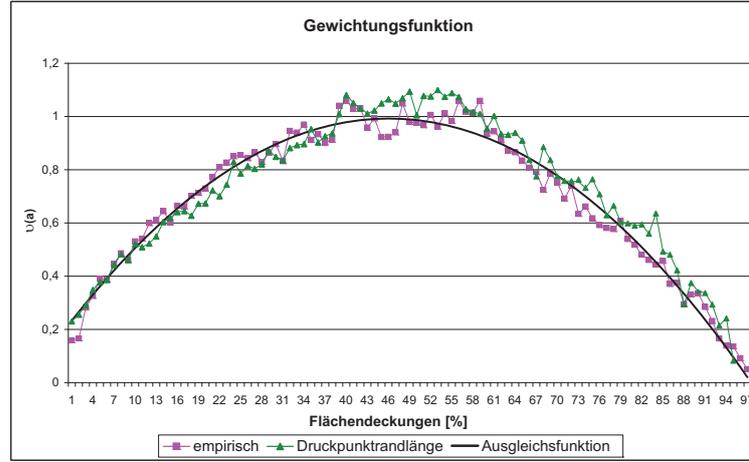


Abbildung 5.8: Die Gewichtungsfunktion $\vartheta(a)$ bezüglich der gemessenen Randlänge mit Ausgleichsfunktion sowie rein empirisch generierte Werte

Für $\vartheta(a)$ bedeutet das im Speziellen:

$$\begin{aligned} \Delta E_s(\vartheta(a)) &= \sum_{\lambda} \left(\beta_a(\lambda) - \widehat{\beta}_a(\lambda) \right)^2 \\ &= \sum_{\lambda} \left(\beta_a(\lambda) - \left\{ \left[(A_{eff}^{50\%}(\lambda) - 0.5) \cdot (\beta_{VT}(\lambda) - \beta_{PW}(\lambda)) \right] \cdot \vartheta(a) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + a \cdot \beta_{VT}(\lambda) + (1 - a) \cdot \beta_{PW}(\lambda) \right\} \right)^2 \end{aligned} \quad (5.9)$$

mit $\beta_a(\lambda)$ und $\widehat{\beta}_a(\lambda)$ als gemessene bzw. zu optimierende Remission bezüglich der nominellen Flächendeckung a , wobei bis auf $\vartheta(a)$ alle Größen bekannt sind.

Zur Minimierung gilt es folgenden differentiellen Zusammenhang zu lösen:

$$\frac{d\Delta E_s(\vartheta(a))}{d\vartheta(a)} = 0$$

Diese $\vartheta(a)$ für alle Flächendeckungen a über wenige Bezugsfelder zu bestimmen, ist eine empirische, aber praxisrelevante Möglichkeit: Für alle Flächendeckungen, die zwischen den gemessenen Stützstellen liegen, werden die $\vartheta(a)$ durch Interpolation dieser Lösung bestimmt (vgl. Kapitel 8.1, Seite 60 und 12.2, Seite 88).

Kennt man nun die von Druckplatten- und Rastertyp abhängige $\vartheta(a)$, wird die Farbvorhersage mittels $A_a(\lambda)$ möglich.

Die grundlegende Verbesserung gegenüber anderen Ansätzen ist demnach die konkrete Messbarkeit sämtlicher Material- und Prozessgrößen, die durch die wellenlängenabhängige Flächendeckung und der darin enthaltenen spektralen Informationen auch ohne empirische Parameter im Modell berücksichtigt werden.

5.3 Das Modell

Die Einbindung der wellenlängenabhängigen Flächendeckung in die Farbvorhersage erfolgt ganz analog zu der skalaren Flächendeckung bei den Anfängen der Rasterdruckvorhersage (vgl. Kapitel 4.1, Seite 22). Im einfarbigen Rasterdruck ersetzt $A_a(\lambda)$ die Flächendeckung a in der MURRAY-DAVIES-Formel und bindet somit alle angesprochenen Einflüsse mit ein, die über die Annahme einer homogen liegenden Farbschicht auf ideal streuendem Bedruckstoff hinaus gehen:

$$\widehat{\beta}_a(\lambda) := A_a(\lambda) \cdot \beta_{VT}(\lambda) + (1 - A_a(\lambda)) \cdot \beta_{PW}(\lambda) \quad \forall \lambda \in [380 \text{ nm}, \dots, 780 \text{ nm}] . \quad (5.10)$$

Des Weiteren lassen sich für die Modellierung des Übereinanderdrucks $A_a^c(\lambda)$, $A_a^m(\lambda)$ und $A_a^y(\lambda)$ statt der a_c , a_m bzw. a_y in den DEMICHEL-Gleichungen verwenden:

$$\begin{aligned} f_{PW}(\lambda) &:= (1 - A_a^c(\lambda)) \cdot (1 - A_a^m(\lambda)) \cdot (1 - A_a^y(\lambda)) \\ f_c(\lambda) &:= A_a^c(\lambda) \cdot (1 - A_a^m(\lambda)) \cdot (1 - A_a^y(\lambda)) \\ f_m(\lambda) &:= (1 - A_a^c(\lambda)) \cdot A_a^m(\lambda) \cdot (1 - A_a^y(\lambda)) \\ f_y(\lambda) &:= (1 - A_a^c(\lambda)) \cdot (1 - A_a^m(\lambda)) \cdot A_a^y(\lambda) \\ f_r(\lambda) &:= (1 - A_a^c(\lambda)) \cdot A_a^m(\lambda) \cdot A_a^y(\lambda) \\ f_g(\lambda) &:= A_a^c(\lambda) \cdot (1 - A_a^m(\lambda)) \cdot A_a^y(\lambda) \\ f_b(\lambda) &:= A_a^c(\lambda) \cdot A_a^m(\lambda) \cdot (1 - A_a^y(\lambda)) \\ f_{DFS}(\lambda) &:= A_a^c(\lambda) \cdot A_a^m(\lambda) \cdot A_a^y(\lambda) . \end{aligned} \quad (5.11)$$

Diese Flächendeckungsanteile lassen sich wiederum analog zu Kapitel 4.1.3, Seite 24 in die NEUGEBAUER-Gleichung einbinden:

$$\widehat{\beta}_{cmy}(\lambda) := \sum_{i \in \Psi} f_i(\lambda) \cdot \beta_{VT_i}(\lambda) \cdot \Gamma_i(\lambda) \quad \forall \lambda \in [380 \text{ nm}, \dots, 780 \text{ nm}] , \quad (5.12)$$

wobei die Indizes $i \in \Psi = \{PW, c, m, y, r, g, b, DFS\}$ der Notation aus Kapitel 4.1.3 entsprechen und $\Gamma_i(\lambda)$ als zusätzlicher Übereinanderdruck-Parameter die Veränderungen bei der Rasterübertragung berücksichtigt.

Wie die Besonderheiten beim Übereinanderdruck im Detail mittels des zusätzlichen Übereinanderdruck-Parameters $\Gamma_i(\lambda)$ berücksichtigt werden, ist in dem gesonderten Kapitel 7, nach der nun folgenden Konsolidierung des Modells, dargestellt.

Kapitel 6

Konsolidierung

Die Konsolidierung erfolgt aus Gründen der besseren Veranschaulichung bezüglich einer Primärfarbe. Wie bereits angesprochen, erklärt BEHLER „Viscous Fingering“ auch anhand einer Farbe [Beh93] und HERSCH entwickelt die farbspezifische Farbspreizungsfunktion, um diesen Effekt für die Farbvorhersage zu nutzen [Her02]. PAUL wählt dem gegenüber den abstrakten Ansatz bezüglich eines Druckpunkts mit Rand, um alle relevanten Effekte im einfarbigen Rasterdruck rein empirisch zu beschreiben [Pau97].

Abbildung 6.1 zeigt im Überblick, dass die angesprochenen Ansätze einerseits als Spezialfall identifiziert werden und andererseits die komplexen Farbdichtevariationen innerhalb eines Druckpunkts im Zusammenwirken mit der Lichtstreuung im Bedruckstoff in den Ansatz der wellenlängenabhängigen Flächendeckung implementiert sind. Durch die spektrale Auswertung eines Rastertonfelds können auf sehr einfachem Wege sämtliche relevanten Informationen berücksichtigt und letztendlich in einer praxisrelevanten Farbvorhersage eingesetzt werden.

Für den Nachweis, dass der in Kapitel 4.4 ab Seite 28 eingeführte Ansatz nach PAUL ein Spezialfall des wellenlängenabhängigen Flächendeckungsansatzes ist, wird zunächst die KUBELKA-MUNK-Theorie vorgestellt. Diese ermöglicht die mathematische Überführung des Ansatzes von PAUL in den Ansatz der wellenlängenabhängigen Flächendeckung und bestätigt darüber hinaus den physikalisch fundierten Hintergrund der vorliegenden Arbeit.

Die Erweiterung bezüglich einer beliebigen Anzahl von Teilbereichen in Druckpunkten mit individuellen Schichtdicken implementiert schließlich sämtliche Informationen der Punkt- und Farbspreizfunktionen und schließt die Konsolidierung ab.

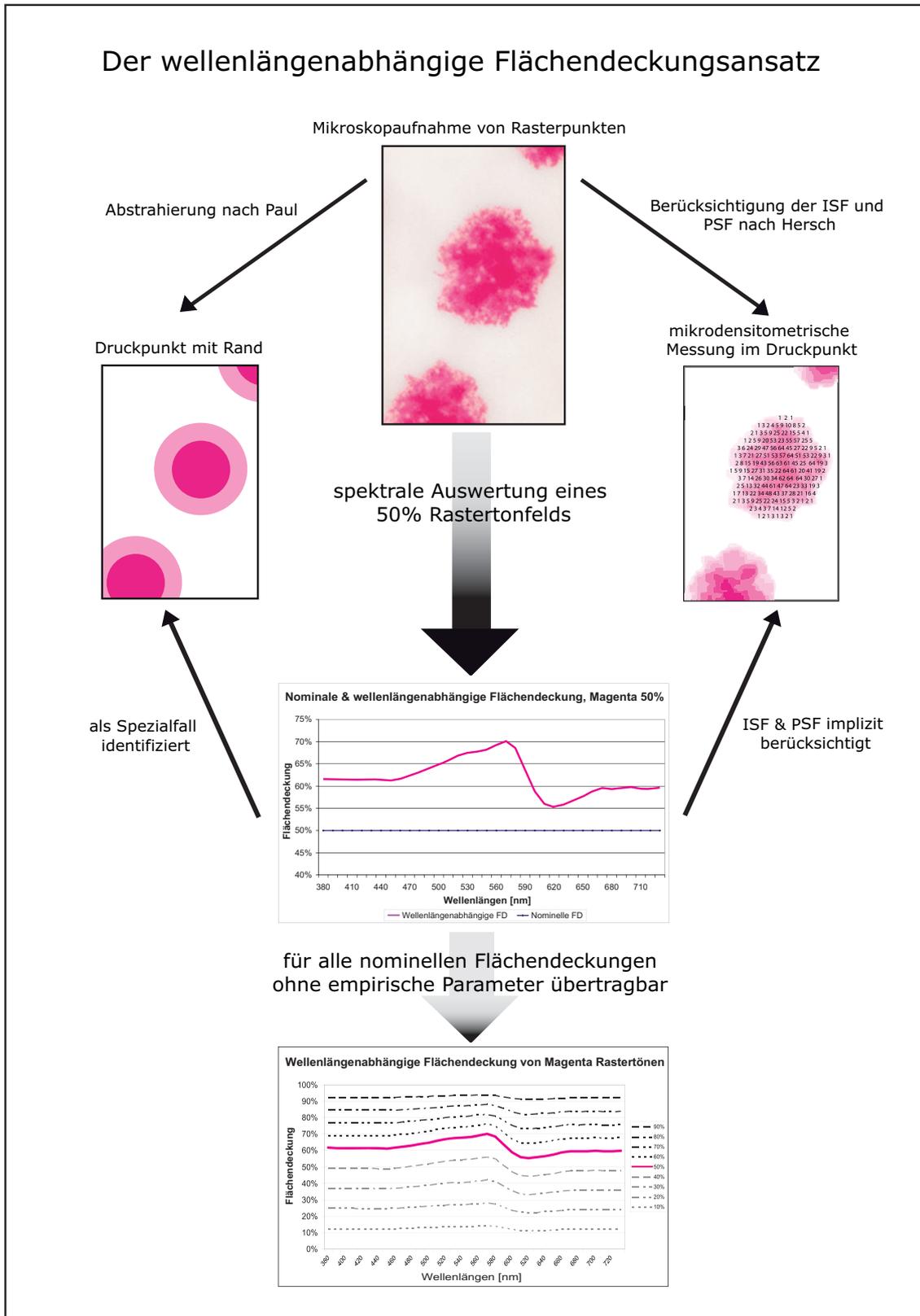


Abbildung 6.1: Konsolidierung

6.1 Kubelka und Munk

Die KUBELKA-MUNK-Theorie beschreibt die Reflexions- und Transmissionscharakteristik von opaken bzw. transparenten Farben bezüglich infinitesimal dünner Farbschichten [Kub54]. Das Konzept ist vereinfacht in Abbildung 6.2 dargestellt. Anhand zweier entgegengerichteter Lichtstrahlen i und j werden im Folgenden die relevanten Zusammenhänge beschrieben.

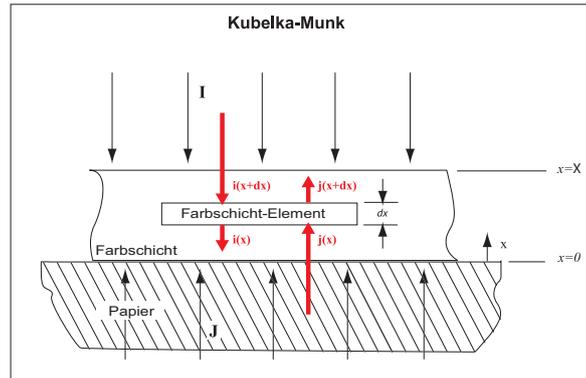


Abbildung 6.2: Kubelka Munk: Zwei entgegengerichtete Lichtstrahlen durch ein Farbschichtelement

Dazu werden die Intensitäten der Lichtstrahlen vor Eintritt aus der jeweiligen Richtung $i(x + dx)$ bzw. $j(x)$ in das Farbschichtelement der Dicke dx und nach Austritt $i(x)$ bzw. $j(x + dx)$ betrachtet. Unter Berücksichtigung der Absorption \hat{K} und der Streuung \hat{S} gilt folgender Zusammenhang:

$$i(x) = i(x + dx) - (\hat{S} + \hat{K}) \cdot i(x + dx) \cdot dx + \hat{S} \cdot j(x) \cdot dx \quad (6.1)$$

$$j(x + dx) = j(x) - (\hat{S} + \hat{K}) \cdot j(x) \cdot dx + \hat{S} \cdot i(x + dx) \cdot dx . \quad (6.2)$$

In Gleichung (6.1) wird bei der Berechnung der Lichtstrahlintensität $i(x)$ ausgehend von der von oben in das Farbschichtelement eindringenden Strahlungsintensität $i(x + dx)$ beschrieben. Durch $-(\hat{S} + \hat{K}) \cdot i(x + dx) \cdot dx$ wird die durch Streuung und Absorption innerhalb des Farbschichtelements hervorgerufene Verminderung der Strahlungsintensität berücksichtigt. Hinzu kommt der Anteil der Strahlung aus Richtung des Untergrunds $+\hat{S} \cdot j(x) \cdot dx$, der durch Streuung im Farbschichtelement die zu berechnende Intensität verstärkt. Entsprechendes gilt für die Interpretation der Gleichung (6.2).

Die spezifische Strahlungsänderung, die die beiden entgegengerichteten Anteile beim Durchgang durch das Farbschichtelement erfahren, ist demzufolge nach KUBELKA-MUNK [Kub31], [Lan95], [Urb05]:

$$\frac{dj}{dx} = -(\hat{S} + \hat{K}) \cdot j(x) + \hat{S} \cdot i(x) \quad (6.3)$$

$$-\frac{di}{dx} = -(\hat{S} + \hat{K}) \cdot i(x) + \hat{S} \cdot j(x) . \quad (6.4)$$

Betrachtet man nun die resultierende Intensität $h = j/i$, also das Verhältnis zwischen zurückkommender und eingestrahelter Intensität, so erhält man die differentielle Beziehung

von h bezüglich x [Lan95]:

$$\frac{dh}{dx} = \left(i \cdot \frac{dj}{dx} - j \cdot \frac{di}{dx} \right) \cdot \frac{1}{i^2} . \quad (6.5)$$

Setzt man hier die beiden Ausdrücke der Gleichungen (6.3) und (6.4) ein, so erhält man eine Differentialgleichung erster Ordnung in h :

$$\frac{dh}{dx} = \hat{S} - 2 \cdot (\hat{K} + \hat{S}) \cdot h + \hat{S} \cdot h^2 . \quad (6.6)$$

Diese Differentialgleichung kann man integrieren, wenn man die folgenden Randbedingungen berücksichtigt: Für $x = 0$ (auf der Bedruckstoffoberfläche) ist $h = \beta_{PW}$, d.h. das Verhältnis der entgegengerichteten Strahlungsflüsse ist dort gleich dem Reflexionsgrad des Bedruckstoffs. Für $x = X$ (an der Oberfläche der Farbschicht) ist $h = \beta_{VT}$, d.h. gleich dem Reflexionsgrad der gedruckten Farbschicht.

Damit ergibt sich als Lösung der Differentialgleichung das bestimmte Integral, wie es in Gleichung (6.7) dargestellt ist [Lan95]:

$$\int_0^X dx = \int_{\beta_{PW}}^{\beta_{VT}} \frac{dh}{\hat{S} - 2 \cdot (\hat{K} + \hat{S}) \cdot h + \hat{S} \cdot h^2} . \quad (6.7)$$

Das in Gleichung (6.7) Remissionen als Integrationsgrenzen für h zulässig sind, hat den Hintergrund, dass die resultierende Intensität messtechnisch betrachtet nichts anderes ist als das Leuchtdichteverhältnis der Lichtquellenstrahlung und der von der Probe zurück kommenden Strahlung. Remissionen sind demgegenüber als Leuchtdichtefaktor definiert, also dem Verhältnis zwischen der von der Probe und der vom Referenzweiß zurück kommenden Strahlung. Definitionsgemäß entspricht aber die Intensität des vom Referenzweiß zurückgestrahlten Lichts weitestgehend der Leuchtdichte der Lichtquelle (vgl. Kapitel 3.2.2, Seite 14) und demnach gilt:

$$\begin{aligned} \beta_{Probe} &= \frac{j_{Probe}}{j_{Referenzweiß}} \\ &= \frac{j_{Probe}}{i} \quad \text{mit} \quad j_{Referenzweiß} = i . \end{aligned} \quad (6.8)$$

In β_{VT} sind dabei sämtliche Streu- und Absorptionseigenschaften einer gedruckten Volltonfläche berücksichtigt. Im einfarbigen Fall kann die Streuung dabei als optisch wirksame Schichtdickenvariation interpretiert werden, da die Strahlung auch durch Streuung in der Farbschicht keinen andersfarbigen Absorptionsspektren ausgesetzt ist: Aus der Streuung in der Farbe resultiert entweder ein längerer oder kürzerer Weg durch die Farbschicht, was sich als stärkere bzw. schwächere Absorption interpretieren lässt. Bei der geplanten Integration kann man also von einem angepassten, homogenen Absorptionsspektrum ausgehen, indem die Streuung als individuelle Anpassung der Absorptionseigenschaften implementiert ist.

Bei der Modellierung des Übereinanderdrucks in Kapitel 7 wird die Streuung dann wieder explizit berücksichtigt, da hier die wahrnehmbaren Effekte unter anderem darauf zurück zu führen sind, dass die Absorption der übereinander gedruckten Primärfarben individuell durch die Streuung in den ebenfalls beteiligten Primärfarben beeinflusst wird.

Da die Konsolidierung bezüglich des einfarbigen Rasterdrucks erfolgt, besteht hier nach obigen Ausführungen die Möglichkeit sich auf den Fall $\hat{S} = 0$ zu konzentrieren. Die Integration wird also anhand der vereinfachten Differentialgleichung durchgeführt, um die Remission β_{VT} in Abhängigkeit der Schichtdicke X und des Absorptionskoeffizienten \hat{K} ausdrücken zu können:

$$\int_0^X dx = \int_{\beta_{PW}}^{\beta_{VT}} \frac{dh}{-2 \cdot \hat{K} \cdot h} = \frac{1}{-2 \cdot \hat{K}} \cdot \int_{\beta_{PW}}^{\beta_{VT}} \frac{dh}{h} \quad (6.9)$$

$$\Leftrightarrow -2 \cdot \hat{K} \cdot X = \ln \left(\frac{\beta_{VT}}{\beta_{PW}} \right) \quad (6.10)$$

$$\Leftrightarrow \beta_{VT} = \beta_{PW} \cdot e^{-2 \cdot \hat{K} \cdot X} . \quad (6.11)$$

Bildet man nun den Quotienten der Remissionen zweier verschieden dicker Farbschichten β_{VT_1} und β_{VT_2} einer Farbe mit $\hat{K} = \hat{K}_1 = \hat{K}_2$ so erhält man:

$$\begin{aligned} \frac{\beta_{VT_1}}{\beta_{VT_2}} &= \frac{\beta_{PW} \cdot e^{-2 \cdot \hat{K}_1 \cdot X_1}}{\beta_{PW} \cdot e^{-2 \cdot \hat{K}_2 \cdot X_2}} = e^{-2 \cdot \hat{K}_1 \cdot X_1 - (-2 \cdot \hat{K}_2 \cdot X_2)} \\ &= e^{-2 \cdot \hat{K} \cdot (X_1 - X_2)} . \end{aligned} \quad (6.12)$$

Damit ist die Herleitung für den folgenden Hilfssatz abgeschlossen. Die Multiplikation von $\beta_{VT_2} \cdot e^{2 \cdot \hat{K} \cdot (X_2 - X_1)}$ auf beiden Seiten der Gleichung (6.12) führt zu folgendem Zusammenhang:

Lemma 6.1 (Schichtdicken) *Die Remission einer (lasierenden) Farbe β_{VT_2} mit beliebiger Schichtdicke X_2 lässt sich in Abhängigkeit der Remission derselben Farbe β_{VT_1} mit einer Schichtdicke X_1 mathematisch in Abhängigkeit des (gemeinsamen) Absorptionskoeffizienten \hat{K} folgendermaßen beschreiben:*

$$\beta_{VT_2} = \beta_{VT_1} \cdot e^{2 \cdot \hat{K} \cdot (X_1 - X_2)} . \quad (6.13)$$

Der in diesem Lemma auftretende Absorptionskoeffizient \hat{K} lässt sich über den Zusammenhang aus Gleichung (6.11), in Anlehnung an das Grundgesetz der Absorptiometrie von LAMBERT-BEER, bestimmen. Durch die direkte Abhängigkeit von den Remissionen β_{VT} und β_{PW} , die ihrerseits wellenlängenabhängig sind, ergibt sich folgender wellenlängenabhängige Zusammenhang für \hat{K} :

$$\hat{K}(\lambda) = \ln \left(\frac{\beta_{VT}(\lambda)}{\beta_{PW}(\lambda)} \right) \cdot \frac{1}{-2 \cdot X} . \quad (6.14)$$

Bei dieser Berechnung von \hat{K} ist im Übrigen sichergestellt, dass die individuelle Farbanahme des Bedruckstoffs bezüglich der jeweiligen Druckfarbe berücksichtigt wird: Bei der Abschätzung der Schichtdicken im Rasterdruck, ausgehend von Volltönen, ist zu bedenken, dass auch im Vollton die Schichtdicke der Druckfarbe deutlich inhomogen ist. Deshalb entsprechen Transmissionsspektren von Druckfarben einer bestimmten Schichtdicke nicht den Gegebenheiten beim Drucken. Dabei spielt es auch keine Rolle, ob die zu berücksichtigenden Schichtdicken durch tatsächliche Schichtdickenvariationen oder durch Lichtfangeffekte hervorgerufen werden [Pau97]. Demnach werden bei der spektralen Auswertung durch Auflichtfarbmessung die tatsächlichen Gegebenheiten automatisch berücksichtigt.

Mit Hilfe des Lemmas 6.1 lässt sich der Beweis des folgenden Satzes 6.2 in sehr kompakter Form führen. Das Lemma wurde deshalb mit der KUBELKA-MUNK-Theorie vor den eigentlichen Nachweis in der Konsolidierung gezogen.

6.2 „Druckpunkt mit Rand“ als Spezialfall

Satz 6.2 (Druckpunkt mit Rand ist ein Spezialfall) Sei a_1 die nominelle Flächendeckung eines einfarbigen Rastertonfeldes und seien $\beta_{VT}(\lambda)$ und $\beta_{PW}(\lambda)$ die Remissionen des zugehörigen Volltonfeldes mit der Schichtdicke X_1 bzw. der unbedruckten Fläche. Sei darüber hinaus a_2 der theoretische, nach PAUL angenäherte Flächendeckungsanteil des Druckpunkt-randes geringerer Schichtdicke X_2 mit zugehöriger Remission $\beta_R(\lambda)$, so kann dies als Spezialfall $\widetilde{A_{eff}^a}(\lambda)$ der wellenlängenabhängigen Flächendeckung interpretiert werden.

Beweis: Geht man wie PAUL davon aus, dass die beschriebenen Randeffekte durch einen zusätzlichen Druckpunkttrand gleicher Farbe, aber geringerer Schichtdicke beschrieben werden können, so liegt es nahe, das vorgestellte Lemma 6.1 dazu zu nutzen, $\beta_R(\lambda)$ in Abhängigkeit der Volltonremission auszudrücken:

$$\begin{aligned}
 & a_1 \cdot \beta_{VT}(\lambda) + a_2 \cdot \beta_R(\lambda) + (1 - (a_1 + a_2)) \cdot \beta_{PW}(\lambda) && \text{PAUL} \\
 & = a_1 \cdot \beta_{VT}(\lambda) + a_2 \cdot \beta_{VT}(\lambda) \cdot e^{2 \cdot \hat{K} \cdot (X_1 - X_2)} + (1 - (a_1 + a_2)) \cdot \beta_{PW}(\lambda) \\
 & = a_1 \cdot \beta_{VT}(\lambda) + \beta_{VT}(\lambda) \cdot \left[a_2 \cdot e^{2 \cdot \hat{K} \cdot (X_1 - X_2)} \right] + (1 - (a_1 + a_2)) \cdot \beta_{PW}(\lambda) \\
 & = \left(a_1 + \left[a_2 \cdot e^{2 \cdot \hat{K} \cdot (X_1 - X_2)} \right] \right) \cdot \beta_{VT}(\lambda) + (1 - (a_1 + a_2)) \cdot \beta_{PW}(\lambda) \\
 & = \widetilde{A_{a_1}}(\lambda) \cdot \beta_{VT}(\lambda) + (1 - (a_1 + a_2)) \cdot \beta_{PW}(\lambda) && \text{NEUER ANSATZ.}
 \end{aligned}$$

■

Nach der Anwendung des Lemmas sind also nur noch wenige Umformungen nötig, um anhand des wellenlängenabhängigen Absorptionskoeffizienten die beiden skalaren Flächendeckungsparameter a_1 und a_2 in eine wellenlängenabhängige Flächendeckung zu überführen.

$\widetilde{A_{a_1}}(\lambda)$ ist demnach eine empirische Näherung der wellenlängenabhängigen Flächendeckung, bei der alle in einer spektralen Auswertung enthaltenen Informationen durch die rein abstrakte Herangehensweise nach PAUL angenähert werden. Dabei ist eine große Übereinstimmung

zwischen $\widetilde{A_{eff}^a}(\lambda)$ und $A_{eff}^a(\lambda)$ beispielsweise bezüglich eines 50% Magenta-Rastertonfelds festzustellen (Abbildung 6.3). Im neuen Ansatz wird bei der Berechnung der zu erwartenden Rasterprobenremission in Anlehnung an den Ansatz von MURRAY-DAVIES letztlich nur noch der Flächendeckungsanteil des unbedruckten Bereichs entsprechend mit $(1 - \widetilde{A_{a1}}(\lambda))$ berücksichtigt.

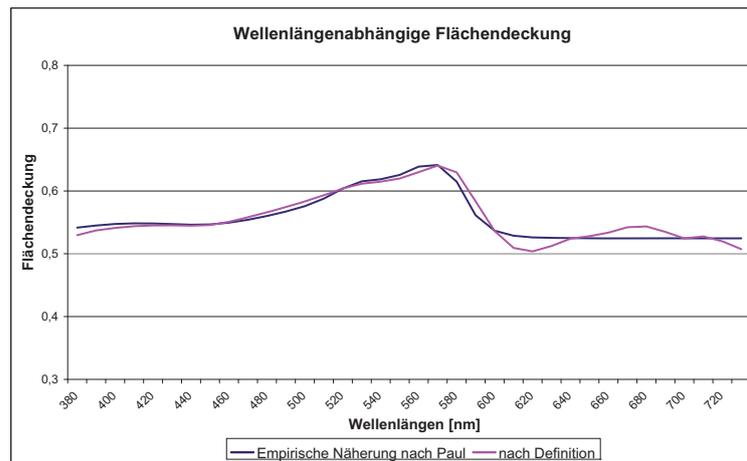


Abbildung 6.3: Gegenüberstellung des überführten $\widetilde{A_{50\%}}(\lambda)$ nach PAUL und $A_{50\%}(\lambda)$ nach Definition 5.1.

6.3 Erweiterung

Implizit lassen sich demnach im neuen Ansatz mindestens zwei empirisch bestimmte Teilbereiche von Druckpunkten betrachten. Es ist aber auch möglich bezüglich sämtlicher Teilbereiche einer Vielzahl von Druckpunkten innerhalb einer messfeldgroßen Fläche (vgl. Kapitel 3.2.4, Seite 15) die tatsächliche, optisch wirksame und individuelle Dichte- bzw. Schichtdickenverteilung ohne explizite mikrodensitometrische Messungen zu berücksichtigen. Dadurch, dass die Druckpunkte in ihrer Form und Struktur selbst innerhalb eines Flächendeckungsgrads stark variieren, stellt dies nicht nur die Implementierung der punktbezogenen Farbspreizfunktion nach HERSCH dar, sondern erweitert auch diesen Ansatz auf die Berücksichtigung einer repräsentativen, messfeldgroßen Fläche mit abzählbar vielen (n) Bereichen individueller Größe a_i und Schichtdicke X_i , deren spektrale Informationen weit mehr als nur die Struktur eines einzelnen Druckpunktes einbindet:

$$\begin{aligned}
& \sum_{i=1}^n a_i \cdot \beta_i(\lambda) + \left(1 - \sum_{i=1}^n a_i\right) \cdot \beta_{PW}(\lambda) \\
&= \sum_{i=1}^n a_i \cdot \left[\beta_{VT}(\lambda) \cdot e^{2 \cdot \hat{K} \cdot (X_1 - X_i)}\right] + \left(1 - \sum_{i=1}^n a_i\right) \cdot \beta_{PW}(\lambda) \\
&= \left(\sum_{i=1}^n a_i \cdot e^{2 \cdot \hat{K} \cdot (X_1 - X_i)}\right) \cdot \beta_{VT}(\lambda) + \left(1 - \sum_{i=1}^n a_i\right) \cdot \beta_{PW}(\lambda) \\
&= \widetilde{A_{a1}}(\lambda) \cdot \beta_{VT}(\lambda) + \left(1 - \sum_{i=1}^n a_i\right) \cdot \beta_{PW}(\lambda) .
\end{aligned}$$

Berücksichtigt man auch hier für die Berechnung der zu erwartenden Rasterprobenremission in Anlehnung an den Ansatz von MURRAY-DAVIES ($1 - \widetilde{A_{a1}}(\lambda)$) als Flächendeckungsanteil für den unbedruckten Bereich, ist die Konsolidierung des Ansatzes abgeschlossen.

Vor der Ergebnispräsentation werden aber, wie angekündigt, die Zusammenhänge des Über-einanderdrucks mehrerer Primärfarben dargestellt, wobei die Streuung wieder berücksichtigt wird.

Kapitel 7

Übereinanderdruck

Wie bereits erwähnt, hängen beim Übereinanderdruck das Farbannahmeverhalten und die übertragene Farbschichtdicke unter anderem von den rheologischen Eigenschaften der Druckfarben ab. Hinzu kommt, dass keine Druckfarbe völlig transparent ist. Aus diesen Gründen ist das Vorhersagen der entstehenden Farben beim Übereinanderdruck wesentlich komplizierter als bei gerasterten Primärfarben [Pau97].

Dennoch werden im Folgenden zwei Herangehensweisen vorgestellt, die zum einen der Herausforderung unter dem Aspekt bekannter Sekundär- und Tertiärfarbremissionen begegnen und zum anderen statt der direkten spektralen Information möglichst viele Farbspaltungseffekte der nachfolgend gedruckten Farbe aus der spektralen Auswertung von auf Schwarz gedruckten Primärfarben ableiten.

