

Farb- und photometrisch kalibrierte Verarbeitung von HDR-Bilddaten

Diplomarbeit

zur Erlangung des Grades eines Diplom-Informatikers
im Studiengang Computervisualistik

vorgelegt von
Hendrik Engelbrecht

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. Stefan Müller
(Institut für Computervisualistik, AG Computergraphik)
Zweitgutachter: Dipl.-Inform. Jakob Bärz
(Institut für Computervisualistik, AG Computergraphik)

Koblenz, im März 2010

Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Ja Nein

Mit der Einstellung der Arbeit in die Bibliothek bin ich einverstanden.

Der Veröffentlichung dieser Arbeit im Internet stimme ich zu.

.....
(Ort, Datum)

.....
(Unterschrift)

Dankesworte

Ich möchte hiermit meinen Dank all jenen aussprechen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Ich danke meinem Professor und Zweitbetreuer Stefan Müller für die sehr gute Lehre. Dank gilt meiner Familie, die mein Studium erst ermöglicht und mich jederzeit nicht nur finanziell unterstützt hat.

Meinem Mathematikdozenten Norbert Heinrich, sowie meinen Kommilitonen David Gossow und Tobias Eble danke ich für ihr offenes Ohr und die Unterstützung in mathematischen Fragen. Niklas Henrich danke ich für seinen fachlichen Rat. Nicht zuletzt möchte ich meinen beiden Korrekturlesern Janina und Jörg für ihre Mühe und ihre wachsamen Augen danken.

Abschließend gilt ein besonderer Dank meinem Betreuer Jakob Bärz für die sehr gute Betreuung und Unterstützung bei dieser Arbeit.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung und Überblick	1
2	Grundlagen zur Licht- und Farbwahrnehmung	2
2.1	Was ist Licht?	2
2.2	Was ist Farbe?	4
2.2.1	Physiologische Sichtweise	4
2.2.2	Physikalische Sichtweise	5
2.3	Farbsehen	7
2.3.1	Rezeptortypen des menschlichen Auges	8
2.3.2	Spektrale Absorptionskurven	9
2.3.3	Metamerie	10
2.4	Farbmessung (Colorimetrie)	11
2.5	Colorimetrie gemäß CIE	13
2.5.1	Der CIE-Normalbeobachter	13
2.5.2	X, Y, Z CIE-Tristimuluswerte	14
2.6	x, y, z Chromaticity Coordinates	15
2.7	L*a*b*-Farbraum	16
3	Grundlagen zur Kameratechnik	18
3.1	Das Auge als Vorbild	18
3.2	Bildsensoren	19
3.2.1	CCD-Sensoren	19
3.2.2	CMOS-Sensoren	20
3.3	Der HDRC-Bildsensor	22
3.3.1	Physikalisches Modell des HDRC-Sensors	24
3.3.2	Interner Aufbau der HDRC-Kamera	24
3.4	Funktionsweise einer Fotodiode	25
3.5	Die HDRC-Kamera GEVILUX CAM1xCL Color	26
3.5.1	Generelle Eigenschaften	26
3.5.2	Farbfilter der Kamera	27
3.5.3	Das Sensorelement	27
3.5.4	FPN-Korrektur und Defekt-Pixel-Maskierung	28
3.5.5	Farbberechnung	28
3.5.6	Farbanpassung	29
3.5.7	Datenausgabe	29
4	Grundlagen zur Monitortechnik	30
4.1	Grundlagen der LCD-Technik	30
4.2	Gammakorrektur	31
4.3	Monitor-Gamut	32
4.4	LC-Display NEC Spectraview 2690	32

5	Related Work	35
5.1	Displaycharakterisierung	35
5.1.1	Matrix, Gamma and Offset (MGO) Modell	35
5.1.2	Matrix, 1D LUT and Offset (1D LUT) Modell	37
5.1.3	3D Tetrahedral LUT and Offset (3D LUT) Modell	38
5.2	Charakteristiken von Liquid Crystal Displays (LCDs)	38
5.2.1	Aufwärmphase	38
5.2.2	Farbkonstanz	38
5.2.3	Kanalunabhängigkeit - Additivität	39
5.2.4	Räumliche Unabhängigkeit	39
5.2.5	Räumliche Homogenität	39
5.2.6	OETF	40
5.3	Analyse des <i>NEC SpectraView 2690</i> Displays	40
5.3.1	Aufwärmphase des Monitors	40
5.3.2	Farbkonstanz des Monitors	40
5.3.3	Additivität des Monitors	41
5.3.4	Räumliche Unabhängigkeit des Monitors	42
5.3.5	Räumliche Homogenität des Monitors	42
5.3.6	OETF des Monitors	44
5.4	Photometrische Kalibrierung	44
6	Kameracharakterisierung	47
6.1	Modellbildung	47
6.1.1	Vorwärtsmodell	48
6.1.2	Inverses Modell	49
6.2	Kameracharakteristiken	49
6.2.1	Farbkonstanz	50
6.2.2	Räumliche Homogenität	50
6.2.3	Additivität der Primärkanäle	51
7	Praktische Umsetzung der Kameracharakterisierung	52
7.1	Aufnahmephase	52
7.1.1	Monitorkalibrierung	53
7.1.2	Charakterisierung und Farbdarstellung	53
7.1.3	Bildaufnahme	54
7.2	Analyse der Kameracharakteristiken	55
7.2.1	Farbkonstanz	56
7.2.2	Räumliche Homogenität	56
7.2.3	Additivität der Primärkanäle	57
7.2.4	Abschließende Bewertung	57
7.3	Transformationsmatrix bestimmen	58

8	Evaluation des Charakterisierungsmodells	61
8.1	Evaluation des Vorwärtsmodells	61
8.2	Inverses Modell	64
9	Fazit und Ausblick	67

Abbildungsverzeichnis

1	Gesamtes elektromagnetisches Spektrum	3
2	Zusammenhang der menschlichen Farbwahrnehmung . . .	4
3	Additive Farbsynthese [GM09]	8
4	Subtraktive Farbsynthese [GM09]	9
5	Spektrale Absorptionskurven der Photorezeptoren [BD80] .	10
6	Zwei metamere Farbreize [GM09]	11
7	Farbmischexperiment [GM09]	12
8	Color-matching functions betrachterabhängig [GM09]	13
9	color-matching functions CIE-Standardbetrachter [GM09] .	14
10	Chromatizitätsdiagramm [GM09]	16
11	Menschliches Auge im Querschnitt [Has]	18
12	Aufbau CCD-Bildsensor [HUB]	20
13	Aufbau eines CMOS-Bildsensors [Sch06]	21
14	Dynamikbereich des HDRC-Bildsensors [Sch06]	23
15	Vergleich CCD-Sensor (links), CMOS-Sensor (rechts) [Sch06]	23
16	Schaltbild der HDRC-Kamera [Sch06]	25
17	HDRC-Kamera GEVILUX CAM1xCL Color	26
18	Farbfilter des Sensorelementes [Sha08]	27
19	Schematischer Aufbau eines LCD-Panel [Gär08]	30
20	Prinzip der Lichtausbreitung und Polarisation im LCD [Gär08]	31
21	Typische Monitor-Antwortkurve	32
22	Gamut des NEC SpectraView 2690	33
23	LC-Display NEC Spectraview 2690 [NEC10]	34
24	Darstellung der Aufwärmphase des NEC Monitors [Koc09]	41
25	Chromatizitätsdiagramm für NEC SpectraView 2690 [Koc09]	41
26	Additivitätsberechnung für NEC SpectraView 2690 [Koc09]	42
27	Leuchtdichtewerte des NEC SpectraView 2690 [Koc09] . . .	43
28	OETF für NEC SpectraView 2690 [Koc09]	44
29	Farbdarstellung auf dem Monitor	54
30	Farbaufnahmeszenario	55
31	Farbkonstanzanalyse für den Grauwertverlauf	56
32	Räumliche Homogenität des Rotkanals	58
33	Abweichung nach Transformation in %	62
34	Ergebnisse im Vergleich zur idealen Kurve	63
35	Ergebnisse im Vergleich zur idealen Kurve (Zoom)	63
36	Abweichung nach Transformation in %	64
37	Abweichung in der Farbdomäne	65
38	Abweichung in der Leuchtdichtedomäne	66

Tabellenverzeichnis

1	Farbdifferenzen für NEC SpectraView 2690 [Koc09]	43
2	Differenzen für NEC SpectraView 2690 [Koc09]	43
3	Durchschnittliche Abweichung der Pixelwerte	57
4	Startwerte für das Levenberg-Marquardt-Verfahren	59
5	Einstellung der Stopping criteria in der Optimization Toolbox	59
6	Prozentuale Abweichung	62
7	Prozentuale Abweichung	65

1 Einführung und Überblick

Kameras mit High Dynamik Range Technologie bieten im Vergleich zu Standardkameras einen sehr hohen Dynamikumfang, sowie die Möglichkeit selbst bei extremen Beleuchtungsverhältnissen wie Dunkelheit oder Gegenlicht, reale Szenen zu erfassen und verarbeiten zu können. Aus diesen Gründen ist der Einsatz solcher Geräte als Messinstrument für Beleuchtung und Farbe durchaus denkbar und wünschenswert. Hierbei besteht jedoch die Problematik, dass Farben von der Kamera im internen, kameraabhängigen Farbraum repräsentiert werden. Auf Grundlage dieser Daten kann keine allgemeingültige, vergleichbare Aussage über die gemessenen Farben getroffen werden. Eine Farbrepräsentation, welche unabhängig von der Art ihrer Erzeugung, ihrer Wiedergabe- oder Aufnahmetechnik ist, muss hierfür als Bedingung erfüllt sein. Durch eine Kameracharakterisierung kann dies erreicht werden.

Ziel dieser Diplomarbeit ist die Entwicklung eines Charakterisierungsmodells für eine HDR-Kamera mit CMOS-Bildsensor und logarithmischer Kamerakennlinie. Das Charakterisierungsmodell soll dabei auf die kameraspezifischen Eigenschaften eingehen und eine farbmétrisch korrekte Transformation gemessener Farbwerte, aus dem geräteabhängigen RGB-Farbraum der Kamera in den geräteunabhängigen XYZ-Farbraum ermöglichen.

Die Charakterisierung wird dabei auf Grundlage eines bereits vollständig charakterisierten LC-Displays vorgenommen. Dieses dient als Lichtquelle und bietet im Vergleich zu anderen, häufig für Kalibrierungs- und Charakterisierungszwecke eingesetzten Quellen entscheidende Vorteile, nämlich eine sehr präzise Steuerbarkeit von Leuchtdichte und Farbausgabe, sowie eine zuverlässige und konstante Anzeige von Farben. Geräteabhängige Farbwerte werden hierbei auf dem LC-Display dargestellt und von der Kamera aufgenommen. Die genaue Analyse der Kameraeigenschaften ist notwendig, um ein für die Kamera geeignetes Charakterisierungsmodell zu entwickeln. Konkret werden in diesem Zusammenhang die Farbkonzanz, die räumliche Homogenität der Sensorantwort, sowie die Additivität der Farbkanäle untersucht.

Die ersten Kapitel der vorliegenden Arbeit vermitteln Grundlagen zur Licht- und Farbwahrnehmung, beschreiben verschiedene Kameratechniken und geben Erläuterungen zur Funktionsweise von Liquid Crystal Displays. Im Anschluss wird ein Überblick über bereits existierende Verfahren zur Charakterisierung von Displays, sowie zur photometrischen Kalibrierung gegeben. Die nachfolgenden Kapitel erläutern die Entwicklung eines Charakterisierungsmodells, sowie dessen praktische Umsetzung und Evaluation.

