

Lux junior 2005
23. bis 25.9.05 Dörnfeld

Jörg Meyer-Brenken

Ralph Samuel

Leuchtdichteschätzung mit digitalen Fotoapparaten

Medienprojekt
TU Ilmenau
Fachgebiet Lichttechnik
2005

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Verzeichnis der Verwendeten Formelzeichen	III
1 Einleitung	1
2 Grundlegende Herangehensweise	3
2.1 Zusammenhang von Leuchtdichte und Grauwerten	3
2.2 Erfassung der benötigten Variablen	6
3 Vergleich der zur Verfügung stehenden Fotoapparate	8
3.1 Vorstellung der verwendeten Fotoapparate	8
3.2 Kalibrierung am Leuchtdichte-Normal	10
3.3 Testbilder mit Baustellenscheinwerfer	13
3.4 Vorläufiges Fazit	16
4 Nutzung der RAW-Fähigkeit	17
4.1 Diagnostic Mode	18
4.2 Aufbau der RAW-Dateien	18
4.3 Problemfelder bei Verwendung der RAW-Dateien	19
5 Korrekturen / Kalibrierung	21
5.1 Dunkelstrom	23
5.1.1 Erläuterung und Versuchsaufbau	23
5.1.2 Auswertung	23
5.2 Linearisierung	28
5.2.1 Erläuterung und Versuchsaufbau	28
5.2.2 Auswertung	28

5.3	Shading	34
5.3.1	Erläuterung und Versuchsaufbau	34
5.3.2	Auswertung	35
5.4	Spektrale Anpassung	39
5.4.1	Erläuterung und Versuchsaufbau	39
5.4.2	Auswertung	41
5.5	Bewertung der Genauigkeit	44
6	Anwendung- Das Programm <i>LUMIPIX</i>	45
6.1	Funktionsweise	45
6.2	Bewertung der Genauigkeit	47
7	Fazit	50
	Erklärung	51
	Anhang	52
	Literaturverzeichnis	57

Verwendete Formelzeichen

(In Reihenfolge ihres Auftretens)

$Q(x, y)$: Ladung eines Pixels mit den Koordinaten x und y auf der CCD-Matrix
α_e	: Mittlerer Absorptionskoeffizient der CCD-Matrix
Φ_e	: Strahlungsfluss
E_e	: Bestrahlungsstärke
A_2	: Bestrahlte Fläche, entspricht hier der Fläche der CCD-Matrix
t	: Belichtungszeit
H_e	: Bestrahlung
$GW(x, y)$: Grauwert eines Pixels mit den Koordinaten x und y
ISO	: Der ISO-Skala entsprechende Empfindlichkeit der CCD-Matrix
$L_e(\gamma_2)$: Strahldichte
Ω_{p2}	: Raumwinkelprojektion, vom beleuchteten Punkt betrachtet
τ_{obj}	: Transmissionsverluste des Objektivs
γ_2	: Halber Öffnungswinkel des vom beleuchteten Punkt betrachteten Raumwinkels
Ω_0	: Einheits-Raumwinkel
$D_{\ddot{o}}$: Durchmesser der Öffnungsblende des Objektivs
f'	: Bildseitige Brennweite
k	: Blendenzahl
L_v	: Leuchtdichte

$$L_v = x_1 \cdot f(t, k, ISO) \cdot GW \quad (1)$$

Kapitel 1

Einleitung

CCD¹-Elemente werden schon seit geraumer Zeit in lichttechnischen Messgeräten eingesetzt. Mit ihrer Hilfe ist es möglich, lichttechnische Messungen durchzuführen, für die normalerweise teure Spezialmessgeräte benötigt werden. Ein Leuchtdichte-Messgerät von hoher Qualität kostet heute ca. 2500 Euro bis 3500 Euro. Ein digitaler Fotoapparat mit CCD-Elementen zur Bilderfassung ist jedoch schon deutlich unter tausend Euro erhältlich. Die Entwicklung in den letzten Jahren hat CCD-Elemente qualitativ hochwertiger, preiswerter, robuster und kleiner gemacht. Mit ihrer Hilfe ist es möglich, Leuchtdichteverteilungen preisgünstig und mit ausreichender Genauigkeit zu messen. Das wird vor allem deutlich, wenn man die Einsatzmöglichkeiten betrachtet. Mit herkömmlichen Spezialmessgeräten, zumeist Einzelempfänger, war es lediglich möglich, punktweise Messungen durchzuführen. Leuchtdichteverteilungen über ein großes Raster zu messen, war entweder sehr zeitaufwendig oder gar nicht zu bewältigen. CCD-Kameras sind in der Lage, ein gesamtes Sehfeld mit einer oder wenigen Messungen orts aufgelöst zu beurteilen. Ein weiterer Aspekt ist die einfache Handhabung der Datenspeicherung und Datenauswertung [1]. Leuchtdichte-Messungen werden in den unterschiedlichsten Bereichen benötigt. Wann immer es darum geht, die Helligkeit einer Lichtquelle oder einer reflektierenden Oberfläche zu bewerten, kommen Leuchtdichte-Messgeräte zum Einsatz. So wird zum Beispiel die Befeuerng von Landepisten auf Flughäfen auf ausreichende Helligkeit geprüft, werden Lichtverhältnisse am Himmel beobachtet oder die Ergonomie von Arbeitsplätzen

¹ charge-coupled device: Ladungsgekoppelter Baustein

(Helligkeitsverteilung von Monitoren und Büroräumen) untersucht. Auch in der Industrie haben günstige Messlösungen unter Einsatz von CCD-Elementen die Aufmerksamkeit auf sich gelenkt. So entwickelt die Firma *BEHR HELLA Thermocontrol* beispielsweise ein „bildgebendes Prüfsystem unter Verwendung einer low-cost CCD-Kamera zur Kontrolle und Einmessung der Leuchtdichten der Nachtsichtkomponenten von Fahrzeug-Klimabediengeräten in der Serienfertigung“.

Ziel dieser Arbeit ist es, mit einem digitalen Fotoapparat eine Leuchtdichteverteilung zu messen². Dazu ist eine genaue Untersuchung der Parameter des Fotoapparates nötig. Es sollen einige Einflußfaktoren, wie z.B. Dunkelstrom, spektrale Empfindlichkeit, Shading, etc., ermittelt und soweit möglich korrigiert werden. Bilder, die mit dem digitalen Fotoapparat von einer Szene gemacht werden, sollen dann mit dem eigens dafür geschriebenen Programm *LUMIPIX* ausgewertet werden.

² Auf Grund der zu erwartenden Ungenauigkeit lautet das Thema dieser Ausarbeitung jedoch „Leuchtdichteschätzung mit digitalen Fotoapparaten“. Aus dem selben Grund wird im Folgenden stets von „schätzen“ anstelle von „messen“ gesprochen.

Kapitel 2

Grundlegende Herangehensweise

2.1 Zusammenhang von Leuchtdichte und Grauwerten

Die in diesem Medienprojekt untersuchten Fotoapparate setzen als Bildsensor jeweils eine CCD-Matrix ein. Die Bildaufnahme mit CCD-Elementen lässt sich nach Krüger in vier Phasen teilen [2, S. 9ff]: Absorption, Integration, Transport und Ladungs-Spannungswandlung.

Aufgrund des inneren photoelektrischen Effekts entstehen durch die Absorption von Photonen Ladungsträgerpaare. Durch das Anlegen definierter Spannungen während einer definierten Integrationszeit t , werden die generierten Elektronen aufsummiert. Es lässt sich folgender Zusammenhang zwischen der Ladung eines Pixels mit den Koordinaten x und y und dem auf den Sensor auftreffenden Strahlungsfluss beschreiben:

$$Q(x, y) = \int_0^t \alpha_e \cdot \Phi_e \cdot d\tau \quad (2.1)$$

Die Ladung $Q(x, y)$ eines Pixels entspricht dem Integral der absorbierten¹ Anteile des Strahlungsflusses über die Zeit t . Sofern gleichmäßige Ausleuchtung des Empfängers vorausgesetzt werden kann, lässt sich der Strahlungsfluss durch das Produkt aus Bestrahlungsstärke und Fläche des Sensors ersetzen und man erhält:

¹ Der Absorptionskoeffizient α_e steht in diesem Fall nur für den Anteil der absorbierten Photonen, die zur Generierung von Ladungsträgern beitragen. Es wird darunter also auch der Einfluss der eingestellten ISO-Empfindlichkeit subsummiert.

$$Q(x, y) = \int_0^t \alpha_e \cdot E_e \cdot A_2 \cdot d\tau \quad (2.2)$$

Geht man davon aus, dass sowohl die Bestrahlungsstärke E_e als auch der Absorptionsfaktor α_e über den Zeitraum der Integration als konstant angesehen werden können, und führt eine Proportionalitätskonstante $x_1 = A_2 \cdot \alpha_e$ ein, so ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$Q(x, y) = x_1 \cdot E_e \cdot t = x_1 \cdot H_e = x_2 \cdot ISO \cdot H_e \quad (2.3)$$

Die somit entstandene Ladung eines Pixels $Q(x, y)$ wird in einem dritten Schritt mittels geeigneter Transportmechanismen ausgelesen. Abschließend wird die Ladung in eine Spannung gewandelt. Auf die konkrete Funktionsweise einer CCD-Matrix soll hierbei nicht näher eingegangen werden, zumal verschiedene Varianten realisiert werden. Es sei an dieser Stelle nur auf die gängige Literatur verwiesen [3] [4].

Im Allgemeinen wird die Spannung $U_{CCD}(x, y)$ mittels eines ADU² in Datenworte überführt. Diese Datenworte repräsentieren Grauwerte (GW)

$$GW(x, y) = f(Q(x, y)) \quad \text{bzw.} \quad GW(x, y) = f(x_2 \cdot ISO \cdot H_e) \quad (2.4)$$

Da vor dem CCD-Element des Fotoapparates eine Optik angebracht wird, ist der Raumwinkel, aus dem Strahlung auf ein Pixel einfallen kann, begrenzt. Das Raumwinkelprojektionsgesetz in seiner allgemeinen Form [5, S.39] bietet somit den Ansatz, um einen Zusammenhang zwischen der Strahldichtevertelung der aufgenommenen Szene und der Bestrahlungsstärke auf dem CCD-Sensor herzustellen:

$$E_e = \int_{\Omega_{p2}} L_e(\gamma_1) \cdot d\Omega_{p2} \quad (2.5)$$

Lässt man den natürlichen Randabfall [5, S.89/133] zunächst außer Betracht [siehe hierzu auch 5.3] und nimmt zusätzlich für die Leuchtdichtevertelung der Szene eine Lambert-Charakteristik an, das heißt $L \neq f(\gamma_1)$, so lässt sich die Bestrahlungsstärke auf der CCD-Matrix vereinfacht beschreiben:

² Analog-Digital-Umsetzer

$$E_e = \tau_{obj} \cdot L_e \cdot \pi \cdot \sin^2 \gamma_2 \cdot \Omega_0 \quad (2.6)$$

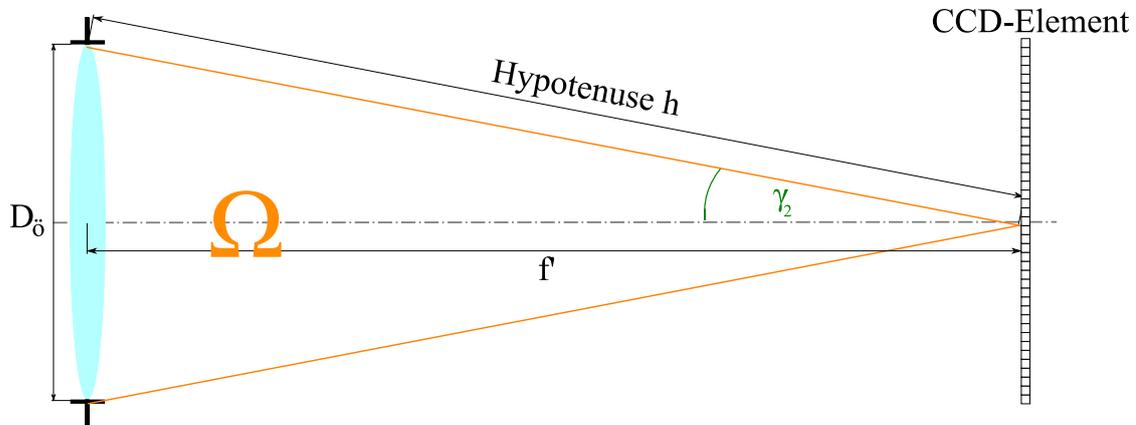


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung der Raumwinkelprojektion

$\sin \gamma_2$ ergibt sich hierbei als Quotient aus halbem Durchmesser der Öffnungsblende D_0 und Hypotenuse h . (vgl. Abb. 2.1) Im Regelfall werden jedoch beide Größen nicht angegeben, sondern müssen aus den bekannten Größen Brennweite f' und Blendenzahl $k = \frac{f'}{D_0}$ ermittelt werden.³ Mit etwas Umformen kann man jedoch beide Variablen eliminieren:

$$\sin^2 \gamma = \frac{D_0^2}{4 \cdot h^2} = \frac{D_0^2}{4 \cdot \left(f'^2 + \frac{D_0^2}{4}\right)} = \frac{1}{4 \cdot \left(\frac{f'^2}{D_0^2} + \frac{1}{4}\right)} = \frac{1}{4 \cdot k^2 + 1} \quad (2.7)$$

und erhält somit

$$E_e = \frac{\tau_{Obj} \cdot L_e \cdot \pi}{4 \cdot k^2 + 1} \cdot \Omega_0 \quad (2.8)$$

Nimmt man nach Coutelier einen logarithmischen Zusammenhang zwischen den Grauwerten und der Bestrahlung an [6],⁴ so ergibt sich zusammen mit Gleichung 2.4 und Gleichung

³ Zwar kann für kleine Winkel, das heißt $\gamma_2 \leq 10^\circ$ mit vernachlässigbarem Fehler $\tan^2 \gamma_2$ anstelle von $\sin^2 \gamma_2$ geschrieben werden, bei der vorliegenden Nikon Coolpix 990 lässt sich jedoch die Blendenzahl k zwischen 2,5 und 11,1 variieren. Somit ist der größtmögliche halbe Öffnungswinkel $\gamma_{2,max} = 11,3^\circ$.

⁴ Der genaue funktionale Zusammenhang zwischen H und GW wird im Allgemeinen auch von dem Farbraum abhängen, den GW repräsentiert [7]. Da Coutelier die L^* -Grauwerte des Lab -Farbraums als Grundlage wählt, ist ein logarithmischer Zusammenhang zwischen L^* und L naheliegend, da in der Definition L^* als $L^* = 116 \cdot \left(\frac{L}{L_n}\right)^{\frac{1}{3}}$ mit L_n als Normfarbwert eines Lambert-Strahlers unter der beleuchtenden Lichtart festgelegt ist.

chung 2.3 folgender Zusammenhang zwischen den Grauwerten des aufgenommenen Bildes und der Strahldichteverteilung in der Szene:

$$\begin{aligned} GW &= \frac{1}{x_3} \cdot \ln(x_2 \cdot ISO \cdot E_e \cdot t) = \frac{1}{x_3} \cdot \ln\left(x_2 \cdot ISO \cdot \frac{\tau_{Obj} \cdot L_e \cdot \pi}{4 \cdot k^2 + 1} \cdot \Omega_0 \cdot t\right) = \\ &= \frac{1}{x_3} \cdot \ln\left(x_4^{-1} \cdot L_e \cdot \frac{ISO \cdot \pi \cdot t}{4 \cdot k^2 + 1}\right) \end{aligned} \quad (2.9)$$

Löst man Gleichung 2.9 nach der Strahldichte L_e auf, so erhält man folgende Gleichung:

$$L_e = x_4 \cdot \frac{4 \cdot k^2 + 1}{ISO \cdot \pi \cdot t} \cdot e^{x_3 \cdot GW} \quad (2.10)$$

Geht man davon aus, dass die spektrale Empfindlichkeit des CCD-Elements mit Hilfe von Filtern zumindest annähernd an die spektrale Empfindlichkeit des menschlichen Auges angepasst wurde, das heißt $s(\lambda)_{Fotoapparat} \approx v(\lambda)$, so kann man Gleichung 2.10 auch für die Leuchtdichte L_v aufstellen:

$$L_v = x_4 \cdot \frac{4 \cdot k^2 + 1}{t \cdot ISO \cdot \pi} \cdot e^{x_3 \cdot GW} \quad (2.11)$$

In Kapitel 3 soll versucht werden, analog zu Coutelier, geeignete Werte für x_4 und x_3 zu finden [6]. In Kapitel 5.2 wird der Zusammenhang zwischen den Grauwerten aus den CCD-Rohdaten, die einer niederen Farbmeterik entsprechen, und der Leuchtdichte erörtert werden.

2.2 Erfassung der benötigten Variablen

Um die gesuchten Werte für x_4 und x_3 ermitteln zu können, musste zunächst eine Möglichkeit gefunden werden, die Werte für Blendenzahl und Belichtungszeit zuverlässig zu erfassen. Die Variante, die Werte manuell festzulegen, schied von vornherein aus zweierlei Gründen aus:

Zum Einen müssten die Werte im Vorfeld separat mit Hilfe eines Belichtungsmesser ermittelt werden, um Unter- bzw. Überbelichtung weitestgehend zu vermeiden. Zum Anderen bleibt die Ungewissheit, ob der Fotoapparat tatsächlich die vorgegebenen Werte

einstellt. Beispielsweise auf Grund von Rundungsfehlern kann es passieren, dass die tatsächlich eingestellten Werte abweichen.

Eine verlässlichere Methode scheint hingegen die Nutzung der *EXIF*-Daten⁵ zu sein [8, S.161]. Dieser Standard wurde im Oktober 1995 von der *JEIDA*⁶ verabschiedet [9]. Die aktuelle Version 2.2 ist seit April 2002 im Rahmen der aktuellen Ausgabe der *DCF*⁷ gültig und baut auf den beiden gängigen Dateiformate jpeg und tiff auf [10] [11]. EXIF definiert Marken und Felder, in denen Metadaten festgehalten werden. Es beinhaltet dabei die in TIFF Rev. 6.0 [10, S. 335ff] beschriebenen Felder wie *Pixelanzahl*, *Breite* oder *Höhe* und fügt weitere hinzu. Neben der Möglichkeit für gerätespezifische Angaben wie *Hersteller* oder *Nutzerkommentar* ist mit den Tags 0x829D/0x9202, 0x829A/0x9201 und 0x8827 auch Platz für bildbezogene Angaben wie *Blendenzahl*, *Belichtungszeit* und *ISO-Empfindlichkeit* geschaffen. Wie in Kapitel 6 näher erläutert werden wird, wurde im Rahmen dieses Medienprojekts auf eine bestehende C++-Klasse zurückgegriffen [12].

Dennoch bleibt eine Restunsicherheit. Auch die (großzügig definierten) EXIF-Datenfelder haben eine begrenzte Genauigkeit. Die ISO-Empfindlichkeit wird durch eine 32bit Zahl gespeichert; bei Belichtungszeit und Blendenzahl werden jeweils separat Zähler und Nenner durch eine 32bit Zahl codiert. Weiterhin bleibt die nicht näher erörterte Frage, ob es eventuell zu einer Diskrepanz zwischen den vom Fotoapparat in die EXIF-Datenfelder geschriebenen und den tatsächlich auftretenden Werten kommt. In Kapitel 5.2 wird aus diesem Grund auch untersucht werden, in wiefern derartige Fehler auftreten und unter Umständen kompensiert werden können.