7.1 Mit angedruckten Sekundär- und Tertiärfarben

Stehen vollflächig übereinander gedruckte Primärfarben zur Verfügung, kann man daraus sämtliche Streu- und Farbspaltungseffekte ableiten, die sich beim Druck auf einen bereits bedruckten Bereich deutlich von denen unterscheiden, die beim Drucken auf den unbedruckten Bedruckstoff auftreten. Abbildung 7.1 zeigt, wie Cyan und Magenta vollflächig übereinander gedruckt bei mikroskopischer Betrachtung aussehen können. Es wird sofort klar, dass hier die reine multiplikative Farbmischung bezüglich homogener Farbschichten nicht zielführend ist.

Demnach werden, wie auch schon in Kapitel 5.3 eingeführt, bei der Berechnung der zu erwartenden Remission $\widehat{\beta_{cmy}}(\lambda)$ die gemessenen $\beta_{VT_i}(\lambda)$ mit $i \in \Psi = \{PW, c, m, y, r, g, b, DFS\}$, also die Remission von unbedrucktem Bedruckstoff sowie die Remissionen der Volltöne von Primär- und Sekundärfarben sowie der Tertiärfarbe, berücksichtigt.

Mit Hilfe des Übereinanderdruckparameters $\Gamma_i(\lambda)$ können darüber hinaus Effekte berücksichtigt werden, die durch Strukturveränderungen der Rasterpunkte in nicht vollflächig bedruckten Bereichen auftreten. Solche Strukturveränderungen treten auf, wenn das Raster einer

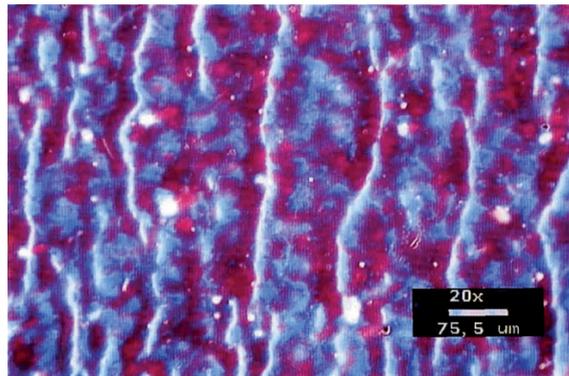


Abbildung 7.1: Das inhomogene „Liegen“ der zuletzt gedruckten Druckfarbe [Pau97]

nachfolgend gedruckten Farbe auf ein noch feuchtes, unmittelbar zuvor gedrucktes Raster appliziert wird.

Wie in Abbildung 7.2 dargestellt, kommt es zu einer Verformung der Rasterpunkte, die mit einer Verschiebung gegenüber der angestrebten Positionierung (durch die Maske des entsprechenden Farbauszugs angedeutet) verbunden ist [Rie08]. Dies kann beispielsweise eine Verlagerung der Flächendeckungsanteile vom Bereich des Überlappendrucks in die Bereiche der Primärfarben bedeuten.

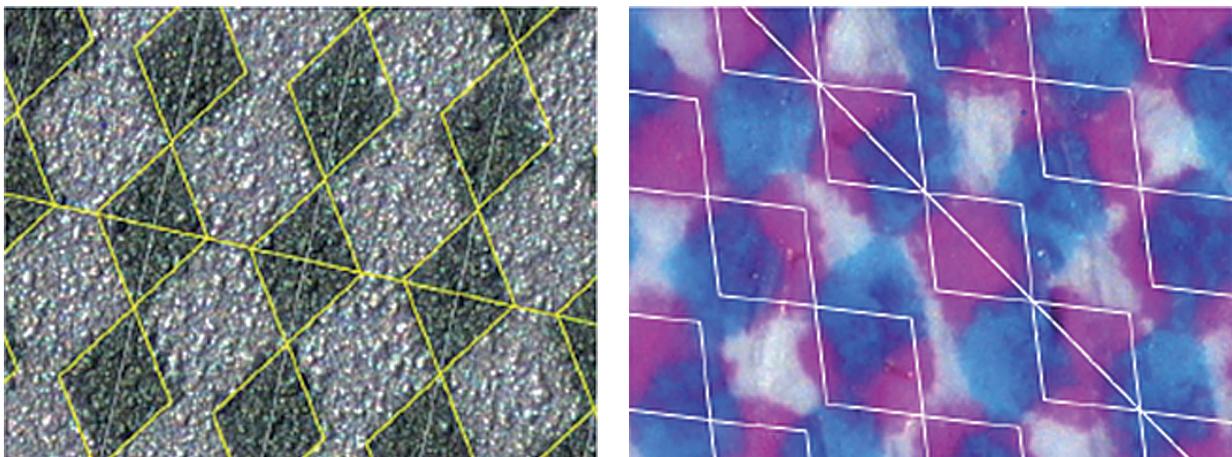


Abbildung 7.2: 40% Flächendeckung auf einer Druckplatte in Cyan-Winkelung (links) und ein gedruckter Rasterton von 40% Magenta auf 40% Cyan mit zugehöriger Magenta-Druckplattenmaske (rechts), um die Effekte beim Überlappendruck von zwei Farben zu dokumentieren [Rie08].

Dabei ist es mit bildanalytischen Methoden möglich, die genaue Strukturveränderung von überlappenden Rasterpunkten zu ermitteln (Abbildung 7.3). Die Strukturbeeinflussung eines Sekundärrasterpunkts ist vom Überlappungsgrad abhängig: Mit zunehmendem Überlappungsgrad verringern sich sowohl die Größe, als auch die Schichtdicke eines überlappenden Rasterpunkts [Raa09].

Die Berücksichtigung des optischen Einflusses dieser Strukturveränderung auf die resultieren-

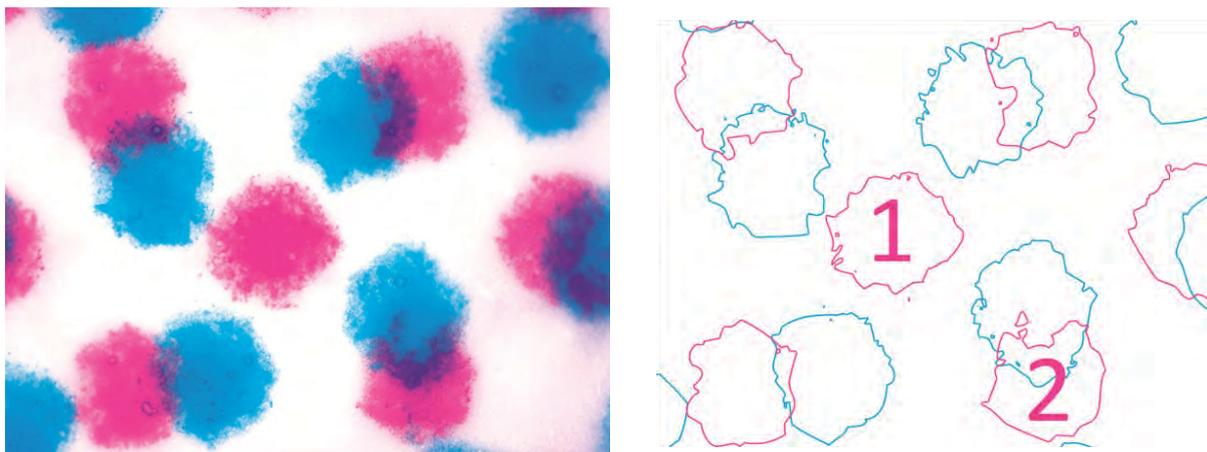


Abbildung 7.3: Strukturveränderungen im Überlappungsbereich eines 30% Magenta auf 30% Cyan Tonwerts [Raa09] (links Mikroskopaufnahme, rechts bildanalytische Auswertung)

de Remission erfolgt demnach über eine Anpassung der optisch wirksamen Schichtdicke der nachfolgend gedruckten Farben mittels ΔX_i (ohne die gemessenen Sekundär- und Tertiär-Volltonremissionen zu verändern) und einer Anpassung der jeweiligen Flächendeckungsgrade mittels Δf_i .

Demnach kann durch die Übereinanderdruckparameter $\Gamma_i(\lambda)$, in Anlehnung an LAMBERT-BEER, eine Anpassung der optisch wirksamen Schichtdicke in $\widetilde{\beta_{VT_i}}(\lambda)$ und eine Anpassung der Flächendeckungsanteile \widetilde{f}_i für alle Flächendeckungskombinationen folgendermaßen berücksichtigt werden.

Ausgehend von der diesbezüglich angepassten NEUGEBAUER-Gleichung liefern folgende Umformungen den physikalischen Hintergrund der Übereinanderdruckparameter $\Gamma_i(\lambda)$:

$$\widehat{\beta_{cmy}}(\lambda) = \sum_{i \in \Psi} \widetilde{f}_i \cdot \widetilde{\beta_{VT_i}}(\lambda) \quad (7.1)$$

$$= \sum_{i \in \Psi} (f_i \cdot \Delta f_i) \cdot \beta_{PW}(\lambda) \cdot e^{-2 \cdot \hat{K}_i(\lambda) \cdot (X_i - \Delta X_i)} \quad (7.2)$$

$$= \sum_{i \in \Psi} f_i \cdot \left[\beta_{PW}(\lambda) \cdot e^{-2 \cdot \hat{K}_i(\lambda) \cdot X_i} \right] \cdot \Delta f_i \cdot e^{2 \cdot \hat{K}_i(\lambda) \cdot \Delta X_i} \quad (7.3)$$

$$= \sum_{i \in \Psi} f_i \cdot \beta_{VT_i}(\lambda) \cdot \left[\Delta f_i \cdot e^{2 \cdot \hat{K}_i(\lambda) \cdot \Delta X_i} \right] \quad (7.4)$$

$$= \sum_{i \in \Psi} f_i \cdot \beta_{VT_i}(\lambda) \cdot \Gamma_i(\lambda) \quad \forall \lambda \in [380 \text{ nm}, \dots, 780 \text{ nm}] . \quad (7.5)$$

Diese $\Gamma_i(\lambda)$ enthalten demnach alle Informationen, die sich laut RAABE mit bildanalytischen Methoden erfassen lassen.

Eine derartige Umsetzung würde jedoch den Verlust jeglicher Praxisrelevanz bedeuten. Untersuchungen haben gezeigt, dass ein Transfer dieser farbspezifischen Parameter $\Gamma_i(\lambda)$ in den

integrativen (für alle beteiligten Farben identischen) Übereinanderdruckparameter $\gamma(\lambda)$ zu ebenfalls sehr guten Ergebnissen führt. Ersetzt man abschließend f_i durch die wellenlängenabhängige $f_i(\lambda)$, um wieder im wellenlängenabhängigen Flächendeckungsansatz zu agieren, schreibt sich Gleichung (7.5) folgendermaßen:

$$\widehat{\beta_{cmy}}(\lambda) := \left(\sum_{i \in \Psi} f_i(\lambda) \cdot \beta_{VT_i}(\lambda) \right) \cdot \gamma_{cmy}(\lambda) \quad \forall \lambda \in [380 \text{ nm}, \dots, 780 \text{ nm}] . \quad (7.6)$$

Damit ist es gelungen, diesem „messbaren“ $\gamma_{cmy}(\lambda)$ eine theoretisch physikalische Deutung zu geben, die nicht nur quantitativ, sondern auch qualitativ die optischen Effekte beim Übereinanderdruck berücksichtigt.

Anhand weniger gedruckter und spektral ausgewerteter Flächendeckungskombinationen werden nun anhand des integrativen Übereinanderdruckparameters $\gamma_{cmy}(\lambda)$ sämtliche Veränderungen bei optisch wirksamer Schichtdicke und Flächendeckung praxisnah und in Abhängigkeit der jeweiligen Flächendeckungskombination berücksichtigt. Relevante Flächendeckungskombinationen für die Bestimmung von $\gamma_{cmy}(\lambda)$ sind $a_m = 50\%$ auf $a_c = 50\%$, $a_y = 50\%$ auf $a_c = 50\%$ und $a_y = 50\%$ auf $a_m = 50\%$ für den Zweifarbedruck. Für den Dreifarbedruck sind folgende Flächendeckungskombinationen relevant: $a_m = 50\%$ und $a_y = 50\%$ in Kombination auf a_c von 10% bis 100% in 10%-Schritten. Insgesamt werden demnach 13 Bezugfelder für die Bestimmung der jeweiligen $\gamma_{cmy}(\lambda)$ gebraucht.

Der jeweilige wellenlängenabhängige Übereinanderdruckparameter wird dabei in Anlehnung an Gleichung (7.6) über den Quotienten aus gemessener und ohne diesen Parameter berechneter Remission des jeweiligen Bezugfelds bestimmt. Beispielsweise wird der über das Bezugfeld mit $a_y = 50\%$, $a_m = 50\%$ und $a_c = 70\%$ bestimmte $\gamma_{cmy}(\lambda)$ dann für die Berechnung sämtlicher Flächendeckungskombinationen von Cyan, Magenta und Gelb heran gezogen, die einen Flächendeckungsanteil bei Cyan zwischen 65% und 75% haben und bezüglich Magenta und Gelb beliebige Flächendeckungsanteile $> 0\%$ aufweisen.

Trotz dieses integrativen Ansatzes bietet sich die Möglichkeit der optimierten Farbseparation. Bei gegebener Remission einer Zielfarbe kann zur Bestimmung der optimalen nominellen Flächendeckungen a_i deren direkte Korrelation zu $A_{eff}^{a_i}(\lambda)$ genutzt werden. Das entsprechende $\gamma_{cmy}(\lambda)$ bleibt dabei unangetastet und fließt somit analog zur Farbvorhersage in die Lösung des zur Farbvorhersage inversen Problems (der Farbseparation) mit ein. Das aufzustellende Gleichungssystem ist die ausführliche Schreibweise von (7.6) unter Berücksichtigung der angepassten DEMICHEL-Gleichungen (5.11) auf Seite 40 und der Definition 5.1 der wellenlängenabhängigen Flächendeckung auf Seite 37. Einige Entscheidungsregeln im Optimierungsalgorithmus, die bestimmte Flächendeckungskombinationen präferieren, runden das zu erwartende Ergebnis des nicht eindeutig lösbaren Problems ab.

Bei der spektralen Regelung müssen die ΔX_i optimiert werden, wovon allerdings der integrative Übereinanderdruckparameter $\gamma_{cmy}(\lambda)$ ebenfalls betroffen ist. Abhilfe schafft hier nur ein Andruck der Bezugfelder in verschiedenen Über- und Unterfärbungskombinationen, damit auch hier ein funktionaler Zusammenhang gefunden und berücksichtigt werden kann.

7.2 Ohne angedruckte Sekundär- und Tertiärfarben

Sind die vollflächigen Übereinanderdrucke der Primärfarben nicht verfügbar, müssen die Informationen bezüglich der Streu- und Farbspaltungseigenschaften anhand der spektralen Auswertung von vollflächig auf 100% Schwarz gedruckten Primärfarben generiert werden. Somit wird auch bei dieser Herangehensweise das inhomogene Liegen der nachfolgend gedruckten Farben berücksichtigt.

Bei der zur Modellkalibrierung nötigen Berechnung der relevanten Remissionen $\widehat{\beta_{VT_i}}(\lambda)$ von den Sekundärfarben und der Tertiärfarbe Dreifarbenschwarz (also $i \in \Psi = \{r, g, b, DFS\}$), aus den Remissionen der Primärfarben, können die jeweiligen Streueigenschaften folgendermaßen berücksichtigt werden:

Bildet man den Quotienten $\Theta_{P,k}(\lambda)$ von Remissionen der vollflächig auf 100% Schwarz (k) gedruckten Primärfarben (P), die zum einen theoretisch, laut multiplikativer Farbmischung berechnet $\widehat{\beta_{P,k}}(\lambda) = \beta_P(\lambda) \cdot \beta_k(\lambda)$ sind [Ric80] und zum anderen messtechnisch erfasst $\beta_{P,k}(\lambda)$ werden, so zeigt sich ein Verlauf der sich in den entsprechenden, zur optimierten Farbvorhersage nötigen Quotienten der Primärfarben $\Theta_{P_1,P_2}(\lambda)$ vollflächig aufeinander gedruckt wiederfindet.

$$\Theta_{P,k}(\lambda) := \frac{\beta_{P,k}(\lambda)}{\widehat{\beta_{P,k}}(\lambda)} \quad \forall \lambda \in [380 \text{ nm}, \dots, 780 \text{ nm}] . \quad (7.7)$$

Abbildung 7.4 zeigt, wie stets der niedrigere Wert der beiden Quotienten $\Theta_{P_i,k}(\lambda)$ beispielsweise von Cyan auf Schwarz bzw. Magenta auf Schwarz dem Quotientenverlauf $\Theta_{P_1,P_2}(\lambda)$ von Magenta auf Cyan entspricht. Nur im Bereich der Überschneidung der beiden Kurven kommt es zu einer deutlichen Abschwächung.

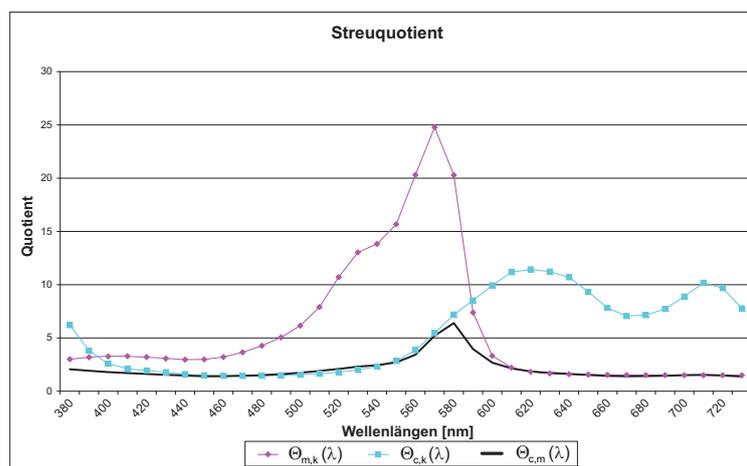


Abbildung 7.4: Quotientenverlauf von Remissionen vollflächig übereinandergedruckter Primärfarben gemessenen und nach subtraktiver Farbmischung berechnet bezüglich Cyan auf Schwarz, Magenta auf Schwarz und Magenta auf Cyan.

Diese Abschwächung lässt sich in einer ersten Näherung nachempfinden, indem eine lineare Interpolation zu beiden Seiten der Überschneidung vorgenommen wird: Sei λ der Wel-

lenlängenbereich der Überschneidung von $\Theta_{P1,k}(\lambda)$ und $\Theta_{P2,k}(\lambda)$, dann gilt für $\Theta_{P1,P2}(\lambda)$ mit $\lambda \in [\check{\lambda} \pm 10nm]$ folgender Zusammenhang:

$$\Theta_{P1,P2}(\lambda) := \text{Min} \left(\Theta_{P1,k}(\check{\lambda} - 10nm), \Theta_{P2,k}(\check{\lambda} - 10nm) \right) \\ + \frac{\text{Min}(\Theta_{P1,k}(\check{\lambda} + 10nm), \Theta_{P2,k}(\check{\lambda} + 10nm)) - \text{Min}(\Theta_{P1,k}(\check{\lambda} - 10nm), \Theta_{P2,k}(\check{\lambda} - 10nm))}{((\check{\lambda} + 10nm) - (\check{\lambda} - 10nm))} \\ \cdot (\lambda - (\check{\lambda} - 10nm)) \quad \forall \lambda \in [\check{\lambda} \pm 10nm].$$

Überall sonst gilt für $\Theta_{P1,P2}(\lambda)$:

$$\Theta_{P1,P2}(\lambda) := \text{Min} \left(\Theta_{P1,k}(\lambda), \Theta_{P2,k}(\lambda) \right) \quad \forall \lambda \in [380 \text{ nm}, \dots, 780 \text{ nm}] \setminus [\check{\lambda} \pm 10nm].$$

Diese Definition der Quotientenfunktion $\Theta_{P1,P2}(\lambda)$ gilt auch für die übrigen Primärfarbkombinationen. Sie fließt in den Modellansatz als Berücksichtigung der Streuung beim vollflächigen Übereinanderdruck der Primärfarben bei der Remissionsberechnung nicht angedruckter Sekundär- und Tertiärfarben mit ein.

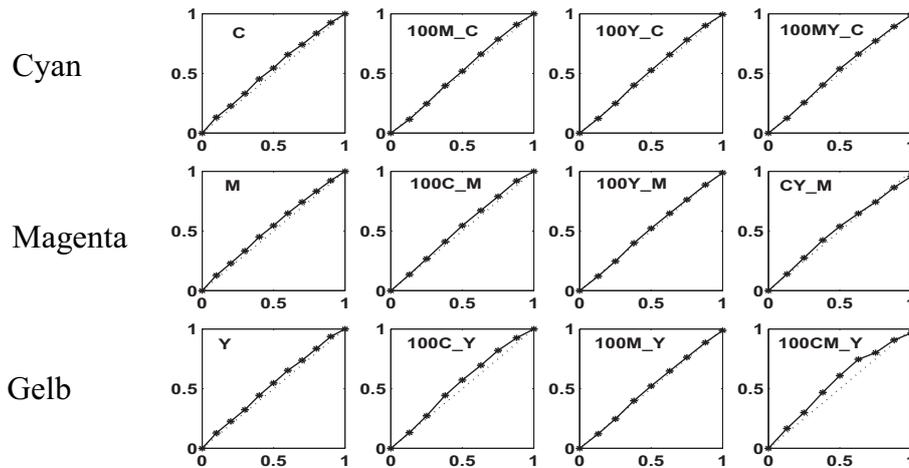


Abbildung 7.5: Tonwertzunahme der Primärfarben auf vollflächig bedrucktem bzw. unbedrucktem Untergrund [Her04].

Die Berücksichtigung der Steigungen von $\Theta_{P1,k}(\lambda)$ und $\Theta_{P2,k}(\lambda)$ in Bereichen der Überschneidungen liefert in Einzelfällen hervorragende Näherungen, konnte aber nicht ohne weitere Anpassung auf die übrigen Primärfarbkombinationen übertragen werden und bleibt hier deshalb ohne weitere Ausführung.

Strukturveränderungseffekte, wie sie im vorangegangenen Kapitel 7.1 angesprochen wurden, können innerhalb dieses Ansatzes ohne verfügbare Andrucke ebenfalls weder für beliebige Farbkombinationen auf demselben noch auf anderen Bedruckstoffen abgeleitet werden. Die Farbspaltungseigenschaften der verschiedenen Druckfarben sind zu unterschiedlich, als

dass man auf Ergebnisse anderer Kombinationen ohne Weiteres zurückgreifen könnte. Nach HERSCH kommt es insbesondere zu veränderten Tonwertzunahmen, je nachdem womit der Untergrund vollflächig bedruckt oder ob er unbedruckt ist (Abbildung 7.5) [Her04].

Wie sich die vorgestellten Ansätze bewähren wird in der folgenden Ergebnispräsentation vorgestellt.

Kapitel 8

Validierung

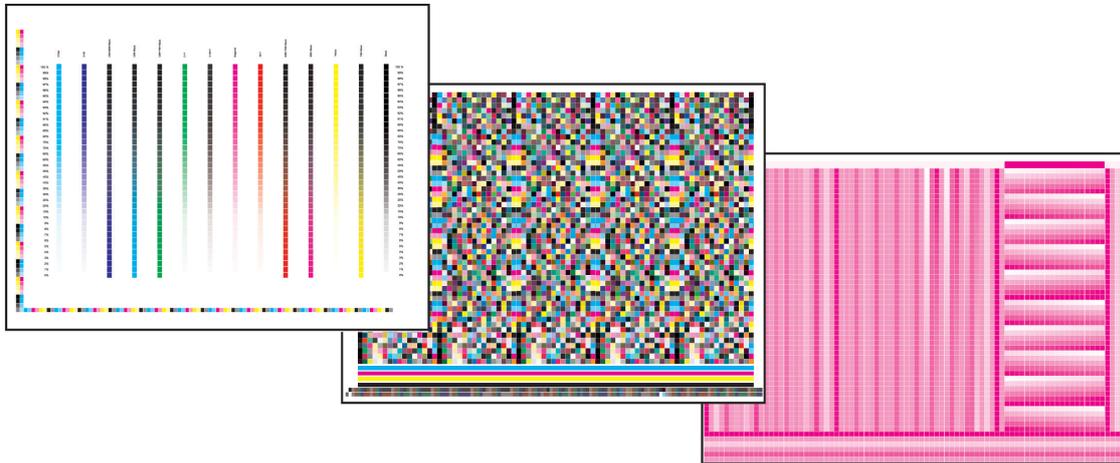


Abbildung 8.1: Drei der verwendeten sieben Testcharts.

In diesem Kapitel werden die erzielten Ergebnisse, die Vorgehensweise zur praxisrelevanten Berechnung und die Bedingungen, unter denen die Ergebnisse reproduzierbar sind, dargestellt. Im Fokus steht die Auswertung des Bogenoffset-Druckverfahrens, für das Inkjet-Verfahren und die Flexo- und Tiefdruckverfahren werden ausschließlich die Anwendungspotentiale des vorgestellten Ansatzes bezüglich des einfarbigen Rasterdrucks skizziert.

8.1 Ergebnisse im Bogenoffset-Verfahren

Die nun präsentierte Qualität der Farbvorhersage für den CMY-Mehrfarbandruck beruht darauf, dass für den wellenlängenabhängigen Flächendeckungsansatz alle 24 relevanten Flächendeckungskombinationen gedruckt und spektral ausgewertet zur Modellkalibrierung als Bezugsfelder zur Verfügung stehen (vgl. Kapitel 5.3, Seite 40 & Kapitel 7.1, Seite 52). Darüber hinaus ist die Gewichtungsfunktion $\vartheta(a)$ in einem funktionalen Zusammenhang (hier eine Ausgleichsfunktion zweiten Grades) vorbereitet (vgl. Seite 60).

Abbildung 8.2 zeigt, dass bei 99% aller 360 bezüglich des Bogenoffsetdrucks untersuchten Flächendeckungskombinationen der farbmetrische Abstand zwischen berechneter und gemessener Remission kleiner als drei ΔE_{ab}^* -Einheiten ist. Nach den in Tabelle 3.4 auf Seite 20 aufgeführten Wahrnehmbarkeitsschwellen bedeutet das, dass alle zu erwartenden Farbabweichungen wenn überhaupt nur schwer wahrnehmbar sind. Betrachtet man dieselben Ergebnisse bezüglich der ΔE_{2000}^* -Metrik, die der tatsächlichen empfindungsgemäßen Farbabweichung deutlich näher kommt, so liegen 89% aller Farbabweichungen unter der kleinsten überhaupt wahrnehmbaren Schwelle von einer ΔE -Einheit. Die dreidimensionale

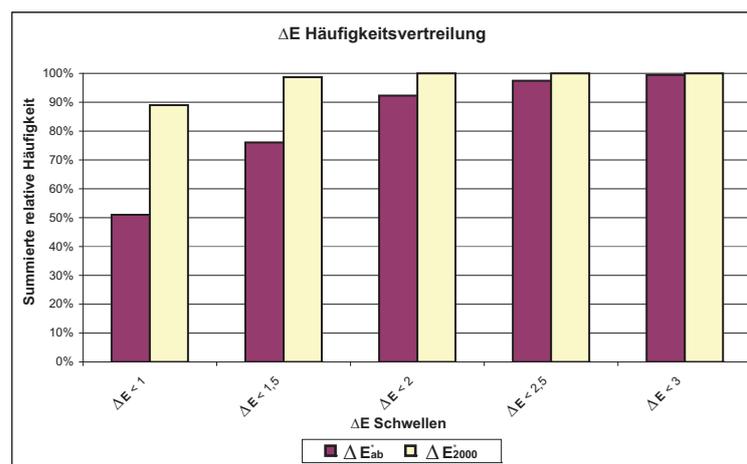


Abbildung 8.2: Erreichte Übereinstimmung zwischen modellierten und gemessenen Remissionen bei Kenntnis der Sekundär- und Tertiärfarben sowie der Übereinanderdruckparameter.

Darstellung in Abbildung 8.3 zeigt betrachtete Farborte mit dazugehöriger ΔE_{ab}^* -Abweichung zwischen berechneter und gemessener Farbvalenz. Die zu erwartenden Abweichungen sind durch entsprechende Kugelradien dargestellt.

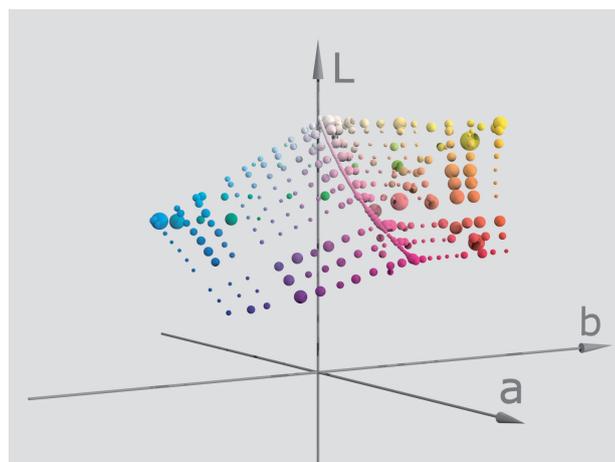


Abbildung 8.3: Dreidimensionale Darstellung der Farbabstände zwischen berechneten und gemessenen Farbvalenzen: die kleinsten Kugeln symbolisieren ΔE_{ab}^* -Abweichung kleiner 0,7 die größte beschreibt 3,7 ΔE_{ab}^* -Abweichung.

Im Einzelnen sind 100 einfarbig, 200 zweifarbig und weitere 60 dreifarbig aufgebaute Raster-tonfelder dargestellt, wobei für deren Berechnung sämtliche zur Modellkalibrierung verwendeten Bezugsfelder in der näheren Umgebung der Testfelder positioniert (Abbildung 8.4) zur Verfügung stehen.

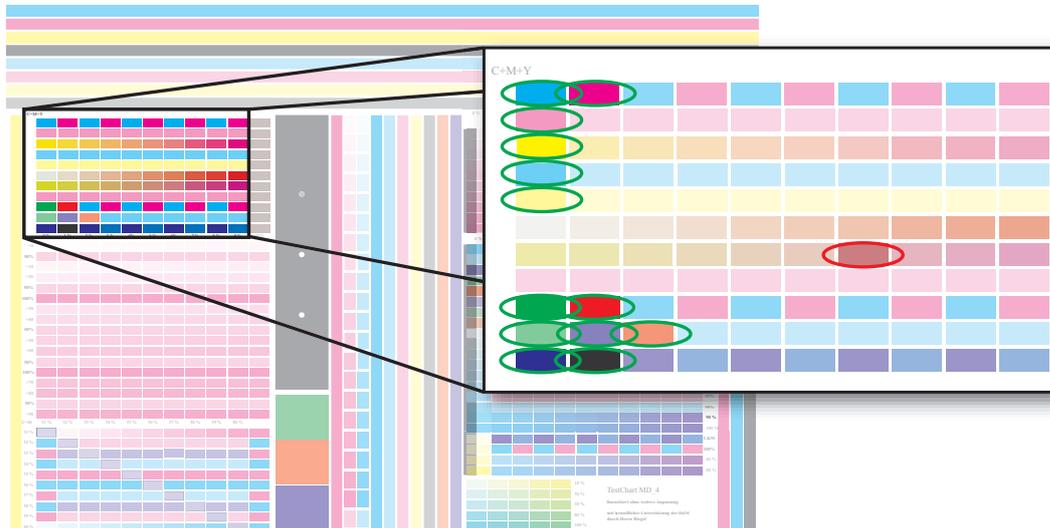


Abbildung 8.4: Test-Chart für die Validierung des Modells mit Bezugsfeldern (grün markiert) und Testfeldern (eines ist exemplarisch rot markiert).

Abbildung 8.5 zeigt exemplarisch (bezüglich einiger Flächendeckungskombinationen von Cyan und Magenta) berechnete Remissionen $\widehat{\beta}_{cm}(\lambda)$, die gegenüber den gemessenen Remissionen $\beta_{cm}(\lambda)$ dargestellt sind.

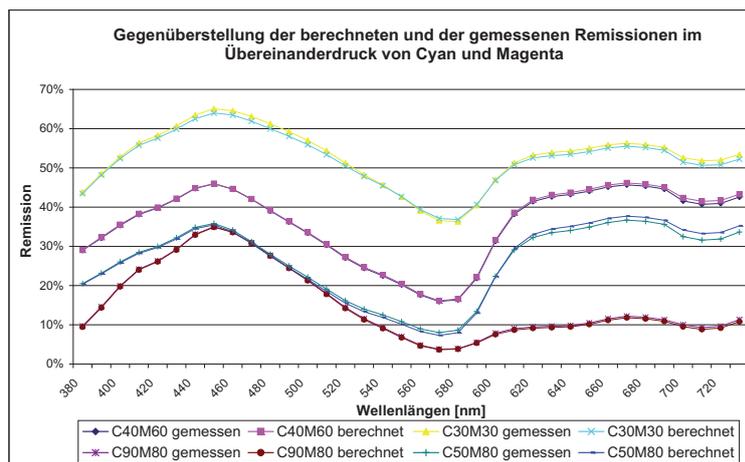


Abbildung 8.5: Berechnete $\widehat{\beta}_{cm}(\lambda)$ und gemessene Remission $\beta_{cm}(\lambda)$ für Flächendeckungskombinationen von Cyan und Magenta.