2 Grundlagen zur Licht- und Farbwahrnehmung

In diesem Kapitel wird auf die Definition von Licht und Farbe eingegangen und sowohl die physiologische, als auch die physikalische Sichtweise der Begriffe betrachtet. Darüber hinaus werden die menschliche Farbwahrnehmung, sowie die Colorimetrie erläutert.

2.1 Was ist Licht?

Sehen erfordert Licht. An dieser Aussage gibt es nach unserem heutigen Kenntnisstand keine Zweifel, doch war diese Erkenntnis zur Zeit der griechischen Philosophen noch keinesfalls gewonnen. So begriffen selbst Philosophen wie Euklid und Plato das Sehen eher als einen Prozess des Fühlens, ausgelöst durch Teilchen die vom Auge ausgesendet werden, um Objekte gewissermaßen zu ertasten. Der Ansatz den Sehprozess auf einfallendes Licht zurückzuführen entstand erst viel später. Experimentelles Erforschen des Sehens begann erst vor etwa 150 Jahren.

Kontroverse Theorien über die Natur und Beschaffenheit des Lichts wurden zum Beispiel von dem britischen Physiker Sir Isaac Newton (1643 - 1727) und dem niederländischen Physiker Christiaan Huygens (1629 - 1695) vertreten. Während Newton davon ausging, Licht bestehe aus einer Reihe von Partikeln, war Huygens der Überzeugung Licht setze sich aus sich ausbreitenden Impulswellen zusammen. Heutige Erkenntnisse besagen dass beide Eigenschaften für das Licht eine Gültigkeit haben. Licht besitzt somit sowohl einen Teilchen- als auch einen Wellencharakter. [Gre01]

Ebenso umstritten wie die Theorien über die Beschaffenheit des Lichtes war die Frage, ob sich Licht mit einer endlichen oder unendlichen Geschwindigkeit ausbreite. Diese Frage war bereits in der Philosophie der Antike von Interesse. Die tatsächliche Endlichkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeit wurde jedoch erst im Jahre 1675 von dem dänischen Astronom Olaf Römer (1644 - 1710) beantwortet. Auch errechnete dieser erstmals einen konkreten Wert für Lichtgeschwindigkeit (215.000 km/s) [vH83]. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Licht im Vakuum gilt heute als eine Naturkonstante und wurde zuletzt im Jahre 1983 von der 17. *Generalkonferenz für Maß und Gewicht*, im Zuge der Festlegung der SI-Einheit *Länge*, angepasst und festgelegt.

Ein Meter ist diejenige Strecke, die Licht im Vakuum binnen des 299792458sten Teils einer Sekunde zurücklegt.

Aus dieser Definition der Längeneinheit *Meter* ergibt sich für die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum (Gleichung 1):

$$c_0 = 299792458 \frac{\text{Meter}}{\text{Sekunde}} \quad (1)$$

Im Allgemeinen wird als *Licht* der für den Menschen sichtbare Teil des elektromagnetischen Spektrums verstanden, welcher dem Bereich mit einer Wellenlänge von etwa 380 bis 780 nm entspricht. Er grenzt im unteren Bereich an das ultraviolette Licht, im oberen Bereich an den infraroten Wellenlängenbereich. Die exakte Eingrenzung ist jedoch nicht möglich, da sich die Empfindlichkeit des menschlichen Auges in den Grenzbereichen allmählich reduziert und individuellen Unterschieden unterliegt. Betrachtet man das gesamte elektromagnetische Spektrum, so stellt man fest, dass das sichtbare Licht nur einen sehr geringen Teil des Spektrums ausmacht. [Gre01] In Abbildung 1 ist der für den Menschen sichtbare Wellenlängenbereich im Vergleich zum gesamten elektromagnetischen Spektrum dargestellt.

Newton zeigte anhand seiner Experimente zur prismatischen Farbzerlegung, dass weißes Licht aus allen Wellenlängen dieses sichtbaren elektromagnetischen Spektrums zusammengesetzt ist. [New96]

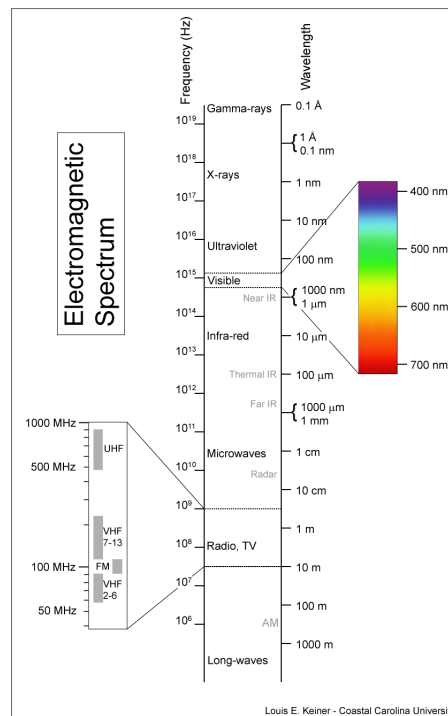


Abbildung 1: Gesamtes elektromagnetisches Spektrum

2.2 Was ist Farbe?

Der Begriff *Farbe* wird in den unterschiedlichen wissenschaftlichen Disziplinen abweichend definiert. Daher folgt eine Beschreibung unter physiologischen, sowie physikalischen Gesichtspunkten.

2.2.1 Physiologische Sichtweise

Farbe ist diejenige Gesichtsempfindung, durch die sich zwei aneinandergrenzende, strukturlose Teile des Gesichtsfeldes bei einäugiger Beobachtung mit unbewegtem Auge allein unterscheiden können.

Gemäß dieser aus der Norm DIN 5033 stammenden Definition, wird der Farbbegriff als ein subjektiver Sinneseindruck verstanden. Farbe ist demnach eine reine Empfindung des Betrachters. Sie ist eine Wahrnehmung, die ausschließlich im Kopf existiert.

Nach [Ric81] kann die Farbwahrnehmung des Menschen wie folgt psychophysisch verstanden werden.



Abbildung 2: Zusammenhang der menschlichen Farbwahrnehmung

Ein aus sichtbarem Licht bestehender, so genannter *Farbreiz* trifft in das menschliche Auge. Die Sinneszellen des Auges erzeugen dabei elektrische Aktionsströme, welche über den Sehnerv an das Gehirn weitergeleitet werden. Man spricht von einer entstehenden *Farbvalenz*. Aus dieser Farbvalenz wird im menschlichen Gehirn die so genannte *Farbempfindung* erzeugt.

Ein Farbreiz besteht dabei aus sichtbarem Licht. Fällt dieses in das menschliche Auge ein, werden durch Reizung der *Retina* (Netzhaut) elektrische Impulse freigesetzt - es entsteht die Farbvalenz. Objektiv kann der Farbreiz durch physikalische Messverfahren erfasst werden. Die Entstehung des Farbreizes wird dabei auf drei Hauptfälle zurückgeführt:

- Licht trifft auf direktem Wege in das menschliche Auge
- Licht passiert einen transparenten Gegenstand und erreicht dann das menschliche Auge
- Es findet zunächst eine Reflexion mit einem Gegenstand statt, bevor das Licht auf das menschliche Auge trifft

Dies sind jedoch stark vereinfachte Fälle. Unter Berücksichtigung möglicher Mehrfachreflexion, Beleuchtung durch mehrere Lichtquellen oder Schattenwurf, ist die Entstehung des Farbreizes in der Realität wesentlich komplexer.

Unter physiologischer Betrachtungsweise ist die Farbvalenz eine Wirkung des Farbreizes auf das Auge bzw. des Signals, welches über den Sehnerv an das Gehirn geleitet wird. Somit ist eine Abhängigkeit vom jeweiligen Beobachter vorhanden. Gemäß der *Graßmannschen Gesetze der Farbenlehre* können Farbreize mittels der drei Rezeptorreaktionen des menschlichen Auges beschrieben werden. Diese Rezeptorreaktionen werden letztlich als Farbvalenz bezeichnet.[Ric81]

Im Bereich der Farbmeterik ist die Farbvalenz ein Punkt in einem durch drei Primärvalenzen aufgespannten Farbraum. Die Verbindung zwischen der subjektiven physiologischen und der objektiven farbmeterischen Betrachtungsweise der Farbvalenz, liefert der *CIE-Normalbeobachter* (siehe 2.5).

Die Farbbempfindung gehört in den Bereich der Psychologie bzw. Neurologie, da sie durch die im Visuellen Kortex verarbeiteten Aktionsströme entsteht. Sie ist das, was für den Betrachter sichtbar ist. Zwei Besonderheiten im Bezug auf die Farbbempfindung bilden die *Simultankontrastphänomene* sowie die *Farbkonstanz*. Simultankontrastphänomene äußern sich dadurch, dass gleiche Farbvalenzen nicht zwingend eine identische Farbbempfindung auslösen müssen. Farbkonstanz bezieht sich auf die Fälle, in denen verschiedene Farbvalenzen zu einer identischen Farbbempfindung führen. [Idl03]

Die Farbkonstanz wird auch im Zuge der Kameracharakterisierung (Kapitel 6) behandelt.

2.2.2 Physikalische Sichtweise

Unter Beachtung der physikalischen Sichtweise des Farbbegriffes ist das Ausschlaggebende für die Wahrnehmung eines Objektes nicht das Objekt als Solches, wie häufig angenommen, sondern es ist die Lichtquelle, die das vom Betrachter wahrgenommene Objekt beleuchtet und so erst für das menschliche Auge erfassbar macht. Ohne Licht ist somit keine Farbe möglich. Denn das, was der Betrachter sieht ist das Licht, das am jeweiligen Objekt reflektiert oder transmittiert wird. Was nun die eigentliche Farbe betrifft, so ist auch diese durch die Eigenschaften der das Objekt beleuchtenden Lichtquelle beeinflusst. Die Messung dieser Eigenschaften ist von Bedeutung, wenn man Farbe untersuchen und messen möchte. Details hierzu finden sich in Kapitel 2.4.

Das Licht, welches ausschlaggebend für die Erzeugung des Farbreizes ist,

wird von so genannten *Primärstrahlern*, also selbstleuchtenden Objekten erzeugt. Je nach Art der Primärstrahler können diese *monochromatisches* oder aber auch *polychromatisches* Licht aussenden. Monochromatisches Licht besteht hierbei aus elektromagnetischen Wellen mit gleicher Wellenlänge, wohingegen polychromatisches Licht aus elektromagnetischen Wellen unterschiedlicher Wellenlängen zusammengesetzt ist. Die meisten Lichtquellen liefern ein polychromatisches Licht. Dazu gehören unter anderem natürliche Lichtquellen wie Sonne und Sterne, aber auch gebräuchliche künstliche Lichtquellen, wie etwa Glühlampen oder Leuchtstoffröhren. Dabei werden die spektralen Eigenschaften einer Lichtquelle durch die von der Wellenlänge λ abhängigen spektralen Strahlungsfunktion $E(\lambda)$ angegeben [Stö98]. Diese gibt die Strahlungsleistung (in Watt) je Wellenlänge an. [Idl03]

Durchaus gebräuchlich für die Beschreibung der spektralen Eigenschaften und gleichzeitig Maß für den Farbeindruck einer Lichtquelle ist aber auch die Angabe der *Farbtemperatur* (in Kelvin). Grundlage hierfür ist das *Plancksche Strahlungsgesetz*. Licht mit niedriger Temperatur erscheint hierbei rötlicher als Licht mit einer hohen Temperatur, welches eine eher bläuliche Farbe besitzt. [Ric81]

Objekte die selber kein Licht emittieren, also aussenden, werden als *Sekundärstrahler* bezeichnet. Damit von diesen also ein Farbeindruck ausgehen kann, müssen sie angestrahlt oder beleuchtet werden. Der Spektrale Reflexionsfaktor $S(\lambda) = \frac{\Phi_r(\lambda)}{\Phi_e(\lambda)}$ ist dabei die physikalisch relevante Größe. $\Phi_e(\lambda)$ ist dabei der einfallende Strahlungsfluss, $\Phi_r(\lambda)$ der reflektierte Strahlungsfluss. [Stö98]

Mittels Reflexionskurven können die Reflexionseigenschaften von Sekundärstrahlern beschrieben werden. Hierbei wird der spektrale Reflexionsfaktor $S(\lambda)$ über die Wellenlänge λ abgetragen. Durch die Überlagerung der spektralen Reflexionseigenschaften des Objektes mit der spektralen Energieverteilung des Primärstrahlers ($S(\lambda) \cdot E(\lambda)$) entsteht der von dem Sekundärstrahler ausgehende Farbeindruck. Auch dieser Sachverhalt verdeutlicht die Tatsache, dass der von einem Objekt ausgehende Farbeindruck zwangsläufig von den spektralen Eigenschaften des Primärstrahlers abhängig ist.