⁵ Exchangeable image format for digital still cameras: Austauschbares Bild-Datei-Format für digitale Fotoapparate

⁶ Japan Electronic Industry Development Association : Entwicklungsvereinigung der japanischen Elektronikindustrie

⁷ Design Rule for camera file system : Gestaltungsvorgabe für ein Kamera Dateisystem

Kapitel 3

Vergleich der zur Verfügung stehenden Fotoapparate

Im vergangenen Jahr wurde am Fachgebiet für Lichttechnik ein Medienprojekt zum Thema *Farbmanagement digitaler Kameras* angefertigt. Hierbei wurden drei digitale Fotoapparate auf die farbrichtige Darstellung verschiedener Vorlagen bei unterschiedlichen Lichtbedingungen untersucht. Aus den Ergebnissen der Untersuchungen geht die Nikon Coolpix 990 als leistungsfähigster Fotoapparat hervor [13, S. 51]. Ausgehend von den Ergebnissen dieses Medienprojektes haben wir eigene Untersuchungen angestellt, um einen für unsere Zwecke geeigneten Fotoapparat auszuwählen.

3.1 Vorstellung der verwendeten Fotoapparate

Derzeit stehen im Fachgebiet für Lichttechnik zwei verschiedene digitale Fotoapparate zur Verfügung. Das ist zum Einen die Coolpix 990 aus dem Hause Nikon und zum Anderen die Powershot A70 von Canon. Zunächst ist es erforderlich, eine Auswahl darüber zu treffen, welches der beiden Modelle besser zur Schätzung von Leuchtdichten geeignet ist. Die Entscheidung soll in zwei Schritten erfolgen. Zunächst werden die technischen Daten verglichen. Im zweiten Schritt werden nach der von Coutelier beschriebenen Methode zunächst Referenzaufnahmen am Leuchtdichtenormal gemacht [6]. Anschließend wird versucht, mit diesen Ergebnissen Aufnahmen verschiedener Leuchtdichteszenen auszuwerten. Zielstellung ist, eine grundlegende Aussage über die Genauigkeit der beiden Fo-

toapparate in Bezug auf die Schätzung von Leuchtdichten zu treffen.

Die Nikon Coolpix 990 ist ein etwas älterer digitaler Fotoapparat aus dem gehobenen Preissegment. Im Jahr ihrer Markteinführung 2000 kostete sie ca. 1250 Euro. Sie hat einen 0,56“ CCD-Chip, der 3,34 Megapixel liefert. Die Auflösung lässt sich in drei Stufen variieren: von 2.048 x 1.536 Bildpunkten bei höchster Qualität über 1.024 x 768 Bildpunkten in mittlerer Qualität bis zu niedriger Qualität mit 640 x 480 Bildpunkten. Die Daten sind in drei verschiedenen Formaten speicherbar. Es können JPEGs (.jpg) oder TIFFs (.tif), sowie im Diagnosemodus des Fotoapparats auch Rohdaten im RAW-Format gespeichert werden. Die Speicherung erfolgt auf einer Speicherkarte vom Typ „CompactFlash Typ1“, was die Größe des lesbaren Datenträgers für die Nikon Coolpix 990 auf 256 MB beschränkt. Der Fotoapparat verfügt außerdem über zwei Schnittstellen, die über einen PC bedient werden können: eine serielle Schnittstelle und eine USB-Schnittstelle (Version 1.x). Die Optik des Fotoapparats verfügt über einen 3-fach Zoom mit 38 mm bis 115 mm Brennweite. Die Lichtempfindlichkeit des Sensors lässt sich in drei ISO-Stufen (100/200/400) manuell einstellen, ebenso Belichtungszeit (1/1000 s bis 8 s) und Blendenzahl (F2,6 bis F11,4) [14]. Beim Arbeiten mit der Nikon hat sich allerdings herausgestellt, dass sich, zumindest im manuellen Modus, ein Blendenumfang von F2,5 bis F11,1 realisieren lässt. Warum die Angaben von den tatsächlich umsetzbaren Blendenzahlen abweichen, ist nicht bekannt und soll an dieser Stelle auch nicht untersucht werden.

Die Canon Powershot A70 ist seit 2003 auf dem Markt und kostet ca. 350 Euro. Ihr 1/2,7“ CCD-Chip liefert 3,2 Megapixel. Die Auflösung der Canon lässt sich in vier Stufen von 2.048 x 1.536 Bildpunkten bei höchster Qualität, 1600 x 1200 Bildpunkten und 1.024 x 768 Bildpunkten in mittlerer Qualität bis zu niedriger Qualität mit 640 x 480 Bildpunkten variieren. Die Bilder werden im JPEG-Format auf einer Speicherkarte vom Typ „CompactFlash Typ1“ gespeichert. Im Gegensatz zur Nikon gibt es hier nicht die Möglichkeit, sich die Rohdaten des Fotoapparates ausgeben zu lassen. Die Verbindung zum Computer wird über eine USB-Schnittstelle (Version 1.x) realisiert. Die Optik der Canon verfügt über einen 3-fach Zoom mit 38 mm bis 115 mm Brennweite. Die Lichtempfindlichkeit kann in vier Stufen von ISO 50, ISO 100, ISO 200 und ISO 400 manuell eingestellt

werden. Die Blenden der Powershot A70 reichen von F2,8 bis F8 und können ebenfalls manuell gewählt werden. Die Belichtungszeit lässt sich in 46 Schritten von 1/2000 s bis 15 s variieren [15].

Im Vergleich der beiden Fotoapparate lässt sich nach dem Betrachten der Datenblätter feststellen, dass die Nikon Coolpix 990 auf Grund ihrer Speichermöglichkeiten im RAW- und TIFF- und JPEG-Format einen Vorteil gegenüber der Canon bietet. Die Coolpix 990 hat auch im Bereich des Blendenumfangs leichte Vorteile gegenüber der Powershot A70. In punkto Auflösung und Optik gleichen bzw. ähneln sich die Werte beider Fotoapparate. Die Canon kann neben den drei Standard-Empfindlichkeiten ISO 100, ISO 200 und ISO 400 auch noch mit ISO 50 betrieben werden. Auch im Bereich der Belichtungszeit liegt die Canon leicht vorn, da sie über einen größeren Integrationsbereich messen kann. Vorläufig lässt sich keiner der beiden Fotoapparate als der „Geeigneter“ für dieses Medienprojekt feststellen. Es müssen weitere Kriterien zur Bewertung herangezogen werden.

3.2 Kalibrierung am Leuchtdichte-Normal

Zunächst wurde für beide Fotoapparate versucht, am Leuchtdichtenormal¹ gemäß Gleichung 2.11 Werte für x_3 und x_4 zu finden. Ein Leuchtdichtenormal ist eine kalibrierte Lichtquelle, bei der sich definierte Leuchtdichten einstellen und nahezu konstant halten lassen. Ferner bleibt die spektrale Verteilung des Lichts stets die selbe, da die Leuchtdichte nicht über den Lampenstrom variiert wird, sondern mit Hilfe einer Blende.

In diesem Versuch wurden Leuchtdichten von $L = 5 \frac{cd}{m^2}$ bis $L = 40960 \frac{cd}{m^2}$ untersucht. Die Abstufung erfolgte in $\sqrt[3]{2}$ -Schritten. Diese exponentielle Abstufung wurde gewählt, um im unteren Integrationszeitbereich eine ausreichende Genauigkeit zu erzielen, im oberen Bereich jedoch nicht unnötig viele Daten zu produzieren. Eine lineare Faktorisierung mit 2 beispielsweise, gäbe ein zu grobes „Abtastraster“.

Beide Fotoapparate wurden nacheinander vor dem Leuchtdichtenormal platziert (vgl.

¹ Leuchtdichtenormal LRS-455; letzte Kalibrierung: 27.09.1994

Leuchtdichtenormal

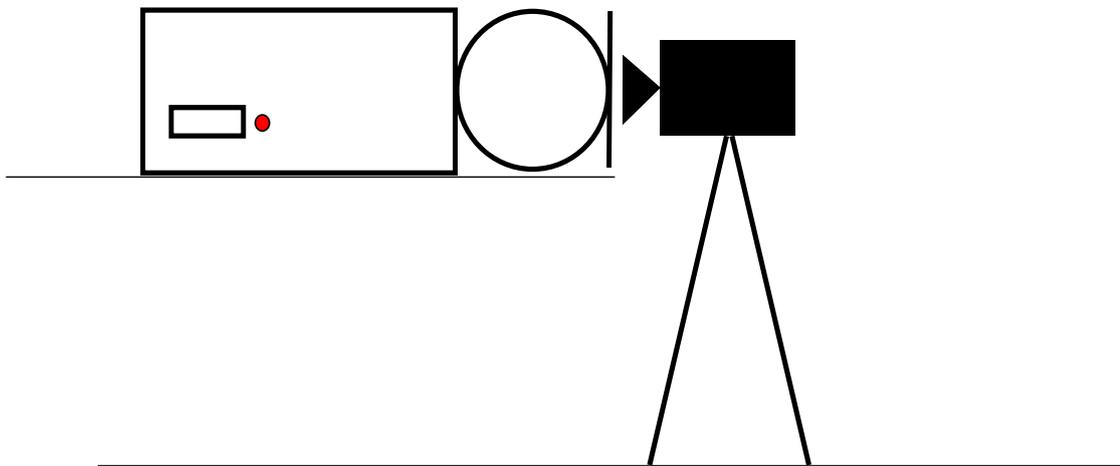
Nikon Coolpix 990 /
Canon Powershot A70

Abbildung 3.1: Versuchsaufbau am Leuchtdichtenormal

Abb. 3.1). Je Fotoapparat und Leuchtdichtewert wurde ein Foto gemacht. Bei der Nikon wurde ein TIFF gespeichert. Die übrigen Parameter der Nikon Coolpix 990 waren konstant bei:

$$f = \infty; f' = 23,2 \text{ mm}; ISO = 100; k = 4; t = 0,001 \text{ s}$$

Ebenso wurde mit der Canon verfahren. Sie zeichnete mangels Alternative allerdings nur ein Bild im JPEG-Format in höchster Qualität und Auflösung auf. Die übrigen Parameter der Canon Powershot A70 waren konstant bei:

$$f = \infty; f' = 16,2 \text{ mm}; ISO = 100; k = 4,8; t = 0,001 \text{ s}$$

Die Auswertung der Bilder erfolgte nach Coutelier [6] mittels Adobe Photoshop CS. Dabei gilt es zu ermitteln, wie sich die Helligkeitswerte (Luminanz-Werte) der von den beiden Fotoapparate gemachten Bildern verhalten. Die Bilder werden zunächst vom RGB-Farbraum in den Lab-Farbraum umgerechnet. Über die 10000 zentrumnahen Pixel wird der mittlere Helligkeitswert jedes Fotos ermittelt. Anschließend wird in einem Diagramm das Produkt aus Belichtung und ISO-Empfindlichkeit über die korrespondierenden Grau-

Canon		Nikon	
x_3	0,017	x_3	0,0161
x_4	0,4646	x_4	1,6138

Tabelle 3.1: Faktoren zur exponentiellen Annäherung an die Kennlinien

werte aufgetragen². Anschließend wurde die Kurve mit einer exponentiellen Trendlinie angenähert, wie Abbildung 3.2 zeigt. Deutlich sichtbar bei beiden Fotoapparaten ist, dass die Kennlinie für Grauwerte $GW > 245$ vom exponentiellen Verlauf abweicht. Wahrscheinlich greift hier eine Art Kniefunktion [3, S. 138]. Auch ist unschwer zu erkennen, dass die Nikon Coolpix einen mehr als doppelt so großen Dynamikumfang hat, als die Canon A70³. Weiterhin ist erkennbar, dass sich die Kennlinie der Nikon etwas besser annähern lässt, als die der Canon. Die Werte für x_3 beziehungsweise x_4 sind Tabelle 3.1 zu entnehmen.

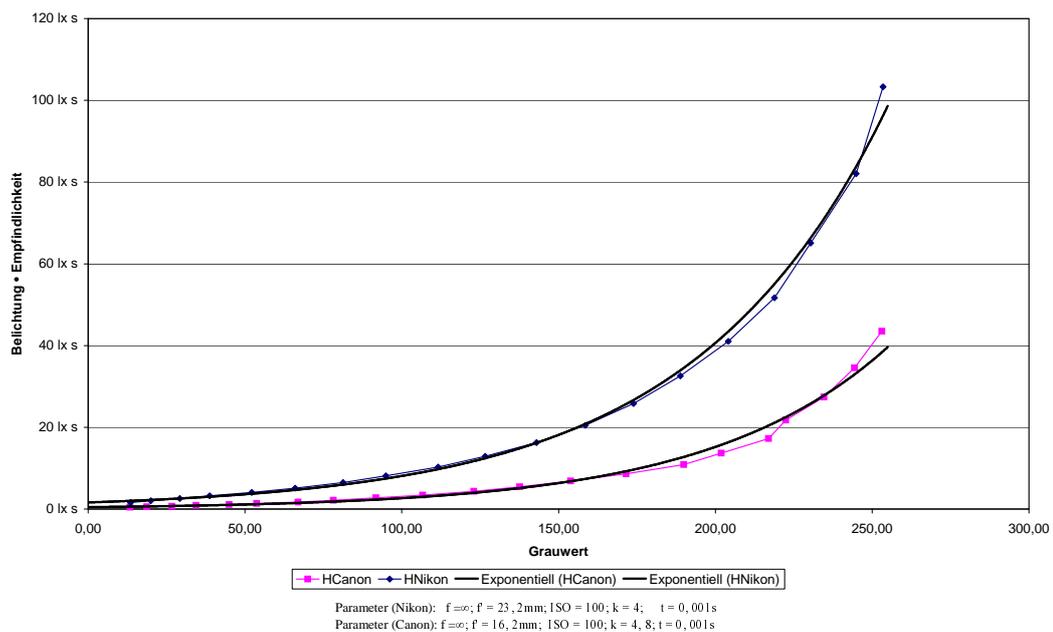


Abbildung 3.2: Belichtung/Grauwerte

² Belichtungswerte, die zu einer Übersteuerung des Sensors und somit zu Grauwerten $GW = 255$ führten, wurden ausgelassen.

³ Zu beachten ist hierbei auch, dass die Aufnahmen der Nikon für $k = 4$, für die Canon allerdings mit $k = 4,8$ gemacht wurden. Die Nikon ist also allgemein in der Lage, größere Leuchtdichten aufzunehmen.

3.3 Testbilder mit Baustellenscheinwerfer

Mit Hilfe eines Baustellenscheinwerfers wurde eine weiße Wand bestrahlt. Nacheinander wurden in den Strahlengang farbige Folien eingebracht. Der Scheinwerfer ist ein handelsübliches Produkt mit einer Halogenleuchte. Vom Zentrum der bestrahlten Fläche wurde für jede Farbfolie je ein Foto mit der Nikon Coolpix 990 und der Canon Powershot A70 gemacht (vgl. Abb. 3.3).

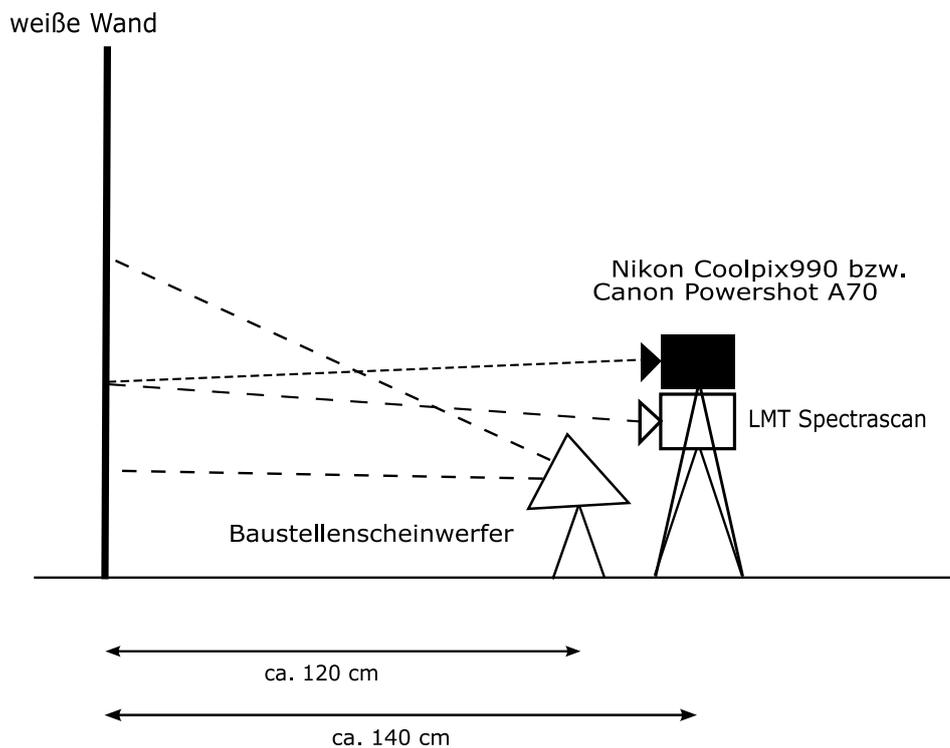


Abbildung 3.3: Versuchsaufbau mit Baustellenscheinwerfer

Als Vergleichsquelle diente ein Leuchtdichtemessgerät⁴ mit dem ebenfalls für jede Lichtfarbe bei jedem Foto zeitgleich eine Messung gemacht wurde. Eine Versuchsreihe bestand aus je einer Aufnahme ohne Filter, mit blauer, grüner, gelber und roter Filterfolie. Für jeden Fotoapparat wurden zwei Reihen durchgeführt, um die Unterschiede zwischen manuellem und automatischem Weißabgleich zu untersuchen. Als Messcharakteristik erschien die Spotmessung als sinnvoll, da sich die Auswertung der Bilder im Weiteren auf

⁴ Leuchtdichtemessgerät *LMT L1003* der Firma *Lichtmesstechnik Berlin*; letzte Kalibrierung: 11/1992

die Bildmitte konzentrieren soll. Bei der Nikon wurde je ein TIFF und ein JPEG⁵ gespeichert. Die Aufnahmen im TIFF-Format sind etwa 10 MB groß und enthalten die Bilddaten in unkomprimierter Form. Die übrigen Parameter der Nikon Coolpix 990 waren konstant bei:

$$f = \infty; f' = 23,1 \text{ mm}; ISO = 100; k = 4,4; t = 0,004 \text{ s}$$

Die Canon zeichnete mangels Alternative nur je ein Bild im komprimierten JPEG-Format in höchster Auflösung auf. Die übrigen Parameter waren konstant bei:

$$f = \infty; f' = 13 \text{ mm}; ISO = 100; k = 4,5; t = 0,004 \text{ s}$$

Die Messungen wurden in einem Laborraum des Fachgebiets durchgeführt. Der Raum war zum Zeitpunkt der Messungen völlig abgedunkelt. Fremdlichtquellen waren nicht vorhanden. Während der Messungen herrschte eine Zimmertemperatur zwischen 20°C und 25°C.

Wiederum wurde für jedes Foto der Mittelwert der 10000 zentrumnahen Pixel ermittelt. Anhand der Gleichung 2.11 wurden nun mit den in Kapitel 3.2 gefundenen Werten für x_3 und x_4 die Leuchtdichten errechnet. Die so bestimmten Leuchtdichten wurden nun für jede Kamera ins Verhältnis zur mit dem LMT gemessenen Leuchtdichte gesetzt und der relative Fehler ermittelt. Wie in Abbildung 3.4 zu sehen ist, ist der relative Fehler der Canon fast immer bei unter 10%. Nur im gelben Bereich sind die Abweichungen etwa 15% und nur hier ist sie schlechter als die Nikon. Die Nikon ihrerseits weicht doch teilweise extrem vom gemessenen Wert ab. Besonders im roten Bereich ist ein Fehler von bis zu bis zu 70% zu verzeichnen.