Für die in Abbildung 8.5 dargestellten Flächendeckungskombinationen sind, neben dem farbmetrischen Vergleich bezüglich der beiden Farbabstandsformeln ΔE_{ab}^* und ΔE_{2000}^* , auch der

spektrale (über die Spektralwert-Metrik ΔE_s definierte) Abstand der beiden Remissionen in der folgenden Tabelle 8.1 aufgeführt:

| Flächendeckungskombination | ΔE_s | ΔE_{ab}^* | ΔE_{2000}^* |
|----------------------------|--------------|-------------------|---------------------|
| C30 M30 | 0,00235 | 0,8 | 0,4 |
| C40 M60 | 0,00049 | 0,4 | 0,3 |
| C50 M80 | 0,00241 | 2,0 | 1,0 |
| C90 M80 | 0,00027 | 0,6 | 0,3 |

Tabelle 8.1: Flächendeckungskombinationen von Cyan und Magenta mit zugehörigen Werten der Spektralwert-Metrik und der beiden Farbabstandsformeln.

Deutlich wird anhand der beiden Flächendeckungskombinationen *C30 M30* und *C50 M80*, dass (analog zu den Normvalenzen (vgl. Kapitel 3.3, Seite 18)) abhängig vom Farbort nahezu identische Werte bei der Spektralwert-Metrik zu spürbar unterschiedlichen Farbvalenzabständen führen können.

8.2 Die Vorgehensweise

Anhand des zweifarbigem Übereinanderdrucks von Cyan und Magenta wird die Vorgehensweise zur Berechnung der zu erwartenden Remissionen exemplarisch gezeigt.

Ausgangspunkt ist die spektrale Auswertung von Bedruckstoff und Farbfeldern mit Flächendeckungen mit 20%, 50%, 80% und 100% der Primärfarbe Magenta. Die in Abbildung 8.6 dargestellten Remissionen sind als Vorwegnahme durch berechnete Remissionen bezüglich der Flächendeckungen 20%, 50% und 80% ergänzt.

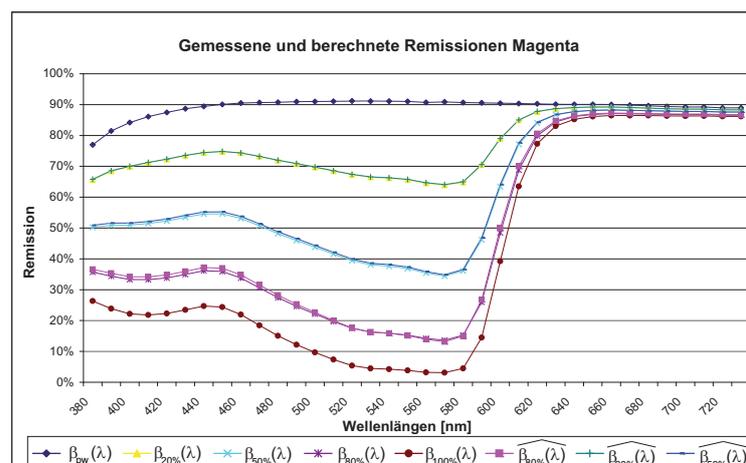


Abbildung 8.6: Remissionen von Bedruckstoff und Magentahalbtönen (gemessen und berechnet)

Abbildung 8.7 zeigt die wellenlängenabhängigen effektiven Flächendeckungen $A_{effM}^a(\lambda)$, die

nach Definition 5.1 (vgl. Seite 37) für die ausgewerteten Flächendeckungen berechnet sind.

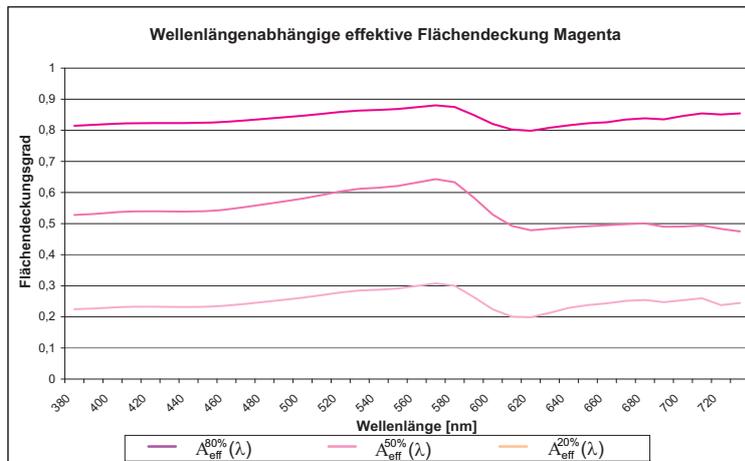


Abbildung 8.7: Wellenlängenabhängige effektive Flächendeckungen $A_{eff_M}^a(\lambda)$

Das homogene Liegen der Kurven ermöglicht, gemeinsam mit der relevanten charakteristischen $A_{eff_M}^{50\%}(\lambda)$ für Magenta und den gemessenen Remissionen der Flächendeckungen $a \in [20\%, 80\%, 100\%]$, den funktionalen Zusammenhang der Gewichtungsfunktion $\vartheta(a)$ aufzustellen. Die Stützstellen $\vartheta(a)$ in $a \in [20\%, 50\%, 80\%, 100\%]$ werden mittels der Spektralwertmetrik (vgl. Kapitel 5.2, Seite 39) ermittelt und für alle Flächendeckungen, die zwischen den gemessenen Stützstellen liegen, durch Interpolation zwischen diesen Lösungen bestimmt (vgl. Kapitel 12.2, Seite 88). Abbildung 8.8 zeigt diese Stützstellen sowie den daraus abgeleiteten funktionalen Zusammenhang der Gewichtungsfunktion. Darüber hinaus sind die eng an diesem funktionalen Zusammenhang liegenden Werte der aus 100 Stützstellen generierten Ausgleichsfunktion dargestellt, was den praxisrelevanten Ansatz $\vartheta(a)$ über nur vier Bezugspfelder zu bestimmen bestätigt.

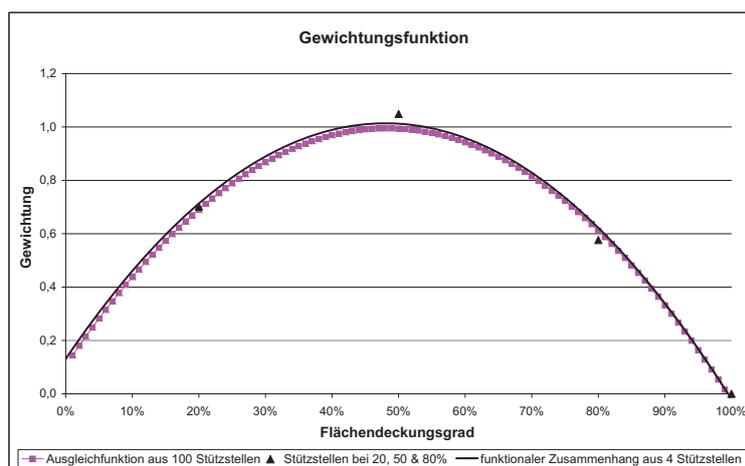


Abbildung 8.8: $\vartheta(a)$, Stützstellen und Werte des funktionalem Zusammenhangs.

$\vartheta(a)$ kann wegen des für alle Primärfarben identischen Druckplatten- und Rastertyps unverändert für die zweite beteiligte Primärfarbe Cyan verwendet werden. Zur Bestimmung

der charakteristischen $A_{effC}^{50\%}(\lambda)$ für Cyan müssen die Bezugsfelder mit 50% und 100% Flächendeckung dieser Farbe spektral ausgewertet werden. Abbildung 8.9 zeigt neben diesen Remissionen auch die Remissionen der relevanten, vollflächig bzw. zu jeweils 50% übereinander gedruckten Primärfarben $\beta_{100\%}^{cm}(\lambda)$ und $\beta_{50\%}^{cm}(\lambda)$.

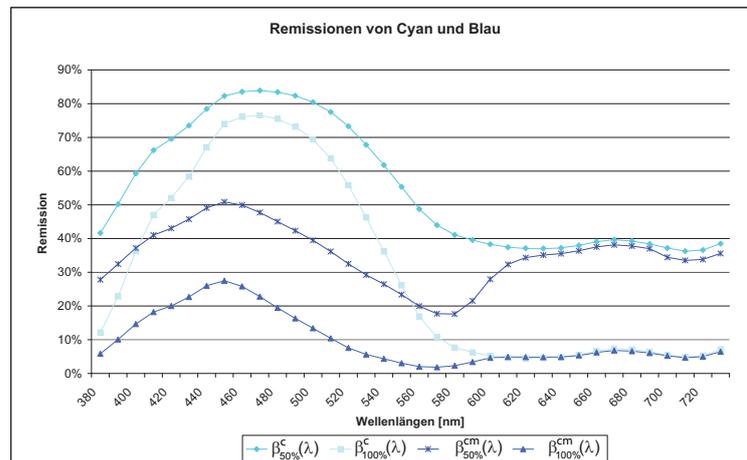


Abbildung 8.9: Remissionen der Bezugsfelder $C100$, $C50$, $C100M100$ und $C50M50$

In Abbildung 8.10 wird die berechnete $A_{effC}^{50\%}(\lambda)$ von Cyan und der, aus der spektralen Auswertung des $C50M50$ -Feldes generierten, integrativen (Zweifارben-) Übereinanderdruckparameter $\gamma_{cm}(\lambda)$ (vgl. Kapitel 7.1, Seite 52) mit eigener, rechtsseitiger Y-Achse gezeigt.

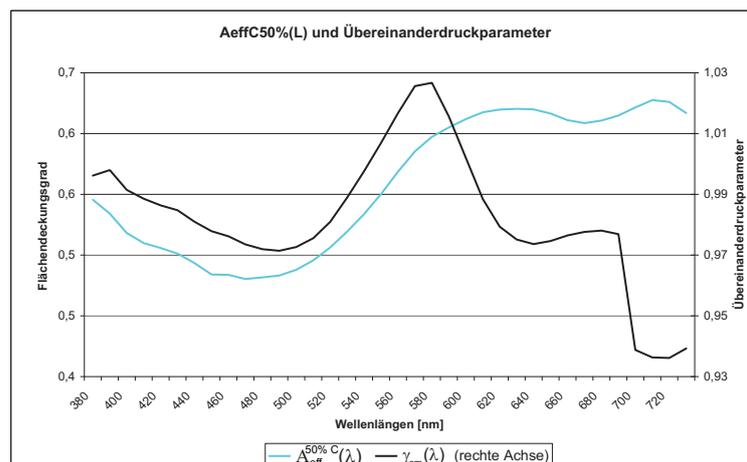


Abbildung 8.10: $A_{effC}^{50\%}(\lambda)$ Cyan und der Übereinanderdruckparameter $\gamma_{cm}(\lambda)$

Laut Modellansatz (vgl. Gleichung (5.12), Seite 40) mit integrativen Übereinanderdruckparameter $\gamma_{cm}(\lambda)$ berechnet sich exemplarisch für Flächendeckungskombinationen von Cyan

und Magenta, die zu erwartende Remission folgendermaßen:

$$\begin{aligned}\widehat{\beta_{cm}}(\lambda) &= \left(\sum_{i \in \{PW, c, m, b\}} f_i(\lambda) \cdot \beta_{VT_i}(\lambda) \right) \cdot \gamma_{cm}(\lambda) \quad \forall \lambda \in [380 \text{ nm}, \dots, 780 \text{ nm}] \\ &= \left(A_a^c(\lambda) \cdot (1 - A_a^m(\lambda)) \cdot \beta_{VT_c}(\lambda) + (1 - A_a^c(\lambda)) \cdot A_a^m(\lambda) \cdot \beta_{VT_m}(\lambda) \right. \\ &\quad \left. + (A_a^c(\lambda)) \cdot (A_a^m(\lambda)) \cdot \beta_{VT_b}(\lambda) + (1 - A_a^c(\lambda)) \cdot (1 - A_a^m(\lambda)) \cdot \beta_{PW}(\lambda) \right) \cdot \gamma_{cm}(\lambda) .\end{aligned}$$

Für die Flächendeckungskombination von Magenta 60% auf Cyan 40% ist die ausführliche Schreibweise dieses Zusammenhangs:

$$\begin{aligned}\widehat{\beta_{c40m60}}(\lambda) &= \left[\left((A_{eff_C}^{50\%}(\lambda) - 0.5) \cdot \vartheta(40\%) + 40\% \right) \cdot \left(1 - (A_{eff_M}^{50\%}(\lambda) - 0.5) \cdot \vartheta(60\%) + 60\% \right) \cdot \beta_{VT_c}(\lambda) \right. \\ &\quad + \left(1 - (A_{eff_C}^{50\%}(\lambda) - 0.5) \cdot \vartheta(40\%) + 40\% \right) \cdot \left((A_{eff_M}^{50\%}(\lambda) - 0.5) \cdot \vartheta(60\%) + 60\% \right) \cdot \beta_{VT_m}(\lambda) \\ &\quad + \left((A_{eff_C}^{50\%}(\lambda) - 0.5) \cdot \vartheta(40\%) + 40\% \right) \cdot \left((A_{eff_M}^{50\%}(\lambda) - 0.5) \cdot \vartheta(60\%) + 60\% \right) \cdot \beta_{VT_b}(\lambda) \\ &\quad \left. + \left(1 - (A_{eff_C}^{50\%}(\lambda) - 0.5) \cdot \vartheta(40\%) + 40\% \right) \cdot \left(1 - (A_{eff_M}^{50\%}(\lambda) - 0.5) \cdot \vartheta(60\%) + 60\% \right) \cdot \beta_{PW}(\lambda) \right] \\ &\quad \cdot \gamma_{cm}(\lambda) .\end{aligned}$$

Werden hier die entsprechenden Werte für $\vartheta(a)$ laut funktionalem Zusammenhang (Abbildung 8.8) sowie alle übrigen nun bekannten Größen eingesetzt, liefert die Formel die gesuchten Remissionen.

*Alle unter den angegebenen Bedingungen betrachtete Flächendeckungskombinationen aus Abbildung 8.3 sind unter Angabe des spektralen Abstands laut Metrik ΔE_s , der CIE $-L^*a^*b^*$ -Farbvalenzen (gemessen und berechnet) und der beiden Farbabstandsformeln in der Tabelle 12.4 im Anhang (vgl. Kapitel 12.4, Seite 91) aufgeführt.*

8.3 Versuchsumgebung im Bogenoffset

8.3.1 Druckmaschine

Seit 2005 liefert die Heidelberger Druckmaschinen AG die Speedmaster CD 74 als lange Wendemaschine mit bis zu zehn Druckwerken und zusätzlichem Lackierwerk aus [Hei05]. Eine Maschine dieser Baureihe CD 74 steht der Bergischen Universität Wuppertal im C-Format (Akzidenzdruckformat 53 cm x 74 cm) mit fünf Druckwerken, Wendung sowie Lackierwerk als Labormaschine zur Verfügung.

8.3.2 Bedruckstoff

Um die optische Wirkung von Aufhellern im Bedruckstoff auf gedruckte Farben auszublen- den, werden alle Druckversuche auf dem aufhellerfreien „APCO II/II“ der Firma Scheufelen realisiert. APCO II/II ist ein Lichtehtheitspapier, das als Normpapier in der Normenreihe ISO 2846 ff aufgeführt ist. Sein Einsatz erfolgt deshalb für Test- und Versuchszwecke in Forschungsinstituten der Druck- und Druckfarbenindustrie [Gla09].

Ansätze bezüglich optisch aufgehellter Bedruckstoffe sind viel versprechend, aber rein empirischer Natur. Die gefundenen Zusammenhänge sind im Ausblick (vgl. Kapitel 11, Seite 86) kurz skizziert.

8.3.3 Druckplatten

Es werden ausschließlich linearisiert bebilderte Druckplatten verwendet (vgl. Kapitel 5.1, Seite 31), um sicher zu stellen, dass in dem als Bezug verwendeten 50% Rasterton eine möglichst große Druckpunktrandlänge und damit möglichst stark ausgeprägte Effekte der Lichtstreuung im Vergleich zu den übrigen Flächendeckungen vorzufinden sind.

Bei tonwertkorrigiert bebilderten Druckplatten wird die direkte Korrelation zwischen der nominellen Flächendeckung a aus dem Datensatz und der Gewichtungsfunktion $\vartheta(a)$ eben durch diese korrigierende Anpassung verzerrt und somit weniger anschaulich. Die hohe Korrelation zwischen der geometrischen Flächendeckung auf der Druckplatte und der Gewichtungsfunktion $\vartheta(a)$ bleibt aber davon unberührt. Daher muss sich die angesprochene Anpassung in der veränderten Interpolationsvorschrift widerspiegeln, damit bei praxisrelevanter Betrachtung ausgehend von wenigen Bezugsfeldern mit nominellen „Datensatzflächendeckungen“ die Gewichtungsfunktion für alle übrigen „Datensatzflächendeckungen“ bestimmt werden kann.

Des Weiteren können verschiedene Druckplattentypen ohne Qualitätseinbußen bei der Farbvorhersage verwendet werden. Die individuellen Eigenschaften werden durch eine Modellkalibrierung in ihrer Wirkung berücksichtigend eingebunden. Untersuchungen beziehen sich auf die positiv arbeitende Fotopolymerplatte „Violet Print“ , die chemisch entwickelt wird [Kod08] und die negativ arbeitende Thermodruckplatte „Azura TS“, bei der eine chemische Druckplattenentwicklung nicht erforderlich ist [GRA08].

8.3.4 Raster

Es sind verschiedene Rastertypen der autotypischen Rasterung zu unterscheiden. Zum einen haben amplitudenmodulierte (AM) Raster je nach Rasterfeinheit und Rasterpunktform individuellen Einfluss auf die Charakteristiken der jeweiligen, farbspezifischen $A_a(\lambda)$. Zum anderen gilt dies in selbem Maße für die verschiedenen frequenzmodulierten (FM) Raster, die durch ein nicht periodisches (stochastisches) Verfahren die Variation von Helligkeit und Farbeindruck über die Anzahl der Punkte gleicher Form und Größe in der Fläche erreichen. Je nach FM-Typ ist die Form der Zusammenschlüsse der Rasterpunkte anders ausgeprägt

und demnach mit eigenen optischen Einflüssen auf das Druckergebnis verbunden [Urb94].

Sämtliche Raster haben demnach ihre individuellen Eigenschaften, die durch eine Modellkalibrierung berücksichtigt werden können. Betrachtet wurden zwei verschiedene FM-Raster sowie AM-Raster mit Feinheiten von 60, 90 und 100 Linien pro Zentimeter in den Ausprägungen „Round-Square“ [Hei07], „Smooth-Elliptical“ [Hei07] und rautenförmiger Kettenpunkt [Hal02], um die Funktionalität des Modells zu dokumentieren. Abbildung 8.11 zeigt exemplarisch, wie sich die charakteristischen $A_{eff}^a(\lambda)$ bezüglich einer FM-Rasterung gegenüber einer AM-Rasterung verhalten. Erwartungsgemäß wird das FM-Raster durch eine stärker ausgeprägte $A_a(\lambda)$ beschrieben, da im Vergleich zum dargestellten AM-Raster mit 60 l/cm die aufsummierte Randlänge der oft freistehenden FM-Rasterpunkte länger ist.

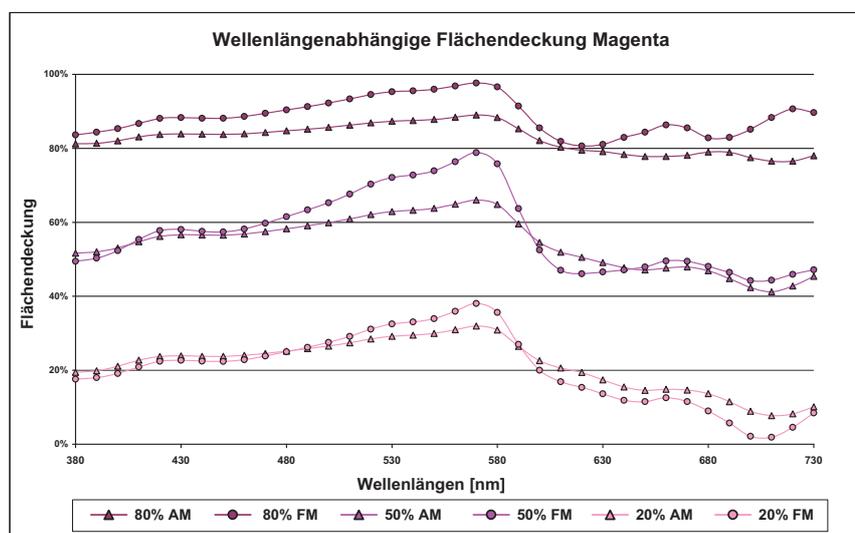


Abbildung 8.11: Die wellenlängenabhängigen effektiven Flächendeckungen bezüglich der nominalen Flächendeckungen 80%, 50% und 20% in AM60er- bzw. FM-Rasterung bei einer Druckfarbe.

Dies wird durch den Erklärungsansatz für Lichtfangeffekte durch HÜBLER bestätigt, der ebenfalls das spektrale Verhalten gedruckter Raster ohne Reduzierung auf densitometrische oder farbmetrische Größen beschreibt. Der direkte Zusammenhang zwischen der Gesamtlänge der Umfangsgrenzen in der Rasterzelle (aufsummierte Randlänge) und Ausprägung der spektralen Effekte wird ebenfalls durch HÜBLER beobachtet [Hüb93].

Dabei ist auch die Gewichtungsfunktion $\vartheta(a)$ insbesondere von der Rasterung abhängig. SCHLAEPFER belegt in diesem Zusammenhang, dass die Vergrößerung der Rasterpunkte im Druck (und damit das Ausmaß der durch die daraus resultierende Randverlängerung hervorgerufenen optischen Effekte) nicht nur von der Punktgröße abhängt, sondern auch von der Form der Rasterpunkte. Was den Einfluss der Punktgröße anbelangt, gilt als Regel, dass die Vergrößerung für eine gegebene Flächenbedeckung proportional zur Umfangslänge des Punkts zunimmt [Sch02]. Dies bestärkt die eingeführte Korrelation zwischen der Gewichtungsfunktion $\vartheta(a)$ und der Druckpunkttrandlänge in Definition 5.2 (vgl. Kapitel 5.2, Seite 37).

Theoretisch hätte nach SCHLAEPFER jener Raster die geringste Verbreiterung, dessen Punkte im Bereich von 0% - 50% positiv rund und im Bereich 50% - 100% negativ rund wären. Obwohl es unmöglich ist Raster herzustellen, die bei 50% vom runden positiven zum runden negativen wechseln, kommt man diesem Grenzfall mit jenen Rastern ziemlich nahe, die in dem Moment des Punktschlusses (bei 50%) quadratisch sind, während die Punkte mit zunehmendem Abstand zum 50%-Tonwert wieder in die runde Form übergehen [Sch02]. Damit ist auch die Druckpunktrandlänge bei 50% Flächendeckung am größten und die zu erwartenden, optischen Effekte am ausgeprägtesten.

Die so genannte „Round-Square“-Rasterung [Hei07] kommt der gerade beschriebenen Rasterung sehr nahe und $\vartheta(a)$ kann mit Hilfe einer polynomialen Ausgleichsfunktion zweiten Grades bezüglich der geometrischen Flächendeckung auf der Druckplatte sehr gut angenähert werden. Bei Rasterungen die deutlich davon abweichen, muss die passende Ausgleichsfunktion individuell bestimmt werden. Bei rautenförmigen Kettenpunkten sind beispielsweise lineare Zusammenhänge zu identifizieren [Dat08].

Anmerkung 8.1 *Bei unkonventionellen Rasterungen befinden sich die größten Druckpunktrandlängen gelegentlich nicht bei den mittleren Flächendeckungen um 50% [Hal02]. Hier muss sowohl die Definition der wellenlängenabhängigen Flächendeckung als auch die Definition von $\vartheta(a)$ entsprechend angepasst werden:*

$$A_a(\lambda) := (A_{eff}^{x\%}(\lambda) - x) \cdot \vartheta(a) + a \quad \forall \quad \lambda \in [380 \text{ nm}, \dots, 730 \text{ nm}]$$

$$\vartheta(a) := R_a / R_{x\%} ,$$

wobei x die betreffende geometrische Flächendeckung mit der längsten Druckpunktrandlänge auf der Druckplatte gemessen ist.

Kennt man nun die Ausprägungen der verwendeten Rasterung, lässt sich $\vartheta(a)$ weiterhin unter dem Aspekt der Praxisrelevanz über wenige Bezugsfelder bestimmen (vgl. Kapitel 8.1, Seite 60). Wenn keine unterschiedlichen Rastertypen in den verschiedenen Farbauszügen verwendet werden, kann dies in guter Näherung für den gesamten Farbensatz anhand einer Primärfarbe erfolgen.

8.3.5 Druckfarbensätze

Verschieden stark pigmentierte Druckfarben oder Druckfarben von verschiedenen Herstellern haben individuelle Farbannahme- und Farbspreizungseigenschaften. Diese machen sich wiederum in der Charakteristik der jeweiligen $A_a(\lambda)$ sowie in den integrativen Übereinanderdruckparametern $\gamma_{cmy}(\lambda)$ bemerkbar und lassen sich dadurch berücksichtigen. Die Gewichtungsfunktion $\vartheta(a)$ bleibt dabei (nahezu) unverändert, wenn die verschiedenen Farbsätze mit identischen, rein linearisiert bebilderten Druckplatten verdruckt werden.

Abbildung 8.12 zeigt beispielhaft anhand der Primärfarbe Magenta aus den verschiedenen stark pigmentierten Druckfarbensätzen „Sun Chemical INTENSE“ und „Sun Chemical HIGH

END-PROCESS“, dass die Unterschiede bezüglich der wellenlängenabhängigen Flächendeckung geringer ausfallen als wenn verschiedene Rasterverfahren bei gleichem Farbensatz verwendet werden (Abbildung 8.11).

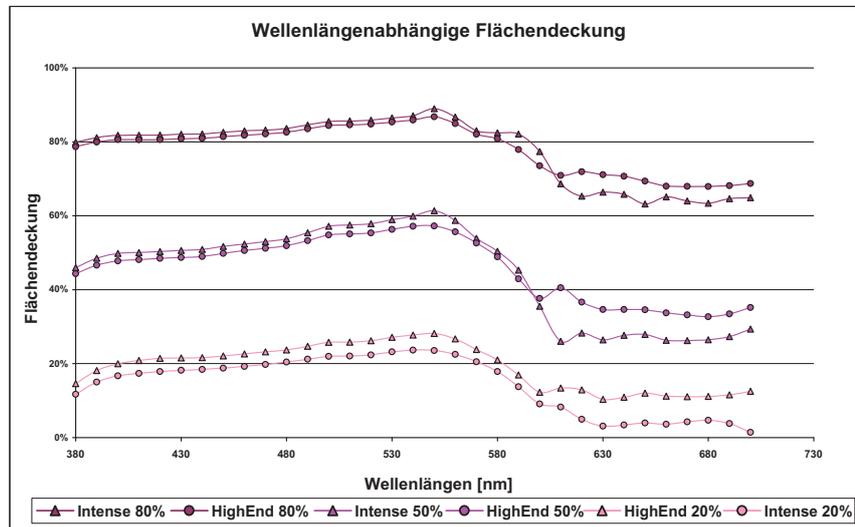


Abbildung 8.12: Die wellenlängenabhängige Flächendeckung bezüglich verschiedener nomineller Flächendeckungen bei einer AM70er Rasterung mit verschiedenen stark pigmentierten Magenta-Druckfarben.

8.3.6 Feuchtmittel und Farbschichtdicke

Die Qualität des gesamten Bogenoffset-Druckprozesses hängt insbesondere von der Regelung des Feuchtmittel-Farbe-Verhältnisses ab und beruht weiterhin auf der optimalen Justierung der Farbzonen innerhalb jedes einzelnen Farbwerks.

Bei einem „stabilen Druck“ geht man davon aus, dass alle Stellgrößen best möglich gewählt sind und das über die Auflage nur noch geringe Anpassungen erfolgen müssen. Alle vorgestellten Ergebnisse beruhen dabei auf der Auswertung von Bogenexemplaren aus dieser Phase des stabilen Drucks. Aber auch hier sind vom Druckmotiv abhängige Einstellungen der einzelnen Farbzonen sowie der im Bogenoffset unvermeidliche Farbabbau in Druckrichtung zu beachten.

Allein der Farbabbau kann bei einfarbig gedruckten Rastertönen, beispielsweise bei einer 50% Flächendeckung, eine Farbabweichung von $2,0 \Delta E_{ab}^*$ -Einheiten innerhalb einer Zone hervorrufen (Abbildung 8.13) [Mil08]. Dies würde, falls nicht berücksichtigt, bei Bezugfeldern zur Modellkalibrierung einen sehr großen Einfluss auf die Qualität der Farbvorhersage haben. Demnach dürfen die Bezugfelder nicht beliebig positioniert sein.

Bei der empirischen Bestätigung der Gewichtungsfunktion $\vartheta(a)$ sind deshalb alle relevanten Bezugfelder mit 50% und 100% Flächendeckung in unmittelbarer Nähe der Testfelder positioniert (Abbildung 8.14), um diese unvermeidlichen, ortsabhängigen Farbschwankungen zu berücksichtigen.

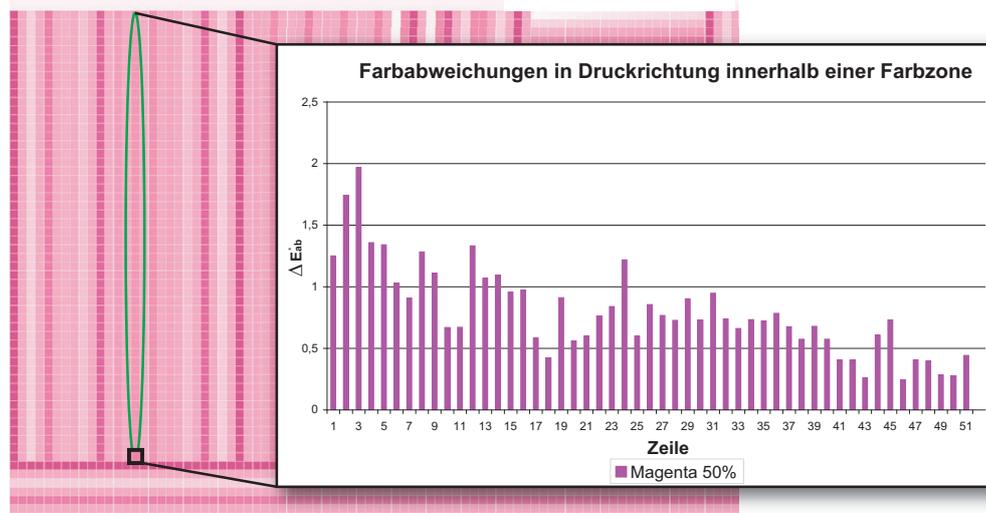


Abbildung 8.13: Test-Chart zur Untersuchung des Farbabfalls und ΔE_{ab}^* -Verlauf bezüglich einer Spalte (grün markiert) von 50%-Rasterfeldern über die gesamte Bogenhöhe bezüglich des schwarz markierten Referenzfelds.

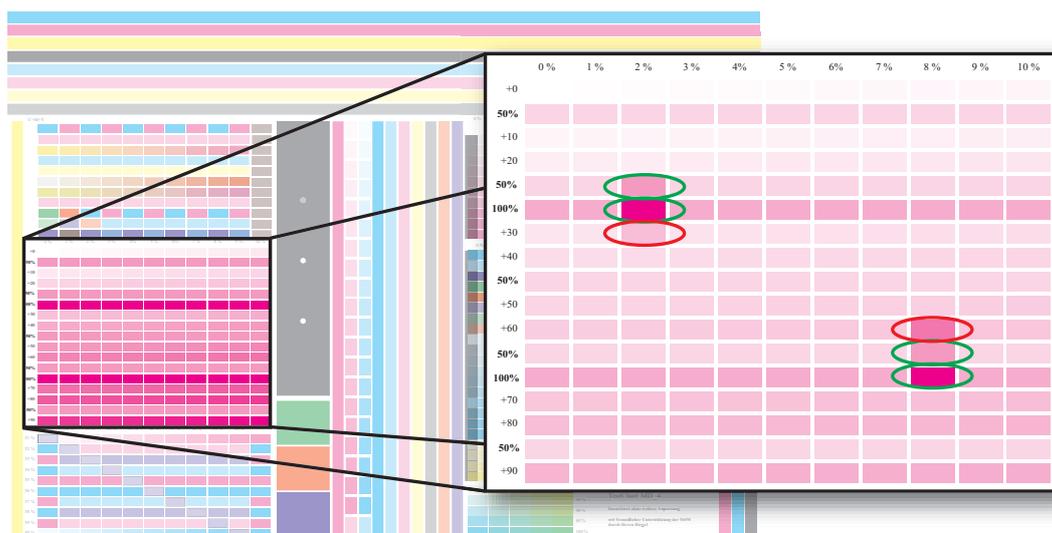


Abbildung 8.14: Test-Chart für die empirische Bestätigung der Gewichtungsfunktion $\vartheta(a)$ mit Bezugsfeldern (exemplarisch grün markiert) für die jeweiligen Testfelder (exemplarisch rot markiert).