Physikalisch korrekt betrachtet, ist das von einer Materialoberfläche reflektierte Licht jedoch nicht ausschließlich von der Spektralverteilung der Lichtquelle, sowie der Reflektivität eines Objektes abhängig. Komplexe Reflexions- und Beleuchtungsmodelle wie zum Beispiel die *BRDF* (Bidirectional Reflectance Distribution Function), sind für eine korrekte Berechnung von Farbeindruck oder Objektreflexion notwendig. [Idl03]

2.3 Farbsehen

Die Wahrnehmung von Farbe spielt für den Menschen eine bedeutende Rolle. Sie ist nicht nur eine wichtige Voraussetzung der visuellen Ästhetik, sondern wirkt sich in besonderer Weise auf unsere Gemütsverfassung aus. Die Erforschung des Farbsehens begann mit der Arbeit von Newton, die er in seinem Werk *Opticks* veröffentlichte. Dabei machte er die in Kapitel 2.1 beschriebene Entdeckung, dass die Summe der unterschiedlichen Spektralfarben das weiße Licht zusammensetzt. Gemäß der Wellentheorie besitzt dabei jede Farbe ihre spezielle Frequenz, was dazu führt, dass das menschliche Auge unterschiedliche neuronale Signale an das Gehirn leiten muss, um auf die verschiedenen Frequenzen reagieren zu können.

Die Schwierigkeit, die sich bei der Verarbeitung der unterschiedlichen Farbfrequenzen ergibt, beruht auf der Tatsache, dass das menschliche neuronale System eine andere Impulsfrequenz besitzt, als die Lichtfrequenz der Spektralfarben. Die Lichtfrequenz von 10^{12} Takten pro Sekunde muss also von dem mit weniger als 10^3 Takten pro Sekunde langsamer arbeitenden Nervensystem verarbeitet werden können.

Der britische Augenarzt und Physiker Thomas Young (1773 - 1829) entwickelte einen Ansatz, nachdem die *Rezeptortypen* des menschlichen Auges auf die drei wesentlichen Grundfarben *Rot, Gelb und Blau* zu reduzieren sind. Die Tatsache, dass dabei alle möglichen Farben durch lediglich drei Rezeptortypen wahrgenommen werden können, begründet sich in Youngs Feststellung, dass die ganze Farbskala durch Mischung dreier Grundfarben abgedeckt werden kann. Dabei verarbeitet das menschliche Auge zwei Farben zu einer dritten, deren Einzelkomponenten sich nach der Mischung nicht mehr identifizieren lassen. Young fand dabei heraus, dass er jede sichtbare Farbe des Spektrums (inklusive Weiß) durch die Mischung von drei Grundfarben mit entsprechender Intensität herstellen kann.

Die *Young-Helmholtz-Theorie* nach Thomas Young und Hermann von Helmholtz (auch *Trichromatische Theorie* genannt) geht bezüglich dieses Phänomens auf das Verhalten des menschlichen Auges ein. Sie besagt, dass es drei farbempfindliche Rezeptortypen (Zapfen) gibt, die jeweils auf Rot, Grün oder Blau reagieren. Alle Farben können durch Mischung der Rezeptorsignale dieses Systems gesehen werden.

Die Trichromatische Theorie von Young und Helmholtz bildet auch die Grundlage für die *Additive Farbsynthese*, die auch als Additive - oder Physiologische Farbmischung bezeichnet wird. Bei diesem optischen Modell werden Farben durch das Hinzumischen (das Addieren) von farbigem Licht der Primärfarben *Rot, Grün* und *Blau* erzeugt. Durch eine gleichmäßige Mischung von farbigem Licht entsteht der Farbton *Weiß* (vgl. Abbildung 3).

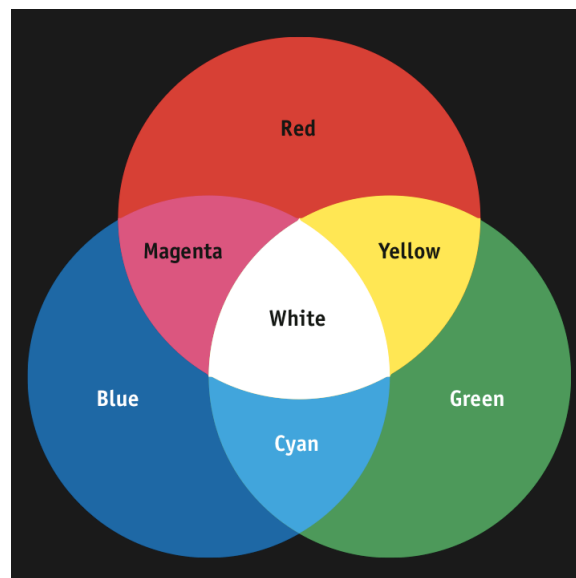


Abbildung 3: Additive Farbsynthese [GM09]

Überall dort, wo mit Farben auf Basis von Pigmenten gearbeitet wird, wie zum Beispiel in der Drucktechnik, kommt hingegen die *Subtraktive Farbsynthese* zur Anwendung. Dabei kommen die zu Youngs Primärfarben komplementären Farben *Cyan*, *Magenta* und *Gelb* zum Einsatz. Die Subtraktion sämtlicher Primärfarben ergibt somit *Schwarz*. Die Subtraktion keiner Farbe hingegen *Weiß* (wenn man in der Drucktechnik von einem weißen Druckmedium ausgeht) (vgl. Abbildung 4). [Gre01]

2.3.1 Rezeptortypen des menschlichen Auges

Wie oben beschrieben, ist die Fähigkeit des Menschen Farben mit den Augen wahrzunehmen mit der Existenz dreier unterschiedlicher, farbempfindlicher Rezeptortypen begründet. Diese so genannten *Photorezeptoren* (auch *Zapfen* genannt) befinden sich in der Retina des Auges. [GM09]

Die drei unterschiedlichen Typen von Zapfen lassen sich wie folgt unterteilen: [BD80]

- **S-Zapfen** (short wavelength receptor)
S-Zapfen decken den Blau-Bereich des sichtbaren Farbspektrums ab. Ihr Absorptionsmaximum liegt bei etwa 420 nm. Man nennt sie daher auch Blaurezeptoren. In der Literatur wird vereinzelt auch die Bezeichnung K-Zapfen (Kurzwellen-Zapfen) verwendet.
- **M-Zapfen** (medium wavelegth receptor)

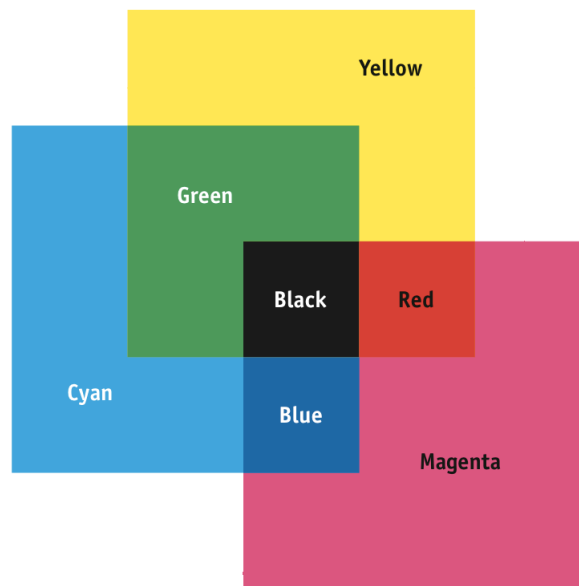


Abbildung 4: Subtraktive Farbsynthese [GM09]

M-Zapfen decken den Farbbereich zwischen den Farbtönen des blauen und des orangefarbenen Lichtes ab. Ihr Absorptionsmaximum liegt bei etwa 534 nm, was einem smaragdgrünen Farbton entspricht. Daher wird diese Zapfenart auch Grünzapfen genannt.

- **L-Zapfen** (long wavelength receptor)
L-Zapfen nehmen hauptsächlich Farbwerte im Rotbereich wahr, was zu der umgangssprachlichen Bezeichnung als Rotrezeptor führt. Das Absorptionsmaximum liegt jedoch im gelbgrünen Bereich von ungefähr 563 nm.

2.3.2 Spektrale Absorptionskurven

Die Spektralen Absorptionskurven (Abbildung 5) beschreiben die Reizantwort der drei Rezeptortypen zur Farbwahrnehmung im menschlichen Auge, in Abhängigkeit der Wellenlänge des wahrgenommenen Reizes.

Oberhalb einer Wellenlänge von ca. 650 nm sinkt die Sensitivität des menschlichen Sehsystems. Im unteren Bereich nimmt die Sensitivität unterhalb 400 nm ab.

Eine besondere Eigenschaft der menschlichen Farbwahrnehmung ist die Tatsache, dass zwei unterschiedliche Spektralwerte zweier Farbreize einen identischen Farbeindruck hervorrufen. Diese Eigenschaft nennt man *Metamerie*. [Ber00]

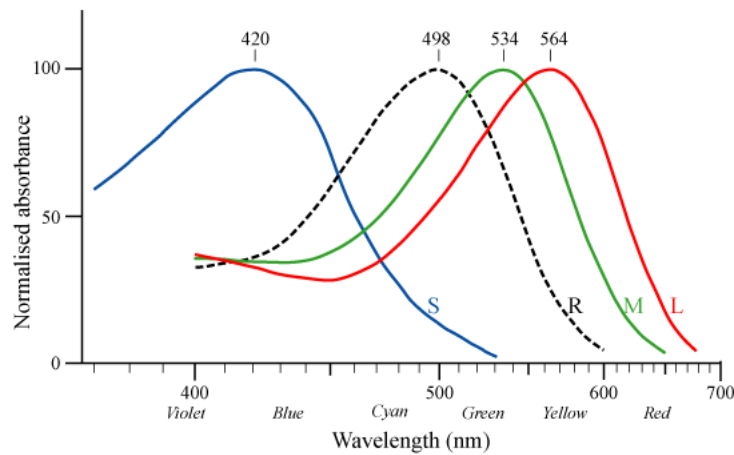


Abbildung 5: Spektrale Absorptionskurven der Photorezeptoren [BD80]

2.3.3 Metamerie

Unter Metamerie versteht man den Sachverhalt, dass zwei unterschiedliche Spektralwerte ein und denselben Farbeindruck erzeugen. [GM09] Unser visuelles System arbeitet nicht als Wellenlängendetektor, sondern approximiert unterschiedliche Wellenlängen zu einem identischen Farbeindruck. Dies zeigt sich, wenn zwei Farbreize mit verschiedenen *spectral power distribution* einen identischen Farbeindruck der Zapfen erzeugen.