Die Ergebnisse einer Messreihe mit manuellem Weissabgleich sind in Abbildung 3.5 dargestellt. Es ist deutlich zu sehen, dass die Canon schlechtere Ergebnisse liefert als bei automatischem Weissabgleich. Während im blauen und weissen Bereich der Fehler unter 5% liegt, sind die restlichen Werte allesamt mit Fehlern zwischen 30% und 50% behaftet. Auch bei der Nikon ist keine wesentliche Verbesserung zu erkennen. Auffällig ist jedoch, dass sich der größte relative Fehler vom roten in den blauen Bereich verschoben hat.

⁵ Die verwendete C++-Klasse kann EXIF-Daten nur aus JPEG-Dateien extrahieren, nicht jedoch aus TIFFs[12]

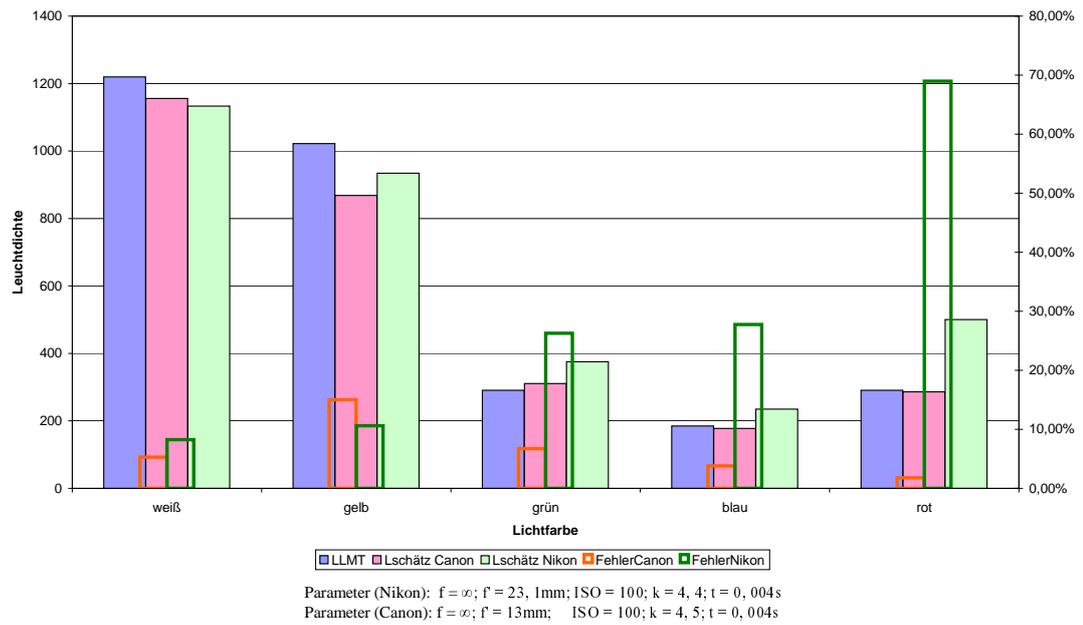


Abbildung 3.4: Schätzgenauigkeit von Canon und Nikon bei automatischem Weißabgleich

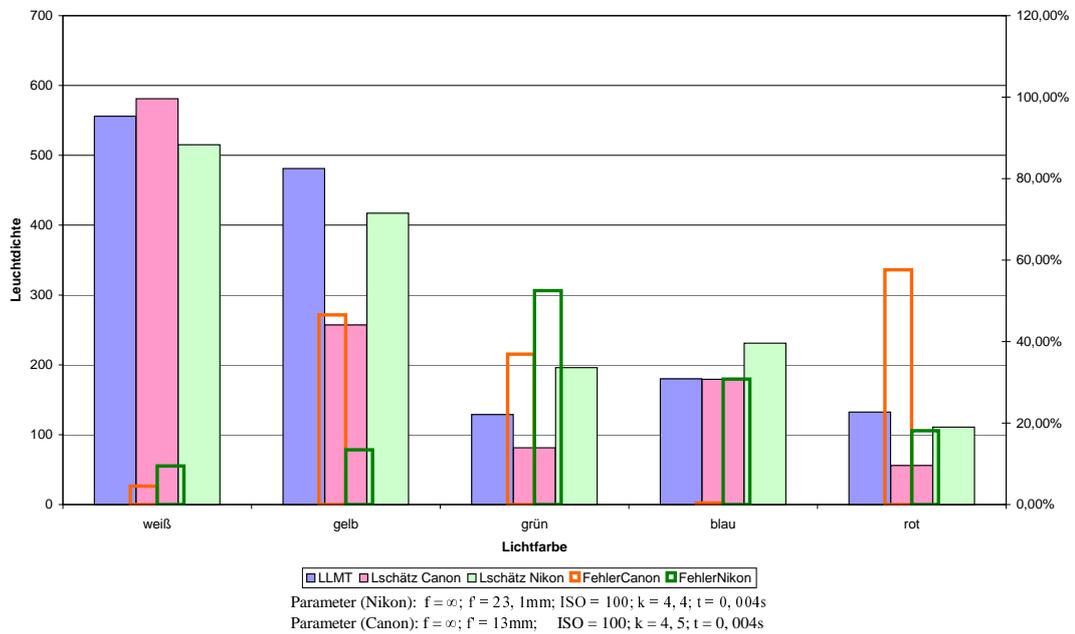


Abbildung 3.5: Schätzgenauigkeit von Canon und Nikon bei manuellem Weißabgleich

3.4 Vorläufiges Fazit

Überraschenderweise hat die Canon Powershot A70 auf den ersten Blick eine bessere Performanz als die Nikon Coolpix 990. Da wir davon ausgegangen waren, dass die Farbwiedergabe der Nikon besser sei[13], überraschten die hohen Abweichungen zu den gemessenen Leuchtdichtewerten bei automatischem Weissabgleich, im grünen und blauen Bereich, besonders aber im roten Bereich. Hier liegt der relative Fehler bei über 60%. Nur im gelben Bereich schneidet die Nikon besser ab als die Canon. Bei manuellem Weissabgleich zeigt die Nikon eine Verbesserung im roten Bereich. Jedoch verschlechtert sich die Genauigkeit bei allen anderen Lichtfarben. Die Canon zeigt ein differentes Verhalten bei manuellem Weissabgleich. Während sich ihre guten Werte im gelben und blauen Bereich noch weiter verbessern, weichen die Leuchtdichtewerte in den anderen drei Bereichen bis zu 30% mehr ab, als bei automatischem Weissabgleich. Bei Anwendung des Coutelier-Verfahrens [6], ist die Canon Powershot A70 der Nikon Coolpix 990 vorzuziehen. Allerdings sollten noch weitere Messungen bezüglich z. B. der spektralen Empfindlichkeit gemacht werden. Dennoch entschieden wir uns an dieser Stelle des Medienprojekts für die Nikon. Wir wollten versuchen mittels geeigneter Mess- und Korrekturverfahren, die fotometrischen Eigenschaften der Nikon so zu verbessern, dass sie letztlich bessere Leuchtdichteschätzungen liefern würde als die Canon. Diese Entscheidung beruhte nicht zuletzt auf der RAW-Fähigkeit⁶ der Nikon.

⁶ Bei der Nikon Coolpix 990 können die Rohdaten der CCD-Matrix genutzt werden (vgl. Kap. 4)

Kapitel 4

Nutzung der RAW-Fähigkeit

Wie der Name schon nahelegt, sind RAW-Daten in der Regel Bilder, an denen keinerlei Korrekturen vorgenommen wurden. Einflüsse durch automatischen beziehungsweise manuellen Weißabgleich, Gradation, Interpolation¹, Kantenschärfung und vor allem Kompression sind also nicht vorhanden. Sämtliche Korrekturen und auch letztlich die Farbraum-Transformation mittels Photoshop (vgl. 3.2) sind ja unter dem Aspekt der Optimierung von Bildern programmiert, nicht jedoch, um die für den Zweck einer Leuchtdichteschätzung relevanten Messdaten möglichst unverfälscht zu lassen. In der Regel ist auch die Farbtiefe größer - je nach Modell 12 oder 14-Bit pro Farbkanal. Als Nachteil muss jedoch klar gesagt werden, dass es kein einheitliches RAW-Format gibt, sondern mehrere proprietäre Dateiformate existieren², die meist den Einsatz von Plug-Ins³ oder proprietärer Software erforderlich macht [17]. Es stellte sich uns also die Herausforderung zum Einen zu überprüfen, inwiefern einer oder beide Fotoapparate über die Möglichkeit verfügen, RAW-Daten auszugeben und zum Anderen zu versuchen, möglichst ohne den Einsatz von Software zur Bildverarbeitung diese Daten zu erschließen und auszuwerten.

¹ In der Regel sind bei Ein-Chip-Kameras die verschiedenfarbigen Filter im sogenannten Bayer-Pattern (vgl. [3, S. 72]) angeordnet. Die tatsächliche Auflösung reduziert sich entsprechend mit der Anzahl der unterschiedlichen Filter als Faktor. Bei Konsumer-Geräten wird versucht, dies durch geeignete Interpolationsalgorithmen zu kompensieren, die jedoch für den Zweck eines Mess- beziehungsweise Schätzgeräts nur eine weitere Fehlerquelle darstellen.

² Adobe versucht seit Herbst 2004 ein einheitliches Format namens Digital Negative zu etablieren [16].

³ Zusatz-Modul zu einem Computer-Programm

4.1 Diagnostic Mode

Bei der Einsichtnahme in die entsprechenden Bedienungsanleitungen schien sich die Befürchtung zunächst zu bewahrheiten, dass die beiden Fotoapparate auf Grund ihres Alters beziehungsweise der Preisklasse nicht über eine entsprechende Funktionalität verfügen, jedoch fand sich in einschlägigen Foren mehrfach der Hinweis, dass es wohl eine Möglichkeit gäbe, zumindest bei der Nikon Coolpix eine derartige Funktionalität freizuschalten. Ein russischer Programmierer hatte beim Experimentieren mit einer Nikon Coolpix 2500 herausgefunden, dass der Fotoapparat in einen Diagnosemodus versetzt werden kann, in dem sie neben dem frei einstellbaren Bild⁴ stets noch ein RAW-Bild speichert [18]. Die Aktivierung des Diagnose-Modus bedarf lediglich das Ändern des Wertes für das Datenfeld *identification*. Während es normalerweise den Wert „NIKON DIGITAL CAMERA“ trägt, muss es auf „DIAG=RAW“ geändert werden. Die Änderung des entsprechenden Datenfeldes im nichtflüchtigen Speicher des Fotoapparates kann mit verschiedenen Programmen über die serielle beziehungsweise USB-Schnittstelle erfolgen, es seien hier nur „cpix“ [19] und eine modifizierte Version des Programms „photopc“ [20] erwähnt. Es darf nicht vergessen werden, darauf hinzuweisen, dass nach Aussage von Nikon der Einsatz des Diagnose-Modus den Verlust der Garantie nach sich zieht, allerdings kann der Diagnose-Modus auch wieder spurlos verlassen werden.

4.2 Aufbau der RAW-Dateien

Nachdem die Kamera in den Diagnose-Modus versetzt und erste RAW-Dateien erzeugt worden waren, stellte sich jedoch heraus, dass diese Dateien nicht in dem Nikon-Format NEF⁵ gespeichert werden, sondern entweder konvertiert [21] oder mit Hilfe eines geeigneten Plug-Ins [22] importiert werden müssen. Obwohl in Bezug auf ihren Aufbau keinerlei Verwandtschaft zu JPEG-Dateien besteht, werden die RAW-Dateien mit der Datei-Erweiterung „.jpg“ versehen. Nach eingehender Analyse einiger Dateien stellte sich jedoch heraus, dass die Datei-Struktur derart simpel aufgebaut ist, dass eigentlich kaum

⁴ JPEG beziehungsweise TIFF, vergleiche Kapitel 3.1.

⁵ Nikon Electronic Format

von einem Datei-Format gesprochen werden kann: Ähnlich den von der Nikon Coolpix 2500 produzierten Dateien [18] lässt sich die Datei in zwei Hälften unterteilen. Sie verfügt dabei über keinen erkennbaren Header⁶. In der oberen Hälfte befinden sich die Informa-

Allgemeine Angaben		Offset	Inhalt
Größe einer Datei in Byte	4.771.840	0x000000	Grün / Magenta
Anzahl der Pixel horizontal	2064	0x246030	„Schwarzer“ Bereich
Anzahl der Pixel vertikal	1540	0x246800	Gelb / Cyan
Anzahl Pixel gesamt	3178560	0x48C830	„Weißer Bereich
Bit pro Pixel	12	0xC18	Länge einer Zeile

Tabelle 4.1: Aufbau der RAW-Dateien der Nikon Coolpix 990

tionen aus den geraden Zeilen. Gemäß der Filteranordnung (vgl. [23]) wechseln sich die Daten der Kanäle Grün und Magenta ab. Am Ende der 385 geraden Zeilen schließt sich ein „schwarzer“ Bereich an. Der Zweck dieses Bereichs ließ sich nicht befriedigend erörtern. Gab es am Anfang noch Hoffnung, dass in den 2000 Byte ein Teil der Information der Dunkel-Pixel⁷ enthalten sein könnte, stellte sich bei genauerer Betrachtung heraus, dass diese Werte nahezu konstant bleiben⁸.

Die zweite Hälfte ist analog aufgebaut, nur dass hier die ungeraden Zeilen und somit die Informationen der Kanäle Gelb und Cyan enthalten sind. Am Ende der Zeilen schließt sich ein „weißer“ Bereich an. Detaillierte Angaben zum Aufbau sind Tabelle 4.1 zu entnehmen.

4.3 Problemfelder bei Verwendung der RAW-Dateien

Nachdem der Aufbau der Dateien erschlossen wurde, stellte sich jedoch heraus, dass das Arbeiten mit RAW-Dateien unter gewissen Einschränkungen erfolgen muss.

Bei den ersten Messreihen fiel auf, dass meist ein Bild zu wenig aufgenommen wurde. Faktisch speichert der Fotoapparat nach dem Formatieren des Datenträgers die erste RAW-Datei unter Umständen nicht richtig. Bei einer Messreihe fanden wir die erste Datei

⁶ Vorspann einer Datei, in dem üblicherweise Metadaten wie Dateityp, Größe etc. angegeben werden

⁷ abgedeckte Pixel, die zur Ermittlung des momentanen, temperaturabhängigen Dunkelstrom dienen

⁸ Das GIMP-Plugin UFRaw benutzt diese Daten sogar als einen Art „Fingerabdruck“, um die nahezu baugleichen Fotoapparate Coolpix 950 und 990 auseinander halten zu können

im übergeordneten Verzeichnis „DCIM“ statt im üblicherweise benutzten Ordner „100Nikon“, in der Regel war sie jedoch nicht auffindbar, während die korrespondierende JPEG-Aufnahme stets ordnungsgemäß gespeichert wurde. Ferner wurde beim genauen Betrachten der Messreihen deutlich, dass auch die zweite RAW-Datei unter Umständen nicht verwendet werden kann. Wie in Kapitel 3.1 angedeutet, lässt sich die Nikon mittels geeigneter Software⁹ über die serielle beziehungsweise USB-Schnittstelle ansteuern. Diese Funktion ist vor allem nützlich, um automatisiert Messreihen mit variabler Belichtungszeit (vgl. Kap. 5.2.1) oder mit gewollter Zeitverzögerung (vgl. Kap. 5.1.1) zu realisieren. Jedoch scheint es eine Eigenart des Diagnose Modus zu sein, dass bei Ansteuerung des Fotoapparats über eine der beiden Schnittstellen das zweite Bild unabhängig von der gewählten Belichtungszeit stets eine Art Dunkelstrombild ist. Es ist also nötig, stets vor dem eigentlichen Einsatz des Fotoapparats zwei Aufnahmen zu machen, auch wenn dadurch im Extremfall knapp 10 Megabyte auf dem Datenträger belegt werden. Weiterhin stellte sich heraus, dass die RAW-Dateien nicht ohne weiteres über die serielle beziehungsweise USB-Schnittstelle übertragen werden können. Sämtliche verfügbare Programme quittierten den Versuch mit Fehlermeldungen oder gar Abstürzen. Ein genaueres in Augenschein nehmen des Dateisystems offenbarte den Grund, der höchstwahrscheinlich für dieses Verhalten verantwortlich ist. Das Dateisystem des Fotoapparats scheint bei der Anfrage nach Dateien auf dem Datenträger in der Antwort die Größe der betreffenden Dateien zu senden. Obwohl sich die RAW-Dateien hinsichtlich ihrer Datei-Erweiterung nicht von den üblichen JPEGs unterscheiden, scheint das Dateisystem sie zu erkennen und sendet auf Anfrage anstelle ihrer wahren Größe (vgl. Tab. 4.1) 0 Byte. Da in vielen Programmen eine Funktion implementiert ist, die anzeigt, wieviel Prozent einer Datei übertragen worden sind, scheint es zu einer Division durch Null zu kommen, die den Transfer zu vereiteln scheint. Trotz einer Anfrage bei der Firma Nikon, auf die hin ein SDK¹⁰ zugesandt wurde, ließ sich im Rahmen des Medienprojekts keine Lösung für dieses Problem finden.

⁹ zum Beispiel die oben erwähnten Programme „cpix“ [19] und die modifizierte Version des Programms „photopc“ [20]

¹⁰ **S**oftware **D**evelopment **K**it: In diesem Fall eine Befehlsreferenz, mit deren Hilfe Programme zur Ansteuerung der Coolpix entwickelt werden können

Kapitel 5

Korrekturen / Kalibrierung

Um bei Messungen fotometrischer Daten mit einer CCD-Kamera den Fehler möglichst gering zu halten, müssen sämtliche systematischen Fehlerquellen, die das Ergebnis verfälschen, bestimmt werden. Kennt man die Fehler und ihr Ausmaß, so kann man möglicherweise eine Korrektur der Werte durchführen.

Bei der Vermessung großflächiger Objekte, werden die Sensorelemente der CCD-Matrix vollkommen mit der Abbildung des Objektes ausgeleuchtet. Der theoretische Zusammenhang zwischen dem Sensorsignal eines Pixels und der Objektleuchtdichte lässt sich vereinfacht wie folgt beschreiben [24]:

$$S(i, j) = k \cdot \int_{\lambda} \frac{s(\lambda) \cdot \Phi_{e,\lambda}(\lambda, i, j)}{A_p(i, j) \cdot \Omega(i, j)} \cdot d\lambda \quad (5.1)$$

Daraus folgt:

$$S(i, j) \sim L(i, j) \quad (5.2)$$

$S(i,j)$ - Sensorsignal des Pixelortes (i,j)

$s(\lambda)$ - Spektrale Empfindlichkeit der CCD-Matrix

$\Phi_{\lambda}(\lambda, i, j)$ - Spektraler Strahlungsfluss der auf das Pixel (i,j) wirkt

$A_p(i,j)$ - projektive Fläche des Pixels (i,j)

$\Omega(i,j)$ - Raumwinkel der vom Pixel (i,j) erfasst wird

$L(i,j)$ - mittlere Leuchtdichte für den Pixelort (i,j)

k - Proportionalitätsfaktor

i,j - Ortskoordinaten

Als Grundlage für die Ermittlung der Leuchtdichtewerte dienen die Grauwerte der einzelnen Pixel. Jedoch ist zu beachten, dass in der Praxis das Verhalten von CCD-Kameras vom idealen Modell abweicht. Deshalb werden bei der Bestimmung der Leuchtdichtewerte einige Einflussgrößen berücksichtigt. Neben der Dunkelstromkorrektur ist eine Shadingkorrektur, eine Linearitätskorrektur und eine spektrale Anpassung nötig. Als Formel stellt sich der gesamte Sachverhalt nach Fischbach und Krüger wie folgt dar¹ [24]:

$$L = [GW(i, j, t) - DS(t) - DS(i, j)] \cdot LN(GW) \cdot SH(i, j) \quad (5.3)$$

GW(i,j,t) - Grauwert des Pixels am Ort (i,j) zum Zeitpunkt t

DS(t) - Zeitabhängiges Dunkelsignal

DS(i,j) - Ortsabhängiges Dunkelsignal

LN(GW) - Linearitätskorrektur

SH(i,j) - Shadingkorrektur

Im Folgenden werden die Einflussgrößen einzeln erläutert, die Möglichkeit, sie messtechnisch zu erfassen, dargestellt, ihr explizites Ausmaß ausgewertet und Vorschläge für eine entsprechende Korrektur gemacht.