Ignoriert man diese Unregelmäßigkeiten im Druckprozess und beschränkt sich bei der Berechnung desselben Farbverlaufs bezüglich eines einzigen 100% Bezugsfelds, so kommt es zu Abweichungszuwächsen von bis zu 300% bei hohen Flächendeckungen (Abbildung 8.15). Dies ist zu erwarten, da der Einfluss einer abweichenden Bezugs-Volltonremission hier am höchsten ist.

In Abbildung 8.15 sind für jede der betrachteten 100 Flächendeckungen zwei Farbabstände zwischen gemessener und berechneter Farbvalenz gegenüber gestellt. Einerseits handelt es sich um den Farbabstand zu der berechneten Farbvalenz bezüglich der Bezugsfelder, die in

unmittelbarer Nachbarschaft zu jedem Testfeld individuell platziert sind. Andererseits ist der Farbabstand zu der berechneten Farbvalenz, die bezüglich eines einzelnen 100%-Bezugsfelds, das für alle Testfelder einheitlich verwendet wird, dargestellt.

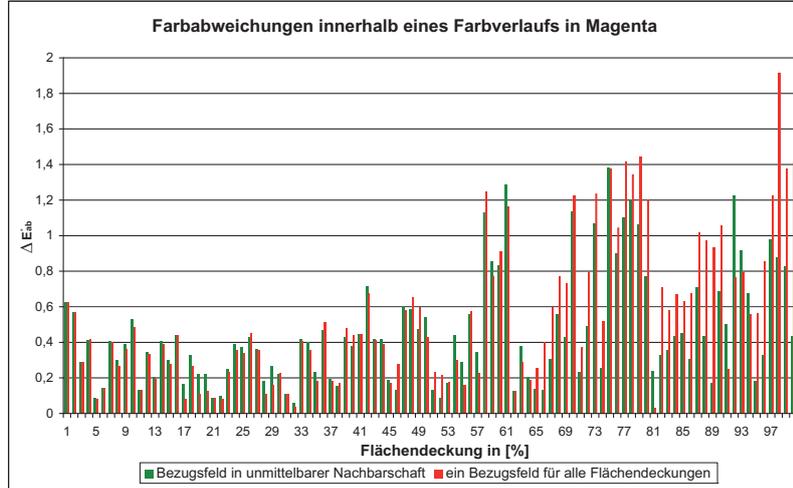


Abbildung 8.15: Fehler bei der Berechnung eines einfarbigen Farbverlaufs bei Positionierung der Bezugsfelder in unmittelbarer Nähe und sonst.

Auch die Möglichkeit das farbabfallbedingte Dichte- bzw. Schichtdickenmaximum auf dem Druckbogen in Druckrichtung, durch Variation des Einsatzpunkts der Farbvereiberwalzen, beliebig aber reproduzierbar zu platzieren, kann im vorliegenden Ansatz berücksichtigt werden. Es ist möglich diese lokalen Schichtdickenverhältnisse bei der Farbvorhersage einzubinden, solange die Farbauftragswalzen nicht oszillieren, da sonst die Reproduzierbarkeit beeinträchtigt ist. Durch dem Druckkontrollstreifen ähnliche Streifen in und quer zur Druckrichtung kann die Farbschichtdickenvariation innerhalb eines Bogens für beliebige Positionen (x, y) beschrieben werden.

Die relevanten 50% und 100% Felder der Primärfarben sind zur Validierung, wie in Abbildung 8.16 dargestellt, großzügig positioniert. Sie können aber auch in der jeweiligen Orientierung (dem Druckkontrollstreifen ähnlich) stark komprimiert werden.

Für die positionsabhängige Schichtdickenbestimmung innerhalb eines Bogens kann mit Lemma 6.1 die relative, optisch wirksame Schichtdicke $\delta_i(x, y)$ für alle Bereiche bezüglich der Schichtdicke eines Referenzfelds pro Primärfarbe bestimmt werden. Ausgehend von den Formeln (8.1) und (8.2), die die Schichtdickenvariation bezüglich der einzelnen Zonen $\delta_i(x)$ bzw. aufgrund des Farbabfalls $\delta_i(y)$ beschreiben, kann $\delta_i(x, y)$ zur Näherung der tatsächlich vorliegenden Schichtdicke an beliebigen Positionen nach (8.3) berechnet werden:

$$\delta_i(x) := X_i(\text{Bezug}) - X_i(x) , \quad (8.1)$$

$$\delta_i(y) := X_i(\text{Bezug}) - X_i(y) , \quad (8.2)$$

$$\widehat{\delta_i(x, y)} := \delta(x)_i \cdot I_i + \delta_i(y) \cdot Q_i \quad i \in [c, m, y] . \quad (8.3)$$

Für diesen einfachen Zusammenhang zwischen gesuchter optisch wirksamer Schichtdicke eines Feldes an der Position (x, y) und den Referenzstreifen werden die Gewichtungsfaktoren I



Abbildung 8.16: Positionierung von Referenzstreifen (grün markiert) zur Berücksichtigung der Farbschichtdickenvariation der jeweiligen Bezugsfelder (rot markiert) und das Referenzfeld (schwarz markiert) für die relative Schichtdickenbetrachtung.

und Q für die individuelle Gewichtung der Schichtdickeninformation in und quer zur Druckrichtung eingeführt. Diese relative Betrachtung der optisch wirksamen Schichtdicke führt auch bezüglich gedruckter Halbtonfelder zu guten Ergebnissen und kann demnach für jede Primärfarbe bezüglich der Bezugsfelder 100% und 50% separat angewendet werden.

Nach der Bestimmung von I und Q durch den Optimierungsansatz der kleinsten Fehlerquadratsumme (vgl. Kapitel 12.2, Seite 88) bezüglich weniger Testfelder, liegen die Abweichungen der relativen Schichtdicken zwischen genähertem $\widehat{\delta}_i(x, y)$ und „gemessenem“ $\delta_i(x, y)$ Wert im Mittel bei $6 \cdot 10^{-5}$ bei den verwendeten Test-Charts. Dementsprechend ist die Farbvorhersagequalität unter Einbindung dieser ortsabhängigen Schichtdickennäherungen mit der Qualität vergleichbar, die bezüglich der in unmittelbarer Umgebung platzierten Bezugsfeldern zu erwarten ist.

8.3.7 Einfluss fehlender Sekundär- und Tertiärfarbremissionen

Bei der Modellierung des Übereinanderdrucks der Primärfarben Cyan und Magenta kommt es ohne Kenntnis der Sekundärfarbenremission zu Abweichungen, die durch die Verwendung der Quotientenfunktion $\Theta_{P_1, P_2}(\lambda)$ im wellenlängenabhängigen Flächendeckungsansatz deutlich reduziert (Abbildung 8.17) werden können.

Abbildung 8.17 zeigt für 100 Flächendeckungskombinationen von Cyan und Magenta jeweils zwei Farbabstände ΔE_{ab}^* zwischen gemessener und berechneter Farbvalenz. Es ist der Farbabstand zu der berechneten Farbvalenz bezüglich der Berechnung mit bzw. ohne Verwendung der Quotientenfunktion $\Theta_{P_1, P_2}(\lambda)$ (vgl. Kapitel 7.2, Seite 54) dargestellt. Auf der x-Achse sind die betrachteten Flächendeckungskombinationen abgetragen, so steht „C5_M5“ beispielsweise für den Übereinanderdruck von 5% Magenta auf 5% Cyan. Insgesamt sind

bezüglich der Flächendeckungen 5%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 80%, 90% und 100% sämtliche Kombinationen dargestellt, wobei nur jede dritte Kombination beschriftet ist.

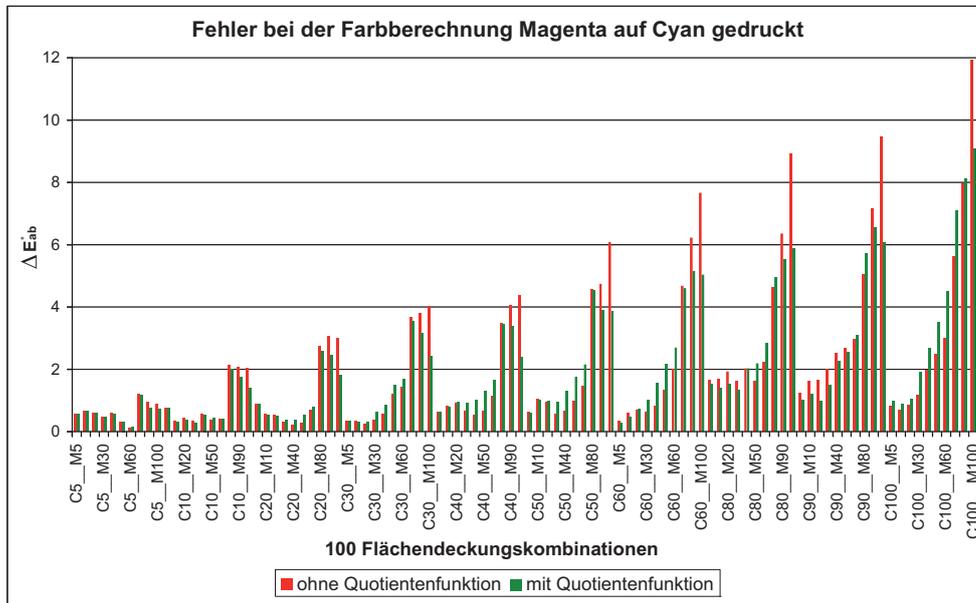


Abbildung 8.17: Fehler bei der Farbberechnung wenn die Sekundärfarbe nicht angedruckt verfügbar ist mit bzw. ohne Quotientenfunktion.

Der Vergleich mit den Ergebnissen, die nach einer Berechnung mittels der NEUGEBAUER-Gleichung zu erwarten sind (Abbildung 8.18) zeigt das Potential des neuen Ansatzes unter diesen Bedingungen. Bei den Berechnungen nach der NEUGEBAUER-Gleichung sind dabei standardmäßig die Volltonremission der Sekundärfarbe (die für die Berechnungen nach dem neuen Ansatz in diesem Zusammenhang nicht berücksichtigt werden) und die gedruckten (geometrischen) Flächendeckungen eingebunden. Dabei werden effektive Flächendeckungen, die anhand von Primärfarbverläufen berechnet und somit die für den NEUGEBAUER-Ansatz bestmögliche Näherung für die gedruckten Flächendeckungen im Übereinanderdruck darstellen verwendet.

Die Abbildung 8.18 zeigt wie auch Abbildung 8.17 für 100 Flächendeckungskombinationen von Cyan und Magenta jeweils zwei Farbabstände zwischen gemessener und berechneter Farbvalenz. Hier sind die Farbabstände bezüglich der Berechnung mit der NEUGEBAUER-Gleichung gegenüber den Farbabstände bezüglich der Berechnung unter Verwendung der Quotientenfunktion im wellenlängenabhängigen Flächendeckungsansatz dargestellt.

Wie sich die hier exemplarisch angesprochenen Fehlerquellen auf die Qualität der Farbvorhersage auswirken können wird nach der Präsentation der Ergebnisse in den übrigen Druckverfahren in der allgemeinen, theoretischen Fehlerdiskussion (Kapitel 9) betrachtet.

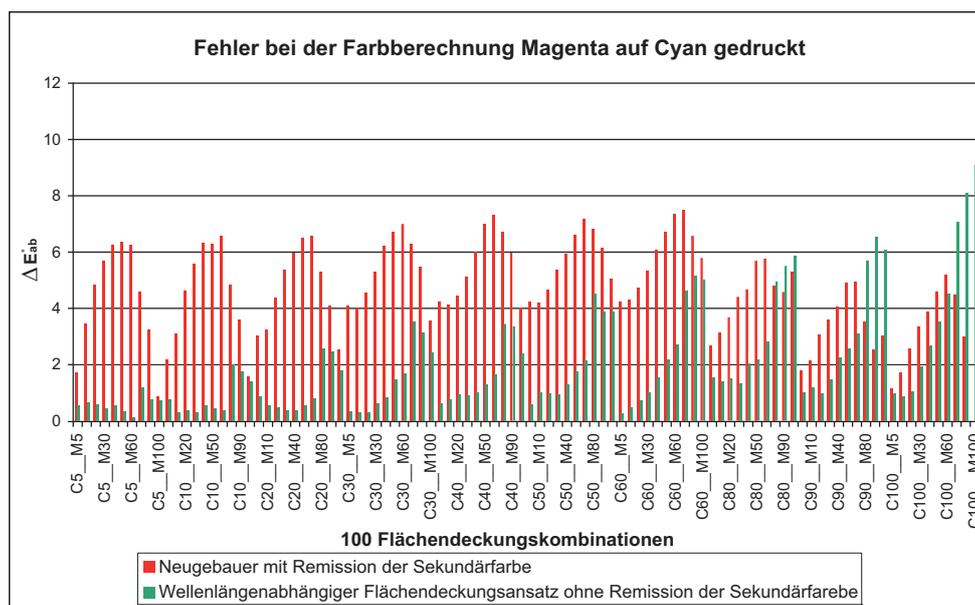


Abbildung 8.18: Fehler bei der Farbberechnung unter Verwendung der Quotientenfunktion wenn die Sekundärfarbe nicht angedruckt verfügbar ist gegenüber den Ergebnissen der NEUGEBAUER-Gleichung unter Verwendung der Volltonremission der Sekundärfarbe.

8.4 Ergebnisse in weiteren Druckverfahren

Im Folgenden werden die Ergebnisse bezüglich der Inkjet-, Tiefdruck- und Flexodruckverfahren für den einfarbigen Rasterdruck der Primärfarben vorgestellt.

In Abbildung 8.19 sind dazu die jeweiligen Remissionen des verwendeten Bedruckstoffs und einer Magentafarbe dargestellt. Dabei sind gleichzeitig die individuellen, wellenlängenabhängigen Flächendeckungen $A_{eff}^a(\lambda)$ der entsprechenden Farben bezüglich der drei Druckverfahren gegenübergestellt. Die $A_{eff}^a(\lambda)$ des Inkjetverfahrens haben eine sehr ausgeprägte Charakteristik, die sich auch im Bereich geringster Absorption der Farbe überschneidungsfrei fortsetzt. Bei Tiefdruck liegen die Remissionswerte im Bereich geringster Absorption näher an den Remissionen des Bedruckstoffs als beim Farb-Bedruckstoffsystem im Inkjetverfahren. Demzufolge sind in diesem Wellenlängenbereich größere Unregelmäßigkeiten zu sehen. Im Fall des betrachteten Farb-Bedruckstoffsystems im Flexodruck sind die Unregelmäßigkeiten, durch die hohe Transparenz der Farbe in diesem Wellenlängenbereich, derart stark ausgeprägt, dass die $A_{eff}^a(\lambda)$ hier auf A_{effRod}^a gesetzt sind (vgl. Kapitel 5.1, Seite 36).

Bezüglich der Gewichtungsfunktionen $\vartheta(a)$ kann bei jedem Druckverfahren ein passender, funktionaler Zusammenhang für die gefundenen Stützstellen bestimmt werden (Abbildung 8.20 links). Damit ist sichergestellt, dass ausgehend von wenigen Bezugspunkten die Farbvorhersage für beliebige Flächendeckungen erfolgen kann. Die dreidimensionale Darstellung der Farbabstände zwischen gemessenen und berechneten Farbvalenzen (Abbildung 8.20 rechts) zeigt, dass das bezüglich des Bogen-Offsetdrucks entwickelte Modell ebenfalls bei anderen Druckverfahren erfolgreich einsetzbar ist.

Remissionen

$$A_{eff}^a(\lambda)$$

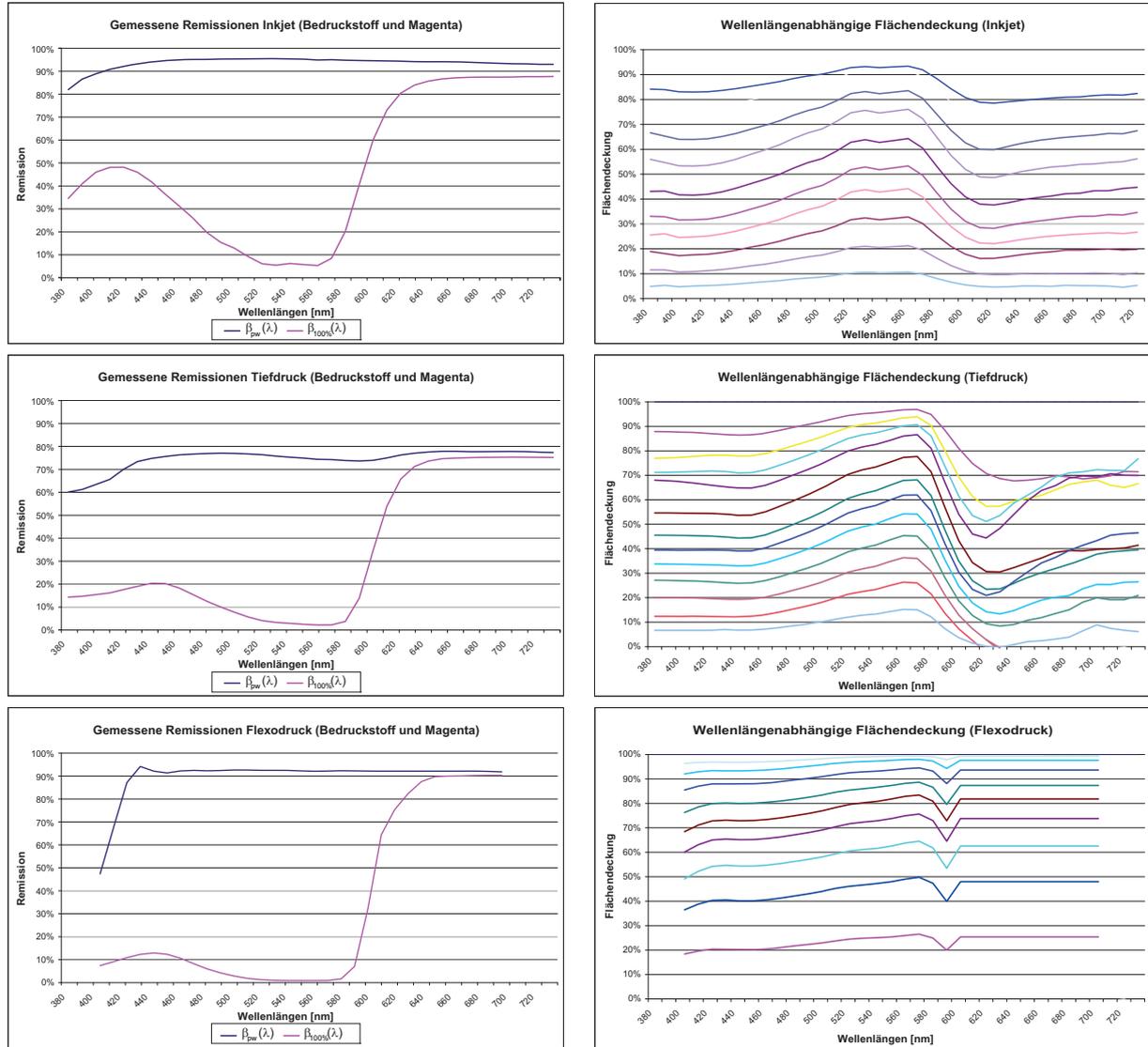


Abbildung 8.19: Remissionen des verwendeten Bedruckstoffs und einer Magentafarbe (links) sowie die individuelle, wellenlängenabhängige Flächendeckungen $A_{eff}^a(\lambda)$ bezüglich verschiedener nomineller Flächendeckungen von Magenta in den drei Druckverfahren (rechts).

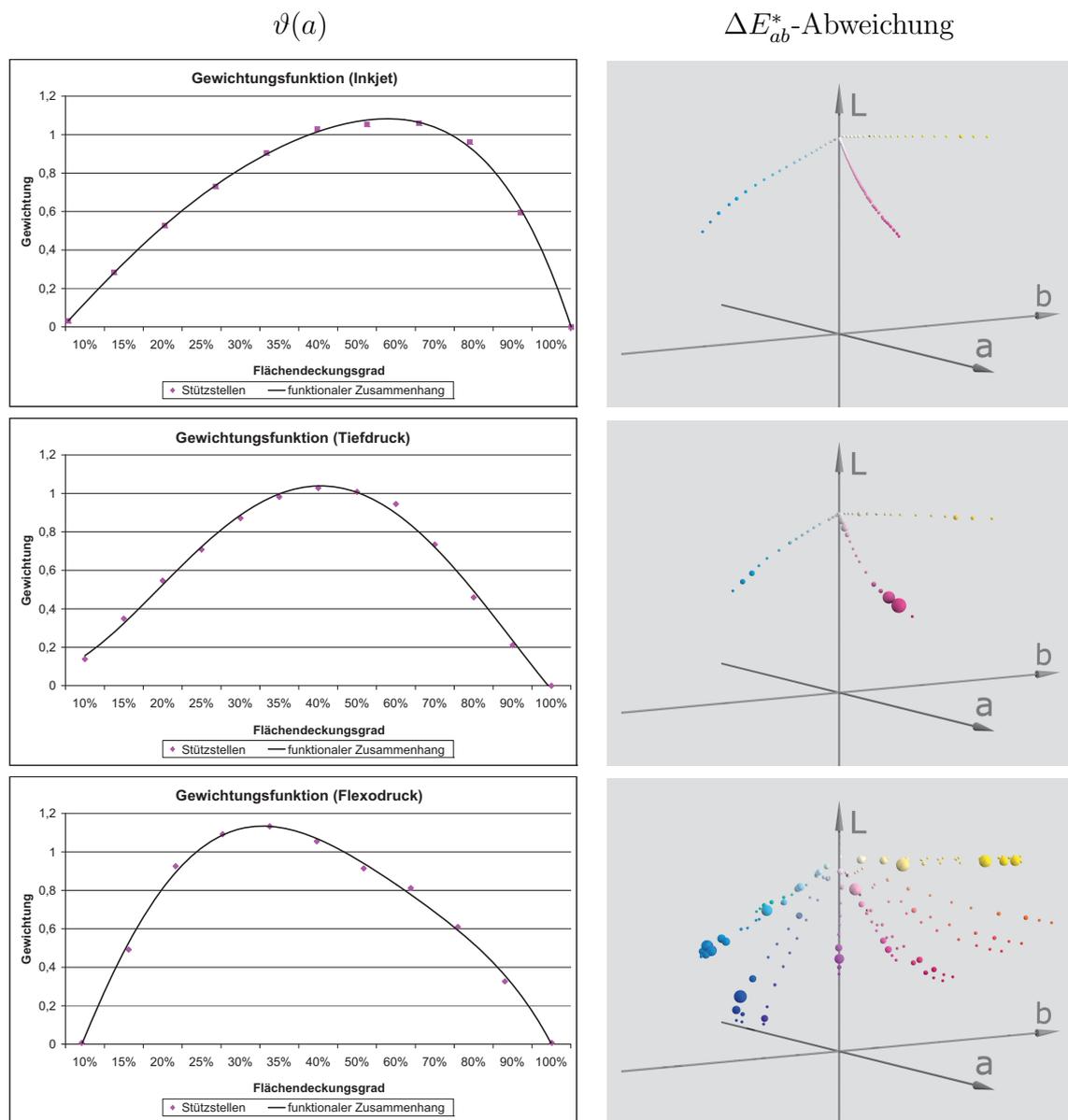


Abbildung 8.20: Stützstellen und funktionaler Zusammenhang der Gewichtungsfunktionen $\vartheta(a)$ (links) sowie dreidimensionale Darstellung der Farbabstände zwischen gemessenen und berechneten Farbvalenzen (rechts). Die kleinsten Kugeln symbolisieren Abweichungen kleiner $0,7 \Delta E_{ab}^*$, die größte Kugel beschreibt eine Abweichung von $3,5 \Delta E_{ab}^*$ -Einheiten.

Versuchsumgebungen

Inkjet

| | |
|----------------------|---|
| Drucker: | Epson Stylus Pro 7880 (PX-7550) HT |
| Bedruckstoff: | APCO II/II |
| Raster: | Frequenzmodulierte Rasterung „Error diffusion (SE1)“ |
| Farbe: | „Epson UltraChrome K3 VM“ mit Tintenbegrenzung auf 70% in allen Primärfarben wegen des verwendeten Offsetpapiers. |
| Messgerät: | „SpectroEye“ |

Flexodruck

| | |
|-----------------------|---|
| Druckmaschine: | Comco (MarkAndy) |
| Bedruckstoff: | PE-weiß (Fasson) |
| Druckplatte: | ACE-Flint 1,17 mm (linearisiert bebildert) |
| Rasterwalze: | 5,9 cm ³ /m ² , 260 l/cm, 60° |
| Unterbau: | Tesa 0,4 mm, Steel Master, hart |
| Farbe: | Flint UFG-Serie |
| Messgerät: | „SpectroDens“ |

Tiefdruck

| | |
|-----------------------|--|
| Druckmaschine: | Die ausgewerteten Druckproben stammen aus dem Probenbestand des Tiefdrucklabors der Bergischen Universität Wuppertal. Nähere Informationen sind nicht verfügbar. |
| Bedruckstoff: | wie oben |
| Druckzylinder: | wie oben |
| Farbe: | wie oben |
| Messgerät: | „SpectroEye“ |

Tabelle 8.2: Versuchsumgebung bei Inkjet, Flexodruck und Tiefdruck

Kapitel 9

Fehlerdiskussion

Zur Bestätigung der im vorangegangenen Kapitel vorgestellten Ergebnisse, und um deren Belastbarkeit zu zeigen, werden hier die unvermeidlichen Fehler betrachtet und ihr Einfluss im Rahmen einer Fehlerfortpflanzungsbetrachtung theoretisch abgeschätzt.

9.1 Reproduzierbarkeit der Messungen

9.1.1 Bestimmung der Druckpunktrandlänge

Die Druckpunktrandlänge wird auf der Druckplatte in einem aufwendigen Verfahren bildanalytisch gemessen (vgl. Kapitel 5.2, Seite 38). Die mittlere (auch durch Schwankungen bei der Druckplattenbebilderung bedingte) Abweichung innerhalb der ausgewählten Druckpunkte im ausgewählten Druckplattenbereich bezüglich der relativen Randlänge liegt bei $\Delta\vartheta(a) = 0,04$ ($\sigma = 0,015$). Dennoch lässt sich der eindeutige Zusammenhang zwischen freier Druckpunktrandlänge und empirisch bestätigtem funktionalen Zusammenhang für $\vartheta(a)$ zeigen (Abbildung 9.1).

In der Praxis kann die Gewichtungsfunktion $\vartheta(a)$ auch über die ebenfalls vorgestellte, auf der spektralen Auswertung weniger Bezugfelder basierende Weise (vgl. Kapitel 8.1, Seite 60) empirisch erfolgen, da sich das Modell bezüglich dieser Größe robust verhält.

9.1.2 Spektrale Farbmessung

Bezüglich der Messgenauigkeit bzw. Ergebnisreproduzierbarkeit bei verfügbaren Spektralfotometern (SpectroDens, SpectroEye und ImageControl) haben Untersuchungen gezeigt, dass selbst beim Vermessen einer Kalibrierungskachel, je nach Gerät und Handhabung deutliche Unterschiede festzustellen sind.

Im einzelnen wurde dabei ganz offensichtlich die Temperatur im Messsystem (inklusive Probe) als großer Einflussfaktor auf die Messergebnisse identifiziert. Bei Mehrfachmessungen

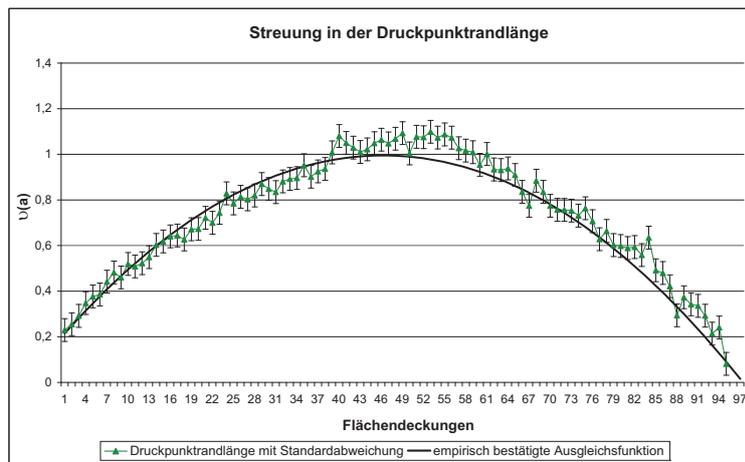


Abbildung 9.1: Die gemessenen Randlängen mit mittlerer Streuung und der empirisch bestätigte funktionale Zusammenhang für $\vartheta(a)$

eines Referenzweißstandards unter Laborbedingungen, kam es zu deutlichen Abweichungen in den Messwerten, obwohl die Messposition nicht verändert wurde. Die Positionsstabilität ist dabei zu 100% gewährleistet, da die Systeme durch Fernauslösung am angeschlossenen Computer gesteuert werden können [Zim10].

In diesem Zusammenhang ist zwischen zwei Gruppen von Geräten einer Baureihe von „SpectroDens“-Messgeräten zu unterscheiden. Bei der einen Gruppe (vier von zwölf) sinkt die gemessene, von der Kachel remittierte Strahlungsintensität über eine Reihe von Messungen im zwei Sekundentakt, während es bei den übrigen Messgeräten zu einem Anstieg kommt. Wartet man zwischen den einzelnen Messungen mindestens 10 Sekunden, tritt dieser Effekt nicht mehr in dieser Form auf (Abbildung 9.2).

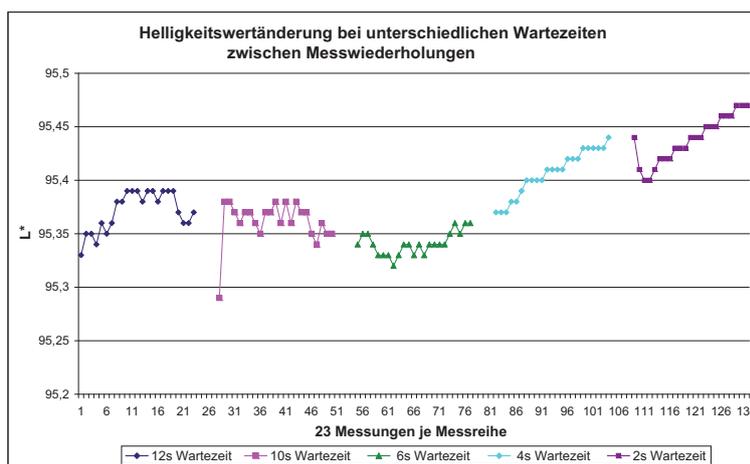


Abbildung 9.2: Gemessene Helligkeitsveränderung bei Messreihen mit verschiedenem Messtakt

Beim Spektralfotometer „SpectroEye“ fällt die erste Messung, nach der automatischen Selbstkalibrierung alle 10 Messungen, mit geringeren Intensitätswerten aus der Reihe, auch wenn die Messposition nicht verändert wird. Allerdings hat hier das Zeitintervall zwischen den Mes-

sungen keine Bewandtnis, wodurch eine schnelle Messfolge unproblematisch ist. Abbildung 9.3 zeigt die maximalen Abweichungen zum gerätespezifischen Mittelwert von 23 Messungen einer Referenzweißkachel, die mit 12 Sekunden Wartezeit zwischen den Messungen erstellt wurden.