Farbtöne sind aber nur dann *metamer*, wenn sie nur unter einer Lichtart identisch aussehen. Metamere Farben sehen in unterschiedlichen Beleuchtungssituationen einmal gleich und einmal verschieden aus, besitzen aber in jedem Fall unterschiedliche *spectral power distribution*. Abbildung 6 zeigt ein Paar metamerer Farbreize. Beide Farbreize erzeugen eine identische Reizung der Photorezeptoren im Auge, unter identischen Lichtbedingungen.

Bedingt ist die Metamerie durch das trichromatische Prinzip der menschlichen Farbwahrnehmung. Hierdurch wird die spektrale Verteilung einer Farbe nur anhand von effektiven Maxima der drei Farbrezeptoren im Auge erfasst. Diese Reizkombination kann trotz unterschiedlicher spektraler Eigenschaft zweier Farben identisch sein. Nur durch diese Tatsache können reine Farben, also solche die nur aus wenigen Wellenlängen bestehen, mit Hilfe von Mischfarben reproduziert werden. [GM09]

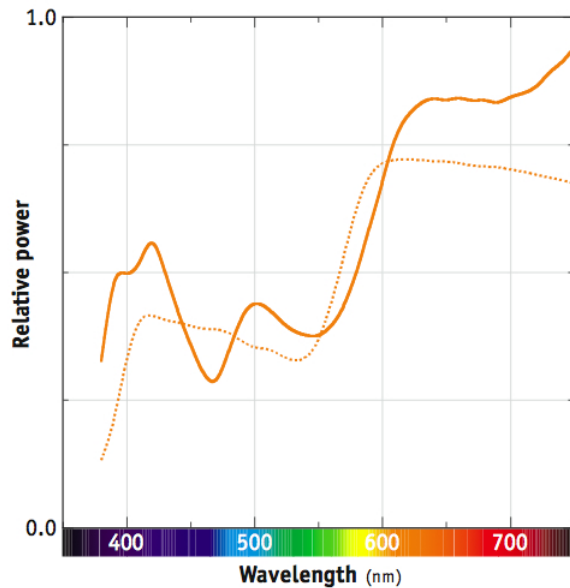


Abbildung 6: Zwei metamere Farbreize [GM09]

2.4 Farbmessung (Colorimetrie)

Die Colorimetrie umfasst Methoden zur Beschreibung und Spezifizierung von Farbreizen durch die Messung der spektralen Strahlung von trichromatischen Signalen, bezogen auf definierte Standard-Beobachter. Dies ermöglicht die Vorhersage von Metamerien. Liefern zwei Farbreize die gleiche trichromatische Antwort, so sind diese Farbreize metamerisch.

Die Colorimetrie begründet sich auf einer Reihe von Versuchen, die sich mit der Mischung von Farbe beschäftigen. Diese sollen das Erforschen und Charakterisieren der trichromatischen Eigenschaften des menschlichen Sehens ermöglichen. Ein dafür typisches Experiment besteht aus einer Projektionsfläche auf der ein runder, zweigeteilter Farbkreis dargestellt wird. Dabei wird jeweils eine der beiden Halbkreisflächen mit einer bestimmten Testfarbe, die andere der beiden Hälften mit drei überlagerten Lichtquellen beleuchtet. Diese sind voneinander unabhängig. Das bedeutet, dass keine der drei Lichtfarben aus einer Kombination der anderen beiden Lichtfarben gebildet werden kann. Für diesen Versuch werden für gewöhnlich die als *Primärfarben* bezeichneten Farben Rot, Grün und Blau ausgewählt.

Bei der Durchführung eines Farbmischexperimentes hat der jeweilige Betrachter der Testfläche die Möglichkeit, die Intensitäten der drei beschriebenen Primärfarben so anzupassen, dass die daraus resultierende Mischfarbe im Vergleich mit der auf der anderen Projektionshälfte angezeigten

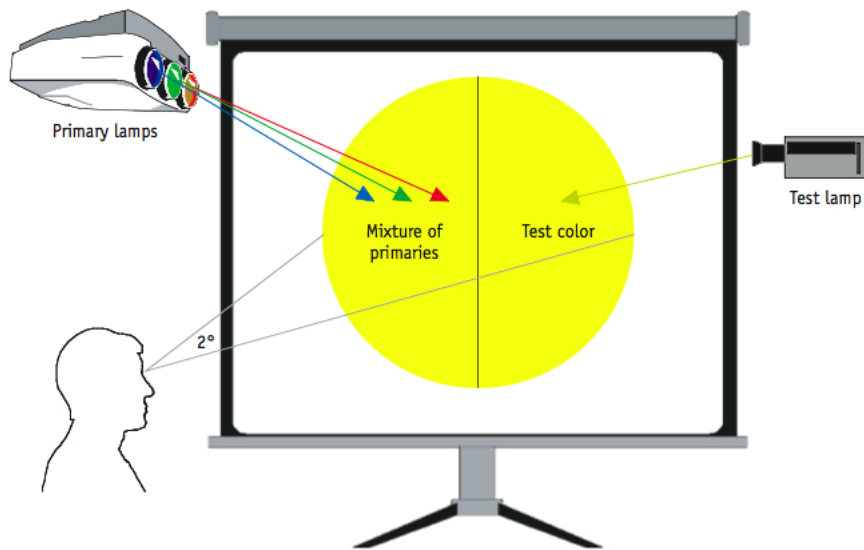


Abbildung 7: Farbmischexperiment [GM09]

Testfarbe eine subjektive Übereinstimmung aufweist. Aus den Ergebnissen einer Serie von Testdurchläufen für die sichtbaren Wellenlängen des Spektrums (380 nm bis 780 nm) entstehen drei Kurven, welche die Intensitäten der jeweiligen Primärreize als *Tristimuluswert* angeben, die für die Darstellung des Lichtes einer bestimmten Wellenlänge benötigt werden. Diese Kurven werden als *color-matching functions* bezeichnet.

Da die Durchführung von Farbmischexperimenten und somit auch das Ermitteln der *color-matching functions* vom jeweiligen Versuchsteilnehmer abhängig ist, existieren für jeden Betrachter unterschiedliche Kurvenverläufe. Dies gilt auch für die im jeweiligen Experiment verwendeten Primärfarbreize. Unterschiedliche Primärfarbreize bedingen unterschiedliche *color-matching functions*.

Als Ergebnis von Farbmischexperimenten können negative Tristimuluswerte auftreten. Dieser Sachverhalt ist dadurch zu begründen, dass bei Verwendung monochromatischer Testfarben einige dieser Farben nicht mit anderen Kombinationen der drei Primärfarbreize gemischt werden können. In diesem Fall muss das Licht einer oder mehrerer Primärfarben auf das Licht der Testfarbe addiert werden. Licht, das auf die Testfarbe addiert wird, kann als Subtraktion von den Primärfarben betrachtet werden. Daher wird die Intensität von Primärfarben, die zur Testfarbe addiert werden als negative Tristimuluswerte abgebildet. [GM09]

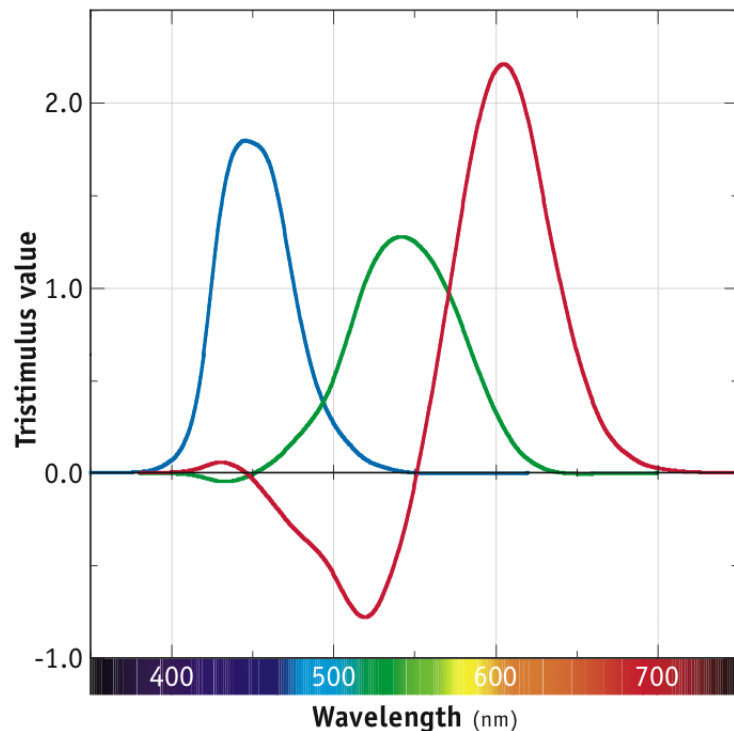


Abbildung 8: Color-matching functions betrachterabhängig [GM09]

2.5 Colorimetrie gemäß CIE

Die Internationale Beleuchtungskommission CIE (*Commission Internationale de l'Éclairage*) definierte im Jahre 1931 eine standardisierte *color-matching function* (Abbildung 9), den so genannten *CIE Standard Colorimetric Observer*. Dieser stellt einen standardisierten Betrachter dar, dessen *color-matching characteristics* stellvertretend für das Farbsehen des menschlichen Sehsystems angenommen wird.

2.5.1 Der CIE-Normalbeobachter

Das im Jahre 1931 entwickelte *CIE-Normvalenzsystem*, in Kurzform auch *CIE 1931* genannt, wurde auf Grundlage von Messwerten erstellt, die auf den *CIE Standard Colorimetric Observer* (oft auch als *Normalbeobachter* bezeichnet) gemittelt wurden. Dieser gemittelte Beobachter blickte dabei auf eine Fläche mit einem Sichtfeld von 2° mittig zur Hauptblickrichtung. Dieser Bereich entspricht derjenigen Zone im menschlichen Auge, in der die Dichte der farbempfindlichen Rezeptoren am höchsten ist. Unter diesen Bedingungen wurden die in Abschnitt 2.4 beschriebenen Farbmischexpe-

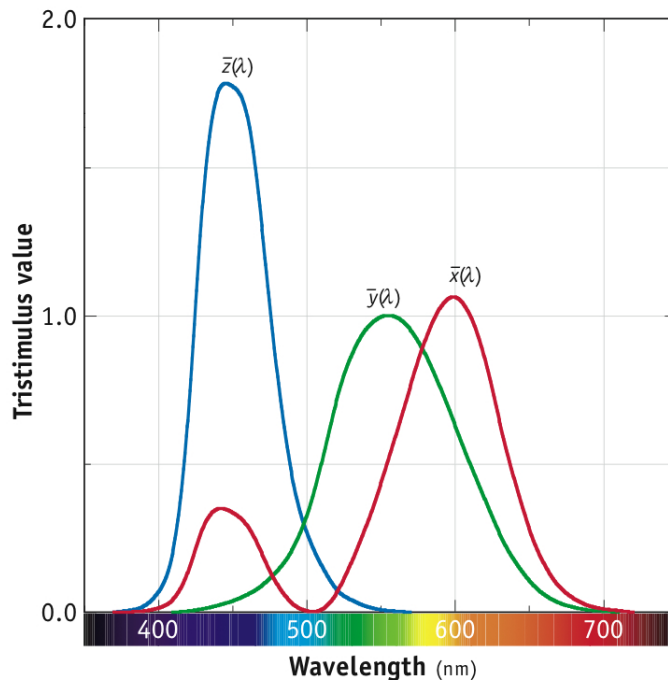


Abbildung 9: color-matching functions CIE-Standardbetrachter [GM09]

rimente durchgeführt. Die Beobachter sollten dabei, wie in Abschnitt 2.4 beschrieben, durch Änderung der Helligkeit dreier Lichtquellen (Primärfarben) den Farbeindruck einer vorgegebenen Farbe nachstellen. Auf diese Weise konnte der gesamte, vom Menschen wahrnehmbare Bereich der Farbreize ermittelt werden. Das menschliche Farbsehvermögen wurde somit numerisch erfasst. [GM09]