¹ Die Korrektur der spektralen Empfindlichkeit ist in dieser Formel außer Betracht gelassen. Da CCD-Sensoren integrale Empfänger sind, muss jegliche Korrektur der spektralen Empfindlichkeit mittels geeigneter Filtergruppen im Strahlengang erfolgen. Eine arithmetische Korrektur ist nur auf Kosten der Ortsauflösung, bzw. durch eine Linearkombination möglich (vgl. Kap. 5.4.2).

5.1 Dunkelstrom

5.1.1 Erläuterung und Versuchsaufbau

Ein Fehler ist der sogenannte Dunkelstrom. Auch bei verschlossenem Objektiv werden unter Umständen trotzdem Grauwerte erzeugt, obwohl kein Licht auf den Sensor fällt. Die Ursache liegt hier in der temperatur- und ortsabhängigen Ladungsgenerierung. Dies gilt es messtechnisch zu erfassen und, sofern möglich, zu korrigieren [1, S.582ff].

Zu diesem Zweck haben wir das Dunkelstromverhalten der Nikon Coolpix 990 über einen Temperaturbereich von 57°C untersucht. Dazu wurde der ausgeschaltete Fotoapparat zunächst zweieinhalb Stunden in einer Umgebung mit -2°C gelagert. Danach wurde der Fotoapparat in einen Raum gebracht, in dem eine Temperatur von 55°C herrschte. Bei konstanten Parametern ($f = \infty$; $f' = 19,0\text{ mm}$; $ISO = 100$; $k = 3,6$) wurde per Fernauslöser bei verschlossenem Objektiv alle zweieinhalb Minuten ein Foto geschossen. Der gewählte Temperaturbereich erschien uns hinreichend groß, da extremere Temperaturen in der Praxis nicht zu erwarten sind. Der Haupteinsatzbereich des Fotoapparates dürfte eher zwischen 10°C und 35°C liegen.

In einem weiteren Versuch wurde die Belichtungszeit variiert, um den Einfluss unterschiedlich langer Integrationszeiten auf den Dunkelstrom zu erörtern. Es wurden Fotos mit Belichtungszeiten von $t = 0,001\text{ s}$ bis $t = 8\text{ s}$ geschossen, wobei die Zeiten jeweils verdoppelt wurden. Die übrigen Parameter waren konstant bei $f = \infty$; $f' = 19,1\text{ mm}$; $ISO = 100$ und $k = 3,6$.

5.1.2 Auswertung

Da es zunächst das Anliegen war, eine generelle Aussage über die Abhängigkeit von Umgebungstemperatur² und Dunkelstromanteilen zu treffen, ermittelten wir den Mittelwert

² Eigentlich wäre vielmehr die Abhängigkeit der Dunkelstromanteile von der Temperatur der CCD von Interesse gewesen. Da dies jedoch ein Öffnen des Fotoapparates erforderlich gemacht hätte und unter Umständen gar zu einer Beschädigung geführt hätte, beschränkten wir uns auf die Umgebungstemperatur und die

der um das Zentrum der CCD gruppierten 10000^3 Pixel und trugen ihn in einem Diagramm entsprechend dem Zeitpunkt auf, zu dem das jeweilige Foto aufgenommen worden war. Das Ergebnis überraschte sehr: Wie Abbildung 5.1 zeigt, entspricht der Verlauf nicht dem erwarteten exponentiellen Anstieg, der vom thermischen Rauschen elektronischer Bauteile gewohnt ist [3, S. 73ff]. Vielmehr scheint nach ca. einer Stunde die CCD einen

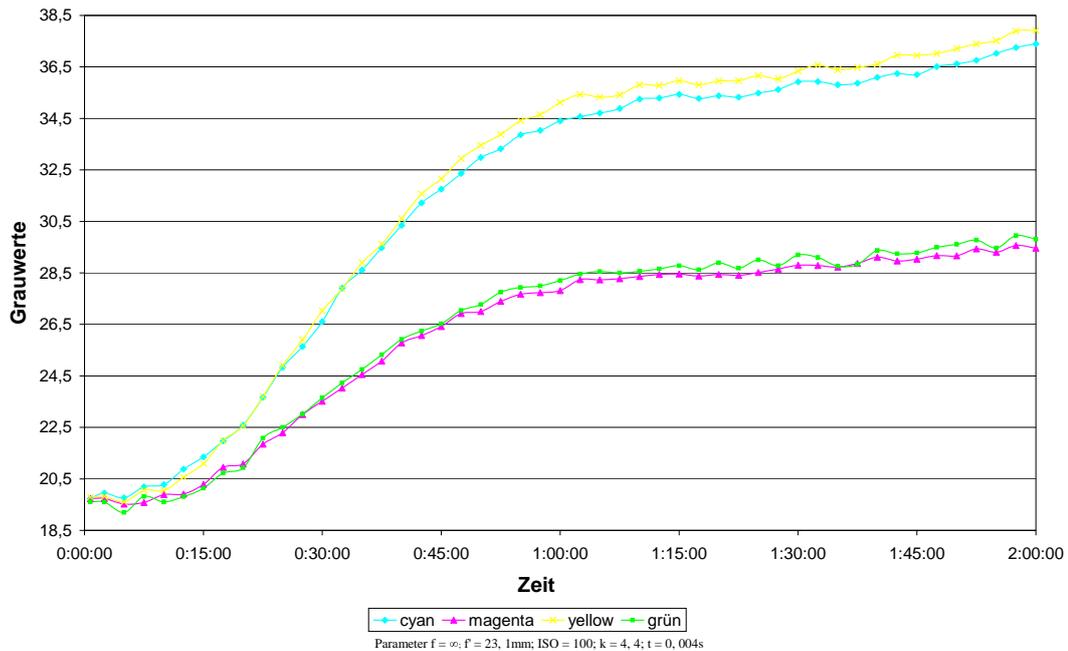


Abbildung 5.1: Verhalten der Dunkelstromanteile bei Erwärmen der CCD

Temperaturbereich erreicht zu haben, in dem sich eine Temperaturänderung $\Delta\theta$ kaum in einer Änderung des Dunkelstroms bemerkbar macht. Das Verhalten der CCD ist nicht eindeutig erklärbar. Es liegt jedoch die Vermutung nahe, dass entgegen der in Kapitel 4 getroffenen Annahmen eine, auch die RAW-Dateien betreffende Dunkelstromkorrektur vorgenommen wird.

Der ab eineinhalb Stunden erneut einsetzende Anstieg scheint von einer drohenden Überhitzung der CCD und dem damit verbundenen Volllaufen einzelner Pixel beziehungsweise

Annahme, dass sich die Temperatur der CCD nach ausreichend langer Zeit an die Umgebungstemperatur annähert.

³ Da die Nutz-Signalanteile der CCD-Matrix stets auch von Rausch-Signalanteilen überlagert werden, hielten wir es für angebracht, den Mittelwert einer hinreichend großen Anzahl an Pixel zur Auswertung heranzuziehen

Regionen herzurühren. Abbildung 5.2 zeigt dies eindrucksvoll⁴. Dementsprechend unterbrachen wir an dieser Stelle den Versuch.

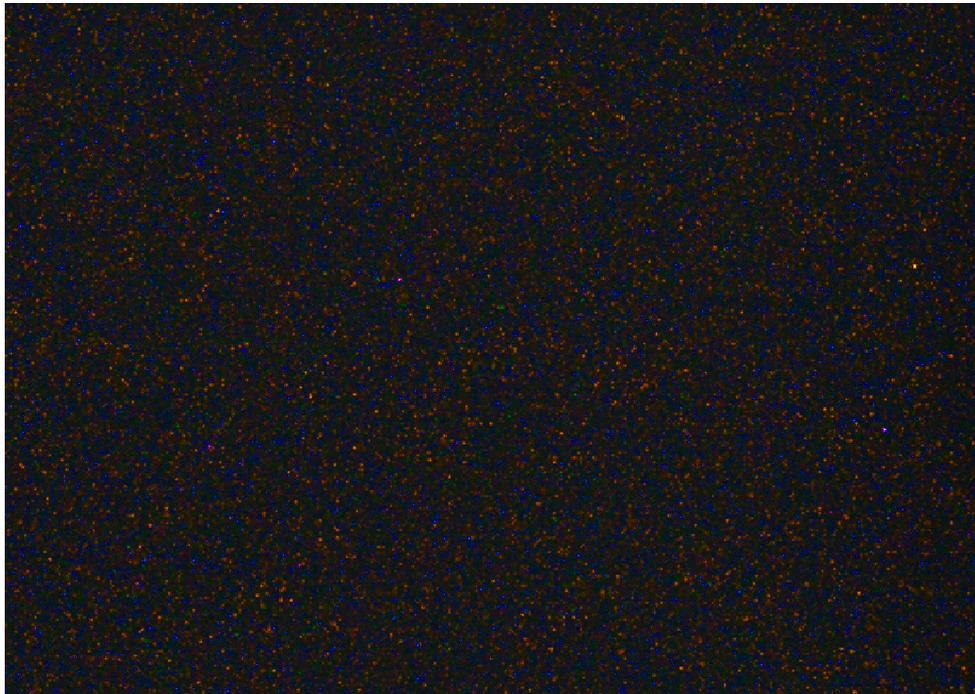


Abbildung 5.2: Dunkelstromanteile bei hohen Temperaturen

Da aus technischen Problemen der Erwärmungsversuch mehrere Male abgebrochen und neu gestartet worden war, standen knapp zwanzig Bilder zur Verfügung, die die Dunkelstromanteile bei Raumtemperatur widerspiegeln. Um Rauschanteile zu unterdrücken, wurde über alle Bilder gemittelt. Abbildung 5.3 zeigt die Dunkelstromanteile ortsaufgelöst⁵. Deutlich sichtbar sind zwei Hotpixel⁶, ansonsten bleiben die Grauwerte im Bereich $GW < 22$. Bezüglich des Einflusses der Belichtungszeit auf die Dunkelstromanteile stellte sich heraus, dass für Belichtungszeiten kleiner 4 Sekunden ein nahezu linearer Zusam-

⁴ Um die beschriebenen Effekte auch in der Form dieser schriftlichen Ausarbeitung erkennbar zu machen, wurde die entsprechende RAW-Datei mittels der in dem in Kapitel 4 erwähnten GIMP-Plugins „Ufraw“ vorhandenen Funktion „Exposure“ aufgehellt [22].

⁵ Da die Darstellung der über drei Millionen Bildpunkte zu aufwändig gewesen wäre und zudem die Werte einzelner Pixel nicht mehr deutlich sichtbar waren, ist in Abbildung 5.3 sowohl die vertikale als auch die horizontale Auflösung um den Faktor 6 reduziert. Ein Bildpunkt stellt den Mittelwert von 36 Pixeln dar.

⁶ Hotpixel: Pixel, das äußerst hohe Grauwerte liefert, auch wenn kaum Licht auf die CCD fällt, und dass sich durch einen deutlich erhöhten Dunkelstrom ausmachen lässt [3, S.88]. Auf Grund des geringen Auftretens und des relativ großen arithmetischen Aufwands wird keine separate Hotpixel-Korrektur (vgl. [25, S.4]) durchgeführt, sondern versucht, dies im Rahmen der Dunkelstromkorrektur zu kompensieren

menhang besteht (vgl. Abb.5.4).

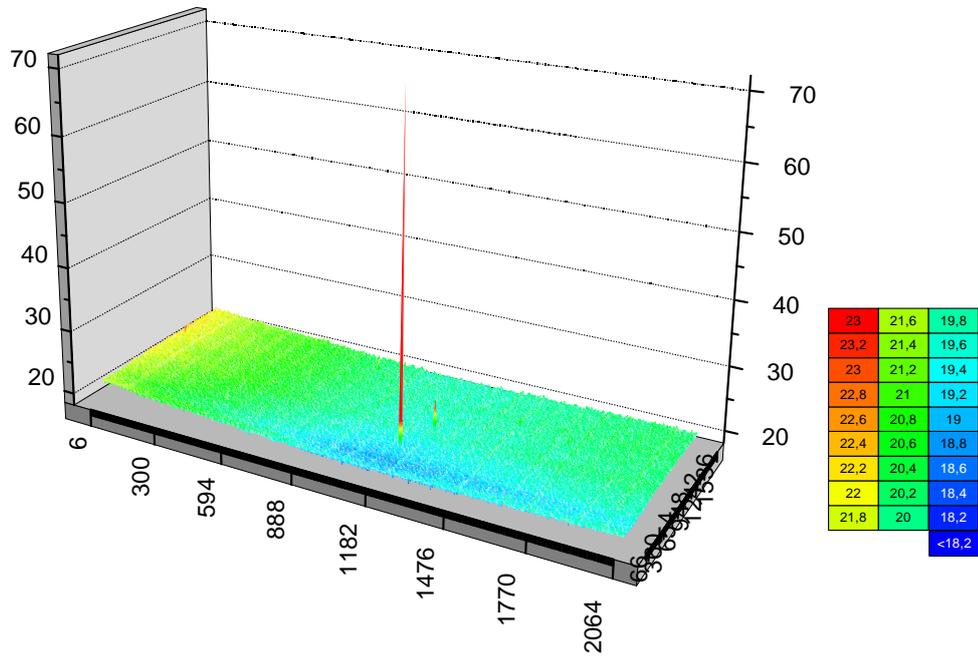


Abbildung 5.3: Dunkelstromanteile bei Raumtemperatur

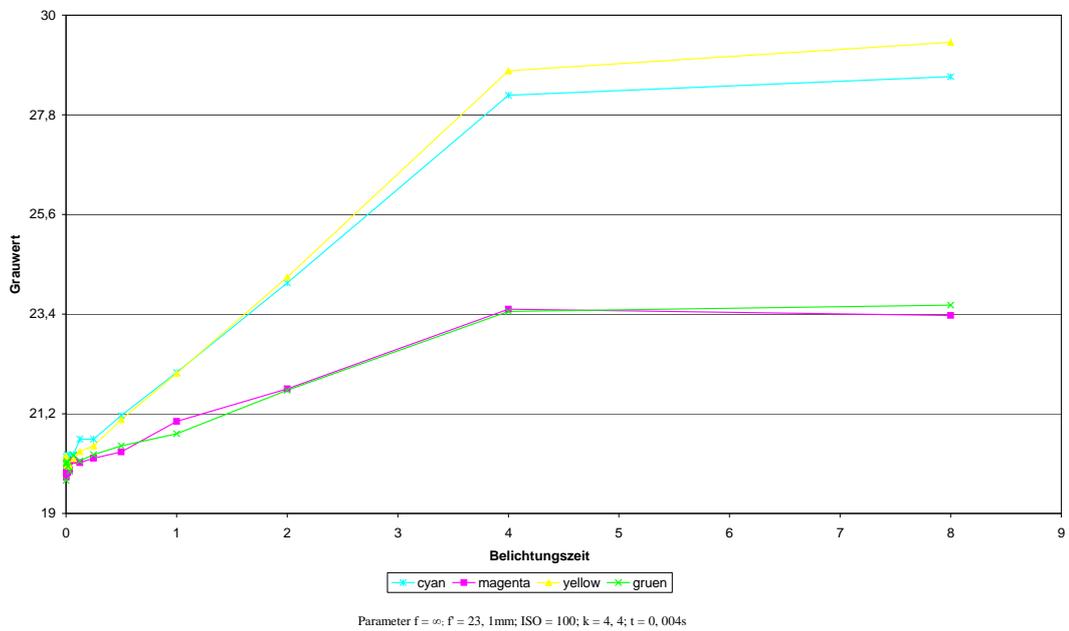


Abbildung 5.4: Abhängigkeit der Dunkelstromanteile von der eingestellten Belichtungszeit

Mathematisch ausgedrückt lässt sich dieser Zusammenhang wie folgt beschreiben:

$$DS(x, y, t) = DS(x, y, t = 0, 001s) \cdot (1 + t \cdot x_1) \quad (5.4)$$

Der Faktor x_1 ist hierbei für die einzelnen Farbkanäle unterschiedlich. Während für den Grün- und den Magenta-Kanal der Faktor als $x_1 = 0, 045$ zu wählen ist, gilt für den Cyan- und den Gelb-Kanal in Annäherung $x_1 = 0, 1075$.

Zusammenfassend lässt sich die Aussage treffen, dass unter normalen Bedingungen der Dunkelstromanteil eines Pixels nicht größer als 50 Grauwerte ausfällt.

5.2 Linearisierung

5.2.1 Erläuterung und Versuchsaufbau

Obwohl die CCD-Matrix auf Grund ihres Funktionsprinzips ein lineares Bauelement ist, ist die gesamte Anordnung nichtlinear [25]. Die Nichtlinearität der Elektronik und Sättigungseffekte bei der Ladungserzeugung auf dem CCD-Chip bewirken eine nichtlineare Kennlinie zwischen der auf das Pixel auftreffenden Beleuchtungsstärke und den generierten Grauwerten [1]. Grundsätzlich gibt es zwei Wege, die Kennlinie zu bestimmen, wenn man davon ausgeht, dass die Messanordnung mit einer festen Blende und fester ISO-Empfindlichkeit betrieben wird. Entweder wird bei konstanter Integrationszeit die Leuchtdichte variiert oder umgekehrt. Dazu ist eine Lichtquelle nötig, die zum Einen regelbar ist und zum Anderen bei unterschiedlichen Leuchtdichten trotzdem die selbe spektrale Verteilung behält [25]. Dies ist bei einem Leuchtdichtenormal mit Blendenregelung gegeben. Da in unserem Fall sowohl die Blende, als auch die ISO-Empfindlichkeit veränderliche Größen sind, sind auch diese jeweils mittels eines Versuches in Bezug zu den Grauwerten zu setzen. Insgesamt sind vier Versuchsreihen am Leuchtdichtenormal durchgeführt worden:

1. Variation der Leuchtdichte L
2. Variation der Integrationszeit t
3. Variation der Blende K in Zehntel-Blendenstufen
4. Variation der ISO-Empfindlichkeit

5.2.2 Auswertung

Die Erkenntnisse aus Kapitel 5.1 nutzend führten wir an den aufgenommenen Bildern zunächst eine Dunkelstromkorrektur durch (Zur Vorgehensweise vgl. Kap. 6). Um ein Verzerren der Messergebnisse durch den Einfluss von Bildrauschen zu vermeiden, benutzten wir auch hier zur Auswertung jeweils den Mittelwert der Grauwerte der 10000 zentrumnahen Pixel. Für die vier Variablen *Leuchtdichte*, *Belichtungszeit*, *Blendenzahl* und *ISO-Empfindlichkeit* versuchten wir zunächst jeweils für jeden der vier Farbkanäle den Zusammenhang aufzustellen. Da diese Zusammenhänge bis auf Proportionalitäts-

faktoren für jede Variable identisch waren, wie am Beispiel der Leuchtdichte dargestellt werden soll, werden wir uns im folgenden auf die Auswirkung der Variablen auf die Linearkombination der vier Farbkanäle (vgl. Kap. 5.4.2) beschränken.