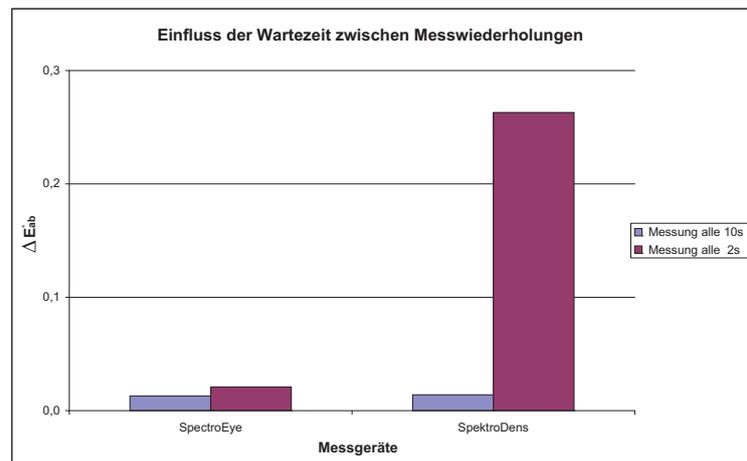


Abbildung 9.3: Einfluss des Messtakts bei verschiedenen Messgeräten [Zim10]

Bezüglich des ebenfalls untersuchten „ImageControl“, mit dem die Auswertung ganzer Test-Charts in wenigen Sekunden erfolgen kann, zeigen Wiederholungsmessungen von unbedruckten Bereichen des Bedruckstoffs (APCO II/II) ohne Manipulation der Probenposition Abweichungen von im Mittel $0,15 \Delta E_{ab}^*$ -Einheiten. Dieses Ergebnis ist durchaus mit den Ergebnissen der übrigen Messgeräte vergleichbar, wenn die Handgeräte für jede Messung an der selben Position immer wieder neu platziert werden. Mehrfachmessungen eines Referenzweißstandards sind mit diesem Gerät nicht möglich, dementsprechend wurde es bei den obigen Untersuchungen nicht berücksichtigt.

Alle in Kapitel 8 ab Seite 56 präsentierten Ergebnisse beziehen sich in diesem Zusammenhang auf Messungen mit dem „SpectroEye“, da hier der größte Wellenlängenbereich (380 nm bis 730 nm) abgedeckt und die Reproduzierbarkeit bei schneller Messfolge gegeben ist. Darüber hinaus ist durch die eingebaute Ringbeleuchtung der Einfluss der Oberflächenstruktur auf die Messergebnisse gegenüber den anderen Messgeräten maßgeblich reduziert. Um schließlich den unvermeidlichen Einfluss von zufälligen Unregelmäßigkeiten bei der Farbübertragung oder im Bedruckstoff auf die Messergebnisse zu minimieren, werden sämtliche Messfelder 15 Mal (mit Verschiebungen innerhalb des jeweiligen Felds) auf einer mattschwarzen Unterlage gemessen. Bei der Mittelwertbildung für die Auswertung, wird dabei jede 10. Messung (nach automatischer Kalibrierung) aus besagtem Grund außer Acht gelassen.

Für die Betrachtung der Fehlerfortpflanzung (vgl. Kapitel 9.3, Seite 78) wird bezüglich der gerätespezifischen Messreproduzierbarkeit bei spektraler Farbmessung demnach von einer zu vernachlässigenden mittleren Streuung ($5 \cdot 10^{-4}$) über alle Wellenlängen ausgegangen.

9.2 Prozess- und Materialschwankungen

9.2.1 Bedruckstoff

Die Proben des verwendeten Bedruckstoffs haben (über die als vernachlässigbar eingestufte Schwankungen in der geräteabhängigen Messreproduzierbarkeit hinaus) eine maximale Streuung von $0,26 \Delta E_{ab}^*$ -Einheiten. Das ist gleichbedeutend mit einer mittleren Abweichung von $0,005$ ($\sigma = 0,003$) gegenüber dem Mittelwert innerhalb der Remissionen bezüglich verschiedener Messpunkte. Bei der spektralen Auswertung der Messpunkte wurde innerhalb eines Quadratzentimeters an 15 Positionen gemessen und jeweils der Mittelwert über 15 Einzelmessungen gebildet. Insgesamt wurden nach diesem Vorgehen neun beliebig gewählte Positionen auf einem unbedruckten Bogen ausgewertet.

9.2.2 Prozess und Farbe

Der Offsetdruck bringt aufgrund seiner Komplexität Farbschwankungen mit sich, die insbesondere durch die Schichtdickenvariation, aber auch durch Passerschwankungen [Boe09] bedingt sind. Schwankungen in der Farbrezeptur (bis zu $2,4 \Delta E_{ab}^*$ -Einheiten bei Skalendruckfarben [Ros04]) sowie bei der Plattenvervielfältigung sollen hier nicht näher betrachtet werden.

Innerhalb einer Auflage können die Farbschwankungen des Drucksystems nach Auswertung eines Prüfkeils bis zu $3,5 \Delta E_{ab}^*$ -Einheiten durch Farbdrift auftreten [Wit06], was von Auflage zu Auflage oder von Druckmaschine zu Druckmaschine ebenfalls (mindestens) zu erwarten ist.

Konzentriert man sich auf die Schwankungen im Druckbogen und hier auf die durch Schichtdickenvariation und veränderte Farbannahme hervorgerufenen Schwankungen, dann kann in dieser Betrachtung von einer mittleren Streuung bei den Bezugswerten von $\Delta\beta = 0,0021$ ($\sigma = 0,0012$) bezüglich aller Wellenlängen ausgegangen werden. Hierbei werden die Schwankungen bezüglich der im Umfeld der Testfelder positionierten Volltonfelder (vgl. Abbildung 8.4, Seite 58) betrachtet, wobei die Schwankungen im Bedruckstoff und im Messgerät hier implizit enthalten bzw. durch die Messvorschrift (vgl. Kapitel 9.1.2, Seite 77) eliminiert sind.

Dies spiegelt aber nicht die Größenordnung der allgemeinen Farbschwankungen auf einem Bogen wider, die bei einer mittleren Streuung von mindestens $0,0084$ ($\sigma = 0,0087$) bezüglich aller Wellenlängen liegt, wenn beispielsweise beliebig positionierte 50% Rasterfelder einer Primärfarbe (vgl. Kapitel 8.3.6, Seite 66) betrachtet werden.

9.3 Fehlerfortpflanzung

Es soll nun gezeigt werden, wie sich die Schwankungen in den Bezugsgrößen des Modells auf die Farbabweichungen zwischen berechneten und gemessenen Farbvalenzen der jeweiligen

Flächendeckungskombinationen auswirkt.

Es lassen sich grundsätzlich drei verschiedene Fehlerarten bei der Fehlerfortpflanzung unterscheiden: Grobe Fehler, systematische Fehler und statistische Fehler. Werden darüber hinaus Modellparameter empirisch aus (fehlerbehafteten) Daten durch Ausgleichsrechnungen (Optimierung) bestimmt, so kommt es, im Gegensatz zur reinen Fehlerfortpflanzung durch vorgegebene mathematische Gleichungen mit bekannten Koeffizienten, zu einem zusätzlichen „Modellfehler“. Dieser Fehler entsteht demnach, wenn Modellparameter selbst eine Funktion fehlerbehafteter Daten sind [Gru06].

In der vorliegenden Arbeit können für den vorgestellten Ansatz grobe und systematische Fehler ausgeschlossen werden. Genauso muss auch kein Modellfehler berücksichtigt werden, da kein Parameter empirischer Natur zwingend erforderlich ist, wenn die Gewichtungsfunktion $\vartheta(a)$ auf Basis der Druckpunkttrandlängenmessung bestimmt wird. Einzig der statistische Fehler, der sich durch die vorgestellten Prozess- und Materialschwankungen in den Spektraldaten zwangsläufig niederschlägt, muss im Folgenden betrachtet werden.

Demnach müssen nach dem Gesetz der Fehlerfortpflanzung der gefundene Modellansatz zur Berechnung der zu erwartenden Remissionen

$$\widehat{\beta_{cmy}}(\lambda) = \left(\sum_{i \in \Psi} f_i(\lambda) \cdot \beta_{VT_i}(\lambda) \right) \cdot \gamma_{cmy}(\lambda) \quad \forall \lambda \in [380 \text{ nm}, \dots, 780 \text{ nm}]$$

bezüglich der Schwankungen in den Remissionen $\Delta\beta$, in der wellenlängenabhängigen Flächendeckung ΔA und im Übereinanderdruckparameter $\Delta\gamma$ betrachtet werden.

$$\Delta\beta_{cmy}(\lambda) = \Delta\beta \cdot \left| \sum_{i \in \Psi} \frac{\partial \widehat{\beta_{cmy}}(\lambda)}{\partial \beta_i(\lambda)} \right| + \Delta A \cdot \left| \sum_{i \in \{c,m,y\}} \frac{\partial \widehat{\beta_{cmy}}(\lambda)}{\partial A_i(\lambda)} \right| + \Delta\gamma \cdot \left| \sum_{i \in \Psi} \frac{\partial \widehat{\beta_{cmy}}(\lambda)}{\partial \gamma_i(\lambda)} \right|$$

Remissionsschwankungen

Bezüglich der Schwankungen $\Delta\beta = 0,0021$ in den Bezugfeldremissionen über alle Wellenlängen (vgl. Kapitel 9.2.2, Seite 78) ergibt sich nach partieller Ableitung bezüglich aller $\beta_i(\lambda)$ bei anschließender Aufsummierung folgender Zusammenhang:

$$\Delta\beta \cdot \left| \sum_{i \in \Psi} \frac{\partial \widehat{\beta_{cmy}}(\lambda)}{\partial \beta_i(\lambda)} \right| = \Delta\beta \cdot \left| \left(\sum_{i \in \Psi} f_i(\lambda) \right) \cdot \gamma_{cmy}(\lambda) \right|. \quad (9.1)$$

Fehler innerhalb der wellenlängenabhängigen Flächendeckung

Bei der Fehlerbetrachtung bezüglich der wellenlängenabhängigen Flächendeckungskombinationen $f_i(\lambda)$ wird zunächst die theoretische Fehlerfortpflanzung innerhalb der farbspezifischen wellenlängenabhängigen Flächendeckung bestimmt und wieder von einem mittleren Fehler für alle Remissionsmessungen über alle Wellenlängen und Bezugfelder ausgegangen. Für

$\vartheta(a)$, auf Basis der Druckpunkttrandlängenmessung bestimmt, wird ebenfalls ein mittlerer Fehler $\Delta\vartheta = 0,04$ über alle Flächendeckungen (vgl. Kapitel 9.1.1, Seite 75) angenommen. Damit können die zu erwartenden Schwankungen $\Delta A_a(\lambda)$ bei allen Flächendeckungen durch Summierung der partiellen Ableitungen von $A_a(\lambda)$ nach $\vartheta(a)$ und $\beta(\lambda)$ bestimmt werden:

$$\Delta A_a(\lambda) = \Delta\vartheta \cdot \left| \frac{\partial [(A_{eff}^{50\%}(\lambda) - 0.5) \cdot \vartheta(a) + a]}{\partial \vartheta(a)} \right| + \Delta\beta \cdot \left| \sum_{i \in \{PW, VT, 50\% \}} \frac{\partial [(A_{eff}^{50\%}(\lambda) - 0.5) \cdot \vartheta(a) + a]}{\partial \beta_i(\lambda)} \right|.$$

Daraus ergibt sich folgende Abschätzung die hinreichend ist, da hier keine empirischen Parameter enthalten sind:

$$\begin{aligned} \Delta A_a(\lambda) &= \Delta\vartheta \cdot \left| \partial \left[\left(\frac{\beta_{PW}(\lambda) - \beta_{50\%}(\lambda)}{\beta_{PW}(\lambda) - \beta_{VT}(\lambda)} - 0.5 \right) \cdot \vartheta(a) + a \right] / \partial \vartheta(a) \right| \\ &\quad + \Delta\beta \cdot \left| \sum_{i \in \{PW, VT, 50\% \}} \partial \left[\left(\frac{\beta_{PW}(\lambda) - \beta_{50\%}(\lambda)}{\beta_{PW}(\lambda) - \beta_{VT}(\lambda)} - 0.5 \right) \cdot \vartheta(a) + a \right] / \partial \beta_i(\lambda) \right| \\ &= \Delta\vartheta \cdot \left| \frac{\beta_{PW}(\lambda) - \beta_{50\%}(\lambda)}{\beta_{PW}(\lambda) - \beta_{VT}(\lambda)} - 0.5 \right| + \Delta\beta \cdot \left| \frac{\beta_{50\%}(\lambda) - \beta_{VT}(\lambda)}{(\beta_{PW}(\lambda) - \beta_{VT}(\lambda))^2} \cdot \vartheta(a) \right| \\ &\quad + \Delta\beta \cdot \left| \frac{\beta_{50\%}(\lambda) - \beta_{PW}(\lambda)}{(\beta_{PW}(\lambda) - \beta_{VT}(\lambda))^2} \cdot \vartheta(a) \right| + \Delta\beta \cdot \left| \frac{-1}{\beta_{PW}(\lambda) - \beta_{VT}(\lambda)} \cdot \vartheta(a) \right|. \end{aligned}$$

Für die weitere Fehlerbetrachtung wird dieser zu erwartende Fehler bei der wellenlängenabhängigen Flächendeckung $\Delta A_a(\lambda)$ über alle Wellenlängen und Flächendeckungen zu einem Wert ΔA gemittelt. Das Mitteln über alle Flächendeckungen bedeutet in diesem Zusammenhang, dass $\vartheta(a) := 0,5$ gesetzt wird, da sonst keine flächendeckungsabhängigen Parameter integriert sind.

Für die partielle Ableitung des Modellansatzes nach den primärfarbspezifischen wellenlängenabhängigen Flächendeckungen $A^j(\lambda)$, um deren Einfluss auf die Flächendeckungskombinationen $f_i(\lambda)$ abzuschätzen, ergibt sich demnach:

$$\Delta A \cdot \left| \sum_{j \in \{c, m, y\}} \frac{\partial \widehat{\beta_{cm_y}}(\lambda)}{\partial A^j(\lambda)} \right| = \Delta A \cdot \left| \sum_{j \in \{c, m, y\}} \left(\sum_{i \in \Psi} \frac{\partial f_i(\lambda)}{\partial A^j(\lambda)} \cdot \beta_i(\lambda) \right) \cdot \gamma_{cm_y}(\lambda) \right|$$

Bezüglich der wellenlängenabhängigen Flächendeckung $A_c(\lambda)$ für Cyan sind im Folgenden sämtliche Ableitungen dargestellt. Diese lassen sich in dieser Form auch für Magenta und Gelb fortführen. Für Gelb sind daher nach dem „+...“ nur die letzten drei Ableitungen

aufgeführt:

$$\begin{aligned}
\Delta A \cdot \left| \sum_{j \in \{c, m, y\}} \frac{\partial \widehat{\beta_{cmy}}(\lambda)}{\partial A^j(\lambda)} \right| &= \Delta A \cdot \left| \left([(1 - A_a^m(\lambda)) \cdot (1 - A_a^y(\lambda)) \cdot \beta_c(\lambda)] + [(-1) \cdot A_a^m(\lambda) \cdot (1 - A_a^y(\lambda)) \cdot \beta_m(\lambda)] \right. \right. \\
&\quad + [(-1) \cdot (1 - A_a^m(\lambda)) \cdot A_a^y(\lambda) \cdot \beta_y(\lambda)] + [A_a^m(\lambda) \cdot (1 - A_a^y(\lambda)) \cdot \beta_b(\lambda)] \\
&\quad + [(-1) \cdot A_a^m(\lambda) \cdot A_a^y(\lambda) \cdot \beta_r(\lambda)] + [A_a^m(\lambda) \cdot (1 - A_a^y(\lambda)) \cdot \beta_g(\lambda)] \\
&\quad + [A_a^m(\lambda) \cdot A_a^y(\lambda) \cdot \beta_{DFS}(\lambda)] + [(-1) \cdot (1 - A_a^m(\lambda)) \cdot (1 - A_a^y(\lambda)) \cdot \beta_{PW}(\lambda)] \\
&\quad + \dots \\
&\quad + [A_a^c(\lambda) \cdot (1 - A_a^m(\lambda)) \cdot \beta_g(\lambda)] + [A_a^c(\lambda) \cdot A_a^m(\lambda) \cdot \beta_{DFS}(\lambda)] \\
&\quad \left. \left. + (-1) \cdot (1 - A_a^c(\lambda)) \cdot (1 - A_a^m(\lambda)) \cdot \beta_{PW}(\lambda) \right) \cdot \gamma_{cmy}(\lambda) \right|
\end{aligned}$$

Dabei werden abhängig von der jeweiligen Flächendeckungskombination in der gerade aufgestellten Gleichung nur die Terme berücksichtigt, die sich auf die entsprechenden Primärfarben beziehen.

So werden beispielsweise bei einer Flächendeckungskombination „C60 M0 Y0“ alle Terme innerhalb der großen runden Klammer bis auf die vor dem „+...“ gleich Null gesetzt. Darüber hinaus wird dieser Fehlerterm mit dem Anteil gewichtet, den er am Gesamtergebnis hat: In Anlehnung an DEMICHEL (vgl. Kapitel 4.1.2, Seite 22) wird jeder Fehlerterm nur mit dem Anteil berücksichtigt, wie er laut Flächendeckungskombination Teil der Gesamtfläche und damit relevant für die zu erwartende Remission ist.

Fehler im Übereinanderdruckparameter

Der theoretische Fehler innerhalb des wellenlängenabhängigen Übereinanderdruckparameters $\gamma_{cmy}(\lambda)$ hängt von den Remissionsmessungen der jeweiligen Bezugfelder ab und gleicht damit die zu erwartenden Schwankungen bei der Remissionsberechnung ohne diesen Parameter aus. Daher wird er wie die Remissionsmessungen selbst auch mit einer Schwankung $\Delta\beta$ abgeschätzt:

$$\Delta\gamma \cdot \left| \sum_{i \in \Psi} \frac{\partial \widehat{\beta_{cmy}}(\lambda)}{\partial \gamma_i(\lambda)} \right| = \Delta\beta \cdot \left| \left(\sum_{i \in \Psi} f_i(\lambda) \cdot \beta_{VT_i}(\lambda) \right) \right|$$

Resultierende Gesamtfehlerbetrachtung

Mittelung aller in Gleichung (9.1) aufgeführten und gerade bestimmten Summanden über alle betrachteten Flächendeckungskombinationen und Wellenlängen liefert die skalare Größe $\Delta\beta_{cmy}$ als mittlere, zu erwartende Schwankung in den Remissionswerten für die Gesamtfehlerbetrachtung.

Dafür werden zunächst die dazugehörigen Schwankungen ΔX , ΔY und ΔZ im Normvalenzsystem bestimmt. Wobei sich die Fehlerfortpflanzung innerhalb dieser Normvalenzberechnung über die Summe der partiellen Ableitungen der Rechenvorschriften (3.2) mit (3.1) (vgl. Kapitel 3.3, Seite 17 & Kapitel 3.1, Seite 9) nach $\beta(\lambda) \quad \forall \quad \lambda \in [380 \text{ nm}, \dots, 780 \text{ nm}]$ berechnet:

$$\begin{aligned}\Delta X &= \Delta\beta_{cmy} \cdot \left| \frac{\partial X}{\partial \beta(\lambda)} \right| = \Delta\beta_{cmy} \cdot \left| k \cdot \sum_{\lambda} S(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) \cdot \Delta\lambda \right| \\ \Delta Y &= \Delta\beta_{cmy} \cdot \left| \frac{\partial Y}{\partial \beta(\lambda)} \right| = \Delta\beta_{cmy} \cdot \left| k \cdot \sum_{\lambda} S(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) \cdot \Delta\lambda \right| \\ \Delta Z &= \Delta\beta_{cmy} \cdot \left| \frac{\partial Z}{\partial \beta(\lambda)} \right| = \Delta\beta_{cmy} \cdot \left| k \cdot \sum_{\lambda} S(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) \cdot \Delta\lambda \right|\end{aligned}$$

Bei der abschließenden Betrachtung der Fehlerfortpflanzung innerhalb der Umrechnung von Normvalenzen in Farbvalenzen gelten, ausgehend von den Rechenvorschriften (3.3) (vgl. Kapitel 3.3, Seite 19), folgende Zusammenhänge:

$$\begin{aligned}\Delta L^* &= \Delta Y \cdot \left| \frac{\partial L^*}{\partial Y} \right| = \Delta Y \cdot \left| \frac{116}{3} \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{Y_n \cdot Y^2}} \right| \\ \Delta a^* &= \Delta X \cdot \left| \frac{\partial a^*}{\partial X} \right| + \Delta Y \cdot \left| \frac{\partial a^*}{\partial Y} \right| \\ &= \Delta X \cdot \left| \frac{500}{3} \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{X_n \cdot X^2}} \right| + \Delta Y \cdot \left| -\frac{500}{3} \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{Y_n \cdot Y^2}} \right| \\ \Delta b^* &= \Delta Y \cdot \left| \frac{\partial b^*}{\partial Y} \right| + \Delta Z \cdot \left| \frac{\partial b^*}{\partial Z} \right| \\ &= \Delta Y \cdot \left| \frac{200}{3} \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{Y_n \cdot Y^2}} \right| + \Delta Z \cdot \left| -\frac{200}{3} \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{Z_n \cdot Z^2}} \right|\end{aligned}$$

Aus den so berechneten Farbvalenzschwankungen ΔL^* , Δa^* und Δb^* berechnet sich nach der Formel (12.1.1) (vgl. Kapitel 12.1, Seite 88) der zu erwartende Farbabstand ΔE_{ab}^* zwischen gemessenen und über das vorgestellte Farbvorhersagemodell berechneten Farbvalenzen. Zur ersten Abschätzung zeigt die folgende Tabelle neben den Normvalenzschwankungen auch den zu erwartenden, mittleren Farbabstand $\varnothing \Delta E_{ab}^*$ sowie dessen Standardabweichung $\sigma(\Delta E_{ab}^*)$:

| Parameterschwankung | $\Delta\beta_{cmy}$ | ΔX | ΔY | ΔZ | $\varnothing \Delta E_{ab}^*$ | $\sigma(\Delta E_{ab}^*)$ |
|---|---------------------|------------|------------|------------|-------------------------------|---------------------------|
| $\Delta\vartheta(a) = 0,040$ & $\Delta\beta = 0,0021$ | 0,0048 | 0,460 | 0,477 | 0,393 | 4,8 | 2,6 |
| $\Delta\vartheta(a) = 0,055$ & $\Delta\beta = 0,0033$ | 0,0076 | 0,737 | 0,765 | 0,631 | 7,7 | 4,1 |

Tabelle 9.1: Auswirkungen der mittleren Schwankungen in den Bezugsgrößen (ohne bzw. mit Berücksichtigung der Standardabweichung) auf das Ergebnis

Über diese Mittelwertdarstellung hinaus zeigt diese Fehlerabschätzung, dass je höher die einzelnen Flächendeckungen in der jeweiligen Flächendeckungskombination sind, desto größer ist der zu erwartende Fehler. Kapitel 8.3.7 (Seite 69) bestätigt dies durch anwachsende ΔE_{ab}^* -Abweichungen bei steigenden Flächendeckungen und nicht verfügbaren Sekundär- und Tertiärfarbremissionen. Dies wird aber im eigentlichen Modellansatz durch die Einbindung dieser Volltonremissionen kompensiert, womit durch diese Fehlerdiskussion der zu erwartende Fehler überschätzt wird, aber die Einordnung der Ergebnisse dennoch möglich ist.

Wenn die Gewichtungsfunktion $\vartheta(a)$ anhand weniger spektraler Messungen über einen funktionalen Zusammenhang empirisch bestimmt wird, muss ein Modellfehler separat betrachtet werden. $\vartheta(a)$ ist in diesem Zusammenhang ein empirischer Modellparameter, der selbst eine Funktion fehlerbehafteter Daten ist. Das geringe Ausmaß dieses Modellfehlers zeigt sich in den präsentierten Ergebnissen, die ausschließlich auf dieser praxisrelevanten Vorgehensweise (den funktionalen Zusammenhang für $\vartheta(a)$ empirisch zu bestimmen) beruhen und dennoch deutlich unter dem hier abgeschätzten Fehler liegen. Vor diesem Hintergrund wird darauf verzichtet diesen zusätzlichen Modellfehler explizit zu bestimmen.

Kapitel 10

Zusammenfassung

Auf die Vorstellung relevanter farbmeterischer Grundlagen folgt eine kurze Einführung in die Zusammenhänge der Farbwahrnehmung. Eine wissenschaftliche Betrachtung der Farbempfindung sowie der messtechnischen Erfassung von Farbe wird präsentiert, bevor existierende Rasterton-Vorhersagemodelle vorgestellt werden.

Dadurch dass viele der heutigen Farbvorhersagemodelle wahrnehmungsrelevante optische Einflussgrößen über eine Vielzahl von oft empirischen Parametern einbinden, deren Abschätzung mit hohem Erhebungsaufwand verbunden ist, bestand in diesem Zusammenhang Entwicklungspotential. Der wellenlängenabhängige Flächendeckungsansatz kommt ohne empirische Parameter aus und bezieht dabei sämtliche für die Farbvorhersage relevanten Informationen aus einer spektralen Auswertung von 50% Rastertonfeldern bzw. den Primärfarbrasterfeldern mit möglichst großer Randlänge der druckenden Elemente.

Ausgehend von einem idealisierten kreisrunden Druckpunkt mit einem ebenfalls idealisierten helleren Rand erfolgt die Konsolidierung des Modells, das die tatsächliche Erscheinung von Druckpunkten auf dem Bedruckstoff berücksichtigt. Die Erweiterung zeigt, wie sämtliche Informationen bezüglich der individuellen Dichte von einer Vielzahl an Teilbereichen eines Druckpunkts statt durch Mikrodensitometrie durch spektrale Auswertung erfasst werden.

Umfangreiche Untersuchungen und Versuchsreihen haben gezeigt, wie akkurat die verschiedenen Prozessparameter bei der vorgestellten Farbvorhersage berücksichtigt werden. So wird klar, dass es nicht reicht die Remission des Bedruckstoffs im Datensatz der Modellkalibrierung zu tauschen, wenn man am reproduzierbaren Farbraum einer anderen Bedruckstoff-Farbenkombination interessiert ist. Um die tatsächlichen Gegebenheiten der Streu- und Farbspaltungseigenschaften bezüglich des neuen Bedruckstoff-Farb-Systems zu berücksichtigen, reichen aber wenige gedruckte und spektral ausgewertete Bezugfelder für eine neue Modellkalibrierung.

Wie dargelegt genügen 24 identifizierte Flächendeckungskombinationen, um die Remissionen sämtlicher CMY-Flächendeckungskombinationen voraus berechnen zu können. Der dabei zu erwartende Farbabstand ΔE_{2000}^* ist bei 89% aller betrachteter Testfelder kleiner als die laut CIE-Definition überhaupt wahrnehmbare Farbabweichung von einer ΔE -Einheit.

Dabei wurde sowohl die Reproduzierbarkeit von spektralen Farbmessungen berücksichtigt, als auch gezeigt wie das Modell bezüglich des Inkjet-, Flexodruck- und Tiefdruckverfahrens arbeitet. Es wird gezeigt und erklärt, welche Einflüsse auf die Farbreproduktion (und damit auf die Modellparameter) beispielsweise verschiedene Rasterfeinheiten oder -punktformen haben, wie sich verschieden stark pigmentierte Druckfarben auswirken, oder wie man den im Bogenoffset unvermeidlichen Farbabfall in Druckrichtung berücksichtigen kann.

Letztendlich liegt die Vorhersagegenauigkeit des Modells im Bereich der Reproduktionsgenauigkeit der Druckverfahren (vgl. Kapitel 8.1, Seite 56 & Kapitel 9.2.2, Seite 78) und könnte somit anhand weniger Bezugsfelder für die Maschinenkalibrierung verwendet werden. Dabei können die wenigen Bezugsfelder neben den Nutzen platziert und während der laufenden Produktion auch zur Prozessregelung verwendet werden. Demnach könnte sogar der separate Druckjob mit Test-Charts zur Maschinenkalibrierung eingespart werden.

Kapitel 11

Ausblick

Allgemein bekannt ist, dass optische Aufheller (Fluoreszenzen) im Bedruckstoff einen großen Einfluss auf die Farbwahrnehmung von im Rasterdruckverfahren bedruckten Oberflächen haben. Wie schon in Kapitel 8.3.2 auf Seite 63 angedeutet liefert das beschriebene Modell auch bei aufgehellten Papieren gute Ergebnisse, verfügt aber bezüglich der Aufhellerimplementierung nur über einen rein empirischen Ansatz.

Bei der Berechnung der zu erwartenden, resultierenden Remission $\widehat{\beta}_a(\lambda)$ von einfarbig aufgebauten Rastertönen auf optisch aufgehellten Bedruckstoffen bedarf es dabei der mit UVcut-Filter gemessenen Bedruckstoff- und Volltonremission der jeweiligen Primärfarbe $\beta_{PW}^{UVcut}(\lambda)$ beziehungsweise $\beta_{VT}^{UVcut}(\lambda)$. Durch den UVcut-Filter wird der UV-Anteil des beleuchtenden Lichts herausgefiltert und somit die Wirkung der optischen Aufheller weitgehend ausgeschaltet. Die nach dem vorgestellten Ansatz daraus berechnete Remission $\widehat{\beta}_a^{UVcut}(\lambda)$ bezüglich einer nominellen Flächendeckung a wird mittels eines zusätzlichen Aufhellerfaktors $B(\lambda)$ angepasst, sodass die Wirkung der Aufheller wieder berücksichtigt wird.

$$\begin{aligned}\widehat{\beta}_a(\lambda) &= B(\lambda) \cdot \widehat{\beta}_a^{UVcut}(\lambda) \\ &= B(\lambda) \cdot \left(A_a(\lambda) \cdot \beta_{VT}^{UVcut}(\lambda) + (1 - A_a(\lambda)) \cdot \beta_{PW}^{UVcut}(\lambda) \right)\end{aligned}$$

$$\text{mit } B(\lambda) = 1 + (\beta_{PW}(\lambda) - \beta_{PW}^{UVcut}(\lambda)) \quad \forall \lambda \in [380 \text{ nm}, \dots, 780 \text{ nm}]$$

wobei $\beta_{pw}(\lambda)$ eine Messung vom Bedruckstoff ohne UVcut-Filter ist, um damit die Wirkung der Aufheller in den Ansatz einfließen zu lassen. Der gefundene Zusammenhang führt bezüglich der Primärfarbe Magenta zu guten Ergebnissen (Abbildung 11.1).

Bei anderen Primärfarben ergeben sich bei gleicher Herangehensweise durch ihre individuellen Absorptionseigenschaften größere Abweichungen. Damit ist eine Berechnung von zu erwartenden, resultierenden Remission $\widehat{\beta}_{cmy}(\lambda)$ von mehrfarbig aufgebauten Rasterfeldern ohne weitere Anpassungen nicht sinnvoll. Dennoch bietet dieser Ansatz die Grundlage weiterführende, wissenschaftlich fundierte Transferüberlegungen anzustellen.

Zur Modellierung des beleuchtungsabhängigen Zusammenwirkens der optischen Aufheller

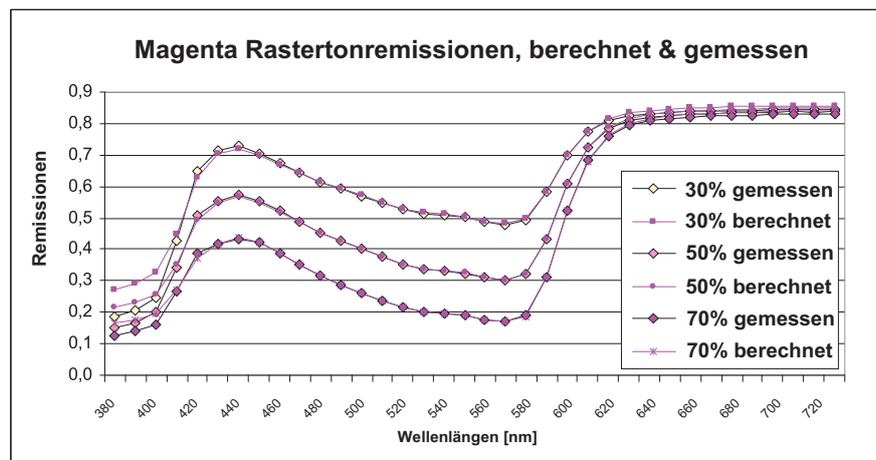


Abbildung 11.1: Vorhersage der Aufhellerwirkung bei 30%, 50% und 70% Magenta Rastertönen [Dat09].

im Bedruckstoff mit den Farben des Druckmotivs muss das charakteristische Absorptionsverhalten von optischen Aufhellern und Druckfarben sowie ihre Wechselwirkung untersucht werden. Da die Aufhellerwirkung nicht nur durch die Farben des Druckmotivs im sichtbaren Wellenlängenbereich beeinflusst wird, sondern darüber hinaus das individuelle Absorptionsverhalten der Farben im UV Bereich die Aufhelleranregung abschwächt, muss insbesondere der unsichtbare UV-Bereich in die Untersuchungen mit einbezogen werden.

Abbildung 11.2 zeigt, wie sich unterschiedliches Absorptionsverhalten im Anregungsbereich der optischen Aufheller (280 nm - 420 nm) im Wellenlängenbereich der Aufhelleremission (420 nm - 480 nm) auswirkt. Obwohl Gelb und Schwarz in Bereich um 450 nm nahezu identisch absorbieren, wenn man sie auf APCO II/II gedruckt betrachtet, stellt man in diesem Bereich, bei identischem Farbauftrag auf ein aufgehelltes Papier, deutliche Unterschiede fest.