2.5.2 X, Y, Z CIE-Tristimuluswerte

Der Begriff *Tristimulus* wird besonders im englischsprachigen Raum für die Bezeichnung der XYZ-Grundwerte benutzt. Von der Bedeutung her, sind X, Y und Z drei Anteile der definierten Grundfarbe. Jede Farbe lässt sich dabei durch ein solches Zahlentripel kennzeichnen. In diesem standardisierten System können alle für den Menschen sichtbaren Farben dargestellt werden [HGF⁺06]. Die von der CIE 1931 gemessenen Kurven für das CIE-Normvalenzsystem werden als *Tristimuluskurven* bezeichnet.

$$X = k \int_{360nm}^{830nm} L(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) \cdot d\lambda \quad (2)$$

$$Y = k \int_{360nm}^{830nm} L(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) \cdot d\lambda \quad (3)$$

$$Z = k \int_{360nm}^{830nm} L(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) \cdot d\lambda \quad (4)$$

Die Gleichungen (2 - 4) transformieren eine *spectral radiance distribution* $L(\lambda)$ in das auf den Normalbetrachter bezogene CIE 1931 Normvalenzsystem mit den *color matching functions* $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$. Die Funktionen sind dabei für den Wellenlängenbereich 360 nm bis 830 nm, in 1 nm Schrittweite definiert [CIE91]. Der Parameter $k = Km$ ist konstant. $Km = 683lm \cdot W^{-1}$ bezeichnet die maximale Lichtausbeute im Falle absoluter Farbmessung. [Koc09]

Die Umrechnung von Farben aus dem CIE XYZ-System in andere, geräteabhängige Farbräume ist unter gewissen Einschränkungen durchführbar. [HGF⁺06]

2.6 x, y, z Chromaticity Coordinates

Die x , y , z *Chromaticity Coordinates* entstehen durch Transformation der in Kapitel 2.5.2 erläuterten Tristimuluswerte X , Y und Z und beschreiben einen Teil der Eigenschaften eines *color stimulus*. Die Transformationen werden mathematisch betrachtet auf folgende Weise durchgeführt: [GM09]

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad (5)$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad (6)$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z} \quad (7)$$

Eine Darstellung der y -Koordinate im Vergleich zur x -Koordinate bildet das hufeisenförmige Chromatizitätsdiagramm (Abbildung 10).

Die *Chromaticity Coordinates* können eine Farbe jedoch nicht vollständig beschreiben, da hierzu drei unabhängige Koordinaten benötigt werden. Da z durch $z = 1 - x - y$ entsteht, liegen für die *Chromaticity Coordinates* nur zwei unabhängige Werte vor. Die Möglichkeit einer vollständigen Beschreibung einer Farbe ist die Verwendung der beiden Koordinaten x und y , sowie des Wertes Y für *luminance*. [Ber00]

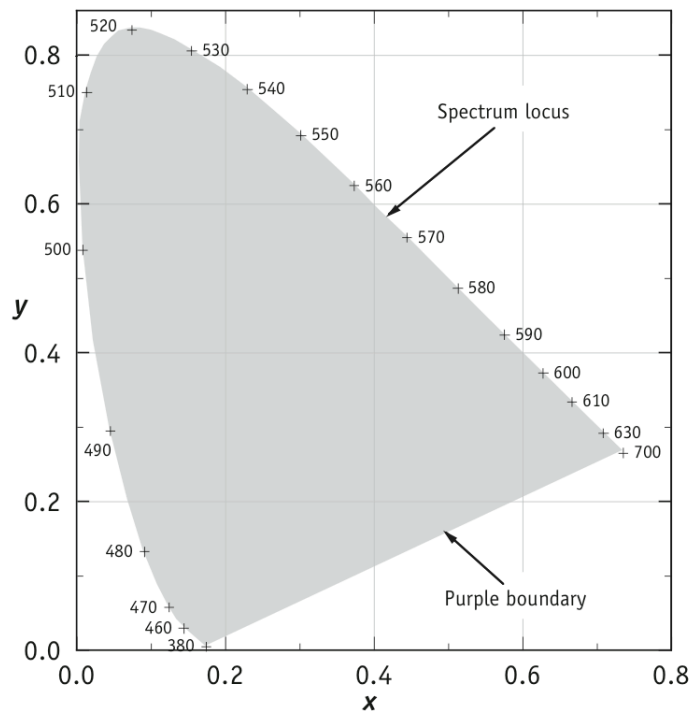


Abbildung 10: Chromatizitätsdiagramm [GM09]

2.7 L*a*b*-Farbraum

Der L*a*b*-Farbraum ist ein geräteunabhängiger Farbraum, der alle wahrnehmbaren Farben umfasst und sich dabei an der menschlichen Farbwahrnehmung orientiert. [RKAJ08]

Farben werden mit den Koordinaten (L*, a*, b*) angegeben, die ein dreidimensionales Koordinatensystem aufspannen. Auf der a*-Achse liegen sich Grün und Rot gegenüber. Damit beschreibt diese Achse den Rot- bzw. Grünanteil einer Farbe. Auf der b*-Achse sind es Blau und Gelb, die sich gegenüberliegen. Die b*-Achse beschreibt den Blau- oder Gelbanteil. Die L*-Achse steht senkrecht auf der von a* und b* aufgespannten Ebene. Sie gibt die Helligkeit einer Farbe wieder. [Ebn07]

Die Umrechnung von XYZ-Tristimuluswerten in den L*a*b*-Farbraum kann durch die Gleichungen 8 - 10 durchgeführt werden (vgl. [GM09]).

$$L^* = 116 \cdot \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_n}} - 16 \quad (8)$$

$$a^* = 500 \cdot \left(\sqrt[3]{\frac{X}{X_n}} - \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_n}} \right) \quad (9)$$

$$b^* = 200 \cdot \left(\sqrt[3]{\frac{Y}{Y_n}} - \sqrt[3]{\frac{Z}{Z_n}} \right) \quad (10)$$

X_n , Y_n und Z_n sind hierbei Normierungswerte, die sich aus dem Weißpunkt der Lichtquelle ergeben.

3 Grundlagen zurameratechnik

Für den praktischen Teil dieser Arbeit findet eine hochdynamische *HDRC-Kamera* vom Typ *GEVILUX CAM1xCL Color* der Firma *Gevitec* Verwendung. Diese basiert auf einem CMOS-Sensorelement und ermöglicht die Erfassung von Helligkeitsunterschieden in einer Größenordnung von 140 dB. Das folgende Kapitel gibt einen Überblick über die in derameratechnik verwendeten Bildsensoren vom Typ CCD und CMOS. Im Speziellen wird auf den CMOS-Sensor vom Typ *HDRC* eingegangen, da dieser in der Kamera *GEVILUX CAM1xCL Color* verbaut ist. Im Anschluss erfolgt eine genaue Beschreibung dieser Kamera.

3.1 Das Auge als Vorbild

Eines der wichtigsten Sinnesorgane unserer Spezies ist das menschliche Auge. Mit seinen, in die Netzhaut (vgl. Abbildung 11) eingebetteten 125 Millionen Sinneszellen [Reh99] ist es in der Lage, Szenen mit einer hohen Auflösung sowie einem hohen Dynamikumfang wahrzunehmen. Dabei werden zwei Arten von Sinneszellen unterschieden: Stäbchen und Zapfen. Die etwa 120 Millionen Stäbchen sind für die Hell- bzw. Dunkelwahrnehmung zuständig. Sie sind etwa 10.000 mal empfindlicher als die Zapfen und damit auch bei sehr schlechten Beleuchtungsverhältnissen funktionstüchtig. Im Gegensatz dazu, sind die wenig lichtempfindlichen Zapfen ausschließlich für die Wahrnehmung von Farben zuständig. Die ungefähr 5 Millionen Zapfen werden dabei in drei Unterarten mit unterschiedlicher spektraler Empfindlichkeit unterschieden. [Reh99]

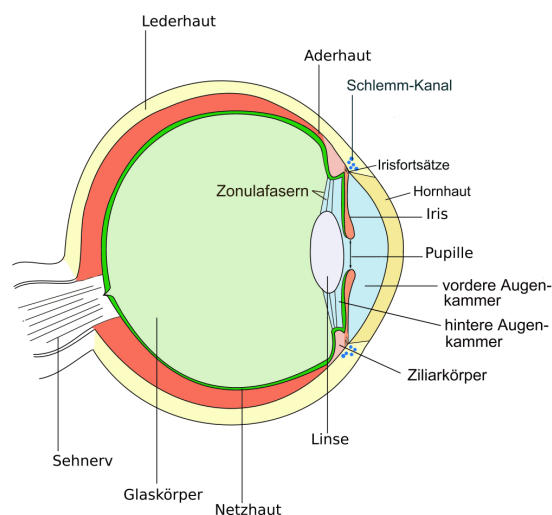


Abbildung 11: Menschliches Auge im Querschnitt [Has]

Einfallendes Licht wird mit Hilfe der zwei beschriebenen Arten von

Sinneszellen zu Nervenimpulsen verarbeitet, welche über Nervenbahnen an das Gehirn weitergeleitet werden. Das menschliche Auge ist dabei in der Lage, Objektdetails sowohl bei starker Helligkeit, als auch bei fast vollständiger Dunkelheit zu erfassen. Man spricht hier von einem hohen Dynamikumfang, welcher seinen Ursprung im logarithmischen Helligkeitsverhalten des Auges hat.

Betrachtet man das menschliche Auge als Vorbild für dieameratechnik, so sind als weitere Bestandteile des Auges die Linse, sowie die Pupille zu erwähnen. Die Linse dient dem Auge, wie auch in derameratechnik zum Scharfstellen des Bildes. Die Pupille des menschlichen Auges ist vergleichbar mit der Blende einer Kamera. Mit ihrer Hilfe kann die Menge an einfallendem Licht kontrolliert werden. [Sch06]

3.2 Bildsensoren

Allgemein werden bei Bildsensoren zwei Technologien unterschieden: CCD-Sensoren (Charge-Coupled Device Sensor) und CMOS-Sensoren (Complementary Metal Oxide Semiconductor Sensor). Diese beiden Technologien werden hier näher beschrieben.