Der Zusammenhang zwischen Leuchtdichte und Grauwert scheint über fast den gesamten Dynamikbereich der CCD linear zu sein, wie Abbildung 5.5 zeigt.

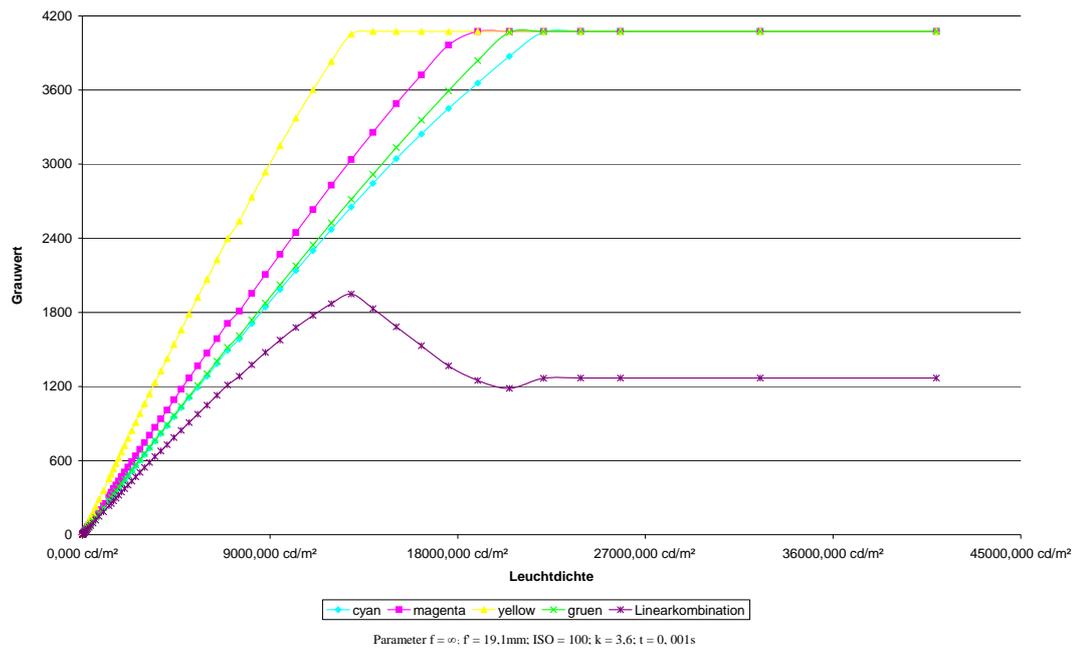


Abbildung 5.5: Zusammenhang zwischen Leuchtdichte und Grauwerten

Deutlich erkennbar sind die unterschiedlichen Steigungen der einzelnen Kanäle, als auch der nahezu lineare Verlauf der Linearkombination⁷. Die Proportionalitätskonstanten und Gültigkeitsbereiche⁸ für die lineare Annäherung der einzelnen Kanäle sind Tabelle 5.1 zu entnehmen. Erklären lässt sich das Phänomen der unterschiedlichen Steigungen, wenn man sich die unterschiedliche spektrale Empfindlichkeit der einzelnen Kanäle vor Augen hält (vgl. Abb. 5.15 in Kapitel 5.4.2).

⁷ Die deutliche Krümmung oberhalb von $10000 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$ resultiert aus der Tatsache, dass die einzelnen Kanäle bei unterschiedlichen Leuchtdichten übersteuert werden

⁸ Die Gültigkeitsbereiche in Tabelle 5.1 wurden exemplarisch für eine Belichtungszeit von $t = 0,001\text{s}$, eine Blendenzahl von $k = 3,6$ und ISO-Empfindlichkeit 100 angegeben, um eine rein qualitative Aussage treffen zu können

Kanal	Faktor	Bestimmtheitsmaß R^2	Gültigkeitsbereich
Cyan	0,2072	0,9989	500 – 16000 $\frac{cd}{m^2}$
Magenta	0,2398	0,9993	500 – 14000 $\frac{cd}{m^2}$
Gelb	0,3406	0,9989	500 – 10000 $\frac{cd}{m^2}$
Grün	0,2118	0,9994	500 – 16000 $\frac{cd}{m^2}$
Linearkombination	0,9982	0,1734	500 – 10000 $\frac{cd}{m^2}$

Tabelle 5.1: Proportionalitätsfaktoren für die einzelnen Kanäle

Um den Einfluss der Belichtungszeit zu betrachten variierten wir die während einer Messreihe die Belichtungszeit, während wir die Leuchtdichte konstant hielten. Auf den ersten Blick schien die Belichtungszeit linear einzugehen. Um den Zusammenhang genauer bestimmen zu können, trugen wir die Grauwerte über der Belichtungszeit auf. Um Verfälschungen durch das Schwanken des Leuchtdichtenormals möglichst zu eliminieren, multiplizierten wir die Grauwerte vorher jedoch mit einem Korrekturfaktor:

$$GW_{cor} = \frac{GW \cdot L_{ist}}{5 \frac{cd}{m^2}} \quad (5.5)$$

Anschließend bestimmten wir mittels der in Excel implementierten Funktion „Trendlinie“ eine möglichst genaue Annäherung. Mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,9999$ ist dies die Polynomfunktion:

$$L_{schätz} = \frac{GW}{-1,84034t^2 + 29,664t} \quad (5.6)$$

In Abbildung 5.6 sind neben den Grauwerten auf einer zweiten Y-Achse auch die reale Leuchtdichte L_{ist} und die mittels Gleichung 5.6 geschätzte Leuchtdichte eingetragen. Deutlich sichtbar sind die Abweichungen für kleine Belichtungszeiten, während hingegen für größere Belichtungszeiten kaum eine Abweichung besteht.

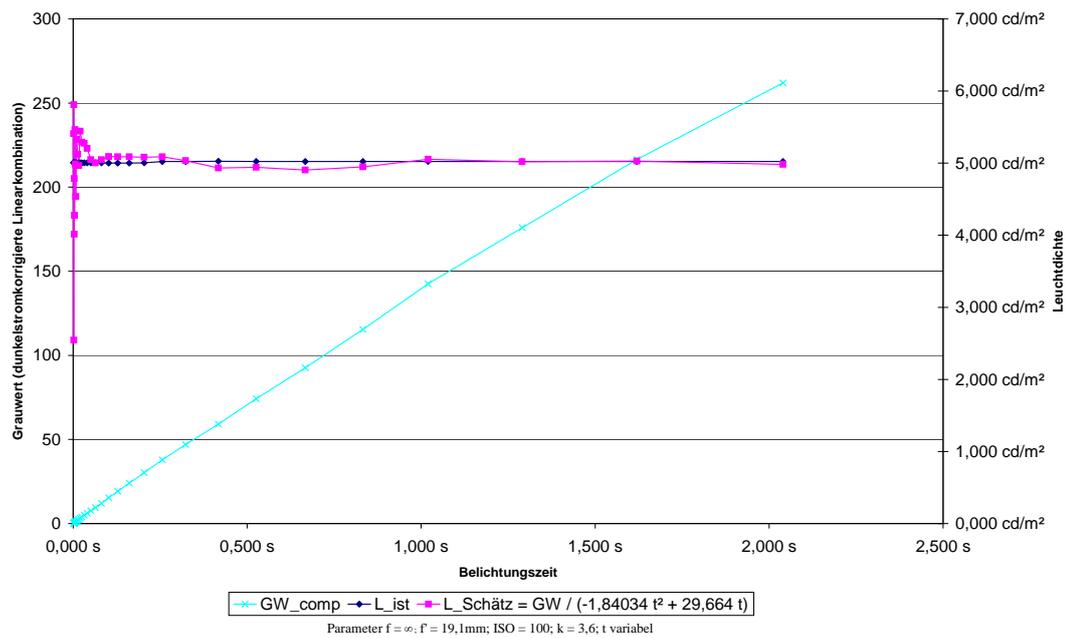


Abbildung 5.6: Zusammenhang zwischen Belichtungszeit und Grauwerten

Für die Erfassung des Einflusses der Blendenzahl k auf die Grauwerte wurde analog vorgegangen: In einer Messreihe wurde bei konstanter Leuchtdichte die Blendenzahl über den gesamten einstellbaren Bereich in 0,1-Schritten variiert. Die mittels Gleichung 5.5 beziehungsweise 5.6 korrigierten Grauwerte wurden unter über den jeweiligen Blendenzahlen aufgetragen. Auch hier schien der Zusammenhang auf den ersten Blick der Theorie zu entsprechen (vgl. Gl. 2.9). Eine genauere Approximation mittels einer Trendlinie lieferte jedoch einen geringfügig abweichenden Einfluss der Blendenzahl auf die Belichtungszeit:

$$L_{\text{schätz}} = \frac{GW}{(-1,84034t^2 + 29,664t) \cdot 13,2716 \cdot k^{-2,0739}} \quad (5.7)$$

Wie aus Abbildung 5.7 sichtbar wird, wirkt sich für Blendenzahlen $k < 4$ der Rundungsfehler sehr stark aus. Deutlich sichtbar ist dies auch an den Abweichungen der geschätzten Leuchtdichte von der realen Leuchtdichte. Dies arithmetisch korrigieren zu wollen, scheint nicht ratsam, da der Fehler mit $\Delta k_{\text{max}} = \pm 0,05$ als statistisch verteilt anzunehmen ist. Es bleibt folglich nur die Alternative, das Verwenden von zu kleinen Blenden-

zahlen zu vermeiden. Eine elegante Lösung ist der Belichtungs-Modus „A“⁹, bei dem vom Nutzer die Blendenzahl vorgegeben werden kann. Der Fotoapparat wählt entsprechend der eingestellten Blendenzahl eine angemessene Belichtungszeit. Diese liegt bei einer größeren Blendenzahl natürlich höher. Somit wird auch der Fehleranfälligkeit der Schätzung durch kleine Belichtungszeiten vorgebeugt

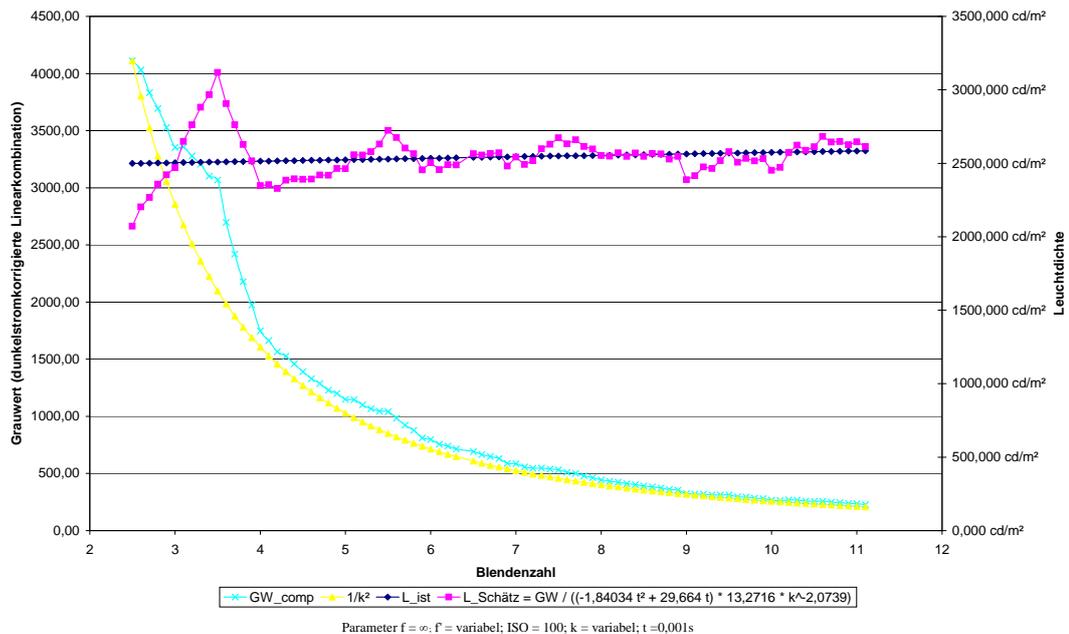


Abbildung 5.7: Zusammenhang zwischen Blendenzahl und Linearkombination

Um den Einfluss der ISO-Empfindlichkeit auf die Grauwerte zu ermitteln, wurden vier Messreihen verglichen: In der ersten Reihe wurde die ISO-Empfindlichkeit bei konstanter Leuchtdichte variiert, bei den übrigen drei Reihen wurde für eine der drei möglichen ISO-Empfindlichkeiten die Leuchtdichte variiert. Analog wurden hier die nach Gleichung 5.5 beziehungsweise 5.7 korrigierten Grauwerte über der ISO-Empfindlichkeit aufgetragen. Wie Abbildung 5.8 zeigt, kam es jedoch zu unerklärlichen, nicht korrigierbaren Abweichungen. Sowohl für $ISO = 200$ als auch für $ISO = 400$ sind die auftretenden Grauwerte unterschiedlich. Es empfiehlt sich also, nur die Empfindlichkeitsstufe $ISO = 100$

⁹ Die verschiedenen Belichtungs-Modi sind nur in der Aufnahmeart „Manuell“ wählbar

einzustellen, und Gleichung 5.7 wie folgt zu ergänzen:

$$L_{\text{Schätz}} = \frac{GW}{(-1,84034t^2 + 29,664t) \cdot 13,2716 \cdot k^{-2,0739} \cdot 0,00820769 \cdot ISO} \quad (5.8)$$

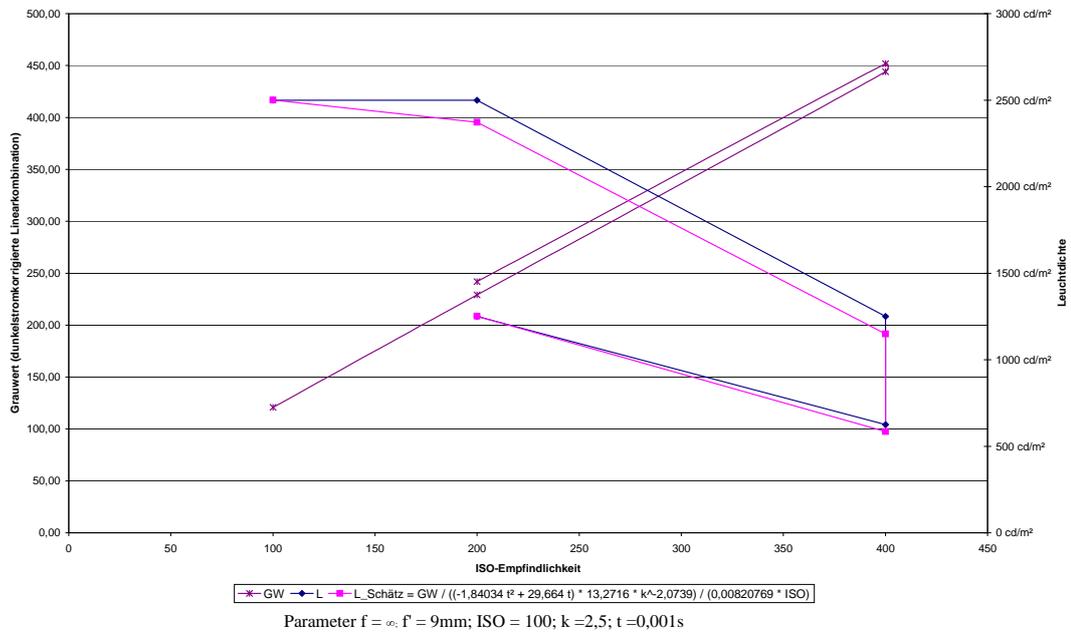


Abbildung 5.8: Zusammenhang zwischen ISO-Empfindlichkeit und Linearkombination

5.3 Shading

5.3.1 Erläuterung und Versuchsaufbau

Das sogenannte Shading bezeichnet den Randabfall des verwendeten Objektivs. Dieser Effekt bewirkt einen Abfall der Werte von den zentralen zu den Randpixeln hin. Nach Gall stellt sich der Randabfall wie folgt dar [5, S.89]:

$$\Omega_{p2} = \frac{\pi}{2} \cdot \left[1 - \cos \left(\arctan \left(\frac{x + R_{\tilde{o}}}{a'} \right) - \arctan \left(\frac{x - R_{\tilde{o}}}{a'} \right) \right) \right] \cdot \Omega_0 \quad (5.9)$$

Dabei nimmt die Raumwinkelprojektion vom Zentrum zum Rand hin ab. Bei Teleobjektiven ist der Randabfall im Vergleich zu Weitwinkelobjektiven vergleichsweise klein. Dennoch ist auch ein geringer Randabfall eine nicht zu vernachlässigende Einflussgröße, die es in der Kalibrierphase zu ermitteln gilt. Danach wird der theoretisch ermittelte Randabfall mit dem korrespondierenden tatsächlich gemessenen Randabfall verglichen. Zusätzlich zu dem durch die Optik des Fotoapparates verursachten Randabfalls, entsteht durch unterschiedliche fotometrische Empfindlichkeit der einzelnen Pixel weiteres Shading. Auch diese Abweichungen sind zu erfassen und in der Korrektur zu berücksichtigen [1].

Zur Bestimmung des Shadings der Nikon Coolpix 990 haben wir den Fotoapparat vor ein Leuchtdichtenormal gestellt. Da dieser Fotoapparat allein aus baulichen Gründen mit einer relativ kleinen Optik ausgestattet ist, ist eine Blendenstufen-Variation in Zehntel-Blenden nur über ein Zusammenspiel von Focus und Blende zu realisieren. Dabei ist die kleinste Blendenzahl von $k = 2,5$ lediglich bei kleinster Brennweite $f' = 8,5 \text{ mm}$ zu erreichen. Für die größte Blendenzahl verhält sich der Sachverhalt genau umgekehrt. Deshalb musste der Abstand der Optik zur Öffnung des Leuchtdichtenormals so gering wie möglich sein (hier: unter 1 cm), um auch bei geringer Blendenzahl, also großer Blendenöffnung eine gleichmäßige Matrix-Beleuchtung zu erhalten. Für jede halbe Blende von $k = 2,5$ bis $k = 11,0$ wurde ein Foto bei festgelegter Integrationszeit und festgelegter Leuchtdichte geschossen. Die Empfindlichkeit ist auf $ISO = 100$ eingestellt.

5.3.2 Auswertung

Zur Auswertung bildeten wir für jede Blendenzahl aus den jeweils zwanzig dunkelstrom-korrigierten Bildern den Mittelwert für jedes Pixel. Anschließend werteten wir die jeweils auf den Maximalwert normierten Mittelwert-Bilder grafisch aus¹⁰. Schnell zeigte sich, dass auf Grund der Versuchsgeometrie die Werte für die Blendenzahl $k = 2, 5$ nicht valide waren. Wie Abbildung 5.9 zeigt, sind auf Grund der kurzen Brennweite f' nicht nur die Referenzfläche des Leuchtdichtennormals, sondern auch die Teile der umgebenden Ullbricht'schen Kugel von der CCD erfasst. Zusätzlich zu den in Abschnitt 5.2.2 erwähnten Gründen, scheidet der Einsatz von Blendenzahlen $k < 3$ aus, da weder natürlicher Randabfall noch örtliche Empfindlichkeit erfasst sind und dementsprechend nicht korrigiert werden können.