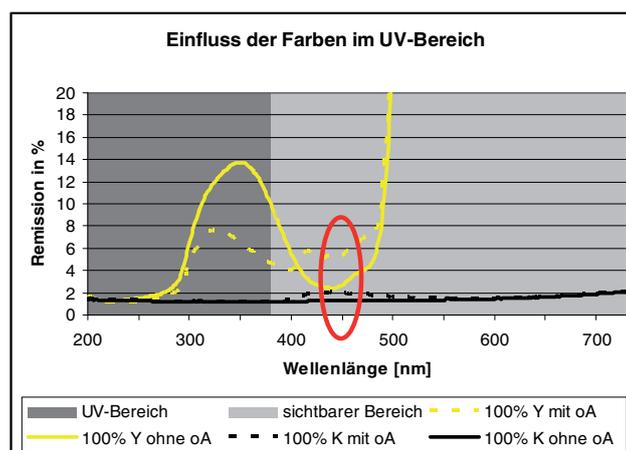


Abbildung 11.2: Gegenüberstellung von Remissionswerten gelber und schwarzer Volltöne auf Papier mit bzw. ohne optischem Aufheller mit Markierung im relevanten Wellenlängenbereich [Brü09].

Kapitel 12

Anhang

12.1 CIE

12.1.1 ΔE_{ab}^* -Formel

Hat man nach den Gleichungen (3.3) die Farbvalenzen L^* , a^* und b^* berechnet, bestimmt sich der Farbabstand zweier Farborte zur empfindungsgemäßen Farbcharakterisierung über die Farbvalenzmetrik ΔE_{ab}^* über den euklidischen Abstand im CIE $-L^*a^*b^*$ -Farbraum:

$$\begin{aligned}\Delta E_{ab}^* &= \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \\ &= \sqrt{(L_1^* - L_2^*)^2 + (a_1^* - a_2^*)^2 + (b_1^* - b_2^*)^2}\end{aligned}$$

12.1.2 ΔE_{2000}^* -Formel

Für die weiter entwickelte ΔE_{2000}^* -Formel sind darüber hinaus weitere Berechnungen anzustellen (ausführlich dargestellt in [Luo01]), bevor über die nun folgende Farbvalenzmetrik eine Farbcharakterisierung stattfinden kann [CIE01] [Luo01]:

$$\Delta E_{2000}^* = \sqrt{\left(\frac{\Delta L^*}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C^*}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H^*}{k_H S_H}\right)^2 + R_T f(\Delta C^* \Delta H^*)}$$

12.2 Kleinste Fehlerquadratsumme

Der Optimierungsansatz der kleinsten Fehlerquadratsumme wird in der vorliegenden Arbeit unter zwei Aspekten eingesetzt. Zum einen ermöglicht er bezüglich der gegebenen Berechnungsvorschrift von $\vartheta(a)$ über alle Wellenlängen und für beliebige Flächendeckung den optimalen Wert durch Minimierung der Spektralwert-Metrik ΔE_s für die Gewichtungsfunktion zu finden. Zum anderen ermöglicht er die Parameterbestimmung bei der Generierung des

funktionalen Zusammenhangs für die Berechnung der $\vartheta(a)$ zwischen den Stützstellen. Nach Festlegung des Funktionentyps (siehe Kapitel 8.3.4) können sämtliche Parameter für die bestmögliche Näherung (Ausgleichsfunktion) über alle Flächendeckungen bestimmt werden.

Im ersten Fall gibt es durch die Berechnungsvorschrift keinen Spielraum, hier ist durch die Spektralwert-Metrik auch die Fehlerquadratsumme schon definiert. Für die Optimierung leitet man diese nach der gesuchten Größe ab, setzt die gefundene Formel gleich Null und löst den differentiellen Zusammenhang.

Bei der Bestimmung von Parametern in einer Ausgleichsfunktion muss demgegenüber zunächst den Typ der besagten Ausgleichsfunktion definiert werden. Die dazugehörigen Basisfunktionen $f_0(a)$, $f_1(a)$, ..., $f_n(a)$ werden mit den Parametern x_0 , x_1 , ..., x_n versehen und bilden die Funktion

$$y(a, x_0, x_1, \dots, x_n) = x_0 \cdot f_0(a) + x_1 \cdot f_1(a) + \dots + x_n \cdot f_n(a)$$

die daraus abgeleitete Fehlerquadratsumme über alle Flächendeckungen lautet:

$$FQS(x_0, x_1, \dots, x_n) = \sum_a [x_0 \cdot f_0(a) + x_1 \cdot f_1(a) + \dots + x_n \cdot f_n(a) - y(a, x_0, x_1, \dots, x_n)]^2 .$$

Deren partielle Ableitungen nach den jeweiligen Parametern x_0 , x_1 bis x_n (bzw. die Ableitung nach der gesuchten Größe im ersten Fall) schreiben sich folgendermaßen:

$$\begin{aligned} \frac{\partial FQS(x_0, x_1, \dots, x_n)}{\partial x_0} &= \sum_a 2 \cdot [x_0 \cdot f_0(a) + x_1 \cdot f_1(a) + \dots + x_n \cdot f_n(a) - y(a)] \cdot f_0(a) \\ \frac{\partial FQS(x_0, x_1, \dots, x_n)}{\partial x_1} &= \sum_a 2 \cdot [x_0 \cdot f_0(a) + x_1 \cdot f_1(a) + \dots + x_n \cdot f_n(a) - y(a)] \cdot f_1(a) \\ &\dots = \dots \\ \frac{\partial FQS(x_0, x_1, \dots, x_n)}{\partial x_n} &= \sum_a 2 \cdot [x_0 \cdot f_0(a) + x_1 \cdot f_1(a) + \dots + x_n \cdot f_n(a) - y(a)] \cdot f_n(a) . \end{aligned}$$

Setzt man alle partiellen Ableitungen gleich Null und bringt den Term mit $y(a)$ auf die linke Seite erhält man:

$$\begin{aligned} \sum_a y(a) \cdot f_0(a) &= x_0 \cdot \sum_a f_0(a) \cdot f_0(a) + x_1 \cdot \sum_a f_1(a) \cdot f_0(a) + \dots + x_n \cdot \sum_a f_n(a) \cdot f_0(a) \\ \sum_a y(a) \cdot f_1(a) &= x_0 \cdot \sum_a f_0(a) \cdot f_1(a) + x_1 \cdot \sum_a f_1(a) \cdot f_1(a) + \dots + x_n \cdot \sum_a f_n(a) \cdot f_1(a) \\ &\dots = \dots \\ \sum_a y(a) \cdot f_n(a) &= x_0 \cdot \sum_a f_0(a) \cdot f_n(a) + x_1 \cdot \sum_a f_1(a) \cdot f_n(a) + \dots + x_n \cdot \sum_a f_n(a) \cdot f_n(a) \end{aligned}$$

in Matrixschreibweise überführt ergibt sich folgendes Ergebnis:

$$\begin{bmatrix} \sum_a f_0(a) \cdot f_0(a) & \sum_a f_0(a) \cdot f_1(a) & \dots & \sum_a f_0(a) \cdot f_n(a) \\ \sum_a f_1(a) \cdot f_0(a) & \sum_a f_1(a) \cdot f_1(a) & \dots & \sum_a f_1(a) \cdot f_n(a) \\ & & \dots & \\ \sum_a f_n(a) \cdot f_0(a) & \sum_a f_n(a) \cdot f_1(a) & \dots & \sum_a f_n(a) \cdot f_n(a) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_0 \\ x_1 \\ \dots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_a y(a) \cdot f_0(a) \\ \sum_a y(a) \cdot f_1(a) \\ \dots \\ \sum_a y(a) \cdot f_n(a) \end{bmatrix}$$

Die Lösung dieses Gleichungssystems liefert die gesuchten Parameter x_0, x_1 bis x_n mit denen die Ausgleichfunktion $y(a, x_0, x_1, \dots, x_n) = x_0 \cdot f_0(a) + x_1 \cdot f_1(a) + \dots + x_n \cdot f_n(a)$ beispielsweise für die Berechnung von $\vartheta(a)$ bezüglich aller übrigen nominellen Flächendeckungen mit geringstmöglichen Fehlern gefunden ist.

12.3 Verwendete Software

12.3.1 Tabellenkalkulation

Microsoft Excel ist das am weitesten verbreitete Tabellenkalkulationsprogramm in das sehr komfortabel die Messergebnisse von Spektalfotometern eingelesen werden können. Darüber hinaus kann Excel mittels Visual Basic for Applications (VBA) programmiert werden, womit sich die direkte Weiterverarbeitung der Messdaten anbietet. Mittels VBA ist deshalb der gesamte Algorithmus inklusive Ergebnisvisualisierung umgesetzt.

12.3.2 Bildbearbeitung

Die „Adobe Creative Suite“ ist eine Sammlung von Design-, Grafik- und Produktionsprogrammen des Unternehmens Adobe Systems. Darin enthalten sind beispielsweise „Adobe Illustrator“ (ein Vektorgrafikprogramm), „Adobe Photoshop“ (klassische pixelbasierte Bildbearbeitung) oder auch „Adobe InDesign“ für Desktop Publishing. Mittels Photoshop wurde die Anpassung der Mikroskopaufnahme der bebilderten Druckplatte vorgenommen (Kapitel 5.2), während InDesign für die Bearbeitung sämtlicher Abbildungen in dieser Arbeit verwendet wurde.

12.3.3 Bildauswertung und -analyse

Media Cybernetics ist ein Unternehmen aus Maryland, USA, das Bildverarbeitungssoftware für industrielle, wissenschaftliche, medizinische und biotechnologische Anwendungen entwickelt. Die Bildauswertungs- und -analysesoftware „ImageProPlus“ ermöglicht insbesondere das Zählen, Messen und Sortieren beliebiger Bildelemente. In diesem Fall sind es die Mikroskopaufnahmen druckender Bereiche einer Offsetdruckplatte, deren Umfang automatisch bestimmt werden. Relevant ist dies, da der auf Offsetdruckplatten gemessene Punktumfang deutlich von dem bezüglich der dazugehörigen Bebilderungsdatei bestimmten abweicht und

zudem streut.

12.4 Farbabweichungstabellen

| C | M | Y | ΔE_s | L^* | a^* | b^* | \widehat{L}^* | \widehat{a}^* | \widehat{b}^* | ΔE_{ab}^* | ΔE_{2000}^* |
|---|----|-----|--------------|-------|-------|-------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------|---------------------|
| 0 | 1 | 0 | 0,00128 | 95,6 | 0,4 | 0,1 | 95,9 | 0,0 | 0,4 | 0,6 | 0,7 |
| 0 | 2 | 0 | 0,00115 | 95,1 | 0,9 | 0,0 | 95,5 | 0,5 | 0,3 | 0,6 | 0,6 |
| 0 | 3 | 0 | 0,00053 | 94,7 | 1,5 | -0,1 | 94,9 | 1,3 | 0,0 | 0,3 | 0,3 |
| 0 | 4 | 0 | 0,00099 | 94,3 | 2,0 | -0,2 | 94,6 | 1,8 | -0,1 | 0,4 | 0,4 |
| 0 | 5 | 0 | 0,00010 | 93,8 | 2,6 | -0,4 | 93,9 | 2,7 | -0,3 | 0,1 | 0,1 |
| 0 | 5 | 5 | 0,00259 | 93,9 | 1,8 | 3,3 | 93,3 | 2,5 | 2,3 | 2,7 | 2,8 |
| 0 | 5 | 10 | 0,00186 | 93,5 | 1,4 | 6,7 | 93,1 | 2,0 | 5,8 | 2,5 | 2,6 |
| 0 | 5 | 20 | 0,00289 | 93,1 | 0,5 | 13,3 | 92,6 | 1,1 | 12,9 | 2,1 | 1,9 |
| 0 | 5 | 30 | 0,00241 | 92,6 | -0,2 | 20,3 | 92,1 | 0,2 | 20,2 | 1,7 | 1,4 |
| 0 | 5 | 40 | 0,00160 | 92,0 | -0,9 | 27,8 | 91,6 | -0,5 | 27,8 | 1,6 | 1,0 |
| 0 | 5 | 50 | 0,00128 | 91,6 | -1,7 | 36,8 | 91,2 | -1,2 | 35,7 | 2,5 | 1,2 |
| 0 | 5 | 60 | 0,00152 | 91,1 | -2,2 | 43,6 | 90,8 | -1,8 | 44,0 | 1,3 | 0,8 |
| 0 | 5 | 80 | 0,00467 | 90,4 | -2,9 | 59,6 | 90,0 | -2,7 | 61,8 | 1,7 | 0,8 |
| 0 | 5 | 90 | 0,00376 | 90,1 | -3,5 | 70,0 | 89,6 | -3,1 | 71,6 | 1,5 | 0,8 |
| 0 | 5 | 100 | 0,00116 | 89,6 | -3,8 | 83,7 | 89,2 | -3,3 | 82,2 | 2,7 | 0,9 |
| 0 | 6 | 0 | 0,00008 | 93,3 | 3,2 | -0,5 | 93,3 | 3,3 | -0,5 | 0,1 | 0,2 |
| 0 | 7 | 0 | 0,00031 | 92,9 | 3,8 | -0,6 | 92,8 | 4,1 | -0,7 | 0,4 | 0,5 |
| 0 | 8 | 0 | 0,00014 | 92,5 | 4,3 | -0,7 | 92,5 | 4,5 | -0,9 | 0,3 | 0,3 |
| 0 | 9 | 0 | 0,00027 | 92,1 | 4,8 | -0,9 | 92,0 | 5,2 | -1,0 | 0,4 | 0,4 |
| 0 | 10 | 0 | 0,00033 | 91,6 | 5,4 | -1,0 | 91,5 | 5,9 | -1,3 | 0,5 | 0,5 |
| 0 | 10 | 5 | 0,00086 | 91,3 | 5,3 | 2,4 | 91,2 | 5,4 | 1,6 | 2,0 | 1,8 |
| 0 | 10 | 10 | 0,00075 | 91,0 | 4,9 | 5,7 | 90,9 | 4,9 | 5,0 | 1,9 | 1,8 |
| 0 | 10 | 20 | 0,00015 | 90,5 | 4,1 | 12,1 | 90,5 | 4,0 | 12,0 | 1,3 | 1,1 |
| 0 | 10 | 30 | 0,00028 | 90,1 | 3,3 | 19,0 | 90,0 | 3,1 | 19,2 | 1,0 | 0,7 |
| 0 | 10 | 40 | 0,00024 | 89,5 | 2,7 | 26,2 | 89,6 | 2,4 | 26,7 | 0,7 | 0,4 |
| 0 | 10 | 50 | 0,00033 | 89,0 | 1,9 | 34,8 | 89,1 | 1,7 | 34,4 | 1,4 | 0,6 |
| 0 | 10 | 60 | 0,00029 | 88,6 | 1,4 | 41,8 | 88,7 | 1,1 | 42,5 | 0,5 | 0,3 |
| 0 | 10 | 80 | 0,00283 | 88,0 | 0,6 | 57,5 | 87,9 | 0,2 | 60,0 | 1,7 | 0,6 |
| 0 | 10 | 90 | 0,00086 | 87,6 | 0,1 | 68,0 | 87,6 | -0,1 | 69,6 | 0,9 | 0,4 |
| 0 | 10 | 100 | 0,00025 | 87,1 | -0,1 | 80,8 | 87,2 | -0,3 | 79,9 | 1,8 | 0,5 |
| 0 | 11 | 0 | 0,00013 | 91,3 | 5,8 | -1,1 | 91,4 | 6,0 | -1,1 | 0,1 | 0,1 |
| 0 | 12 | 0 | 0,00020 | 90,9 | 6,4 | -1,2 | 90,8 | 6,7 | -1,3 | 0,3 | 0,3 |
| 0 | 13 | 0 | 0,00013 | 90,5 | 6,9 | -1,3 | 90,5 | 7,1 | -1,4 | 0,2 | 0,2 |

Tabelle 12.1: Farbabweichungen bei Flächendeckungskombinationen von Cyan, Magenta und Gelb

| C | M | Y | ΔE_s | L^* | a^* | b^* | \widehat{L}^* | \widehat{a}^* | \widehat{b}^* | ΔE_{ab}^* | ΔE_{2000}^* |
|---|----|-----|--------------|-------|-------|-------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------|---------------------|
| 0 | 14 | 0 | 0,00032 | 90,1 | 7,5 | -1,4 | 89,9 | 7,8 | -1,6 | 0,4 | 0,4 |
| 0 | 15 | 0 | 0,00026 | 89,5 | 8,2 | -1,6 | 89,4 | 8,4 | -1,7 | 0,3 | 0,3 |
| 0 | 16 | 0 | 0,00029 | 88,9 | 8,9 | -1,7 | 88,8 | 9,3 | -1,9 | 0,4 | 0,4 |
| 0 | 17 | 0 | 0,00022 | 88,5 | 9,5 | -1,8 | 88,6 | 9,5 | -2,0 | 0,2 | 0,1 |
| 0 | 18 | 0 | 0,00010 | 88,2 | 10,0 | -2,0 | 88,1 | 10,2 | -2,2 | 0,3 | 0,3 |
| 0 | 19 | 0 | 0,00014 | 87,7 | 10,5 | -2,1 | 87,8 | 10,6 | -2,3 | 0,2 | 0,2 |
| 0 | 20 | 0 | 0,00005 | 87,2 | 11,2 | -2,3 | 87,2 | 11,4 | -2,4 | 0,2 | 0,2 |
| 0 | 20 | 5 | 0,00144 | 86,8 | 11,3 | 1,0 | 86,9 | 11,3 | 0,2 | 1,9 | 1,4 |
| 0 | 20 | 10 | 0,00088 | 86,5 | 10,8 | 4,1 | 86,6 | 10,8 | 3,5 | 1,7 | 1,4 |
| 0 | 20 | 20 | 0,00028 | 86,0 | 10,2 | 10,2 | 86,2 | 9,9 | 10,2 | 1,1 | 0,9 |
| 0 | 20 | 30 | 0,00034 | 85,6 | 9,6 | 16,7 | 85,8 | 9,1 | 17,2 | 0,5 | 0,3 |
| 0 | 20 | 40 | 0,00099 | 84,9 | 9,0 | 23,7 | 85,3 | 8,4 | 24,4 | 0,3 | 0,2 |
| 0 | 20 | 50 | 0,00132 | 84,5 | 8,3 | 32,0 | 84,9 | 7,7 | 31,9 | 1,0 | 0,4 |
| 0 | 20 | 60 | 0,00091 | 84,3 | 7,8 | 38,4 | 84,5 | 7,1 | 39,7 | 0,4 | 0,2 |
| 0 | 20 | 80 | 0,00188 | 83,7 | 6,8 | 54,0 | 83,8 | 6,3 | 56,4 | 1,6 | 0,5 |
| 0 | 20 | 90 | 0,00118 | 83,3 | 6,4 | 63,4 | 83,5 | 6,0 | 65,6 | 1,4 | 0,4 |
| 0 | 20 | 100 | 0,00076 | 82,9 | 6,1 | 76,4 | 83,1 | 5,8 | 75,4 | 1,8 | 0,5 |
| 0 | 21 | 0 | 0,00005 | 87,2 | 11,4 | -2,3 | 87,2 | 11,4 | -2,3 | 0,1 | 0,1 |
| 0 | 22 | 0 | 0,00005 | 86,8 | 11,9 | -2,4 | 86,8 | 12,0 | -2,4 | 0,1 | 0,1 |
| 0 | 23 | 0 | 0,00005 | 86,3 | 12,6 | -2,5 | 86,2 | 12,8 | -2,6 | 0,2 | 0,2 |
| 0 | 24 | 0 | 0,00017 | 85,9 | 13,1 | -2,6 | 85,8 | 13,4 | -2,7 | 0,4 | 0,3 |
| 0 | 25 | 0 | 0,00018 | 85,3 | 13,9 | -2,7 | 85,1 | 14,2 | -2,8 | 0,4 | 0,3 |
| 0 | 26 | 0 | 0,00025 | 84,8 | 14,5 | -2,8 | 84,6 | 14,9 | -3,0 | 0,4 | 0,3 |
| 0 | 27 | 0 | 0,00013 | 84,4 | 15,1 | -2,9 | 84,3 | 15,4 | -3,0 | 0,4 | 0,2 |
| 0 | 28 | 0 | 0,00005 | 83,9 | 15,7 | -3,0 | 84,0 | 15,9 | -3,1 | 0,2 | 0,1 |
| 0 | 29 | 0 | 0,00006 | 83,5 | 16,4 | -3,1 | 83,4 | 16,6 | -3,3 | 0,3 | 0,2 |
| 0 | 30 | 0 | 0,00046 | 82,9 | 17,1 | -3,3 | 83,1 | 17,1 | -3,4 | 0,2 | 0,1 |
| 0 | 30 | 5 | 0,00118 | 82,4 | 17,4 | -0,3 | 82,5 | 17,5 | -1,1 | 1,9 | 1,3 |
| 0 | 30 | 10 | 0,00072 | 82,2 | 16,9 | 2,7 | 82,3 | 17,0 | 2,1 | 1,7 | 1,2 |
| 0 | 30 | 20 | 0,00002 | 81,9 | 16,3 | 8,5 | 81,9 | 16,2 | 8,6 | 1,0 | 0,8 |
| 0 | 30 | 30 | 0,00023 | 81,3 | 15,7 | 14,7 | 81,5 | 15,4 | 15,3 | 0,5 | 0,4 |
| 0 | 30 | 40 | 0,00045 | 80,8 | 15,3 | 21,5 | 81,1 | 14,7 | 22,2 | 0,3 | 0,1 |
| 0 | 30 | 50 | 0,00055 | 80,4 | 14,5 | 29,2 | 80,7 | 14,1 | 29,4 | 0,7 | 0,4 |
| 0 | 30 | 60 | 0,00075 | 80,2 | 13,9 | 35,5 | 80,3 | 13,5 | 36,8 | 0,5 | 0,2 |
| 0 | 30 | 80 | 0,00188 | 79,5 | 13,3 | 50,3 | 79,7 | 12,7 | 52,8 | 1,7 | 0,6 |
| 0 | 30 | 90 | 0,00146 | 79,2 | 12,8 | 59,0 | 79,4 | 12,4 | 61,5 | 1,7 | 0,5 |
| 0 | 30 | 100 | 0,00054 | 78,8 | 12,6 | 71,0 | 79,0 | 12,2 | 70,8 | 1,0 | 0,3 |
| 0 | 31 | 0 | 0,00010 | 82,9 | 17,3 | -3,4 | 83,0 | 17,3 | -3,4 | 0,1 | 0,1 |
| 0 | 32 | 0 | 0,00004 | 82,5 | 18,0 | -3,5 | 82,5 | 18,0 | -3,5 | 0,1 | 0,0 |
| 0 | 33 | 0 | 0,00113 | 81,9 | 18,7 | -3,6 | 82,3 | 18,5 | -3,6 | 0,4 | 0,3 |

Farbabweichungen bei Flächendeckungskombinationen von Cyan, Magenta und Gelb (Fortsetzung)

| C | M | Y | ΔE_s | L^* | a^* | b^* | \widehat{L}^* | \widehat{a}^* | \widehat{b}^* | ΔE_{ab}^* | ΔE_{2000}^* |
|---|----|-----|--------------|-------|-------|-------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------|---------------------|
| 0 | 34 | 0 | 0,00012 | 81,5 | 19,2 | -3,6 | 81,4 | 19,5 | -3,7 | 0,4 | 0,2 |
| 0 | 35 | 0 | 0,00006 | 80,8 | 20,1 | -3,8 | 80,8 | 20,3 | -3,8 | 0,2 | 0,1 |
| 0 | 36 | 0 | 0,00016 | 80,4 | 20,8 | -3,9 | 80,3 | 21,3 | -4,0 | 0,5 | 0,3 |
| 0 | 37 | 0 | 0,00027 | 80,0 | 21,4 | -4,0 | 80,1 | 21,3 | -4,0 | 0,2 | 0,1 |
| 0 | 38 | 0 | 0,00014 | 79,5 | 22,0 | -4,1 | 79,6 | 22,0 | -4,2 | 0,2 | 0,1 |
| 0 | 39 | 0 | 0,00067 | 79,0 | 22,8 | -4,1 | 79,3 | 22,4 | -4,2 | 0,4 | 0,3 |
| 0 | 40 | 0 | 0,00080 | 78,4 | 23,6 | -4,3 | 78,7 | 23,3 | -4,4 | 0,4 | 0,2 |
| 0 | 40 | 5 | 0,00149 | 77,9 | 24,1 | -1,5 | 78,1 | 24,1 | -2,3 | 1,7 | 1,1 |
| 0 | 40 | 10 | 0,00173 | 77,5 | 23,8 | 1,3 | 77,9 | 23,6 | 0,7 | 1,5 | 0,9 |
| 0 | 40 | 20 | 0,00055 | 77,2 | 23,3 | 6,8 | 77,5 | 22,8 | 7,0 | 0,7 | 0,5 |
| 0 | 40 | 30 | 0,00073 | 76,7 | 22,7 | 12,8 | 77,1 | 22,1 | 13,4 | 0,3 | 0,2 |
| 0 | 40 | 40 | 0,00089 | 76,3 | 22,2 | 19,0 | 76,8 | 21,4 | 20,0 | 0,4 | 0,3 |
| 0 | 40 | 50 | 0,00106 | 75,9 | 21,5 | 26,3 | 76,4 | 20,8 | 26,9 | 0,4 | 0,2 |
| 0 | 40 | 60 | 0,00178 | 75,8 | 20,8 | 31,7 | 76,1 | 20,3 | 34,0 | 1,5 | 0,8 |
| 0 | 40 | 80 | 0,00291 | 75,0 | 20,4 | 45,7 | 75,5 | 19,5 | 49,2 | 2,8 | 1,3 |
| 0 | 40 | 90 | 0,00230 | 74,8 | 19,9 | 54,1 | 75,2 | 19,2 | 57,4 | 2,6 | 1,0 |
| 0 | 40 | 100 | 0,00112 | 74,4 | 19,6 | 65,7 | 74,9 | 19,0 | 66,1 | 0,4 | 0,2 |
| 0 | 41 | 0 | 0,00065 | 78,9 | 23,4 | -4,5 | 78,6 | 23,7 | -4,5 | 0,4 | 0,3 |
| 0 | 42 | 0 | 0,00053 | 78,4 | 23,8 | -4,5 | 78,2 | 24,4 | -4,6 | 0,7 | 0,4 |
| 0 | 43 | 0 | 0,00017 | 77,9 | 24,7 | -4,6 | 77,7 | 25,1 | -4,7 | 0,4 | 0,2 |
| 0 | 44 | 0 | 0,00018 | 77,4 | 25,4 | -4,6 | 77,2 | 25,8 | -4,7 | 0,4 | 0,2 |
| 0 | 45 | 0 | 0,00030 | 76,4 | 26,7 | -4,8 | 76,6 | 26,7 | -4,8 | 0,2 | 0,1 |
| 0 | 46 | 0 | 0,00004 | 76,0 | 27,4 | -4,9 | 76,1 | 27,5 | -4,9 | 0,1 | 0,1 |
| 0 | 47 | 0 | 0,00079 | 75,5 | 28,3 | -5,0 | 75,8 | 27,8 | -5,0 | 0,6 | 0,3 |
| 0 | 48 | 0 | 0,00073 | 75,1 | 28,7 | -5,0 | 75,5 | 28,2 | -5,0 | 0,6 | 0,3 |
| 0 | 49 | 0 | 0,00049 | 74,7 | 29,4 | -5,1 | 74,9 | 29,0 | -5,1 | 0,5 | 0,3 |
| 0 | 50 | 0 | 0,00037 | 74,3 | 30,0 | -5,2 | 74,0 | 30,4 | -5,3 | 0,5 | 0,3 |
| 0 | 50 | 5 | 0,00078 | 73,5 | 30,9 | -2,6 | 73,6 | 31,0 | -3,4 | 1,7 | 1,0 |
| 0 | 50 | 10 | 0,00097 | 73,2 | 30,7 | 0,2 | 73,4 | 30,6 | -0,5 | 1,5 | 0,9 |
| 0 | 50 | 20 | 0,00004 | 73,1 | 29,7 | 5,4 | 73,0 | 29,8 | 5,5 | 1,0 | 0,6 |
| 0 | 50 | 30 | 0,00025 | 72,5 | 29,5 | 10,9 | 72,7 | 29,1 | 11,6 | 0,1 | 0,1 |
| 0 | 50 | 40 | 0,00054 | 72,2 | 28,9 | 16,8 | 72,4 | 28,5 | 18,0 | 0,4 | 0,2 |
| 0 | 50 | 50 | 0,00038 | 71,8 | 28,3 | 23,7 | 72,1 | 27,9 | 24,5 | 0,0 | 0,0 |
| 0 | 50 | 60 | 0,00137 | 71,7 | 27,7 | 29,1 | 71,8 | 27,4 | 31,3 | 1,4 | 0,7 |
| 0 | 50 | 80 | 0,00208 | 71,0 | 27,2 | 42,4 | 71,3 | 26,6 | 45,6 | 2,5 | 1,2 |
| 0 | 50 | 90 | 0,00163 | 70,9 | 26,5 | 50,2 | 71,0 | 26,3 | 53,3 | 2,4 | 0,9 |
| 0 | 50 | 100 | 0,00082 | 70,3 | 26,6 | 61,0 | 70,8 | 26,1 | 61,4 | 0,3 | 0,1 |
| 0 | 51 | 0 | 0,00007 | 74,4 | 30,1 | -5,3 | 74,5 | 30,0 | -5,4 | 0,1 | 0,1 |
| 0 | 52 | 0 | 0,00006 | 74,0 | 30,5 | -5,3 | 74,1 | 30,5 | -5,3 | 0,1 | 0,1 |
| 0 | 53 | 0 | 0,00018 | 73,4 | 31,5 | -5,4 | 73,5 | 31,5 | -5,5 | 0,2 | 0,1 |