3.2.1 CCD-Sensoren

CCD-Bildsensoren stellen die ursprüngliche Technologie der bildgebenden Sensoren dar, da Sensoren in CMOS-Technologie bis Anfang der 90er Jahre nicht in zufriedenstellender Qualität produziert werden konnten. Die Bezeichnung CCD steht für Charge-Coupled-Device und bezieht sich dabei auf die Art des Ladungstransportes im Inneren des Sensorelementes. Das Prinzip des CCD-Sensors wurde von den Wissenschaftlern Willard Boyle und George E. Smith bereits Anfang der 60er Jahre entwickelt. Ursprünglich stand dabei nicht der Einsatz als Bildsensor, sondern vielmehr die Verwendung der CCD-Technologie als Speichermedium im Vordergrund ihrer Forschungsarbeit. Schnell etablierte sie sich jedoch in dem Einsatzbereich der bildgebenden Sensorik und wird auch heute noch zu diesem Zweck verwendet. [Sch06] Im Jahre 2009 erhielten Boyle und Smith den Physik Nobelpreis für ihre Erfindung. [Fou09]

Bildsensoren nach CCD-Technologie bestehen aus einer Menge lichtempfindlicher *Fotodioden* (vgl. 3.4), welche meist in Matrixform angeordnet sind. Bedingt durch den inneren photoelektrischen Effekt wird die Energie des einfallenden Lichtes auf die Elektronen des CCD-Halbleiters übertragen. Die dabei entstehende Ladung, welche proportional zur einfallenden Lichtmenge ist, wird in so genannten Potentialtöpfen gespeichert. Die Ladungen werden dann zum Zeilen- bzw. Spaltenende verschoben und erreichen als

serielles Signal einen Ausleseverstärker. Dieser gibt eine von der Ladung und in Folge dessen, von der Lichtmenge abhängige elektrische Spannung aus. Trotz des seriellen Ausleseverfahrens speichert der CCD-Sensor ein parallel entstehendes Bild, da zum Zeitpunkt der Bildaufnahme alle Fotodioden gleichzeitig belichtet werden.

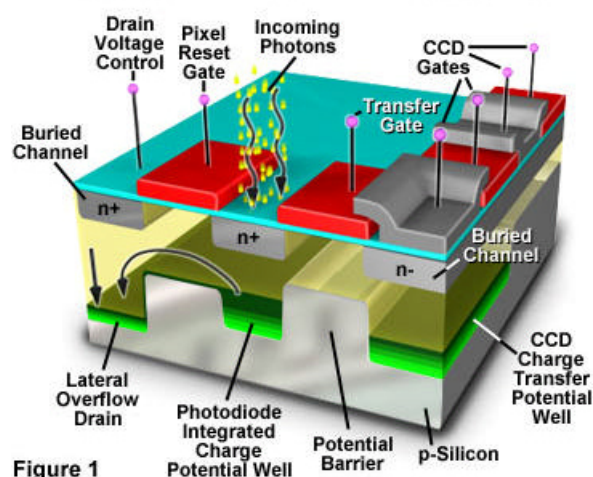


Abbildung 12: Aufbau CCD-Bildsensor [HUB]

Nachteile der CCD-Technologie kommen bei der Verwendung in Szenarien mit hoher Beleuchtungsstärke zum Tragen. Bei einer sehr starken Lichteinstrahlung ist es möglich, dass die oben erwähnten Potentialtöpfe durch eine zu hohe Ladung zum Überlaufen gebracht werden. Ladungsträgerinformationen werden hierdurch verfälscht und es kommt zu Bildstörungen, dem so genannten *Bloomingeffekt*.

Ein weiterer Nachteil ist die Einsatzfähigkeit bis zu einer maximalen Umgebungstemperatur von 25 Grad Celsius. Bei der Verwendung unter höheren Temperaturverhältnissen kommt es zu sinkender Effizienz im Ladungstransport innerhalb des Sensorelementes. Der Grund hierfür sind auftretende Leckströme. Im Vergleich zu Bildsensoren mit CMOS-Technologie haben CCD-Sensoren den Nachteil, dass der Dynamikbereich nicht einfach erweitert werden kann. [Sch06]

3.2.2 CMOS-Sensoren

Der technische Fortschritt der letzten beiden Jahrzehnte hat es ermöglicht, CMOS-Bildsensoren in großen Mengen und für verschiedenste Anwendungsbereiche zu entwickeln und diese in Serie zu produzieren. Dabei sind diese meist den Eigenschaften der CCD-Sensoren überlegen. CMOS-

Sensoren sind in unterschiedlichen Ausführungen erhältlich und können so auf die speziellen Einsatzgebiete der Kunden abgestimmt werden. Diese Ausführungen unterscheiden sich in der Art des Ausleseverfahrens.

Jede Pixelzelle eines CMOS-Sensors besteht aus einer Fotodiode und einer, je bauartspezifischen Anzahl an Transistoren (vgl. Abbildung 13), welche die Umwandlung des von der Fotodiode erzeugten Fotostroms in eine Spannung vollziehen und zusätzlich als Signalverstärker dienen. Ein Sensorelement in CMOS-Technologie besitzt eine Vielzahl von Fotodioden, da pro Fotodiode nur die Helligkeit an genau einem Punkt ermittelt werden kann. Bei einem Zeilensensor sind diese in einer Zeile, bei Flächensensoren in Matrixform angeordnet. Diese Matrixform ermöglicht das genaue Ansteuern einzelner Pixel über eine Zuordnung von Zeilen und Spalten durch entsprechende Zeilen- bzw. Spaltendekoder. Das in die Fotodioden einfallende Licht, genauer gesagt die einfallenden Photonen, werden in einen Strom, den so genannten *Fotostrom* umgewandelt und anschließend, je nach Baubart des CMOS-Bildsensors, weiterverarbeitet.

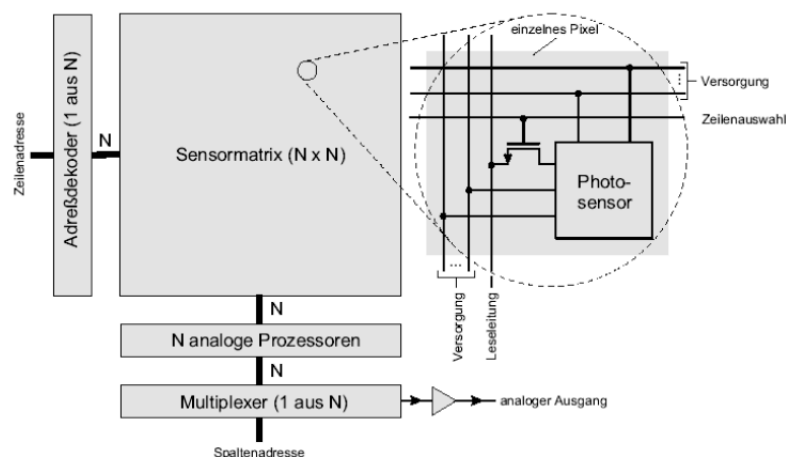


Abbildung 13: Aufbau eines CMOS-Bildsensors [Sch06]

Lineare CMOS-Sensoren arbeiten meist mit integrierenden Ausleseverfahren. Das bedeutet, dass die Fotodiode eine bestimmte Zeit belichtet wird. Der auf diesem Wege produzierte Fotostrom wird in einem Kondensator gespeichert, bevor die Information von dem aufgeladenen Kondensator ausgelesen wird. Im Gegensatz dazu, gibt es auch die nach dem kontinuierlichen Ausleseverfahren arbeitenden Sensoren. Diese integrieren nicht über den Fotostrom. Pixeldaten stehen in Form der aktuell gemessenen Beleuchtungsstärke kontinuierlich zur Verfügung. Lineare Sensoren haben den Vorteil gute Rohbilddaten aufgrund nur geringen örtlichen Rauschens zu liefern. Nachteilig ist jedoch ein nur kleiner darstellbarer Dynamikum-

fang.

Die Verwendung von CMOS-Bildsensoren mit logarithmischen Ausleseverfahren bietet die Möglichkeit einer wesentlichen Dynamikerweiterung. Hiermit wird die Funktionsweise des menschlichen Auges nachgebildet. Bei diesen Sensoren wird der erzeugte Fotostrom in ein logarithmisches Signal konvertiert. Trotz des hohen Dynamikumfanges hat das Bild, bedingt durch die bei der logarithmischen Konvertierung entstehende Komprimierung des Ausgangssignals, einen geringen Kontrast und eine niedrige Auflösung. Neben dem Verfahren des logarithmischen Ausleseverfahrens, kann der Dynamikumfang bei linear arbeitenden CMOS-Sensoren durch z.B. Multisamplingverfahren, Kontrolle der Integrierzeiten oder Schwellwertdetektion erhöht werden.

Neben den linear oder logarithmisch auslesenden CMOS-Sensoren arbeitet eine weitere Variante mit der LinLogTM-Technologie der Firma *photon focus*. Sensoren mit dieser Technologie unterstützen sowohl das lineare als auch das logarithmische Ausleseverfahren. Dieses kann programmiertechnisch ausgewählt werden. Ziel dieser Technologie ist das Umgehen von Nachteilen, die bei reinen linearen bzw. logarithmischen Ausleseverfahren entstehen. Die Ansteuerung von LinLogTM-Sensoren ist jedoch komplex, da das Auftreten von Problemen bedingt durch die unstetige Kennlinie, sowie nicht konstante Kameraparameter verhindert werden müssen. [Sch06]

3.3 Der HDRC-Bildsensor

Der High Dynamic Range CMOS-Bildsensor (kurz HDRC-Bildsensor) wurde am Institut für Mikroelektronik Stuttgart (IMS) entwickelt und von selbigem im Jahre 1992 patentiert. Als Vorbild für diesen Sensor dient das menschliche Auge, welches ebenso eine logarithmische Kennlinie aufweist. Aus dieser Form der Signalcodierung resultiert ein hoher Dynamikumfang des Sensors, welcher den des menschlichen Auges sogar übertrifft.

Die Abbildung 14 stellt verschiedene Arten von Bildaufnahmemedien im Bezug auf ihren Dynamikumfang gegenüber. Sie zeigt den hohen Dynamikumfang des logarithmisch arbeitenden HDRC-Sensors und ermöglicht auch den direkten Vergleich mit dem Dynamikumfang des menschlichen Auges, welcher um einiges geringer ist. Der klassische CCD-Sensor ist hingegen als lineares Aufnahmemedium erkennbar. Neben seinem, im Vergleich mit dem HDRC-Sensor sehr geringen Dynamikumfang, ist auch erkennbar, dass mit CCD-Sensoren unterhalb einer Beleuchtungsstärke von etwa 0,1 Lux keine Aufnahme mehr möglich ist. Die Obergrenze der Beleuchtungsstärke für den Einsatz von CCD-Sensoren liegt noch unterhalb von 10 Lux.

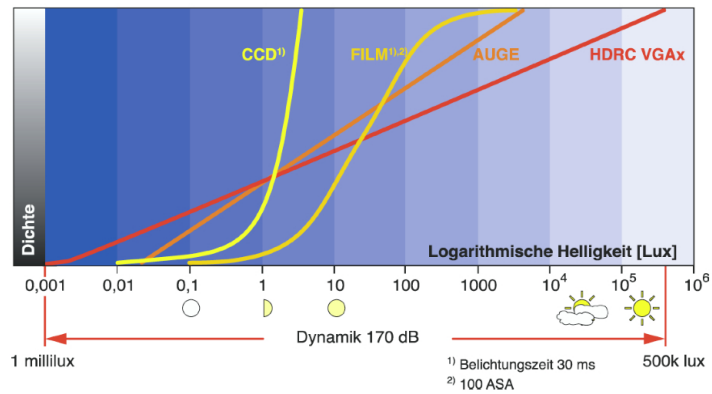


Abbildung 14: Dynamikbereich des HDRC-Bildsensors [Sch06]

Der Dynamikumfang eines HDRC-Sensors kann unter Verwendung der Werte für die minimal bzw. maximal erfassbare Beleuchtungsstärke berechnet werden. Für den Dynamikbereich von HDRC-Sensoren gilt:

$$\text{Dynamikumfang} = 20 \cdot \log \left(\frac{\text{Beleuchtungsstärke}_{max}}{\text{Beleuchtungsstärke}_{min}} \right) \text{ dB} \quad (11)$$

Allgemein wird der Dynamikumfang von bildgebenden Sensoren in Dezibel angegeben.