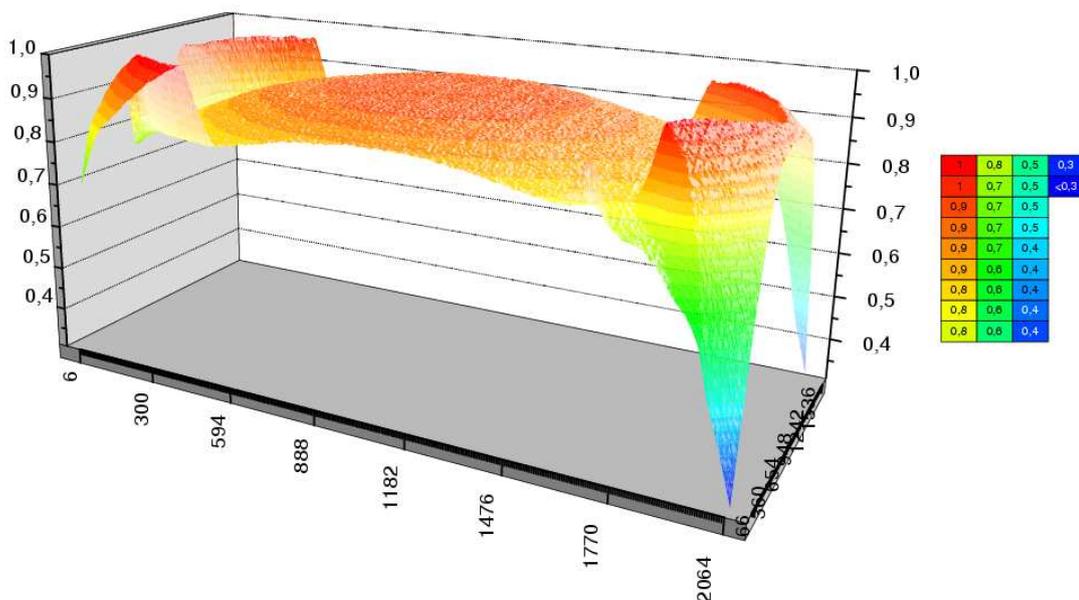


Abbildung 5.9: Misslungene Erfassung des natürlichen Randabfalls für $k=2,5$

¹⁰ wie in Abschnitt 5.1.2 beschrieben wurde auch hier eine Reduktion der Datenpunkte durchgeführt. Ein Bildpunkt stellt den Mittelwert von 36 realen Pixeln dar.

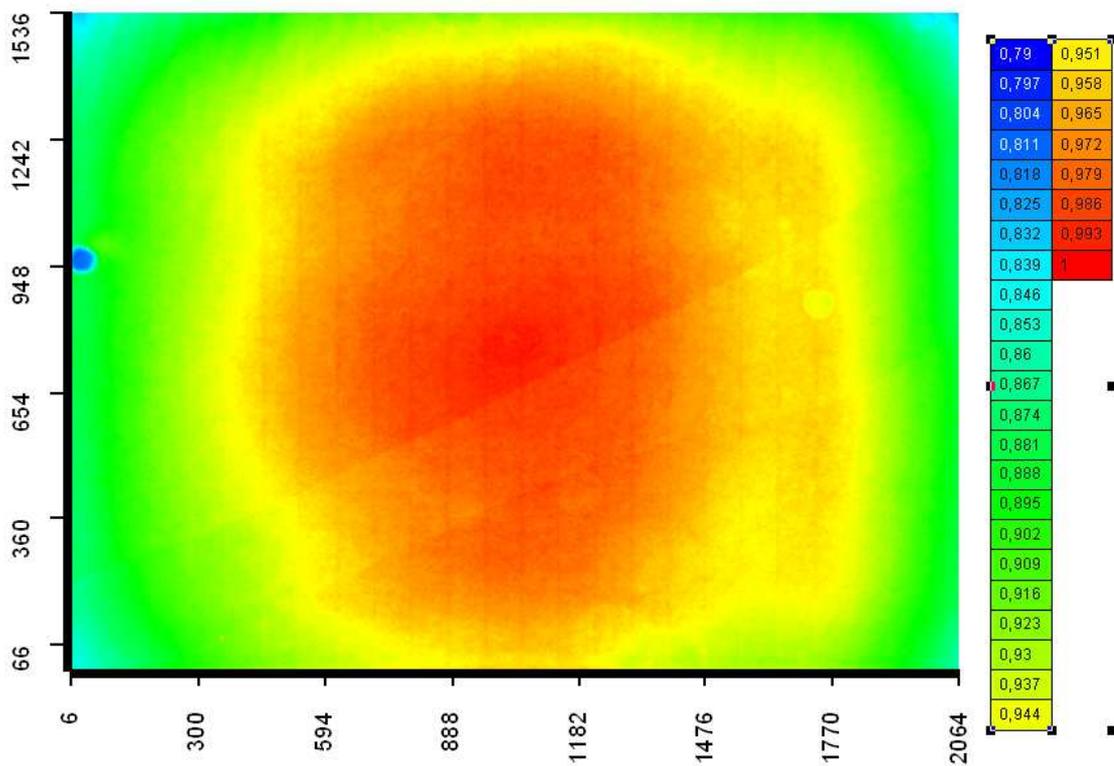


Abbildung 5.10: Prozentualer Randabfall der Grauwerte und örtliche Empfindlichkeit für $k=11$

Für die anderen Blendenzahlen $k \geq 3$ entsprachen die Ergebnisse in etwa den Erwartungen. Abbildung 5.10 zeigt den natürlichen Randabfall in Überlagerung mit der örtlichen Empfindlichkeit exemplarisch für Blendenzahl $k = 11$. Deutlich sichtbar sind Regionen mit unterschiedlicher Empfindlichkeit wie beispielsweise am linken Rand der CCD, aber auch ein nahezu symmetrischer Randabfall. Da die geometrischen Abmessungen des eingesetzten CCD-Sensors bekannt sind [23], lässt sich der gemessene Randabfall¹¹ mit dem natürlichen Randabfall vergleichen, der mit Hilfe der von Gall [5, S.89] angegebenen Formel rechnerisch ermittelt wurde.

¹¹ Hierzu wurde spaltenweise über die 9 zentrumnahen Zeilen gemittelt.

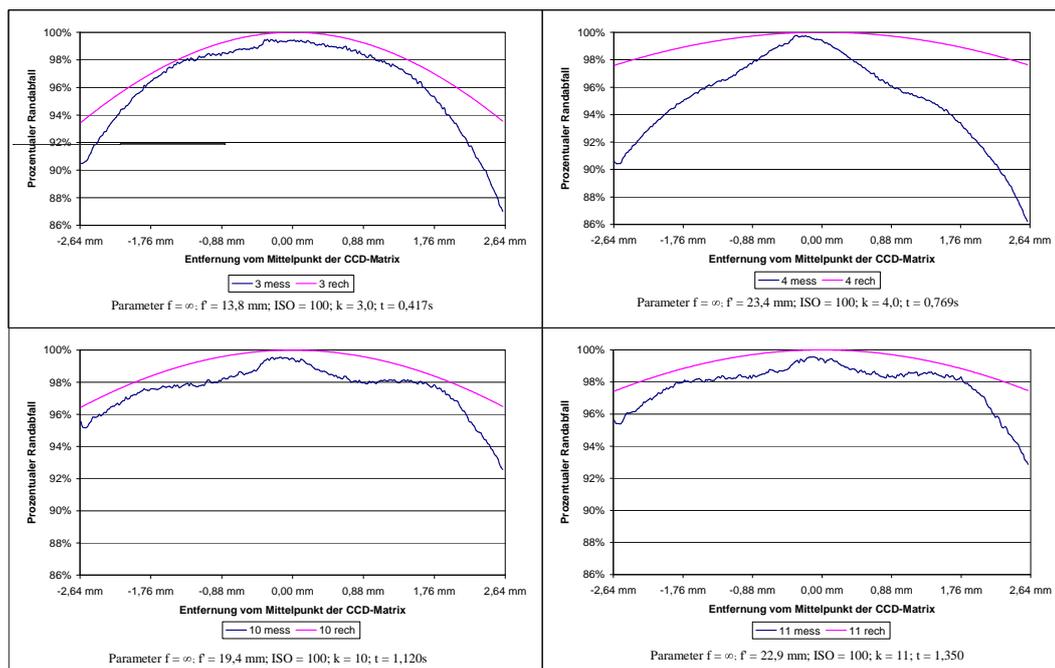


Abbildung 5.11: Vergleich Gemessener / Rechnerischer Randabfall für ausgewählte Blendenzahlen

Abbildung 5.11 zeigt, dass für kleine Blendenzahlen eine Abweichung im zweistelligen Prozentbereich vorliegt, während für große Blendenzahlen ca. 5% Differenz besteht. Äußerst problematisch ist bei der Nikon Coolpix E990, dass, wie oft bei digitalen Fotoapparaten, die Blende nur rudimentär eingestellt werden kann¹². Feinere Variationen zwischen den beiden Extrema $k = 2,5$ und $k = 11,1$ lassen sich nur mittels Variation der Brennweite f' einstellen. Dementsprechend resultieren unter Umständen verschiedene Randabfälle für ein und dieselbe Blendenzahl, da sie durch drei verschiedene Blenden/Brennweiten-Kombinationen erzielt werden kann. Dies liefert beispielsweise auch eine Erklärung dafür, dass der Randabfall für $k = 4$ im Vergleich zu anderen Blendenzahlen aus dem Rahmen fällt, wie Abbildung 5.12 zeigt.

¹² Die Blende lässt sich nur in drei Stufen direkt einstellen [14].

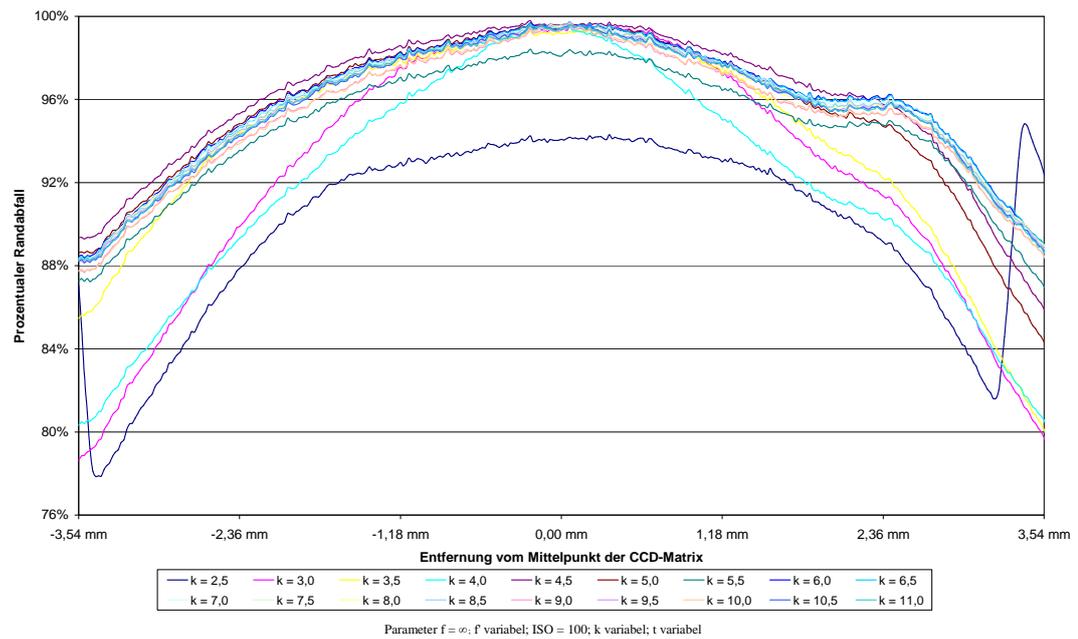


Abbildung 5.12: Randabfall für ausgewählte Blendenzahlen

5.4 Spektrale Anpassung

5.4.1 Erläuterung und Versuchsaufbau

Da die Nikon Coolpix 990 Lichtszenarien bewerten soll, die von Menschen wahrgenommen werden, ist es notwendig, sie an die spektrale Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges anzupassen. Hierzu ist die genaue Vermessung der relativen spektralen Empfindlichkeit des verwendeten CCD-Sensors eine wichtige Voraussetzung. Die sogenannte $V(\lambda)$ -Kurve¹³ beschreibt die spektrale Hell-Empfindlichkeit eines Menschen. Zielstellung ist es, die spektrale Empfindlichkeit des Sensors $s(\lambda)$ möglichst genau an die spektrale Empfindlichkeit des Auges anzupassen.

Hierzu werden zunächst einige Versuche an einem Monochromator¹⁴ durchgeführt. Monochromatoren sind Geräte mit veränderlicher Wellenlängeneinstellung, deren größte Strahlungsleistung in einem kleinen Wellenlängenintervall enthalten ist. Außerhalb desselben ist sie im Idealfall Null. Die Lage des Intervalls wird durch die kennzeichnende Wellenlänge beschrieben [26, S.223]. Durch Beugung an einem Gitter und durch anschließende Interferenz der gebeugten Strahlung entstehen Interferenzmaxima und zwar für eine bestimmte Wellenlänge unter einem ganz bestimmten Abstrahlwinkel. Es treten mehrere Interferenzordnungen auf, wobei die Unerwünschten ausgefiltert werden müssen [27, S.42]. Das wird in unserem Fall durch den Einsatz zweier Filter im Strahlengang des Messaufbaus realisiert (vgl. Abb. 5.13).

¹³ Die $V(\lambda)$ - Kurve beschreibt den spektralen Hell-Empfindlichkeitsgrad von Testpersonen bei Tageslicht (photopischer Bereich). Sie wurde empirisch ermittelt und 1924 im *Internationalen Standard Beobachter* veröffentlicht. In Deutschland ist sie unter DIN 5031 normiert.

¹⁴ Monochromator der Firma Carl Zeiss Jena

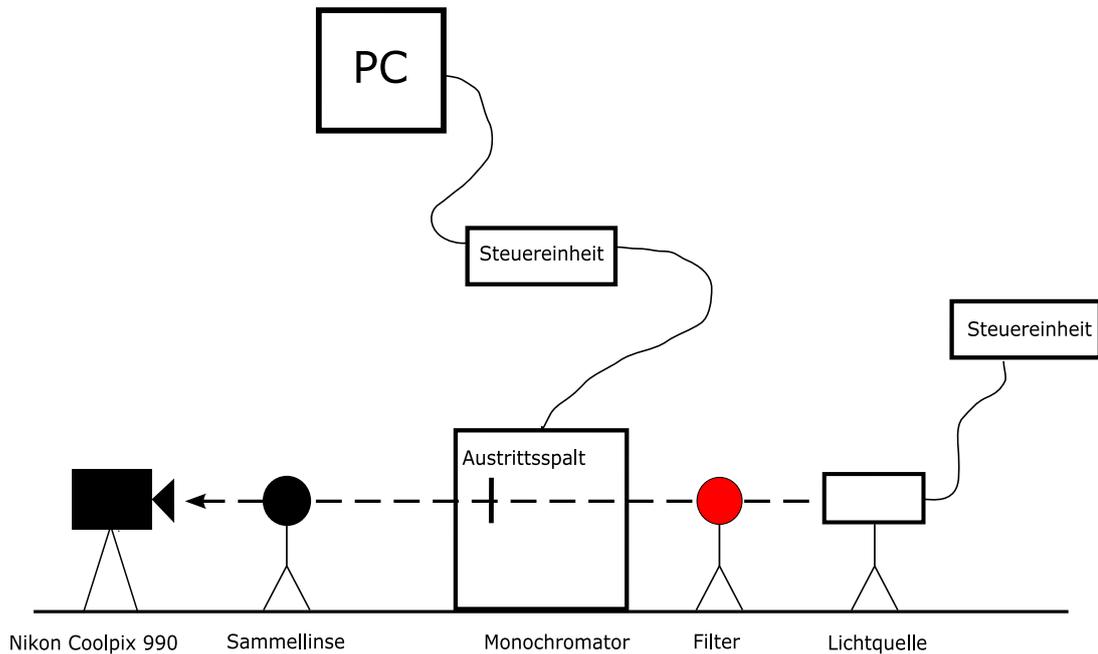


Abbildung 5.13: Versuchsaufbau mit Nikon Coolpix 990

Der hier verwendete Monochromator erlaubt eine nanometergenaue Ansteuerung der ausgesonderten Strahlung. Über einen Servomotor wird die gewünschte Wellenlänge von einem PC aus angesteuert. Die Spaltbreite beträgt am Austrittsspalt 0,1 mm. Zunächst wird mit der Nikon Coolpix 990 ein Spektrum von 400 nm bis 1100 nm in 10 nm-Schritten gemessen. Bei 500 nm wird ein gelbes Filter („GG5“) im Strahlengang platziert. Dieses wird bei 800 nm durch ein rotes Filter („RA63“) ersetzt. Die Belichtungszeit wird in der ersten Versuchsreihe auf $t = 0,125 \text{ s}$ eingestellt. In zwei weiteren Versuchsreihen wird die Belichtungszeit variiert, um eine optimale Ausnutzung des Dynamikumfangs zu erreichen. Die zusätzlich gewählten Belichtungszeiten sind $t = 0,769 \text{ s}$ und $t = 1,4 \text{ s}$. Die übrigen Parameter sind konstant bei:

$$f = \infty; f' = 19,1 \text{ mm}; ISO = 100; k = 3,6$$

Für die zweite Messreihe wird eine Fotodiode¹⁵ als Referenzquelle eingesetzt. Die Messung wird genau wie oben beschrieben auch hier durchgeführt. Der Versuchsaufbau ist bis auf den Austausch des Fotoapparates durch die Diode der Gleiche (vgl. Abb 5.14).

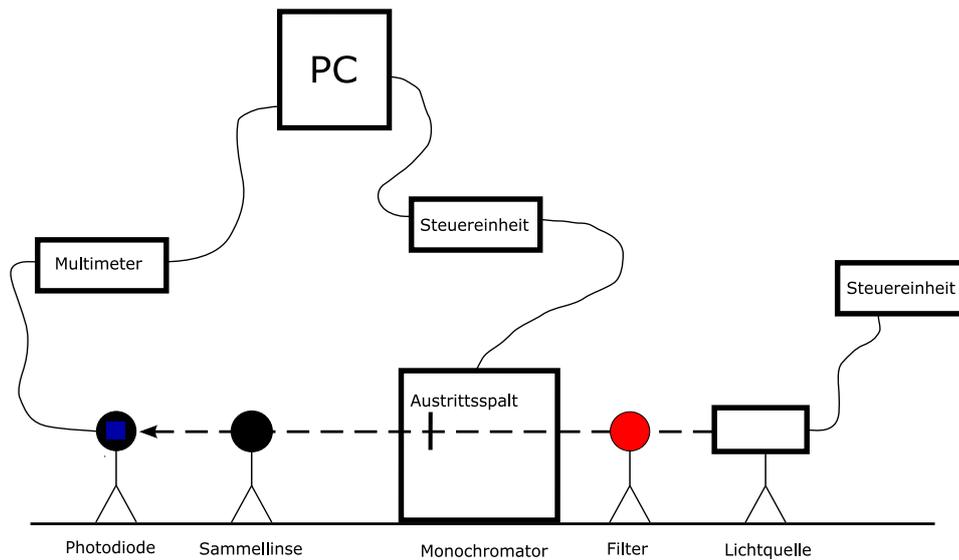


Abbildung 5.14: Versuchsaufbau mit Fotodiode 123/9

Die Messungen werden in einem Laborraum des Fachgebiets durchgeführt. Der Raum ist zum Zeitpunkt der Messungen völlig abgedunkelt. Die gesamte Messapparatur ist mit streuungs- und reflektionsarmem Molton abgedeckt. Fremdlichtquellen sind nicht vorhanden. Während der Messungen beträgt die Raumtemperatur zwischen 20°C und 25°C.

5.4.2 Auswertung

Wie zuvor wurde auch hier jeweils über die 10000 zentrumnahen Pixel gemittelt, bevor die eigentliche Auswertung stattfand. In Abbildung 5.15 sind die normierten Ergebnisse in Überlagerung mit den Angaben des Herstellers [23] dargestellt.