Farbabweichungen bei Flächendeckungskombinationen von Cyan, Magenta und Gelb (Fortsetzung)

| C | M | Y | ΔE_s | L^* | a^* | b^* | \widehat{L}^* | \widehat{a}^* | \widehat{b}^* | ΔE_{ab}^* | ΔE_{2000}^* |
|---|----|-----|--------------|-------|-------|-------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------|---------------------|
| 0 | 54 | 0 | 0,00013 | 72,8 | 32,3 | -5,4 | 72,8 | 32,7 | -5,6 | 0,4 | 0,2 |
| 0 | 55 | 0 | 0,00041 | 71,9 | 33,8 | -5,6 | 72,0 | 33,9 | -5,8 | 0,3 | 0,2 |
| 0 | 56 | 0 | 0,00016 | 71,5 | 34,5 | -5,6 | 71,3 | 35,0 | -5,9 | 0,6 | 0,3 |
| 0 | 57 | 0 | 0,00007 | 70,9 | 35,5 | -5,7 | 70,8 | 35,8 | -5,9 | 0,3 | 0,2 |
| 0 | 58 | 0 | 0,00109 | 70,5 | 35,9 | -5,7 | 70,0 | 36,9 | -6,0 | 1,1 | 0,5 |
| 0 | 59 | 0 | 0,00046 | 70,1 | 36,6 | -5,8 | 69,7 | 37,4 | -6,0 | 0,9 | 0,4 |
| 0 | 60 | 0 | 0,00055 | 69,7 | 37,2 | -5,8 | 69,3 | 38,0 | -6,0 | 0,8 | 0,4 |
| 0 | 60 | 5 | 0,00033 | 69,2 | 37,8 | -3,5 | 69,0 | 38,4 | -4,2 | 1,8 | 0,9 |
| 0 | 60 | 10 | 0,00024 | 68,9 | 37,7 | -0,9 | 68,9 | 38,0 | -1,5 | 1,5 | 0,8 |
| 0 | 60 | 20 | 0,00019 | 68,4 | 37,6 | 4,2 | 68,6 | 37,3 | 4,2 | 0,7 | 0,4 |
| 0 | 60 | 30 | 0,00018 | 68,3 | 36,7 | 9,4 | 68,3 | 36,6 | 10,0 | 0,4 | 0,3 |
| 0 | 60 | 40 | 0,00047 | 67,8 | 36,3 | 14,9 | 68,0 | 36,0 | 16,0 | 0,5 | 0,3 |
| 0 | 60 | 50 | 0,00024 | 67,5 | 35,8 | 21,4 | 67,7 | 35,4 | 22,2 | 0,1 | 0,1 |
| 0 | 60 | 60 | 0,00124 | 67,3 | 35,2 | 26,4 | 67,5 | 34,9 | 28,6 | 1,5 | 0,8 |
| 0 | 60 | 80 | 0,00213 | 66,9 | 34,5 | 38,6 | 67,0 | 34,2 | 42,1 | 2,7 | 1,3 |
| 0 | 60 | 90 | 0,00132 | 66,6 | 34,2 | 46,2 | 66,8 | 33,9 | 49,2 | 2,3 | 1,0 |
| 0 | 60 | 100 | 0,00047 | 66,2 | 34,1 | 56,3 | 66,6 | 33,7 | 56,7 | 0,3 | 0,1 |
| 0 | 61 | 0 | 0,00157 | 70,0 | 37,0 | -6,0 | 69,4 | 38,1 | -6,1 | 1,3 | 0,6 |
| 0 | 62 | 0 | 0,00002 | 69,2 | 38,3 | -6,0 | 69,1 | 38,4 | -6,0 | 0,1 | 0,1 |
| 0 | 63 | 0 | 0,00011 | 68,5 | 39,4 | -6,0 | 68,4 | 39,8 | -6,1 | 0,4 | 0,2 |
| 0 | 64 | 0 | 0,00004 | 68,2 | 39,7 | -6,0 | 68,2 | 39,9 | -6,0 | 0,2 | 0,1 |
| 0 | 65 | 0 | 0,00018 | 67,2 | 41,5 | -6,1 | 67,3 | 41,5 | -6,1 | 0,1 | 0,1 |
| 0 | 66 | 0 | 0,00002 | 66,6 | 42,5 | -6,2 | 66,7 | 42,4 | -6,1 | 0,1 | 0,1 |
| 0 | 67 | 0 | 0,00015 | 66,1 | 43,1 | -6,2 | 66,3 | 42,8 | -6,1 | 0,3 | 0,2 |
| 0 | 68 | 0 | 0,00024 | 65,6 | 44,0 | -6,2 | 65,9 | 43,5 | -6,0 | 0,6 | 0,3 |
| 0 | 69 | 0 | 0,00035 | 65,3 | 44,3 | -6,2 | 65,6 | 44,0 | -6,1 | 0,4 | 0,3 |
| 0 | 70 | 0 | 0,00140 | 64,8 | 45,3 | -6,2 | 65,4 | 44,3 | -6,1 | 1,1 | 0,6 |
| 0 | 71 | 0 | 0,00003 | 65,3 | 44,8 | -6,4 | 65,4 | 44,7 | -6,3 | 0,2 | 0,1 |
| 0 | 72 | 0 | 0,00008 | 64,5 | 46,2 | -6,4 | 64,6 | 45,8 | -6,2 | 0,5 | 0,2 |
| 0 | 73 | 0 | 0,00054 | 63,8 | 47,4 | -6,4 | 64,2 | 46,4 | -6,2 | 1,1 | 0,5 |
| 0 | 74 | 0 | 0,00003 | 63,5 | 47,8 | -6,3 | 63,5 | 47,7 | -6,1 | 0,3 | 0,1 |
| 0 | 75 | 0 | 0,00100 | 62,4 | 49,6 | -6,4 | 63,0 | 48,4 | -6,1 | 1,4 | 0,6 |
| 0 | 76 | 0 | 0,00023 | 61,8 | 50,7 | -6,4 | 62,1 | 49,9 | -6,0 | 0,9 | 0,3 |
| 0 | 77 | 0 | 0,00048 | 61,3 | 51,3 | -6,4 | 61,8 | 50,3 | -6,0 | 1,1 | 0,5 |
| 0 | 78 | 0 | 0,00051 | 60,8 | 52,3 | -6,3 | 61,2 | 51,3 | -5,9 | 1,2 | 0,5 |
| 0 | 79 | 0 | 0,00032 | 60,5 | 52,7 | -6,3 | 60,8 | 51,8 | -5,9 | 1,1 | 0,4 |
| 0 | 80 | 0 | 0,00018 | 59,9 | 53,8 | -6,2 | 60,1 | 53,1 | -5,9 | 0,8 | 0,3 |
| 0 | 80 | 5 | 0,00055 | 60,4 | 53,2 | -4,1 | 59,8 | 54,4 | -5,0 | 2,2 | 1,0 |
| 0 | 80 | 10 | 0,00064 | 60,3 | 52,8 | -1,8 | 59,7 | 54,0 | -2,6 | 2,2 | 1,0 |
| 0 | 80 | 20 | 0,00045 | 60,0 | 52,6 | 2,7 | 59,5 | 53,3 | 2,5 | 1,5 | 0,8 |

Farbabweichungen bei Flächendeckungskombinationen von Cyan, Magenta und Gelb (Fortsetzung)

| C | M | Y | ΔE_s | L^* | a^* | b^* | \widehat{L}^* | \widehat{a}^* | \widehat{b}^* | ΔE_{ab}^* | ΔE_{2000}^* |
|---|-----|-----|--------------|-------|-------|-------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------|---------------------|
| 0 | 80 | 30 | 0,00061 | 59,8 | 51,9 | 7,3 | 59,4 | 52,7 | 7,6 | 1,3 | 0,7 |
| 0 | 80 | 40 | 0,00027 | 59,4 | 51,8 | 12,4 | 59,2 | 52,1 | 12,9 | 0,8 | 0,4 |
| 0 | 80 | 50 | 0,00032 | 59,3 | 51,0 | 18,0 | 59,0 | 51,6 | 18,3 | 1,1 | 0,6 |
| 0 | 80 | 60 | 0,00178 | 59,4 | 49,9 | 22,4 | 58,8 | 51,1 | 23,8 | 1,8 | 0,9 |
| 0 | 80 | 80 | 0,00138 | 59,0 | 49,5 | 33,1 | 58,6 | 50,3 | 35,2 | 2,0 | 0,9 |
| 0 | 80 | 90 | 0,00142 | 58,9 | 49,0 | 38,9 | 58,4 | 50,0 | 41,1 | 2,2 | 0,9 |
| 0 | 80 | 100 | 0,00050 | 58,7 | 48,6 | 48,0 | 58,3 | 49,8 | 47,1 | 2,1 | 1,3 |
| 0 | 81 | 0 | 0,00009 | 60,5 | 53,4 | -6,5 | 60,3 | 53,5 | -6,5 | 0,2 | 0,1 |
| 0 | 82 | 0 | 0,00006 | 59,7 | 54,6 | -6,4 | 59,8 | 54,3 | -6,4 | 0,3 | 0,1 |
| 0 | 83 | 0 | 0,00005 | 59,1 | 55,8 | -6,3 | 59,1 | 55,5 | -6,3 | 0,4 | 0,1 |
| 0 | 84 | 0 | 0,00010 | 58,6 | 56,6 | -6,2 | 58,7 | 56,2 | -6,2 | 0,4 | 0,2 |
| 0 | 85 | 0 | 0,00007 | 57,6 | 58,5 | -6,2 | 57,7 | 58,1 | -6,1 | 0,5 | 0,2 |
| 0 | 86 | 0 | 0,00003 | 57,1 | 59,3 | -6,1 | 57,1 | 59,0 | -6,0 | 0,3 | 0,1 |
| 0 | 87 | 0 | 0,00033 | 56,5 | 60,0 | -6,0 | 56,3 | 60,7 | -5,8 | 0,7 | 0,3 |
| 0 | 88 | 0 | 0,00007 | 56,0 | 61,1 | -5,7 | 56,1 | 60,7 | -5,6 | 0,4 | 0,2 |
| 0 | 89 | 0 | 0,00005 | 55,7 | 61,6 | -5,8 | 55,6 | 61,7 | -5,6 | 0,2 | 0,1 |
| 0 | 90 | 0 | 0,00020 | 54,9 | 63,0 | -5,6 | 55,2 | 62,3 | -5,5 | 0,7 | 0,3 |
| 0 | 90 | 5 | 0,00015 | 55,5 | 62,4 | -4,1 | 55,2 | 63,0 | -4,7 | 1,5 | 0,7 |
| 0 | 90 | 10 | 0,00011 | 55,4 | 62,1 | -1,8 | 55,2 | 62,6 | -2,4 | 1,4 | 0,7 |
| 0 | 90 | 20 | 0,00003 | 55,2 | 61,7 | 2,5 | 55,0 | 62,0 | 2,3 | 0,9 | 0,5 |
| 0 | 90 | 30 | 0,00010 | 55,1 | 61,0 | 6,8 | 54,9 | 61,3 | 7,0 | 0,7 | 0,4 |
| 0 | 90 | 40 | 0,00037 | 55,1 | 60,2 | 11,2 | 54,8 | 60,7 | 11,8 | 0,9 | 0,5 |
| 0 | 90 | 50 | 0,00010 | 54,8 | 59,9 | 16,3 | 54,7 | 60,2 | 16,8 | 0,6 | 0,3 |
| 0 | 90 | 60 | 0,00103 | 54,9 | 59,0 | 20,1 | 54,6 | 59,7 | 21,8 | 1,6 | 0,7 |
| 0 | 90 | 80 | 0,00075 | 54,6 | 58,5 | 29,8 | 54,4 | 58,9 | 32,0 | 1,8 | 0,8 |
| 0 | 90 | 90 | 0,00069 | 54,7 | 57,7 | 35,7 | 54,3 | 58,5 | 37,2 | 1,6 | 0,7 |
| 0 | 90 | 100 | 0,00016 | 54,4 | 57,6 | 43,1 | 54,2 | 58,2 | 42,5 | 1,4 | 0,8 |
| 0 | 91 | 0 | 0,00015 | 55,4 | 62,8 | -6,3 | 55,2 | 63,3 | -6,4 | 0,5 | 0,2 |
| 0 | 92 | 0 | 0,00059 | 54,8 | 64,0 | -6,0 | 54,3 | 65,1 | -6,1 | 1,2 | 0,5 |
| 0 | 93 | 0 | 0,00039 | 54,1 | 65,3 | -5,8 | 53,7 | 66,1 | -5,9 | 0,9 | 0,4 |
| 0 | 94 | 0 | 0,00010 | 53,5 | 66,2 | -5,7 | 53,3 | 66,8 | -5,9 | 0,7 | 0,3 |
| 0 | 95 | 0 | 0,00003 | 52,7 | 67,9 | -5,5 | 52,6 | 68,0 | -5,6 | 0,2 | 0,1 |
| 0 | 96 | 0 | 0,00004 | 52,1 | 68,9 | -5,2 | 52,0 | 69,1 | -5,4 | 0,3 | 0,2 |
| 0 | 97 | 0 | 0,00027 | 51,6 | 69,5 | -5,1 | 51,3 | 70,4 | -5,2 | 1,0 | 0,4 |
| 0 | 98 | 0 | 0,00018 | 50,8 | 71,1 | -4,6 | 50,5 | 71,9 | -4,8 | 0,9 | 0,4 |
| 0 | 99 | 0 | 0,00017 | 50,6 | 71,6 | -4,6 | 50,3 | 72,4 | -4,7 | 0,8 | 0,4 |
| 0 | 100 | 0 | 0,00004 | 49,9 | 73,0 | -4,3 | 49,7 | 73,3 | -4,5 | 0,4 | 0,2 |
| 0 | 100 | 5 | 0,00026 | 50,4 | 72,7 | -3,4 | 50,7 | 71,9 | -3,6 | 0,9 | 0,4 |
| 0 | 100 | 10 | 0,00061 | 50,2 | 72,7 | -1,2 | 50,7 | 71,5 | -1,5 | 1,3 | 0,5 |
| 0 | 100 | 20 | 0,00017 | 50,3 | 71,7 | 2,5 | 50,6 | 70,8 | 2,7 | 0,8 | 0,3 |

Farbabweichungen bei Flächendeckungskombinationen von Cyan, Magenta und Gelb (Fortsetzung)

| C | M | Y | ΔE_s | L^* | a^* | b^* | \widehat{L}^* | \widehat{a}^* | \widehat{b}^* | ΔE_{ab}^* | ΔE_{2000}^* |
|----|-----|-----|--------------|-------|-------|-------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------|---------------------|
| 0 | 100 | 30 | 0,00024 | 50,1 | 71,0 | 6,8 | 50,6 | 70,2 | 7,0 | 0,8 | 0,3 |
| 0 | 100 | 40 | 0,00012 | 50,2 | 70,3 | 10,7 | 50,5 | 69,5 | 11,4 | 0,7 | 0,3 |
| 0 | 100 | 50 | 0,00017 | 50,1 | 69,7 | 15,3 | 50,5 | 69,0 | 15,8 | 0,7 | 0,3 |
| 0 | 100 | 60 | 0,00027 | 50,1 | 69,3 | 18,7 | 50,4 | 68,4 | 20,2 | 1,3 | 0,6 |
| 0 | 100 | 80 | 0,00033 | 50,1 | 68,2 | 27,1 | 50,4 | 67,5 | 29,2 | 1,8 | 0,9 |
| 0 | 100 | 90 | 0,00013 | 50,2 | 67,5 | 32,2 | 50,3 | 67,1 | 33,6 | 1,0 | 0,5 |
| 0 | 100 | 100 | 0,00006 | 50,1 | 67,1 | 38,3 | 50,3 | 66,7 | 38,0 | 0,8 | 0,3 |
| 5 | 5 | 0 | 0,03049 | 92,5 | 0,6 | -2,8 | 91,9 | 0,3 | -1,7 | 1,3 | 1,2 |
| 5 | 5 | 100 | 0,00332 | 87,6 | -6,2 | 83,6 | 86,9 | -5,5 | 81,7 | 2,4 | 0,6 |
| 5 | 10 | 0 | 0,02026 | 89,7 | 4,1 | -3,6 | 89,8 | 3,0 | -2,3 | 1,7 | 1,6 |
| 5 | 10 | 90 | 0,00026 | 85,9 | -2,7 | 68,6 | 85,7 | -2,6 | 68,2 | 0,9 | 0,2 |
| 5 | 20 | 0 | 0,02020 | 85,7 | 9,8 | -4,7 | 85,6 | 8,7 | -3,6 | 1,6 | 1,3 |
| 5 | 20 | 80 | 0,00029 | 82,3 | 3,6 | 54,1 | 82,5 | 3,2 | 55,0 | 0,7 | 0,4 |
| 5 | 30 | 0 | 0,01565 | 81,4 | 15,7 | -5,8 | 81,3 | 14,7 | -4,7 | 1,5 | 1,0 |
| 5 | 30 | 70 | 0,00139 | 78,6 | 10,1 | 42,0 | 79,1 | 9,5 | 43,4 | 1,3 | 0,8 |
| 5 | 40 | 0 | 0,01335 | 76,9 | 22,2 | -6,9 | 77,0 | 21,0 | -5,8 | 1,6 | 0,9 |
| 5 | 40 | 60 | 0,00269 | 74,7 | 17,3 | 32,3 | 75,5 | 16,2 | 33,1 | 1,5 | 1,1 |
| 5 | 50 | 0 | 0,01037 | 72,4 | 28,7 | -7,7 | 72,5 | 27,7 | -6,8 | 1,3 | 0,6 |
| 5 | 50 | 50 | 0,00360 | 70,8 | 24,6 | 23,3 | 71,8 | 23,3 | 23,8 | 1,7 | 1,1 |
| 5 | 60 | 0 | 0,00868 | 68,0 | 35,8 | -8,5 | 68,0 | 34,9 | -7,6 | 1,2 | 0,5 |
| 5 | 60 | 40 | 0,00539 | 66,5 | 33,6 | 14,1 | 67,8 | 31,1 | 15,6 | 3,1 | 1,9 |
| 5 | 80 | 0 | 0,00949 | 59,3 | 50,6 | -8,9 | 58,7 | 50,9 | -8,5 | 0,8 | 0,6 |
| 5 | 80 | 30 | 0,00059 | 58,5 | 49,0 | 6,6 | 59,0 | 48,1 | 7,1 | 1,1 | 0,6 |
| 5 | 90 | 0 | 0,00428 | 54,4 | 59,8 | -9,0 | 53,9 | 59,7 | -8,3 | 0,8 | 0,5 |
| 5 | 90 | 20 | 0,00100 | 53,6 | 59,4 | 1,3 | 54,3 | 58,2 | 1,4 | 1,5 | 0,8 |
| 5 | 100 | 0 | 0,00283 | 49,1 | 70,3 | -8,4 | 49,1 | 69,1 | -7,5 | 1,6 | 0,5 |
| 5 | 100 | 10 | 0,00062 | 48,8 | 70,0 | -2,4 | 49,2 | 69,6 | -2,9 | 1,3 | 0,7 |
| 10 | 0 | 10 | 0,00612 | 92,3 | -5,5 | 2,9 | 91,8 | -6,0 | 3,5 | 0,9 | 0,7 |
| 10 | 0 | 30 | 0,00670 | 91,2 | -7,3 | 16,6 | 90,8 | -8,0 | 17,7 | 1,4 | 0,8 |
| 10 | 0 | 50 | 0,00206 | 90,2 | -9,2 | 33,1 | 89,8 | -9,5 | 33,1 | 0,5 | 0,3 |
| 10 | 0 | 80 | 0,00224 | 88,8 | -10,9 | 56,9 | 88,5 | -11,2 | 58,8 | 1,9 | 0,5 |
| 10 | 0 | 100 | 0,00076 | 87,9 | -11,8 | 80,3 | 87,7 | -11,8 | 78,8 | 1,5 | 0,4 |
| 10 | 5 | 0 | 0,03152 | 91,0 | -1,1 | -5,1 | 90,2 | -1,2 | -3,9 | 1,4 | 1,1 |
| 10 | 5 | 10 | 0,02006 | 90,7 | -2,3 | 1,8 | 89,5 | -2,1 | 2,3 | 1,1 | 0,8 |
| 10 | 10 | 0 | 0,01903 | 88,4 | 2,2 | -5,9 | 88,2 | 1,5 | -4,5 | 1,6 | 1,4 |
| 10 | 10 | 20 | 0,00784 | 87,9 | -0,3 | 7,4 | 87,3 | -0,5 | 8,5 | 0,5 | 0,4 |
| 10 | 20 | 0 | 0,01467 | 84,1 | 8,0 | -7,0 | 84,0 | 7,1 | -5,7 | 1,6 | 1,2 |
| 10 | 20 | 30 | 0,00408 | 83,5 | 4,6 | 12,8 | 83,1 | 4,1 | 13,8 | 0,6 | 0,7 |
| 10 | 30 | 0 | 0,01016 | 79,7 | 13,8 | -8,1 | 79,8 | 13,0 | -6,9 | 1,5 | 0,9 |
| 10 | 30 | 40 | 0,00076 | 78,6 | 9,9 | 17,9 | 78,8 | 9,2 | 19,0 | 0,8 | 0,8 |

Farbabweichungen bei Flächendeckungskombinationen von Cyan, Magenta und Gelb (Fortsetzung)

| C | M | Y | ΔE_s | L^* | a^* | b^* | \widehat{L}^* | \widehat{a}^* | \widehat{b}^* | ΔE_{ab}^* | ΔE_{2000}^* |
|----|-----|-----|--------------|-------|-------|-------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------|---------------------|
| 10 | 40 | 0 | 0,00756 | 75,1 | 20,3 | -9,1 | 75,5 | 19,3 | -7,9 | 1,6 | 0,9 |
| 10 | 40 | 50 | 0,00072 | 74,1 | 15,7 | 23,3 | 74,4 | 14,9 | 23,9 | 1,0 | 0,7 |
| 10 | 50 | 0 | 0,00481 | 71,0 | 26,3 | -9,8 | 71,1 | 26,0 | -8,9 | 1,0 | 0,5 |
| 10 | 50 | 60 | 0,00103 | 69,4 | 22,3 | 27,4 | 69,9 | 21,2 | 28,6 | 1,4 | 1,0 |
| 10 | 60 | 0 | 0,00352 | 66,4 | 33,8 | -10,6 | 66,6 | 33,1 | -9,6 | 1,2 | 0,6 |
| 10 | 60 | 70 | 0,00176 | 64,9 | 29,6 | 30,7 | 65,2 | 28,3 | 33,0 | 2,3 | 1,6 |
| 10 | 80 | 0 | 0,00359 | 58,0 | 47,8 | -11,1 | 57,4 | 48,9 | -10,5 | 1,3 | 0,7 |
| 10 | 80 | 80 | 0,00212 | 56,7 | 44,1 | 31,9 | 56,1 | 45,0 | 34,0 | 1,9 | 0,8 |
| 10 | 90 | 0 | 0,00612 | 53,1 | 56,9 | -11,2 | 52,7 | 57,6 | -10,3 | 1,2 | 0,6 |
| 10 | 90 | 90 | 0,00159 | 51,9 | 52,4 | 35,3 | 51,1 | 54,8 | 37,0 | 2,8 | 1,0 |
| 10 | 100 | 0 | 0,00552 | 47,9 | 67,0 | -11,0 | 48,0 | 66,9 | -9,5 | 1,5 | 0,6 |
| 10 | 100 | 100 | 0,00254 | 47,5 | 61,5 | 37,5 | 46,1 | 65,6 | 39,0 | 3,9 | 1,7 |
| 20 | 5 | 0 | 0,02555 | 87,6 | -4,0 | -9,2 | 86,8 | -4,3 | -8,5 | 1,1 | 0,8 |
| 20 | 5 | 100 | 0,00558 | 82,5 | -12,3 | 75,5 | 81,6 | -10,6 | 72,3 | 4,0 | 1,2 |
| 20 | 10 | 0 | 0,01740 | 85,2 | -0,9 | -10,0 | 84,8 | -1,6 | -9,0 | 1,3 | 1,2 |
| 20 | 10 | 90 | 0,00168 | 80,9 | -8,9 | 60,1 | 80,4 | -7,6 | 59,7 | 1,4 | 0,7 |
| 20 | 20 | 0 | 0,01171 | 80,9 | 4,8 | -11,1 | 80,8 | 3,8 | -10,1 | 1,3 | 1,1 |
| 20 | 20 | 80 | 0,00126 | 77,5 | -2,6 | 46,7 | 77,3 | -1,6 | 47,4 | 0,9 | 0,6 |
| 20 | 30 | 0 | 0,00730 | 76,7 | 10,4 | -12,0 | 76,6 | 9,6 | -11,2 | 1,1 | 0,8 |
| 20 | 30 | 70 | 0,00166 | 74,1 | 3,9 | 34,8 | 74,1 | 4,5 | 36,5 | 1,1 | 0,5 |
| 20 | 40 | 0 | 0,00561 | 72,6 | 16,3 | -12,9 | 72,5 | 15,8 | -12,1 | 1,0 | 0,5 |
| 20 | 40 | 60 | 0,00108 | 70,4 | 10,9 | 25,4 | 70,7 | 11,0 | 26,6 | 0,7 | 0,5 |
| 20 | 50 | 0 | 0,00233 | 68,1 | 22,8 | -13,7 | 68,2 | 22,3 | -13,0 | 0,9 | 0,4 |
| 20 | 50 | 50 | 0,00135 | 66,5 | 18,5 | 17,0 | 67,1 | 17,8 | 17,8 | 1,1 | 0,8 |
| 20 | 60 | 0 | 0,00185 | 63,9 | 29,5 | -14,4 | 63,8 | 29,3 | -13,7 | 0,7 | 0,4 |
| 20 | 60 | 40 | 0,00163 | 62,7 | 26,7 | 7,8 | 63,4 | 25,1 | 9,8 | 2,2 | 1,5 |
| 20 | 80 | 0 | 0,00198 | 55,5 | 43,4 | -15,0 | 54,9 | 44,7 | -14,5 | 1,5 | 0,8 |
| 20 | 80 | 30 | 0,00055 | 54,7 | 42,3 | 0,5 | 54,9 | 41,5 | 1,6 | 0,9 | 0,4 |
| 20 | 90 | 0 | 0,00982 | 50,9 | 52,2 | -15,2 | 50,3 | 53,3 | -14,4 | 1,5 | 0,8 |
| 20 | 90 | 20 | 0,00035 | 50,1 | 52,3 | -5,0 | 50,4 | 51,2 | -4,1 | 1,1 | 0,5 |
| 20 | 100 | 0 | 0,00907 | 45,4 | 62,4 | -15,2 | 45,7 | 62,5 | -13,7 | 1,5 | 0,6 |
| 20 | 100 | 10 | 0,00034 | 45,2 | 63,6 | -8,8 | 45,5 | 62,5 | -8,8 | 1,3 | 0,6 |
| 30 | 0 | 10 | 0,00124 | 84,9 | -11,9 | -6,6 | 84,8 | -12,4 | -6,0 | 0,8 | 0,7 |
| 30 | 0 | 30 | 0,00109 | 83,8 | -14,1 | 6,9 | 83,7 | -14,7 | 7,7 | 1,0 | 0,6 |
| 30 | 0 | 50 | 0,00007 | 82,6 | -16,5 | 22,4 | 82,7 | -16,6 | 22,4 | 0,1 | 0,0 |
| 30 | 0 | 80 | 0,00097 | 81,2 | -18,6 | 45,3 | 81,2 | -18,6 | 47,0 | 1,7 | 0,6 |
| 30 | 0 | 100 | 0,00088 | 80,2 | -20,0 | 67,1 | 80,4 | -19,3 | 65,8 | 1,5 | 0,4 |
| 30 | 5 | 0 | 0,01201 | 83,7 | -7,2 | -14,2 | 83,3 | -7,5 | -13,1 | 1,2 | 0,8 |
| 30 | 10 | 0 | 0,00809 | 81,5 | -4,3 | -14,7 | 81,4 | -4,9 | -13,6 | 1,3 | 1,0 |
| 30 | 20 | 0 | 0,00440 | 77,5 | 1,1 | -15,5 | 77,5 | 0,5 | -14,6 | 1,1 | 0,8 |

Farbabweichungen bei Flächendeckungskombinationen von Cyan, Magenta und Gelb (Fortsetzung)

| C | M | Y | ΔE_s | L^* | a^* | b^* | \widehat{L}^* | \widehat{a}^* | \widehat{b}^* | ΔE_{ab}^* | ΔE_{2000}^* |
|----|-----|-----|--------------|-------|-------|-------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------|---------------------|
| 30 | 30 | 0 | 0,00236 | 73,6 | 6,3 | -16,3 | 73,5 | 6,1 | -15,5 | 0,8 | 0,4 |
| 30 | 40 | 0 | 0,00088 | 69,3 | 12,2 | -17,2 | 69,4 | 12,1 | -16,4 | 0,8 | 0,5 |
| 30 | 50 | 0 | 0,00067 | 65,1 | 18,1 | -17,9 | 65,3 | 18,5 | -17,2 | 0,9 | 0,6 |
| 30 | 60 | 0 | 0,00087 | 60,9 | 24,9 | -18,4 | 61,0 | 25,3 | -17,8 | 0,8 | 0,5 |
| 30 | 80 | 0 | 0,00318 | 52,5 | 38,5 | -19,1 | 52,3 | 40,4 | -18,6 | 2,0 | 0,9 |
| 30 | 90 | 0 | 0,01079 | 47,6 | 47,4 | -19,3 | 47,9 | 48,8 | -18,5 | 1,6 | 0,7 |
| 30 | 100 | 0 | 0,00941 | 42,7 | 57,7 | -19,5 | 43,3 | 57,8 | -17,9 | 1,7 | 0,9 |
| 40 | 5 | 0 | 0,01340 | 80,3 | -10,4 | -18,6 | 79,8 | -10,8 | -17,8 | 1,0 | 0,7 |
| 40 | 10 | 0 | 0,00970 | 78,3 | -7,4 | -18,9 | 77,9 | -8,3 | -18,2 | 1,2 | 0,9 |
| 40 | 20 | 0 | 0,00650 | 74,5 | -2,2 | -19,5 | 74,1 | -3,1 | -19,1 | 1,0 | 1,0 |
| 40 | 30 | 0 | 0,00325 | 70,6 | 2,9 | -20,2 | 70,2 | 2,5 | -20,0 | 0,6 | 0,5 |
| 40 | 40 | 0 | 0,00104 | 66,4 | 8,6 | -21,0 | 66,3 | 8,3 | -20,7 | 0,5 | 0,3 |
| 40 | 50 | 0 | 0,00036 | 62,0 | 14,7 | -21,8 | 62,3 | 14,5 | -21,4 | 0,6 | 0,4 |
| 40 | 60 | 0 | 0,00050 | 58,0 | 21,2 | -22,3 | 58,2 | 21,2 | -22,0 | 0,4 | 0,3 |
| 40 | 80 | 0 | 0,00125 | 49,9 | 34,5 | -22,6 | 49,8 | 35,9 | -22,7 | 1,4 | 0,6 |
| 40 | 90 | 0 | 0,01056 | 45,0 | 43,0 | -23,2 | 45,4 | 44,1 | -22,6 | 1,3 | 0,7 |
| 40 | 100 | 0 | 0,00794 | 40,3 | 53,2 | -23,3 | 41,0 | 52,9 | -22,1 | 1,3 | 0,8 |
| 50 | 0 | 10 | 0,00059 | 77,4 | -19,0 | -16,4 | 77,5 | -19,4 | -15,8 | 0,8 | 0,5 |
| 50 | 0 | 30 | 0,00068 | 76,3 | -21,7 | -3,6 | 76,3 | -22,2 | -2,7 | 1,0 | 0,7 |
| 50 | 0 | 50 | 0,00000 | 75,2 | -24,5 | 11,3 | 75,2 | -24,5 | 11,3 | 0,0 | 0,0 |
| 50 | 0 | 80 | 0,00079 | 73,7 | -27,6 | 33,3 | 73,6 | -27,2 | 34,5 | 1,3 | 0,6 |
| 50 | 0 | 100 | 0,00141 | 72,5 | -29,6 | 53,9 | 72,6 | -28,2 | 52,1 | 2,3 | 0,6 |
| 50 | 5 | 0 | 0,00909 | 76,6 | -13,8 | -23,3 | 76,1 | -14,3 | -22,6 | 1,0 | 0,6 |
| 50 | 10 | 0 | 0,00593 | 74,7 | -10,8 | -23,4 | 74,3 | -11,9 | -23,0 | 1,2 | 0,8 |
| 50 | 20 | 0 | 0,00325 | 70,9 | -5,8 | -24,0 | 70,7 | -6,8 | -23,7 | 1,0 | 0,8 |
| 50 | 30 | 0 | 0,00143 | 67,1 | -0,8 | -24,7 | 67,0 | -1,4 | -24,4 | 0,6 | 0,5 |
| 50 | 40 | 0 | 0,00054 | 63,3 | 4,5 | -25,3 | 63,2 | 4,3 | -25,1 | 0,3 | 0,1 |
| 50 | 50 | 0 | 0,00000 | 59,3 | 10,4 | -25,7 | 59,3 | 10,4 | -25,7 | 0,0 | 0,0 |
| 50 | 60 | 0 | 0,00027 | 55,3 | 16,7 | -26,2 | 55,3 | 16,8 | -26,2 | 0,2 | 0,1 |
| 50 | 80 | 0 | 0,00241 | 47,7 | 29,2 | -26,5 | 47,2 | 31,2 | -26,8 | 2,1 | 1,0 |
| 50 | 90 | 0 | 0,01069 | 42,7 | 38,0 | -27,2 | 43,0 | 39,1 | -26,8 | 1,2 | 0,6 |
| 50 | 100 | 0 | 0,01400 | 37,7 | 47,2 | -27,8 | 38,7 | 47,7 | -26,3 | 1,9 | 1,2 |
| 60 | 5 | 0 | 0,00517 | 72,7 | -17,6 | -28,4 | 72,5 | -18,0 | -27,4 | 1,1 | 0,5 |
| 60 | 10 | 0 | 0,00356 | 70,9 | -14,9 | -28,6 | 70,7 | -15,6 | -27,8 | 1,1 | 0,6 |
| 60 | 20 | 0 | 0,00162 | 67,4 | -9,9 | -28,8 | 67,2 | -10,7 | -28,4 | 0,9 | 0,5 |
| 60 | 30 | 0 | 0,00092 | 63,9 | -5,0 | -29,3 | 63,6 | -5,4 | -29,0 | 0,5 | 0,3 |
| 60 | 40 | 0 | 0,00012 | 60,0 | 0,1 | -29,9 | 60,0 | 0,1 | -29,6 | 0,3 | 0,1 |
| 60 | 50 | 0 | 0,00059 | 56,0 | 5,7 | -30,4 | 56,3 | 6,0 | -30,1 | 0,5 | 0,3 |
| 60 | 60 | 0 | 0,00147 | 52,1 | 11,7 | -31,0 | 52,5 | 12,3 | -30,5 | 0,8 | 0,6 |
| 60 | 80 | 0 | 0,00329 | 44,5 | 24,5 | -31,4 | 44,6 | 26,1 | -31,0 | 1,7 | 1,1 |