Einsatzgebiete von HDRC-Bildsensoren sind zum Beispiel die Bildverarbeitung im industriellen Umfeld, fahrerunterstützende Technologien in der Automobilindustrie, sowie verschiedenste Bereiche in der Sicherheitstechnik. Hierbei kommen die Vorzüge des logarithmischen Sensors und des daraus resultierenden hohen Dynamikumfanges besonders in all den Einsatzgebieten zum Tragen, in denen schwierige, sowohl besonders helle als auch dunkle Beleuchtungsverhältnisse vorherrschend sind.

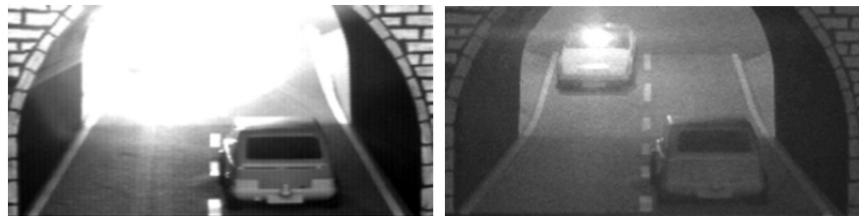


Abbildung 15: Vergleich CCD-Sensor (links), CMOS-Sensor (rechts) [Sch06]

Die Abbildung 15 zeigt den Einsatz eines HDRC-Sensors in einer Kamera zur Überwachung eines Verkehrstunnels. Eine Straßensituation in der sowohl die Dunkelheit des Tunnels, als auch die starke Helligkeit durch

Sonnenlicht auf der anderen Tunnelseite oder Blendwirkung entgegenkommender Scheinwerfer, aufeinandertreffen. Das linke Teilbild zeigt die Aufnahme mit einer herkömmlichen CCD-Sensorkamera, das rechte Teilbild hingegen im Vergleich eine Aufnahme der identischen Situation unter Verwendung einer logarithmisch arbeitenden Kamera mit HDRC-Sensorelement. Der hohe Dynamikumfang der Kamera ermöglicht hier eine ideale Darstellung der Szene. [Sch06]

3.3.1 Physikalisches Modell des HDRC-Sensors

Der HDRC-Sensor ist ein logarithmischer Bildsensor, dessen Pixelverhalten durch Gleichung 12 modelliert wird.

$$y = b + a \cdot \ln(x + c) \quad (12)$$

a und b sind hierbei kameraspezifische Parameter. a gibt die Skalierung (Verstärkung), b den Offset (Verschiebung) in der Kamerafunktion an. x ist die von der Kamera aufgenommene Beleuchtungsstärke.

Der Parameter c modelliert den 3dB-Punkt der Kamera. Der 3dB-Punkt ist ein wichtiges Gütekriterium für Bildsensoren. Oberhalb dieses 3dB-Punktes kann der vom Licht erzeugte Fotostrom als ausreichend groß angenommen werden, sodass verschiedene Arten von Rauschen kaum Einfluss auf die Qualität des aufgenommenen Bildes haben. Unterhalb des 3dB-Punktes hat Rauschen jedoch starken Einfluss auf dieses.

Eine mögliche Variation des 3dB-Punktes (des Parameters c) bewirkt eine Verschiebung der Kamerakennlinie in den niedrigen Leuchtdichtebereichen unterhalb von ≈ 10 Lux. Somit bewirkt zum Beispiel ein hoher Wert für den 3dB-Punkt die Verschiebung der Kennlinie nach oben, sodass für Pixel erst ab einer höheren Beleuchtungsstärke ein Signal detektiert wird. Die Lichtempfindlichkeit der Pixel lässt sich somit reduzieren. Im Bereich der hohen Beleuchtungsstärken hat die Variation des 3dB-Punktes keine Auswirkungen. [Sch06]

3.3.2 Interner Aufbau der HDRC-Kamera

Abbildung 16 zeigt schematisch den Aufbau der HDRC-Kamera. Die Photonen des in die Kamera einfallenden Lichtes werden durch die *Fotodiode* (1) in einen Fotostrom umgewandelt. Der als Last dienende *Transistor* (2) besitzt eine exponentielle Strom-Spannungskennlinie und erzeugt so den logarithmischen Zusammenhang zwischen Fotostrom und Ausgangsspannung der Kamera. Punkt (3) sind *Pixelkapazitäten*, die hier nicht weiter spezifiziert werden sollen. Der so genannte *Source-Folger* (4) dient als Pixel-speicher und Vorverstärker. Im Nachfolgenden *zweistufigen Multiplexer* (5)

findet eine Reduzierung der Datenleitungen von 784 auf 8 und anschließend von 8 auf eine Datenleitung (Pixel) statt. Um stabile Ausgangswerte zu gewährleisten, wird dieser Vorgang zweistufig vollzogen. Das Signal wird anschließend verstärkt (6), bevor im *Video AD-Wandler* (7) die Analog-Digitalwandlung durchgeführt wird. Die Spannungswerte befinden sich anschließend im digitalen Bereich mit einer Auflösung von 10 bzw. 12 Bit. Mittels *Controller* (8) und gespeichertem *Fixed Pattern Bild* (9) findet eine *Fixed-Pattern Korrektur* des Ausgabebildes statt. [Sch06]

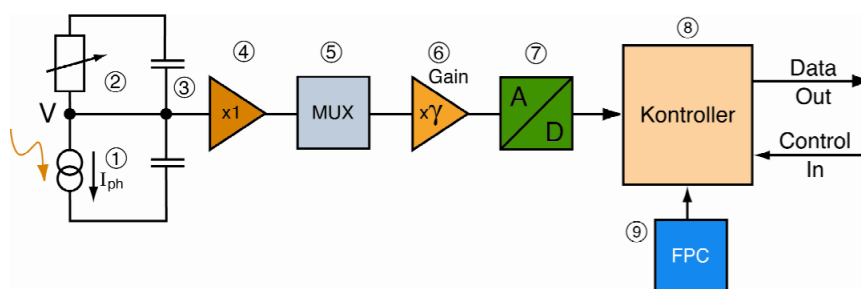


Abbildung 16: Schaltbild der HDRC-Kamera [Sch06]

3.4 Funktionsweise einer Fotodiode

Eine Fotodiode ist ein meist aus Silizium gefertigtes elektronisches Bauteil, welches einfallendes Licht in einen elektrischen Strom umwandelt. Je nach baulicher Ausführung reagiert sie auf das Licht des sichtbaren Spektrums, auf UV-, Infrarot- oder sogar Röntgenstrahlung. Auf die Fotodiode auftreffendes Licht bewirkt, dass Photonen Elektronen anregen, die als freie Ladungsträger zur Verfügung stehen. Von den Polen der Diode angezogen, bewirken diese das Fließen eines elektrischen Stroms, dem so genannten *Fotostrom*. Dieser ist proportional zur aufgenommenen Beleuchtungsstärke, sowie zur Fläche der Fotodiode.

Neben Fläche A und Beleuchtungsstärke x sind jedoch noch andere Faktoren für die Stärke des Fotostroms verantwortlich. So zählen die Blende, die Linse, sowie die Quantenausbeute zu so genannten Verlustmechanismen, die zu einer Verringerung des Fotostroms führen können. Der Fotostrom setzt sich also wie folgt zusammen:

$$I_{\text{Photo}} = G_{\text{Blende}} \cdot G_{\text{Linse}} \cdot G_{\text{Quantenausbeute}} \cdot A \cdot x$$

Hier muss bei der Berechnung des Gesamtstromes zusätzlich der *Dunkelstrom* berücksichtigt werden. Damit gilt für den Gesamtstrom:

$$I = I_{\text{Dunkel}} + I_{\text{Photo}}$$

Der so genannte Dunkelstrom entsteht bei fehlendem Lichteinfall auf die Diode. Die Verarmungszone, der als ladungsneutral geltende Bereich zwischen n- und p-Schicht der Fotodiode, dehnt sich bei vorherrschender Dunkelheit aus. Es fließt der Dunkelstrom. Da dieser die Empfindlichkeit des Bildsensors und letztlich seine Sensorantwort beeinflusst, ist er als ein wichtiger Parameter im Bezug auf die Bildgebung mittels HDRC-Sensoren anzusehen.

3.5 Die HDRC-Kamera GEVILUX CAM1xCL Color

Im Folgenden wird die in dieser Arbeit verwendete HDRC-Kamera *GEVILUX CAM1xCL Color* grundlegend beschrieben. Im weiteren Verlauf wird sie vereinfacht als *Kamera* bezeichnet.



Abbildung 17: HDRC-Kamera GEVILUX CAM1xCL Color

3.5.1 Generelle Eigenschaften

Die Kamera der Firma *GEVITEC* ist eine hochdynamische HDRC-Kamera die mit einem CMOS-Bildsensor vom Typ HDRC arbeitet. Die Sensorauflösung dieser Kamera beträgt 768×496 Pixel bei einer Pixelgröße von $10\mu m \times 10\mu m$ pro Pixel. Der Dynamikumfang des Bildsensors beträgt 140 dB und erfasst Helligkeitsunterschiede in dieser Größenordnung.

Für jeden Pixel ist ein Verstärker mit logarithmischer Kennlinie integriert, sodass sich weite Wertebereiche der Beleuchtungsstärke in einem Signal mit begrenzter Amplitude abbilden lassen. Die Umwandlung des analogen - in einen digitalen Datenstrom von 12 Bit Auflösung findet auf der Sensorplatine statt. Die weiteren Verarbeitungsschritte finden unter vollständiger Erhaltung der Datenbreite von 12 Bit statt. Mit Hilfe eines Peltier-Kühlers wird die Temperatur der Sensorplatine stabilisiert und auf einer konstanten

Solltemperatur von $T = 25^{\circ}C$ gehalten. Dies ist wichtig, um Abweichungen oder Driften der Sensorkennlinie sowie des A/D-Wandlers der Kamera zu vermeiden. [Gen06]

3.5.2 Farbfilter der Kamera

Auf das Sensorelement der Kamera ist ein Farbfilter aufgedampft (vgl. Abbildung 18), welches in seiner Anordnung dem so genannten *Bayer Pattern* entspricht. Mit Hilfe dieses speziellen Filters, dessen Filterschichten für das Licht der Farben Rot, Grün und Blau durchlässig sind, ist die Gewinnung von Farbinformationen möglich. [Gen06]

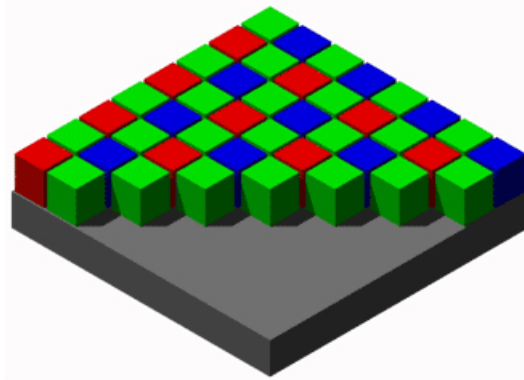


Abbildung 18: Farbfilter des Sensorelementes [Sha08]

3.5.3 Das Sensorelement

Der HDRC-Sensor hat eine Auflösung von 768×496 Sensorzellen, den so genannten Pixeln die jeweils eine Pixelgröße von $10\mu m \times 10\mu m$ besitzen und aus einer Fotodiode, sowie einem Verstärker mit logarithmischer Kennlinie bestehen. Einfallendes Licht wird von der Fotodiode in einem kontinuierlichen Verfahren gemessen und in einen elektrischen Strom umgewandelt, welcher proportional zur Beleuchtungsstärke des einfallenden Lichtes ist. Die Spannungen aller Pixelausgänge einer Sensorzeile werden zum Auslesen der Bildinformationen in einen Zwischenspeicher geschrieben und als analoges Signal vom Sensor ausgegeben. Dieses Prinzip wird als *Rolling Shutter* bezeichnet.