¹⁵ Fotodiode 123/9, Tabelle: Spektrale Empfindlichkeit der Fotodiode 123/9 siehe Anhang, Tabelle 1

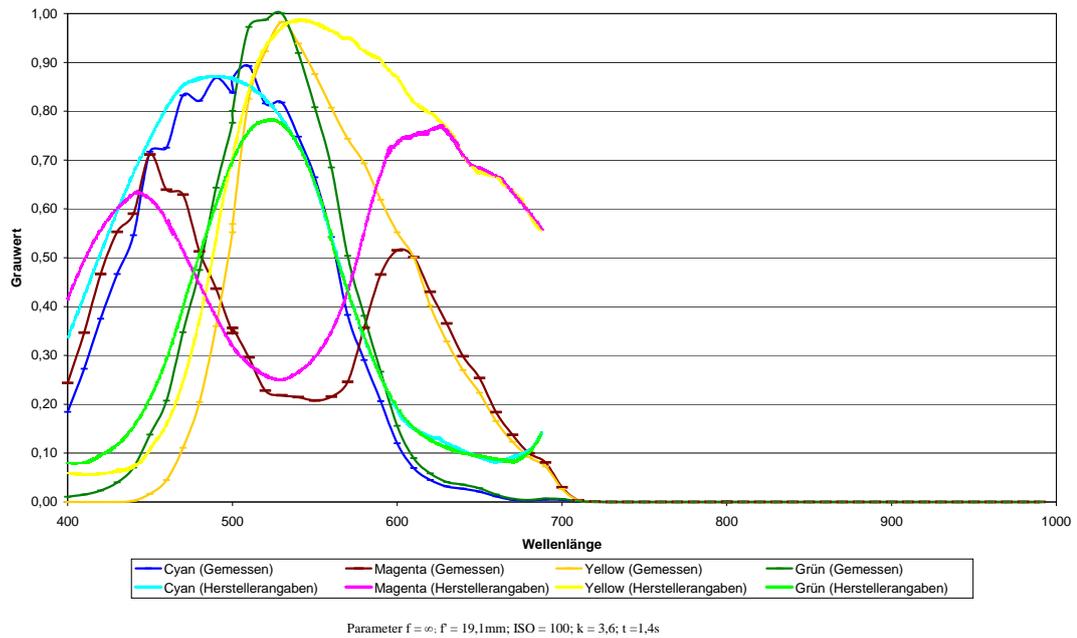
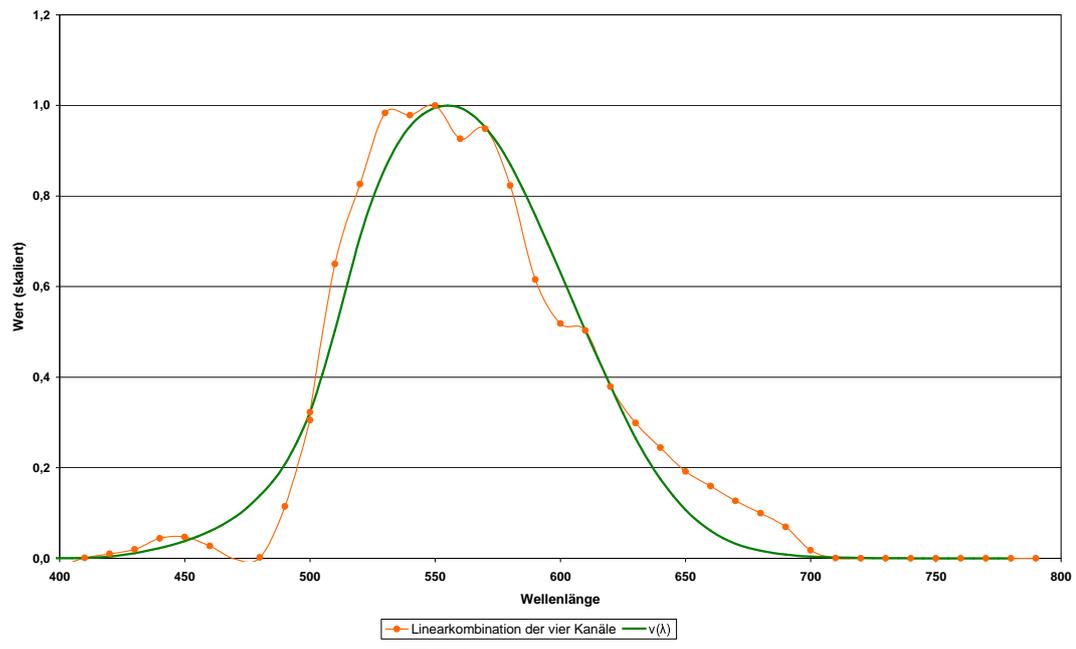


Abbildung 5.15: Relative spektrale Empfindlichkeit der vier Kanäle im Vergleich mit den Herstellerangaben

Deutlich sichtbar ist die überwiegende Übereinstimmung mit den Herstellerangaben und der Einsatz eines Infrarotsperreffilters ab ca. 600nm . Woher die deutliche Abweichung des grünen Kanals von den Herstellerangaben herrührt, bleibt verborgen. Da CCD-Sensoren stets integrale Empfänger sind, muss die Anpassung ihrer spektralen Empfindlichkeit stets im Strahlengang durch Filterpakete vorgenommen werden. Da ein Eingriff in den Fotoapparat bzw. eine Vorsatz-Optik nicht als Option zur Verfügung stehen, müssen hier die spektralen Empfindlichkeiten der einzelnen Kanäle als gegeben angenommen werden.

Abbildung 5.16: $V(\lambda)$ -Kurve und Linearkombination aus den vier Kanälen

Faktor	Wert	Faktor	Wert
x_1	0,60	x_2	-0,34
x_3	0,83	x_4	-1,00
f_1 -Fehler			17,02%

Tabelle 5.2: Faktoren (normiert) und f_1 -Fehler der optimalen Linearkombination

Dies bedeutet, dass zur Annäherung an die $V(\lambda)$ -Kurve lediglich die Möglichkeit der Bildung einer Linearkombination aus den vier einzelnen Kanälen zur Verfügung steht, das heißt: $s(\lambda) = x_1 \cdot s_{cyan}(\lambda) + x_2 \cdot s_{magenta}(\lambda) + x_3 \cdot s_{yellow}(\lambda) + x_4 \cdot s_{grün}(\lambda)$ wobei die Faktoren x_1, x_2, x_3, x_4 empirisch ermittelt werden müssen. Abbildung 5.16 zeigt die optimale Lösung einer Annäherung an die $V(\lambda)$ -Kurve¹⁶. Tabelle 5.2 enthält die jeweiligen Faktoren und den charakteristischen f_1 -Fehler.

¹⁶ Die Faktoren wurden hierbei mit Hilfe von Excel bestimmt, wobei das Hauptaugenmerk auf der Minimierung des f_1 -Fehlers lag

5.5 Bewertung der Genauigkeit

Die Vermessung bzw. Kalibrierung der Nikon Coolpix 990 ist insgesamt relativ ungenau. Man sollte sich darüber im Klaren sein, dass dieser Fotoapparat wohl eher ein Leuchtdichte-Schätzgerät, als ein Leuchtdichte-Messgerät ist. Um den Gesamtfehler abschätzen zu können, betrachten wir zunächst die Einzelfehlerquellen. Für die Güte von Leuchtdichtemessgeräten ist nach DIN 5032-7 die $V(\lambda)$ -Anpassung von besonderer Bedeutung. Der sogenannte f_1 -Fehler gibt die Abweichung von der $V(\lambda)$ -Kurve an. In unserem Fall liegt der ermittelte f_1 -Fehler bei 17,02 %. Da nach DIN 5032-7 der f_1 -Fehler für Messgeräte der Klasse C (mit geringer Genauigkeit) nicht über 9% liegen darf, liegt die Nikon bereits außerhalb der nach der DIN erfassten Messgeräte. Die weiteren Fehler, die im Bereich Linearisierung, Dunkelstromkorrektur und Shading gemacht wurden, sind in Prozent nur schwer einzuschätzen. Weiterhin kommen Ungenauigkeiten im Messaufbau und leicht unterschiedliche Messbedingungen an den einzelnen Versuchstagen hinzu. Vergleichsmessgeräte, die teilweise Jahrzehnte in der Vergangenheit das letzte Mal kalibriert worden sind, tragen zu weiteren Fehlern bei. Der Gesamtfehler liegt somit deutlich außerhalb der für die Messgeräte der Klasse C nötigen Abweichung von unter 20%.

Kapitel 6

Anwendung- Das Programm *LUMIPIX*

6.1 Funktionsweise

Nachdem die entsprechenden Korrekturfaktoren ermittelt waren, galt es abschließend, ein Programm zu entwerfen, das die entsprechenden Umrechnungen an den RAW-Dateien vornimmt und ein orts aufgelöstes Leuchtdichtebild ausgibt. Die beste Lösung wäre gewesen, ein Programm zu schaffen, das komplett die Steuerung des Fotoapparates übernimmt und somit eine Verfälschung durch die Wahl einer zu großen Belichtungszeit oder einer zu kleinen Blendenzahl zu verhindern (vgl. Kap. 5.2.2 bzw. 5.3.2). Allein wegen des ungelösten Problems, RAW-Dateien über die serielle bzw. USB-Schnittstelle auszulesen (vgl. Kap.4.3) kam dieses Konzept nicht in Frage. *LUMIPIX* ist folglich als reines Konvertierungsprogramm gedacht, das RAW-Dateien einliest und ein Leuchtdichtebild im *tix*-Format¹ ausgibt (vgl. Programmablaufplan in Abb. 1 im Anhang). Diese lassen sich wiederum beispielsweise mit der Software des Leuchtdichte-Messgerätes LMK-COLOR betrachten und näher auswerten. *LUMIPIX* kann unter Windows auf zwei verschiedene Wege aufgerufen werden. Zum Einen besteht die Möglichkeit, das Programm über die Eingabeaufforderung mit der Syntax „lumipix.exe *Dateiname*“ zu starten, zum Anderen, indem im Windows-Explorer auf eine Datei mit der linken Maustaste geklickt wird, und aus dem Kontextmenü unter der Funktion „Öffnen mit“ „lumipix.exe“ ausgewählt wird. Weitere Nutzer-Eingaben sind nicht nötig, nur sind folgende Punkte zu beachten:

¹ *tix* ist ein dem TIFF verwandtes Datenformat, das von der Firma Technoteam konzipiert wurde [28, S.114]

- Das Programm erwartet Dateien, die gemäß der von Werk aus eingestellten Namenskonvention der Nikon Coolpix 990 benannt sind, also $DSCN_x.jpg$, wobei x eine beliebige natürliche Zahl ist, die mit Vornullen auf vier Stellen aufgefüllt wird. Bei Nichteinhaltung der Namenskonvention bricht das Programm nach dem Einlesen der Dunkelstromkorrektur-Matrix ab, ohne eine Konvertierung vorgenommen zu haben.
- Das Programm erwartet, dass die Datei, die ihm übergeben wird, Rohdaten enthält. Die Übergabe eines anderen Dateityps hat Fehler zur Folge, unter Umständen bricht das Programm mit Fehlermeldungen ab. Es kommt nicht zu einer sinnvollen Konvertierung.
- Bei Übergabe einer der Namenskonvention entsprechenden Datei $DSCN_x.jpg$, erwartet das Programm, dass im gleichen Ordner eine Datei $DSCN_{(x+1)}.jpg$ vorliegt, aus der es die erforderlichen EXIF-Informationen auslesen kann². Nach Einlesen der EXIF-Daten wird die Konvertierung für $DSCN_x.jpg$ gestartet (siehe unten bzw. Abb. 1 im Anhang). Nach deren Abschluss prüft das Programm, ob eine Datei $DSCN_{(x+2)}.jpg$ vorliegt. Wenn dies der Fall ist, wird auch diese Datei konvertiert. Das Programm bricht ab, wenn es nach einer Datei $DSCN_{(x+y)}$ keine Datei $DSCN_{(x+y+1)}$ mehr vorfindet.

Bei der eigentlichen Konvertierung beginnt *LUMIPIX* zunächst mit einer Dunkelstromkorrektur. Die aus der Auswertung (vgl. 5.1.2) gewonnene Dunkelstrommatrix wird in Abhängigkeit der Belichtungszeit skaliert. Anschließend wird die Shading-Korrektur durchgeführt. Auf Grund der großen Datenmengen sind nur 18 Shading-Korrektur-Matrizen von $k = 2,5$ bis $k = 11$ in 0,5-Schritten vorgegeben. Für Blendenzahlen, die zwischen dieses Raster fallen, wird eine Shading-Matrix linear interpoliert. Nun wird unter Verlust der Auflösung die gefundene Linearkombination angewandt (vgl. Kap. 5.4.2) bevor abschließend eine Absolutwertkalibrierung (Umrechnung in $\frac{cd}{m^2}$) durchgeführt wird.

² Die Nikon Coolpix 990 legt die RAW- und JPEG-Dateien im Diagnosemodus automatisch in dieser Reihenfolge ab

6.2 Bewertung der Genauigkeit

Nun galt es, die Genauigkeit der Schätzung zunächst in einem direkten Vergleich mit der Leuchtdichtemesskamera *LMK 98-Color* der Firma *Technoteam* zu betrachten.

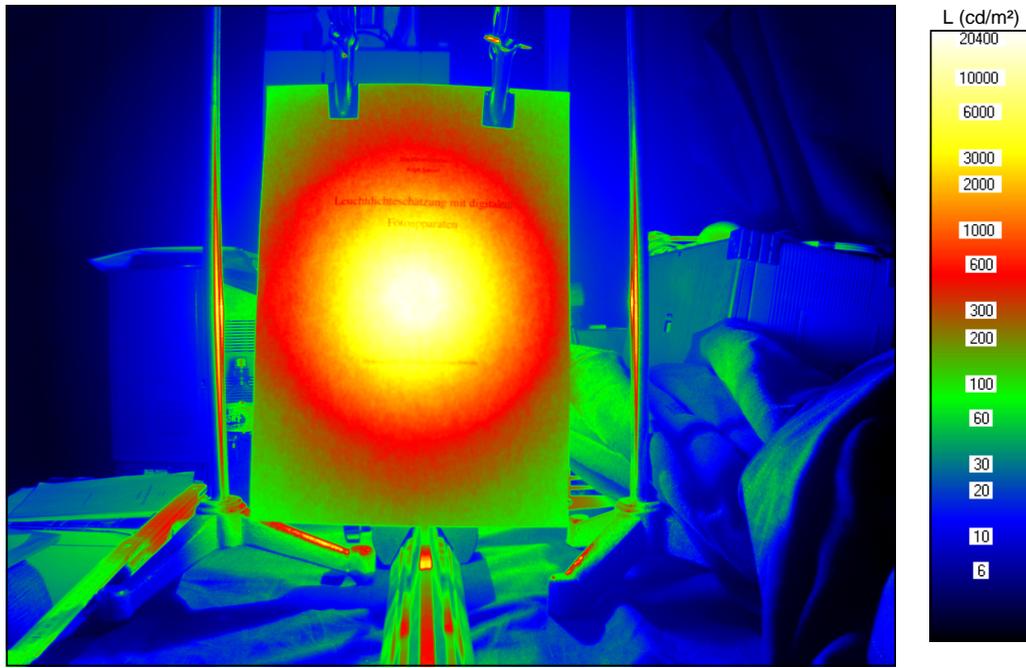


Abbildung 6.1: High-Dyn-Leuchtdichtebild einer Szene mit *LMK 98-Color*

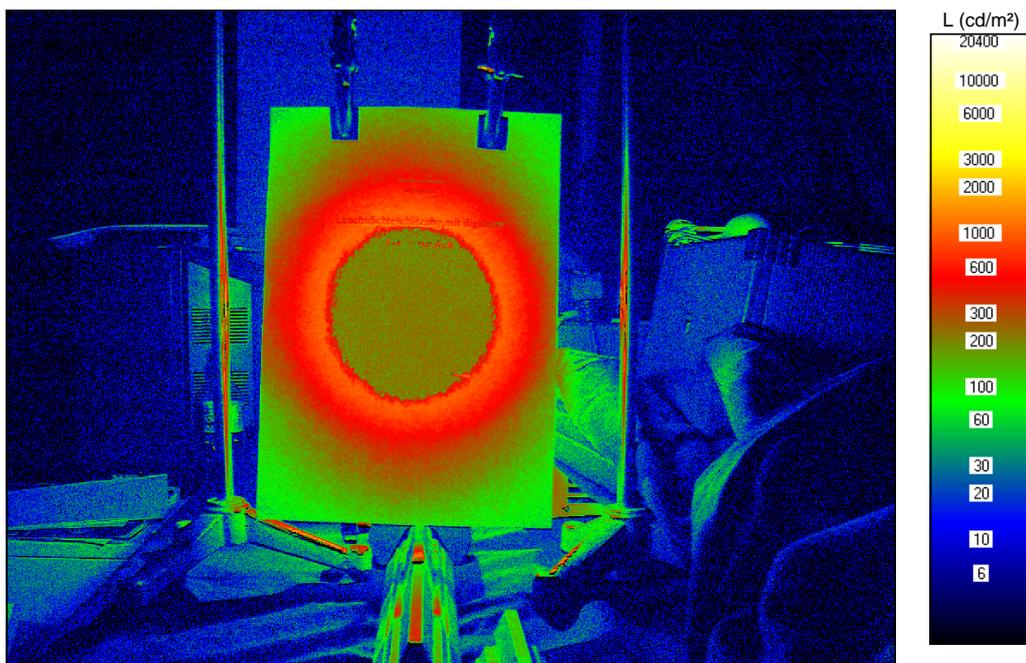


Abbildung 6.2: Leuchtdichtebild der selben Szene mit Nikon Coolpix 990 und *LUMIPIX*

Abbildung 6.1 zeigt das Ergebnis einer High-Dyn-Messung³ mit der Leuchtdichtemeskamera, Abbildung 6.2 das Ergebnis einer Messung der gleichen Szene mit der Nikon Coolpix 990 unter Einsatz des Programms *LUMIPIX*. Prägnant fällt der übersteuerte Bereich im Zentrum des Bildes auf. Auf Grund der Linearkombination kommt es hier bei Leuchtdichten, die zu einer Übersteuerung des gelben Kanals führen, paradoxerweise zur Berechnung von Werten, die unter den nicht übersteuerten liegen. Ab einer gewissen Grenze jedoch sind alle vier Farbkanäle übersteuert und die Werte einheitlich. In der Peripherie der Szene macht sich auf der anderen Seite Untersteuerung bemerkbar. In den übrigen Bereichen ist die Annäherung gut, wie man an den Rändern des Papiers und den Stativ-Teilen sehen kann.

Abschließend stellten wir die Ergebnisse der vier verschiedenen Geräte und Verfahren gegenüber. Grundlage war eine Szene mit Mischlicht, die exemplarisch in Abbildung 6.3 dargestellt ist.