Farbabweichungen bei Flächendeckungskombinationen von Cyan, Magenta und Gelb (Fortsetzung)

| C | M | Y | ΔE_s | L^* | a^* | b^* | \widehat{L}^* | \widehat{a}^* | \widehat{b}^* | ΔE_{ab}^* | ΔE_{2000}^* |
|-----|-----|-----|--------------|-------|-------|-------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------|---------------------|
| 60 | 90 | 0 | 0,04173 | 40,3 | 32,1 | -31,8 | 40,5 | 33,9 | -30,9 | 2,0 | 1,2 |
| 60 | 100 | 0 | 0,04526 | 35,4 | 41,3 | -32,5 | 36,4 | 42,2 | -30,5 | 2,4 | 1,4 |
| 80 | 0 | 10 | 0,00250 | 65,3 | -30,4 | -32,1 | 66,0 | -31,6 | -31,2 | 1,7 | 0,9 |
| 80 | 0 | 30 | 0,00094 | 64,1 | -34,5 | -20,0 | 64,5 | -35,7 | -19,2 | 1,5 | 0,8 |
| 80 | 0 | 50 | 0,00028 | 63,1 | -38,4 | -6,6 | 63,2 | -39,4 | -6,5 | 1,0 | 0,4 |
| 80 | 0 | 80 | 0,00124 | 61,7 | -43,3 | 13,6 | 61,3 | -44,0 | 14,4 | 1,1 | 0,6 |
| 80 | 0 | 100 | 0,00072 | 60,6 | -46,6 | 31,6 | 60,2 | -46,1 | 29,9 | 1,8 | 0,8 |
| 80 | 5 | 0 | 0,00601 | 65,5 | -24,8 | -37,6 | 64,8 | -26,1 | -37,5 | 1,5 | 0,8 |
| 80 | 10 | 0 | 0,00314 | 63,6 | -22,3 | -37,9 | 63,3 | -23,8 | -37,7 | 1,5 | 0,7 |
| 80 | 20 | 0 | 0,00297 | 60,4 | -17,5 | -37,8 | 60,1 | -19,1 | -38,0 | 1,7 | 0,8 |
| 80 | 30 | 0 | 0,00156 | 57,0 | -12,9 | -38,1 | 56,8 | -14,2 | -38,4 | 1,4 | 0,6 |
| 80 | 40 | 0 | 0,00234 | 54,1 | -7,9 | -37,9 | 53,5 | -9,0 | -38,7 | 1,5 | 0,8 |
| 80 | 50 | 0 | 0,00056 | 50,2 | -2,6 | -38,4 | 50,1 | -3,5 | -38,9 | 1,1 | 0,5 |
| 80 | 60 | 0 | 0,00048 | 46,9 | 3,1 | -38,5 | 46,6 | 2,3 | -39,1 | 1,1 | 0,6 |
| 80 | 80 | 0 | 0,00015 | 39,7 | 14,8 | -38,8 | 39,4 | 15,1 | -39,2 | 0,6 | 0,3 |
| 80 | 90 | 0 | 0,00509 | 35,8 | 22,0 | -39,1 | 35,7 | 22,2 | -39,1 | 0,2 | 0,1 |
| 80 | 100 | 0 | 0,00558 | 31,3 | 30,0 | -39,8 | 31,9 | 29,9 | -38,7 | 1,2 | 0,6 |
| 90 | 5 | 0 | 0,00385 | 61,4 | -29,6 | -43,1 | 60,9 | -30,6 | -42,7 | 1,2 | 0,6 |
| 90 | 10 | 0 | 0,00268 | 59,8 | -27,0 | -43,1 | 59,4 | -28,4 | -42,8 | 1,4 | 0,7 |
| 90 | 20 | 0 | 0,00179 | 56,5 | -22,5 | -43,1 | 56,4 | -23,8 | -43,0 | 1,3 | 0,6 |
| 90 | 30 | 0 | 0,00222 | 53,7 | -17,7 | -42,8 | 53,3 | -19,0 | -43,2 | 1,4 | 0,7 |
| 90 | 40 | 0 | 0,00293 | 50,9 | -12,8 | -42,5 | 50,1 | -14,0 | -43,3 | 1,7 | 0,9 |
| 90 | 50 | 0 | 0,00174 | 47,4 | -7,3 | -42,5 | 46,9 | -8,8 | -43,4 | 1,8 | 0,7 |
| 90 | 60 | 0 | 0,00125 | 44,1 | -1,9 | -42,7 | 43,6 | -3,2 | -43,5 | 1,6 | 0,8 |
| 90 | 80 | 0 | 0,00027 | 37,2 | 9,0 | -42,8 | 36,8 | 9,0 | -43,3 | 0,6 | 0,3 |
| 90 | 90 | 0 | 0,00752 | 33,6 | 15,8 | -43,0 | 33,3 | 15,7 | -43,1 | 0,3 | 0,3 |
| 90 | 100 | 0 | 0,00691 | 29,5 | 24,4 | -43,0 | 29,8 | 23,0 | -42,6 | 1,5 | 0,7 |
| 100 | 0 | 10 | 0,01288 | 55,7 | -40,6 | -44,5 | 57,8 | -41,5 | -42,2 | 3,3 | 2,2 |
| 100 | 0 | 30 | 0,00818 | 54,3 | -47,0 | -33,4 | 56,1 | -47,5 | -31,1 | 3,0 | 2,0 |
| 100 | 0 | 50 | 0,00190 | 53,7 | -52,2 | -20,4 | 54,6 | -53,2 | -19,4 | 1,6 | 1,1 |
| 100 | 0 | 80 | 0,00098 | 52,2 | -60,0 | -2,5 | 52,3 | -61,0 | -0,3 | 2,4 | 1,2 |
| 100 | 0 | 100 | 0,00005 | 50,9 | -66,0 | 13,3 | 51,0 | -65,4 | 13,5 | 0,6 | 0,2 |
| 100 | 5 | 0 | 0,00196 | 56,6 | -35,8 | -49,6 | 56,8 | -35,4 | -48,1 | 1,6 | 0,5 |
| 100 | 10 | 0 | 0,00099 | 55,1 | -33,2 | -49,4 | 55,4 | -33,3 | -48,1 | 1,3 | 0,5 |
| 100 | 20 | 0 | 0,00047 | 52,4 | -28,5 | -48,8 | 52,6 | -28,8 | -48,1 | 0,8 | 0,4 |
| 100 | 30 | 0 | 0,00036 | 49,6 | -24,0 | -48,5 | 49,7 | -24,2 | -48,1 | 0,5 | 0,2 |
| 100 | 40 | 0 | 0,00058 | 47,0 | -19,1 | -48,0 | 46,8 | -19,4 | -48,0 | 0,4 | 0,2 |
| 100 | 50 | 0 | 0,00041 | 43,9 | -14,0 | -47,8 | 43,7 | -14,4 | -47,9 | 0,4 | 0,2 |
| 100 | 60 | 0 | 0,00019 | 40,6 | -8,8 | -47,9 | 40,7 | -9,1 | -47,8 | 0,3 | 0,2 |
| 100 | 80 | 0 | 0,00029 | 34,6 | 2,3 | -47,3 | 34,3 | 2,5 | -47,3 | 0,3 | 0,2 |
| 100 | 90 | 0 | 0,00030 | 31,3 | 8,7 | -47,3 | 31,1 | 8,8 | -46,9 | 0,4 | 0,2 |
| 100 | 100 | 0 | 0,00019 | 27,6 | 15,7 | -47,3 | 27,7 | 15,5 | -46,3 | 1,0 | 0,3 |

Farbabweichungen bei Flächendeckungskombinationen von Cyan, Magenta und Gelb (Fortsetzung)

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|------|--|----|
| 3.1 | Strukturlose, aneinander angrenzende Farbfelder in neutralem Umfeld für den Farbenvergleich | 7 |
| 3.2 | Elektromagnetische Strahlung | 8 |
| 3.3 | Schematische Darstellung der Verteilung von Zapfen (blaue Kreise) und Stäbchen (rote Punkte) auf der Netzhaut [Fun06] | 10 |
| 3.4 | Spektrale Empfindlichkeit der Stäbchen (R) und Zapfen im kurzwelligen (S) Blau-, im mittelwelligen (M) Grün- und im langwelligen (L) Rotbereich des Lichts, jeweils relativ zur maximalen Empfindlichkeit der Sehzelle dargestellt [Bow81] | 10 |
| 3.5 | Addition und Subtraktion der M- und L-Absorptionskurven [Fun06] | 11 |
| 3.6 | Gegenfarbpaare [Fun06] | 11 |
| 3.7 | Optische Täuschungen am Beispiel der Helligkeitskonstanz [Bac08] (links) und des Hermann-Gitters (rechts) | 12 |
| 3.8 | Relative Strahlungsverteilungsfunktionen der Normlichtarten D65, D50 und A | 14 |
| 3.9 | Dichteverteilung der Zapfen und Stäbchen in Abhängigkeit der Winkeldifferenz zur Fovea [Bie91] | 15 |
| 3.10 | Involvierte Netzhautbereiche um die Fovea bei 2°- und 10°-Standardbeobachterbedingungen [Fun06] | 16 |
| 3.11 | Farbmessung mit Prisma und Photodiodenzeile [Bul06] | 16 |
| 3.12 | Normfarbtafel mit den Schwellenellipsen nach MACADAM [Mac35] (Die Ellipsen sind gegenüber dem Maßstab der Koordinaten x, y zehnfach vergrößert.) | 18 |
| 4.1 | Pointillismus: „Der Papstpalast in Avignon“ von Paul Signac (1900) [Sig06] . | 21 |
| 4.2 | Der Übereinanderdruck von drei Primärfarben idealisiert dargestellt [Her06]. | 23 |
| 4.3 | Diffuse Streuung des Lichts in Bedruckstoff | 25 |
| 4.4 | Dreidimensionale Darstellung einer Punktstreuungsfunktion [Uki10]. | 26 |

| | | |
|-----|--|----|
| 4.5 | Farbspaltungseffekte [Beh93] (links) und Mikroskopische Betrachtung eines Rasterpunktes [Pau97] (rechts) | 27 |
| 4.6 | Dichteverteilung innerhalb eines Druckpunktes (Inkjet) [Her02] | 27 |
| 4.7 | ISF als Erweiterung des NEUGEBAUER Modells [Her09] | 28 |
| 4.8 | Rasterpunkte unterschiedlicher Größe [Pau97] | 29 |
| 4.9 | Abstrahierte Rasterpunkte [Pau97]. | 29 |
| 5.1 | Spektrale Empfindlichkeit des Empfängersystems nach DIN 16536-2 zur Bestimmung der A_{eff} und die Remission der betreffenden Primärfarbe Magenta [Dat09] | 33 |
| 5.2 | Spektrale Empfindlichkeit des Empfängersystems nach RODRIGUEZ zur Bestimmung der A_{effRod}^a und die Remission der Primärfarbe Magenta [Dat09] . | 34 |
| 5.3 | Spektrale Empfindlichkeit des Empfängersystems zur Bestimmung der $A_{eff}^a(\lambda)$ bezüglich jeder Wellenlänge und die Remission einer möglichen Primärfarbe Magenta [Dat09] | 35 |
| 5.4 | Gegenüberstellung der nominellen Flächendeckung $a = 50\%$ und $A_{eff}^{50\%}(\lambda)$ am Beispiel einer Primärfarbe Magenta [Dat09] | 36 |
| 5.5 | Berechnete, effektive, spektrale Flächendeckungsverläufe bezüglich verschiedener nomineller Flächendeckungen [Dat09] | 36 |
| 5.6 | „gemessene“ $A_{eff}^a(\lambda)$ von 100 nominellen Flächendeckungen in Magenta im Offsetdruckverfahren gedruckt. | 37 |
| 5.7 | Druckplattenbelichtungsdatei mit 70% Flächendeckung (1. von links); 70% auf der entwickelten Druckplatte (Mikroskopaufnahme) (2. von links); für die Randlängenbestimmung angepasste Aufnahme (3. von links); ermittelter Rand auf Mikroskopaufnahme projiziert (rechts) | 38 |
| 5.8 | Die Gewichtungsfunktion $\vartheta(a)$ bezüglich der gemessenen Randlänge mit Ausgleichsfunktion sowie rein empirisch generierte Werte | 39 |
| 6.1 | Konsolidierung | 42 |
| 6.2 | Kubelka Munk: Zwei entgegengerichtete Lichtstrahlen durch ein Farbschichtelement | 43 |
| 6.3 | Gegenüberstellung des überführten $\widetilde{A}_{50\%}(\lambda)$ nach PAUL und $A_{50\%}(\lambda)$ nach Definition 5.1. | 47 |
| 7.1 | Das inhomogene „Liegen“ der zuletzt gedruckten Druckfarbe [Pau97] | 50 |

| | | |
|------|--|----|
| 7.2 | 40% Flächendeckung auf einer Druckplatte in Cyan-Winkelung (links) und ein gedruckter Rasterton von 40% Magenta auf 40% Cyan mit zugehöriger Magenta-Druckplattenmaske (rechts), um die Effekte beim Übereinanderdruck von zwei Farben zu dokumentieren [Rie08]. | 50 |
| 7.3 | Strukturveränderungen im Überlappungsbereich eines 30% Magenta auf 30% Cyan Tonwerts [Raa09] (links Mikroskopaufnahme, rechts bildanalytische Auswertung) | 51 |
| 7.4 | Quotientenverlauf von Remissionen vollflächig übereinandergedruckter Primärfarben gemessenen und nach subtraktiver Farbmischung berechnet bezüglich Cyan auf Schwarz, Magenta auf Schwarz und Magenta auf Cyan. | 53 |
| 7.5 | Tonwertzunahme der Primärfarben auf vollflächig bedrucktem bzw. unbedrucktem Untergrund [Her04]. | 54 |
| 8.1 | Drei der verwendeten sieben Testcharts. | 56 |
| 8.2 | Erreichte Übereinstimmung zwischen modellierten und gemessenen Remissionen bei Kenntnis der Sekundär- und Tertiärfarben sowie der Übereinanderdruckparameter. | 57 |
| 8.3 | Dreidimensionale Darstellung der Farbabstände zwischen berechneten und gemessenen Farbvalenzen: die kleinsten Kugeln symbolisieren ΔE_{ab}^* -Abweichung kleiner 0,7 die größte beschreibt 3,7 ΔE_{ab}^* -Abweichung. | 57 |
| 8.4 | Test-Chart für die Validierung des Modells mit Bezugsfeldern (grün markiert) und Testfeldern (eines ist exemplarisch rot markiert). | 58 |
| 8.5 | Berechnete $\widehat{\beta_{cm}(\lambda)}$ und gemessene Remission $\beta_{cm}(\lambda)$ für Flächendeckungskombinationen von Cyan und Magenta. | 58 |
| 8.6 | Remissionen von Bedruckstoff und Magentahalbtönen (gemessen und berechnet) | 59 |
| 8.7 | Wellenlängenabhängige effektive Flächendeckungen $A_{effM}^a(\lambda)$ | 60 |
| 8.8 | $\vartheta(a)$, Stützstellen und Werte des funktionalen Zusammenhangs. | 60 |
| 8.9 | Remissionen der Bezugsfelder <i>C100</i> , <i>C50</i> , <i>C100M100</i> und <i>C50M50</i> | 61 |
| 8.10 | $A_{effC}^{50\%}(\lambda)$ Cyan und der Übereinanderdruckparameter $\gamma_{cm}(\lambda)$ | 61 |
| 8.11 | Die wellenlängenabhängigen effektiven Flächendeckungen bezüglich der nominellen Flächendeckungen 80%, 50% und 20% in AM60er- bzw. FM-Rasterung bei einer Druckfarbe. | 64 |
| 8.12 | Die wellenlängenabhängige Flächendeckung bezüglich verschiedener nomineller Flächendeckungen bei einer AM70er Rasterung mit verschiedenen stark pigmentierten Magenta-Druckfarben. | 66 |

| | | |
|------|--|----|
| 8.13 | Test-Chart zur Untersuchung des Farbabfalls und ΔE_{ab}^* -Verlauf bezüglich einer Spalte (grün markiert) von 50%-Rasterfeldern über die gesamte Bogenhöhe bezüglich des schwarz markierten Referenzfelds. | 67 |
| 8.14 | Test-Chart für die empirische Bestätigung der Gewichtungsfunktion $\vartheta(a)$ mit Bezugsfeldern (exemplarisch grün markiert) für die jeweiligen Testfelder (exemplarisch rot markiert). | 67 |
| 8.15 | Fehler bei der Berechnung eines einfarbigen Farbverlaufs bei Positionierung der Bezugsfelder in unmittelbarer Nähe und sonst. | 68 |
| 8.16 | Positionierung von Referenzstreifen (grün markiert) zur Berücksichtigung der Farbschichtdickenvariation der jeweiligen Bezugsfelder (rot markiert) und das Referenzfeld (schwarz markiert) für die relative Schichtdickenbetrachtung. . . | 69 |
| 8.17 | Fehler bei der Farbberechnung wenn die Sekundärfarbe nicht angedruckt verfügbar ist mit bzw. ohne Quotientenfunktion. | 70 |
| 8.18 | Fehler bei der Farbberechnung unter Verwendung der Quotientenfunktion wenn die Sekundärfarbe nicht angedruckt verfügbar ist gegenüber den Ergebnissen der NEUGEBAUER-Gleichung unter Verwendung der Volltonremission der Sekundärfarbe. | 71 |
| 8.19 | Remissionen des verwendeten Bedruckstoffs und einer Magentafarbe (links) sowie die individuelle, wellenlängenabhängige Flächendeckungen $A_{eff}^a(\lambda)$ bezüglich verschiedener nomineller Flächendeckungen von Magenta in den drei Druckverfahren (rechts). | 72 |
| 8.20 | Stützstellen und funktionaler Zusammenhang der Gewichtungsfunktionen $\vartheta(a)$ (links) sowie dreidimensionale Darstellung der Farbabstände zwischen gemessenen und berechneten Farbvalenzen (rechts). Die kleinsten Kugeln symbolisieren Abweichungen kleiner $0,7 \Delta E_{ab}^*$, die größte Kugel beschreibt eine Abweichung von $3,5 \Delta E_{ab}^*$ -Einheiten. | 73 |
| 9.1 | Die gemessenen Randlängen mit mittlerer Streuung und der empirisch bestätigte funktionale Zusammenhang für $\vartheta(a)$ | 76 |
| 9.2 | Gemessene Helligkeitsveränderung bei Messreihen mit verschiedenem Messtakt | 76 |
| 9.3 | Einfluss des Messtakts bei verschiedenen Messgeräten [Zim10] | 77 |
| 11.1 | Vorhersage der Aufhellerwirkung bei 30%, 50% und 70% Magenta Rastertönen [Dat09]. | 87 |
| 11.2 | Gegenüberstellung von Remissionswerten gelber und schwarzer Volltöne auf Papier mit bzw. ohne optischem Aufheller mit Markierung im relevanten Wellenlängenbereich [Brü09]. | 87 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|------|--|----|
| 2.1 | Zeichen | 5 |
| 3.1 | ΔE , Wahrnehmbarkeitsschwellen im CIE- $L^*a^*b^*$ -Farbraum | 20 |
| 8.1 | Flächendeckungskombinationen von Cyan und Magenta mit zugehörigen Werten der Spektralwert-Metrik und der beiden Farbabstandsformeln. | 59 |
| 8.2 | Versuchsumgebung bei Inkjet, Flexodruck und Tiefdruck | 74 |
| 9.1 | Auswirkungen der mittleren Schwankungen in den Bezugsgrößen (ohne bzw. mit Berücksichtigung der Standardabweichung) auf das Ergebnis | 83 |
| 12.1 | Farbabweichungen bei Flächendeckungskombinationen von Cyan, Magenta und Gelb | 91 |

Literaturverzeichnis

- [Bac08] M. Bach. Die Hermann-Gitter-Täuschung: Lehrbucherklärung widerlegt. *Ophthalmologe*, 106:913–917, 2008.
- [Beh93] H. Behler. *Die Randstruktur von Druckpunkten - eine experimentelle Untersuchung der Farbspaltungsströmung*. PhD thesis, Technische Hochschule Darmstadt, 1993.
- [Bei00] W. Beier. *Handbuch der Printmedien; Kapitel 3*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 2000.
- [Ber97] F. Berg. *Isotrope Lichtstreuung in Papier - Neue Überlegungen zur Kubelka-Munk-Theorie*. PhD thesis, Technische Hochschule Darmstadt, 1997.
- [Bie91] R. Schmidt N. Bierbauer. *Biologische Psychologie*. Springer, Heidelberg, 1991.
- [Boe09] F. Boehme. Theoretische Untersuchungen zur passerschwankungsbedingten Farbdrift im mehrfarbigen autotypischen Rasterdruck. *Bachelor-Thesis an der Bergischen Universität Wuppertal*, 2009.
- [Bow81] K. Bowmaker. Visual pigments and colour vision in man and monkeys. *Journal of the Royal Society of Medicine*, 74, 1981.
- [Brü00] S. Brües. *Handbuch der Printmedien; Kapitel 1.4.2*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 2000.
- [Brü09] M. Dattner P. Urban S. Brües. UV/Vis-Spektroskopie zur Klärung der Einflüsse opt. Aufheller auf die Farbwahrnehmung von im Rasterdruckverfahren gedruckten Farben. *Bewilligter Antrag bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft*, 2009.
- [Bul06] F. Buleke. Kosteneinsparung durch Prozessstandardisierung und richtige Farbkommunikation. *CLC-Nord X-Rite, Hamburg*, 2006.
- [bvd08] Arbeitsgruppe Medienstandard Druck bvdM. *Medienstandard Standard Druck 2008*. Print + Media Forum AG, 2008.
- [CIE24] CIE. Empfehlung: Es ist eine Expertengruppe für Fragen der Farbmessung einzusetzen. *CIE-Proceedings*, 6:68, 1924.
- [CIE31] CIE. Experten-Ausschuß E-1.3.1: Empfehlung für Farbmessung 1-5. *CIE-Proceedings*, 8:19–29, 1931.

- [CIE59] CIE. Bericht des Farbmess Komitees. *CIE-Proceedings*, 14:91, 1959.
- [CIE63] CIE. Experten-Ausschuß E-1.3.1: Empfehlung 1. *CIE-Proceedings*, 15:108, 1963.
- [CIE71] CIE. *Experten-Ausschuß E-1.3.1: Colorimetry; official recommendations of the International Commission on Illumination (CIE)*. Bureau Central de la CIE, Paris, 1971.
- [CIE86] CIE. *Experten-Ausschuß E-1.3.1: Colorimetry 2nd Ed.; International Commission on Illumination (CIE) Publ. No. 15.2*. Central Bureau of the CIE, Vienna, 1986.
- [CIE01] CIE. Improvement to industrial colour-difference evaluation. *CIE-Proceedings*, 142:15, 2001.
- [Dat08] M. Dattner. Drucktechnisches Modell zur Farbvorhersage im Offsetdruck unter Berücksichtigung relevanter drucksystem-, farb- und papierspezifischer Parameter. *Wissenschaftliches Kolloquium an der Bergischen Universität Wuppertal, FB-E-DMT*, 51, 2008.
- [Dat09] P. Urban J. Rodriguez H. Mantler M. Dattner. Colour prediction model on basis of the wavelength dependent area coverage including the scattering of light and optical brightener. *IARIGAI*, 36:161–169, 2009.
- [Dem24] M.E. Demichel. *Procédé*, 26:17–21, 1924.
- [DIN92] DIN. *Deutsches Institut für Normung: DIN 5033 'Farbmessung'*. Beuth Verlag, Berlin, 1992.
- [DIN93] DIN. *Deutsches Institut für Normung: DIN 16527-3 Kontrollfelder Anwendung im Druck, Teil 3*. Beuth Verlag, Berlin, 1993.
- [DIN95] DIN. *Deutsches Institut für Normung: DIN 16536-2 Farbdichtemessung an Drucken, Teil 2*. Beuth Verlag, Berlin, 1995.
- [DIN97] DIN. *Deutsches Institut für Normung: DIN 16536-1 Farbdichtemessung an Drucken, Teil 1*. Beuth Verlag, Berlin, 1997.
- [Eng94] P. Engeldrum. The Color between the Dots. *JOURNAL OF IMAGING SCIENCE AND TECHNOLOGY*, 38:545–551, 1994.
- [Fun06] G. Funk. www.dma.ufg.ac.at/app/link/Grundlagen. E-Learning Plattform der Kunst Universität Linz, Stand: August 2010, 2006.
- [Gla09] I. Glanz. www.scheufelen.de/content/single-list.php?section=press. Papierfabrik Scheufelen, Leiningen, Stand: August 2010, 2009.
- [Goe81] S. Goelling. Überprüfung der Neugebauer-Gleichung unter Berücksichtigung der Lichtdiffusion. *Diplomarbeit am Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren der Technische Hochschule Darmstadt*, 1981.
- [GRA08] AGFA GRAPGICS. :Azura TS. *Datenblatt zum chemielosen Thermodruckplatten-system*, 2008.

- [Gru06] L. Gruendig. Messfehler, Fehlerfortpflanzung, Modellfehler. *Fehlerlehre und Statistik Script, Technische Universität Bern, Institut für Geodäsie und Geoinformationstechnik.*, 2006.
- [Hae84] F. Haeuser. *Die Entstehung des Farbeindrucks bei der autotypischen Farbmischung.* PhD thesis, Universität Bonn, 1984.
- [Hal02] K. Haller. www.karl-haller.de/Rastertechnologie/HTML-Rpm-Start.htm. Prof. Dr.-Ing. Karl Haller, Ehemals Hochschule München, Stand: August 2010, 2002.
- [Hau78] F.R. Ruckdeschel O.G. Hauser. Yule-Nielsen effect in printing: a physical analysis. *Applied Optics*, 17:3376–3383, 1978.
- [Hüb93] A. Hübler. *Zur Struktur der Strahlungsprozesse in autotypisch gerasterten Druckbildern.* PhD thesis, Technische Universität Berlin, 1993.
- [Hei05] Heidelberger. www.innovations-report.de/html/berichte/unternehmensmeldung/bericht-59735.html. innovations-report, Stand: August 2010, 2005.
- [Hei07] Heidelberger. *Einführung in die Rastertechnologie.* Heidelberger Druckmaschinen AG, Heidelberg, 2007.
- [Her02] P. Emmel R. D. Hersch. Modelling Ink Spreading for Color Prediction. *JOURNAL OF IMAGING SCIENCE AND TECHNOLOGY*, 46:237–247, 2002.
- [Her04] P. Emmel R. D. Hersch. Spectral prediction and dot surface estimation models for halftone prints. *IS+T/SPIE Electronic Imaging Symposium*, 5293:356–369, 2004.
- [Her06] M. Hebert R. Hersch. Interaction between Light, Paper and Color Halftones: Challenges and Modelization Approaches. *IS+T European Conference on Color in Graphics, Imaging and Vision*, 3:1–7, 2006.
- [Her09] M. Hebert M. Brichon T. Bugnon R. Hersch. Deducing Ink Spreading Curves from Reflection Spectra Acquired Within Printed Color Images. *IS+T European Conference on Color in Graphics, Imaging and Vision*, 7:0305021–0305027, 2009.
- [Kip00] H. Kipphan. *Handbuch der Printmedien.* Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 2000.
- [Kod08] Kodak. Violet Print, Digital Press. *Datenblatt*, 2008.
- [Kub31] F. Munk P. Kubelka. Ein Beitrag zur Optik der Farbanstriche. *Zeitschrift für technische Physik*, 11, 1931.
- [Kub54] P. Kubelka. New contributions to the optics of intensely light-scattering material, part II: Non-homogeneous layers. *Journal of the Optical Society of America*, 44:330–335, 1954.
- [Lan93] H. Lang. *Farbmetrik in „Bergmann Schaefer: Optik-Lehrbuch der Experimentalphysik“; Band 3 ; 9. Auflage.* Walter de Gruyter Verlag, Berlin, 1993.
- [Lan95] H. Lang. *Farbwiedergabe in den Medien.* Muster-Schmidt Verlag, Göttingen, 1995.

- [Luo01] G. Cui B. Rigg M. R. Luo. The development of the CIE 2000 colour difference formula. *Color Research and Application*, 26:340–350, 2001.
- [Mac35] D. MacAdam. Maximum visual efficiency of colored materials. *Journal of the Optical Society of America*, 25:808–834, 1935.
- [Mac49] W. Brown D. MacAdam. Visual sensitivities to combined chromaticity and luminance differences. *Journal of the Optical Society of America*, 39:808–834, 1949.
- [Mil08] D. Milosavljevic. Auswirkungen von Farbabfall und Zonenvariation im Bogenoffsetdruck. *Ausarbeitung im Spezialisierungsmodul „Medientechnologie“ an der Bergischen Universität Wuppertal*, 2008.
- [Mur36] A. Murray. A monochrom reproduction of photograving. *Journal of Franklin Institute*, 221:721–744, 1936.
- [Neu37] H.E.J. Neugebauer. Die theoretischen Grundlagen des Mehrfarbendrucks. *Zeitschrift fuer wissenschaftliche Photographie*, 36:73–89, 1937.
- [Pau97] A. Paul. *Drucktechnische Farbschwankungen im Offsetdruck und ihre farbmtrische Bewertung in verschiedenen Farbraumbereichen*. PhD thesis, Hochschule der Künste Berlin, 1997.
- [Raa09] T. Raabe. Strukturen von Farbschichten bei der Farbannahme im Offsetdruck. *Ausarbeitung im Spezialisierungsmodul „Medientechnologie“ an der Bergischen Universität Wuppertal*, 2009.
- [Ric80] M. Richter. *Einführung in die Farbmetrik*. Walter de Gruyter Verlag, Berlin, 1980.
- [Ric96] K. Richter. *Computergrafik und Farbmetrik*. VDE Verlag, Berlin, 1996.
- [Rie08] R. Riedl. Farbannahme im Offsetdruck - experimentelle Untersuchungen in Labor und Praxis. *Wissenschaftliches Kolloquium an der Bergischen Universität Wuppertal, FB-E-DMT*, 47, 2008.
- [Rod82] G. Fischer J. Rodriguez. Ein physikalisches Modell für die Beschreibung von Lichtstreuungsprozessen. *Applied Optics*, 17:3376–3383, 1982.
- [Rod03] C. Biendarra H. Mantler J. Rodriguez. A bridge between colour and process-related magnitudes in autotypic printing. *IARIGAI*, 30:119–125, 2003.
- [Rog00] G. Rogers. A Generalized Clapper-Yule Model of Halftone Reflectance. *Color Res. Appl.*, 25:402–407, 2000.
- [Ros04] A. Rosenberg. Berücksichtigung der Materialeigenschaften und der Messmethodik bei der Vereinbarung von Farbtoleranzen für die Lieferung von Offsetdruckfarben. *FOGRA, Forschungsbericht*, Nr. 50.034, 2004.
- [Sch02] K. Schlaepfer. *Farbmetrik in der grafischen Industrie*. UGRA, 2002.

- [Sig06] P. Signac. http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/7d/Paul_Signac_Palais_des_Papes_Avignon.jpg. Wikimedia Commons, Stand: August 2010, Gallery: Musée d'Orsay, Paris, 2006.
- [Sin06] R. Hersch A. Singla. An Ink Spreading Model for Dot-on-Dot Spectral Prediction. *IS+T Color Imaging Conference*, 14:38–43, 2006.
- [Tes10] R. Tessloff. www.wasistwas.de/fileadmin/mediafiles/. Tessloff Verlag, Stand: August 2010, 2010.
- [Uki10] M. Ukishima. *Prediction and Evaluation of Color Halftone Print Quality Based on Microscopic Measurement*. PhD thesis, University of Eastern Finland, 2010.
- [Urb94] P. Urban. *Beitrag zur Bewertung der frequenzmodulierten Bildraasterungsverfahren*. PhD thesis, Technische Hochschule Darmstadt, 1994.
- [Urb05] Philip Urban. *Metamere und multispektrale Methoden zur Reproduktion farbiger Vorlagen*. PhD thesis, Technische Universität Hamburg, 2005.
- [Wit06] J. Witt. *Verfahren zur Reproduktion von im CIELAB-Farbraum definierten Farben*. Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) VIII-1, Mess- und Prüftechnik, Sensorik, 2006.
- [Yul51] W.J. Nielsen J.A.C Yule. The penetration of light into paper and its effect on halftone reproductions. *TAGA*, 3:65–76, 1951.
- [Yul53] F.R. Clapper J.A.C. Yule. The effect of multiple internal reflections on the densities of halftone prints on paper. *Journal of the Optical Society of America*, 43:600–603, 1953.
- [Zim10] R. Fendt A. Zimmer. Ergebnis-Reproduzierbarkeit bei Spektralfotometern. *Bachelor-Projekt an der Bergischen Universität Wuppertal*, 2010.

Lebenslauf

von Michael Dattner

- 18. April 1972 Geboren in Gerolstein
- 1978 - 1991 Grundschule und Gymnasium in Gerolstein,
Abitur
- 1991 - 2005 Studium der Mathematik an der
Technischen Universität Kaiserslautern,
Dipl.-Math.
- 2005 - 2010 Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der
Bergischen Universität Wuppertal
im Fachbereich E Druck- und Medientechnologie,
Dr.-Ing.
- seit Januar 2011 Projektleiter bei BST-International in Bielefeld
im Bereich Entwicklung: Inline Spektralmesssysteme

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbst und nur unter Verwendung der in der Arbeit genannten Hilfen und Literatur angefertigt habe.

Einige in dieser Arbeit gefundenen Ergebnisse wurden in [Dat08] und [Dat09] veröffentlicht. Ansonsten wurde die Arbeit bis jetzt weder in Teilen noch im Ganzen veröffentlicht.

Wuppertal, 15. September 2010