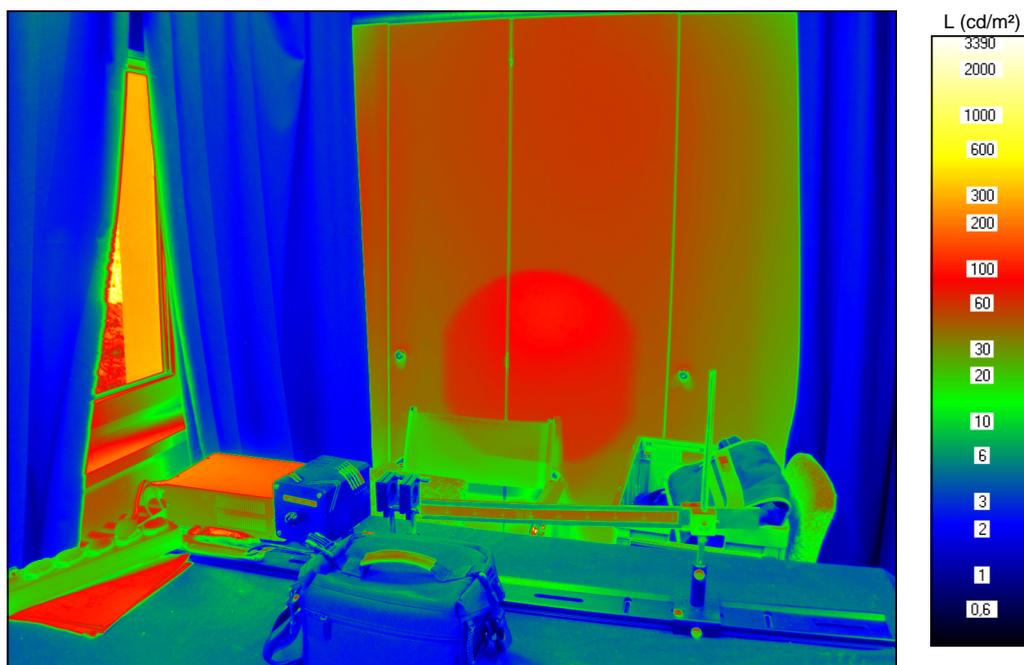


Abbildung 6.3: High-Dyn-Leuchtdichtebild der Mischlicht-Szene mit *LMK 98-Color*

Das Ergebnis der Auswertung war überraschend:

³ Da CCD-Elemente in der Regel einen Dynamikumfang von 1:100 haben, kommt es bei realen Szenen oft zu Unter- beziehungsweise Überbelichtung. Um dies zu kompensieren, werden von einer Szene mehrere Aufnahmen mit unterschiedlichen Integrationszeiten angefertigt und zu einem Bild mit künstlich erzeugtem hohen Dynamikumfang kombiniert.

Messpunkt	LMK 98-Color	Gerät / Verfahren		
		LUMIPIX Nikon Coolpix 990	Berechnung nach Coutelier Nikon Coolpix 990	Canon Powershot A70
Glanzpunkt	94,97 $\frac{cd}{m^2}$	74,37 $\frac{cd}{m^2}$	98,82 $\frac{cd}{m^2}$	33,58 $\frac{cd}{m^2}$
Schrankecke r.o.	30,26 $\frac{cd}{m^2}$	21,8 $\frac{cd}{m^2}$	22,80 $\frac{cd}{m^2}$	11,07 $\frac{cd}{m^2}$
Oberseite Netzgerät	201,8 $\frac{cd}{m^2}$	113,5 $\frac{cd}{m^2}$	97,36 $\frac{cd}{m^2}$	34,05 $\frac{cd}{m^2}$
Oberseite Lampe	4,57 $\frac{cd}{m^2}$	6,776 $\frac{cd}{m^2}$	5,71 $\frac{cd}{m^2}$	1,35 $\frac{cd}{m^2}$
Ecke Stuhllehne l.o.	24,91 $\frac{cd}{m^2}$	20,06 $\frac{cd}{m^2}$	22,06 $\frac{cd}{m^2}$	6,74 $\frac{cd}{m^2}$

Tabelle 6.1: Gegenüberstellung der Ergebnisse der verschiedenen Geräte / Verfahren

Es zeigt sich, dass die Nikon Coolpix mit der Auswertung nach Coutelier (vgl. Kap. 3.2) den von der *LMK 98-Color* gemessenen Leuchtdichtewerten am Nächsten kommt. Erstaunlich ist das schlechte Abschneiden der Canon Powershot A70 im Vergleich zu den Ergebnissen von Kapitel 3.3. Sie lassen sich mit einem Blick in Tabelle 6.2 erklären: Die Blendenzahl weicht mit $k = 2,8$ stärker von der in Kapitel 3.2 zur Kalibrierung eingestellten Blendenzahl $k = 4,8$ ab. Scheinbar wirken sich die Rundungsfehler stark aus. Um dies zu überprüfen, nahmen wir die Szene ein weiteres Mal mit einer Blendenzahl von $k = 6,3$ auf, um vergleichbare Einstellungen zur Nikon Coolpix zu erzielen. Die Schätzwerte fallen zwar deutlich besser aus (Die Leuchtdichtewerte liegen ca. um den Faktor zwei höher), jedoch sind weiterhin stärkere Abweichungen vom gemessenen Wert der *LMK 98-Color* zu verzeichnen.

Parameter	Gerät	
	Nikon Coolpix 990	Canon Powershot A70
Belichtungszeit	0,256s	0,077s
Blendenzahl	6,2	2,8
ISO-Empfindlichkeit	100	100

Tabelle 6.2: An den Fotoapparaten eingestellte Parameter

Gemeinsam ist allen drei Schätzmethode eine starke Abweichung im vierten Messpunkt. Dies überrascht, da die Oberfläche des Netzgerätes diffus reflektierend ist und die unvermeidliche Parallaxe bei der Aufnahme als Fehlergrund ausscheidet. Hier zeigen sich jedoch die Stärken der Auswertung der RAW-Daten mit dem Programm *LUMIPIX*.

Kapitel 7

Fazit

Wie vor allem in Kapitel 6.2 deutlich wurde, lässt sich zumindest mit der Nikon Coolpix 990 die Leuchtdichte zumindest in Größenordnungen schätzen. Nichtsdestotrotz beträgt die Abweichung unter Umständen 50% vom Realwert. Die Implementierung der in Kapitel 5 gefundenen Korrekturterme in das Programm *LUMIPIX* hatte im Vergleich zur Auswertung nach Coutelier jedoch eher enttäuschende Ergebnisse zur Folge, da sich der Fehler nicht verringert, sondern in gewissen Punkten sogar vergrößert hatte. Dennoch halten wir die Nutzung des Programms für sinnvoll, da sie einen unbestrittenen Vorteil bietet:

Während die Auswertung der TIFF-Bilder nach Coutelier manuell in Photoshop oder einem vergleichbar mächtigen Bildbearbeitungsprogramm beziehungsweise unter Zuhilfenahme von Tabellenkalkulationsprogrammen wie Excel erfolgen muss, liefert *LUMIPIX* direkt berechnete Leuchtdichtewerte im vorteilhaften TIX-Format. Diese können anschließend mit der Software der *LMK 98-Color* auf vielfältige Art und Weise ausgewertet werden. Die Berechnung der Leuchtdichtewerte einschließlich Korrekturen und Ausgabe benötigt für ein einzelnes Bild ca. 20 Sekunden; bei der Wandlung mehrerer Bilder benötigt das Programm durchschnittlich 5 Sekunden pro Bild. Dies stellt einen wesentlichen Geschwindigkeitsvorteil gegenüber der Methode nach Coutelier dar.

Erklärung

Die vorliegende Arbeit ist eine Kollektivarbeit.

Von Herrn Ralph Samuel wurden folgende Abschnitte bearbeitet: 2; 4; 5.1.2; 5.2.2; 5.3.2; 5.4.2; 6 und 7.

Von Herrn Jörg Meyer-Brenken wurden die Abschnitte 1; 3; 5.1.1; 5.2.1; 5.3.1; 5.4.1; 5.5 und 7 bearbeitet.

Wir erklären, dass wir die Versuche, die dieser Arbeit zu Grunde liegen, selbständig durchgeführt, sowie die schriftliche Ausarbeitung selbständig abgefasst haben. Quellen, Literatur und Hilfsmittel, die von uns benutzt wurden, sind als solche gekennzeichnet.

Ilmenau, 24. April 2005

Jörg Meyer-Brenken

Ilmenau, 24. April 2005

Ralph Samuel

Anhang

λ (nm)	S ($\mu A \cdot \frac{qm}{W}$)	λ (nm)	S ($\mu A \cdot \frac{qm}{W}$)	λ (nm)	S ($\mu A \cdot \frac{qm}{W}$)
200	11,3883	370	11,39	680	11,3917
210	11,3884	380	11,3901	700	11,3918
220	11,3885	390	11,3902	720	11,3919
230	11,3886	400	11,3903	740	11,392
240	11,3887	420	11,3904	760	11,3921
250	11,3888	440	11,3905	780	11,3922
260	11,3889	460	11,3906	800	11,3923
270	11,389	480	11,3907	820	11,3924
280	11,3891	500	11,3908	840	11,3925
290	11,3892	520	11,3909	860	11,3926
300	11,3893	540	11,391	880	11,3927
310	11,3894	560	11,3911	900	11,3928
320	11,3895	580	11,3912	920	11,3929
330	11,3896	600	11,3913	940	11,393
340	11,3897	620	11,3914	960	11,3931
350	11,3898	640	11,3915	980	11,3932
360	11,3899	660	11,3916	1000	11,3933

Tabelle 1: Spektrale Empfindlichkeit der Fotodiode 123/9

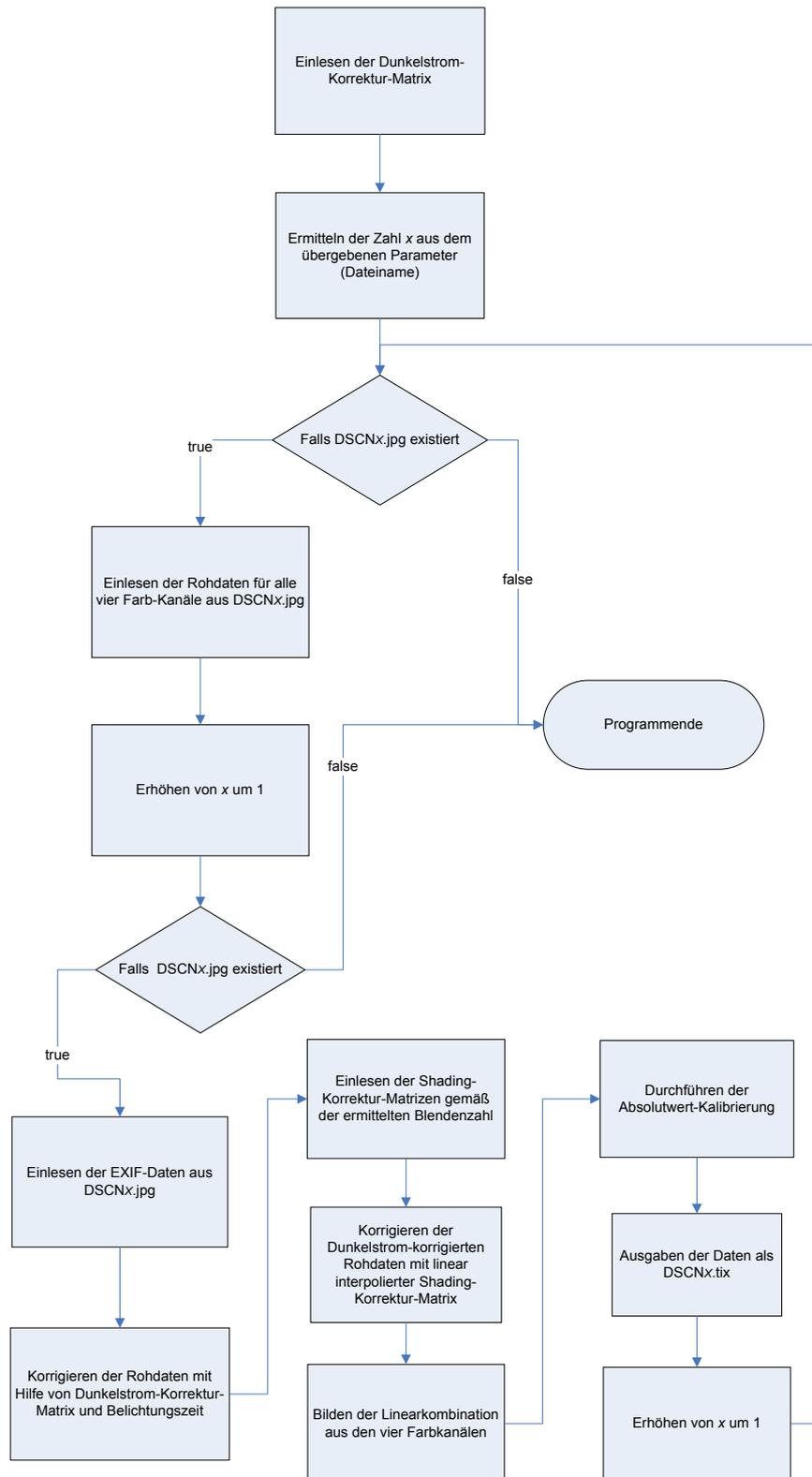


Abbildung 1: Programmablaufplan des Programms *LUMIPIX*

Literaturverzeichnis

- [1] FISCHBACH, Ingo ; RIEMANN, Manfred ; SCHMIDT, Franz: Anwendungen angepaßter CCD-Sensortechnik in der orts aufgelösten Lichtmeßtechnik. In: *Licht* 7-8 (1997), S. 582ff, zitiert auf Textseiten: 1, 23, 28, 34
- [2] KRÜGER, Udo: *Ausgewählte Aspekte der orts aufgelösten Erfassung stationärer Licht- und Farbverteilungen*. Osnabrück : Der Andere Verl., 2004, zitiert auf Textseite: 3
- [3] HOLST, Gerald C.: *CCD Arrays, cameras, and displays*. 1. Aufl. Winter Park: JCD Publishing, 1996, zitiert auf Textseiten: 4, 12, 17, 24, 25
- [4] JANESICK, James R.: *Scientific charge-coupled devices*. Bellingham, Wash : SPIE Press, 2001, zitiert auf Textseite: 4
- [5] GALL, Dietrich: *Grundlagen der Lichttechnik : Kompendium*. 1. Aufl. München [u.a.]: Pflaum, 2004, zitiert auf Textseiten: 4, 34, 36
- [6] COUTELIER, Bruno ; DUMORTIER, Dominique: Luminance calibration of the Nikon Coolpix 990 digital camera. In: *proceedings of 25th Session of the CIE, San Diego*, 2003, zitiert auf Textseiten: 5, 6, 8, 11, 16
- [7] FREY, Herbert: *Digitale Bildverarbeitung in Farbräumen*. München, 1988, zitiert auf Textseite: 5
- [8] MASCHKE, Thomas: *Digitale Kameratechnik : Technik digitaler Kameras in Theorie und Praxis*. Berlin [u.a.] : Springer, 2004, zitiert auf Textseite: 7

- [9] CANON INC. *Technical Report - Exif Print*. URL <http://www.canon.com/camera-museum/tech/report/200208/200208.html>. Aktualisierungsdatum: 30.03.2005, zitiert auf Textseite: 7
- [10] LIPP, Thomas W.: *Grafikformate : [Aufbau und Programmierung aller wichtigen Grafikformate und sofort einsetzbare Bibliotheken unter Windows 95 und Windows NT*. 1. Aufl. Unterschleißheim : Microsoft Press, 1997, zitiert auf Textseite: 7
- [11] JAPAN ELECTRONICS INFORMATION AND TECHNOLOGY INDUSTRIES ASSOCIATION. *Exchangeable image file format for digital still cameras: Exif Version 2.2*. URL <http://www.exif.org/Exif2-2.PDF>. Aktualisierungsdatum: 30.03.2005, zitiert auf Textseiten: 7
- [12] PIZZOLATO, Davide. *Cexif - a small class to read the EXIF data stored in JPEG images*. URL <http://www.xdp.it/cexif.htm>. Aktualisierungsdatum: 30.03.2005, zitiert auf Textseiten: 7, 14
- [13] BEYER, Marcus ; KUNZE, Olliver. *Farbmanagement digitaler Kameras*. 2004, zitiert auf Textseiten: 8, 16
- [14] MEDIANORD EK. *Ausführliches Datenblatt für Nikon Coolpix 990*. URL <http://www.digitalkamera.de/Kameras/nikon-coolpix-990.asp>. Aktualisierungsdatum: 31.03.2005, zitiert auf Textseiten: 9, 37
- [15] CANON DEUTSCHLAND GMBH. *Canon Deutschland - PowerShot A70 Technische Daten*. URL http://www.canon.de/for_home/product_finder/cameras/digital/powershot_a70/index.asp?specs=1. Aktualisierungsdatum: 31.03.2005, zitiert auf Textseite: 10
- [16] ADOBE SYSTEMS INCORPORATED. *Digitale Negative (DNG) - The public, archival format for digital camera raw data*. URL <http://www.adobe.com/products/dng/main.html>. Aktualisierungsdatum: 31.03.2005, zitiert auf Textseiten: 17
- [17] TRINKWALDER, Andrea: Raw-Masse - Höhere Farbtiefe, weniger Fehler: Bessere Bilder dank Rohdaten. In: *c't 16/2004* (2004), S. 152 – 159, zitiert auf Textseite: 17

- [18] UNBEKANNTER AUTOR. *Nikon Coolpix 2500 - Research of E2500 v1.1*. URL http://e2500.narod.ru/raw_format_e.htm. Aktualisierungsdatum: 31.03.2005, zitiert auf Textseiten: 18, 19
- [19] WALLACE, Charlie. *cPix Software Camera Control Software for Nikon Coolpix 990, and allegedly others*. URL <http://www.charliex.net/cpix/cpix.htm>. Aktualisierungsdatum: 31.03.2005, zitiert auf Textseiten: 18, 20
- [20] BOWMAN, John. *Remote Control Driver and GUI for the Nikon Coolpix 990, 950, 880, 775, and 995 Digital Cameras*. URL <http://www.math.ualberta.ca/imaging/>. Aktualisierungsdatum: 31.03.2005, zitiert auf Textseiten: 18, 20
- [21] UNBEKANNTER AUTOR. *Nikon Coolpix 2500 - Research of E2500 v1.1*. URL http://e2500.narod.ru/raw2nef_e.htm. Aktualisierungsdatum: 31.03.2005, zitiert auf Textseite: 18
- [22] FUCHS, Udi. *UFRaw - The Unidentified Flying Raw*. URL <http://ufraw.sourceforge.net/>. Aktualisierungsdatum: 31.03.2005, zitiert auf Textseiten: 18, 25
- [23] SONY ELECTRONICS INC. *Sony ICX252AKF - data sheets*. URL <http://products.sel.sony.com/semi/PDF/ICX252AKF.pdf>. Aktualisierungsdatum: 31.03.2005, zitiert auf Textseiten: 19, 36, 41
- [24] FISCHBACH, Ingo ; KRÜGER, Udo: Erfassung photometrisch richtiger Daten mit CCD-Kameras. In: *43. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium der TU-Ilmenau, 21.-24.09.1997* Bd. Band 1, 1998, zitiert auf Textseiten:, S. 658ff 21, 22
- [25] SCHMIDT, Franz ; KRÜGER, Udo: Einsatz von Standard-CCD-Matrizen für fotometrische Messungen - Anwendung und Design von Kameras mit hoher Auflösung und Genauigkeit. In: *Framos CCD-Forum 99, 10.-11.06.99, München 1999*, 1999, zitiert auf Textseiten: 25, 28
- [26] ERB, Wolfgang: *Leitfaden der Spektroradiometrie*. Berlin [u.a.] : Springer, 1989, zitiert auf Textseite: 39

- [27] ZIMMERMANN, R.: *Lichtmeßtechnik*. TH Ilmenau - Sektion Physik und Technik, 1975, zitiert auf Textseite: 39
- [28] TECHNOTEAM BILDVERARBEITUNG GMBH. *LMK2000 - Handbuch Bedienung*. URL <http://www.technoteam.de/pdf/Handbuch%20LMK%202000.pdf>. Aktualisierungsdatum: 31.03.2005, zitiert auf Textseite: 45