Die Taktfrequenz für das Auslesen der Sensorzellen beträgt konstant 12 MHz. Dieser Wert ist fest konfiguriert. Daraus folgt, dass die Bildwiederholungsrate f , also die Frequenz mit der Bildwechsel stattfinden, von der horizontalen, sowie vertikalen Bildgröße abhängig ist. Sie lässt sich mit folgender Formel berechnen:

$$f = \frac{12 \cdot 10^6}{(u_{\max} + 16) \cdot (v_{\max} + 2)}$$

u_{\max} und v_{\max} sind die horizontale bzw. vertikale Bildgröße in Pixeln. Wird die maximale Sensorauflösung von 768 x 496 Pixeln gewählt, ergibt sich für die Bildwechselfrequenz ein Wert von

$$f_{768 \times 496} = 30.73 \frac{\text{frames}}{\text{sec}}$$

Das Format des auszulesenden Bildfensters lässt sich jedoch am Sensor einstellen, sodass sich durch kleiner gewählte Bildgrößen wesentlich höhere Bildwiederholungsraten erreichen lassen. [Gen06]

3.5.4 FPN-Korrektur und Defekt-Pixel-Maskierung

Fixed Pattern Rauschen (im Englischen Fixed Pattern Noise) ist ein örtliches zeit-invariantes Rauschen. Es bezeichnet den Sachverhalt, dass trotz homogener Beleuchtung der Sensorfläche für einzelne Pixel unterschiedliche Ausgabewerte vorliegen. Die Ursache dieser Inhomogenität der Ausgabewerte sind zum einen produktionsbedingte Fertigungstoleranzen der verwendeten MOS-Transistoren (vgl. Kapitel 3.3.2), zum anderen trägt der komplexe Aufbau der zweidimensionalen Matrix zum Fixed Pattern Rauschen bei. Zudem reagieren HDRC-Sensoren, bedingt durch ihren Pixelaufbau, sehr empfindlich auf geringste Parameterschwankungen. [Sch06]

Die FPN-Korrektur (Fixed Pattern Noise Korrektur) des Bildsensors korrigiert die Pixel des Bildes entsprechend des jeweilig vorliegenden Grauwertes. Zu diesem Zweck sind vier Offset-Korrekturwerte in der Kamera gespeichert. Diese werden unmittelbar nach Einschalten der Kamera von einer internen SDRAM-Speicherbank geladen.

Die *Defekt-Pixel-Maskierung* der Kamera sorgt dafür, dass Sensorzellen bei denen es zu einer gestörten Kennlinie und somit zur Störung einzelner Bildpunkte kommt, in einem Korrekturspeicher speziell markiert und durch eine Interpolation mit den Nachbarpixeln korrigiert werden. [Gen06]

3.5.5 Farbberechnung

Für die Berechnung der Farbinformation findet eine Interpolation über die Bildpunkte einer 5 x 5-Umgebung statt. Hierdurch werden Farbartefakte an den Bildkanten vermieden. Für jeden Bildpunkt wird ein RGB-Vektor mit einer Auflösung von 12 Bit pro Farbkanal berechnet. Die Verwendung der 5 x 5-Umgebung für die Interpolation der Farbe führt

dazu, dass für die Bildränder eine Farbberechnung nach dieser Vorgehensweise nicht möglich ist. Daher findet für die beiden äußeren Zeilen, sowie Spalten keine Farbwertberechnung statt und die Bildpunkte dieser Bereiche werden mit den RGB-Werten (0, 0, 0) notiert. [Gen06]

3.5.6 Farbanpassung

Über die Konfigurationsschnittstelle können vom Benutzer die Parameter einer Transformationsmatrix gesetzt werden. Hiermit ist die Anpassung an einen gewünschten Farbraum möglich. Folgende Transformation ist in der Kamera implementiert:

$$\begin{pmatrix} R_0 \\ G_0 \\ B_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_0 & r_1 & r_2 \\ r_3 & r_4 & r_5 \\ r_6 & r_7 & r_8 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} R_i \\ G_i \\ B_i \end{pmatrix}$$

Für die Koeffizienten gilt: $r_i \in \left(-\frac{4095}{2048}, \frac{4095}{2048}\right)$ mit $0 \leq i \leq 8$ [Gen06]

3.5.7 Datenausgabe

Die Datenausgabe der Kamera erfolgt über die *CameraLink*-Schnittstelle. Die RGB-Vektoren werden gemäß Spezifikationsdokument der Kamera in der Reihenfolge (R, G, B) mit einer Frequenz von 36 MHz ausgegeben. [Gen06]

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass in der zur Kamera gehörenden Anwendungssoftware ein Fehler bezüglich der Datenverarbeitung auftritt. Die Kameradaten werden zwar korrekt empfangen und angezeigt, bei der Speicherung eines Bildes werden die RGB-Farbwerte jedoch in falscher Reihenfolge in die RAW-Datei geschrieben. Die drei Primärfarbwerte eines Pixelfarbwertes liegen somit in der Reihenfolge (B, G, R) in der RAW-Datei vor.

Da der Fehler in der Anwendungssoftware seitens des Kameraherstellers behoben werden muss, wurde in dieser Arbeit darauf geachtet, dass die Pixelwerte vor der Weiterverarbeitung (z.B. für Auswertungen) manuell in die richtige Reihenfolge gebracht wurden, um korrekte Ergebnisse zu erhalten.

4 Grundlagen zur Monitortechnik

Im folgenden Abschnitt wird auf die Grundlagen der *Liquid-Crystal-Displays* (kurz: LCD) eingegangen. Weiterführend werden die Begriffe *Gammakorrektur*, sowie *Montior-Gamut* näher erläutert. Abschließend werden technische Details zu dem im praktischen Teil dieser Arbeit eingesetzten LCD beschrieben. Die Begrifflichkeiten Bildschirm, Monitor und Display werden dabei in diesem Abschnitt synonym verwendet.

4.1 Grundlagen der LCD-Technik

Die Funktionsweise der Liquid-Crystal-Displays beruht auf dem Einsatz spezieller Flüssigkristalle, mit deren Hilfe Einfluss auf die Polarisationsrichtung von Licht genommen werden kann. Das Licht einer Hintergrundlichtquelle wird dabei zunächst durch eine Polarisationsfolie polarisiert, bevor es eine Schicht, aus für diese Technologie namensgebenden Flüssigkristallen, passiert. Diese drehen das einfallende Licht in Abhängigkeit der gewünschten Helligkeit in ihrer Polarisationsrichtung. Durch einen zweiten Polarisationsfilter tritt das Licht wieder aus. Diese beiden Polarisationschichten bilden gemeinsam mit Farbfiltern, Glasscheiben und Treiberelektronik das so genannte LCD-Panel. Die Abbildung 19 zeigt dieses in seinem schematischen Aufbau.

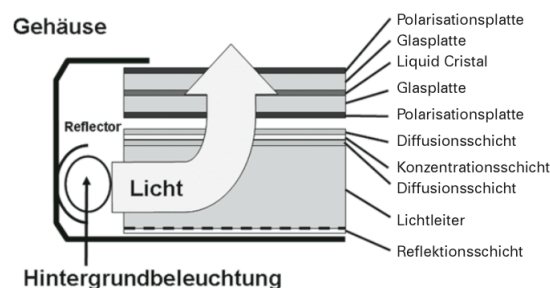


Abbildung 19: Schematischer Aufbau eines LCD-Panel [Gär08]

Eine mögliche Technologie zur Realisierung von Flachbildschirmen stellt die *Thin Film Transistor-Technologie* (TFT) dar, welche momentan auf dem Elektronikmarkt dominiert. Diese enthalten eine als Aktivmatrix bezeichnete Schicht aus Dünnschichttransistoren in matrixartiger Anordnung. Hinter jedem Pixel eines Bildschirms befindet sich dabei ein eigener Dünnschichttransistor, der separat angesteuert werden kann. Jedes dieser Pixel wird zusätzlich jeweils in drei Subpixel unterteilt, welche sich jeweils unabhängig voneinander in ihrer Lichtleitfähigkeit steuern lassen. Dies ermöglicht, unter Verwendung von Farbfiltern die Anzeige von Farbe. Dabei wird jedes Subpixel mit einem Rot-, Grün- oder Blaufilter ausgestattet. Die Far-

be der jeweiligen Pixel wird durch die Ansteuerung mit unterschiedlichen Spannungen und einer daraus resultierenden Verdrehung der Flüssigkristalle erreicht. Pro Subpixel lassen sich 256 Nuancen an Leuchtintensitäten darstellen. Hieraus ergeben sich pro Pixel $256^3 = 16,77$ Millionen darstellbare Farben.

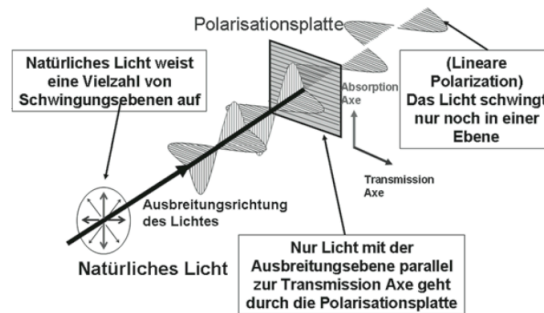


Abbildung 20: Prinzip der Lichtausbreitung und Polarisation im LCD [Gär08]

Ein bedeutendes Problem der TFT-Technologie stellt der begrenzte seitliche Einblickwinkel dar. So lassen Farbtreue und Bildschirmkontrast nach, wenn seitlich auf die Projektionsfläche des Monitors geblickt wird. Bedingt wird dieses Problem durch Flüssigkristalle, die nicht immer vollständig parallel zueinander ausgerichtet sind und somit die Entstehung von Streulicht (fehlgeleitetem Licht) ermöglichen. Dieses durchdringt die Kristallschicht des Displays schräg, sodass eine unterschiedliche Abschwächung der Intensitäten stattfindet. [Gär08]

4.2 Gammakorrektur

Sowohl CRT-Röhrenmonitore als auch moderne LC-Displays weisen eine nichtlineare Beziehung zwischen den digitalen Eingabewerten und den resultierenden Intensitäten auf. Dabei besitzt die Antwortkurve einen annähernd exponentiellen Verlauf. Der Exponent dieser Antwortfunktion wird als *Gamma* bezeichnet und bezieht sich hierbei auf den griechischen Buchstaben γ der in diesem Bezug die nicht-lineare Beziehung zwischen Monitor Input und Output beschreibt. Das nicht-lineare Verhalten der Monitor-Antwortkurve kann unter Verwendung der so genannten *Gammakorrektur* so verändert werden, dass sie einen linearen Verlauf annimmt. [Cor07]

Abbildung 21 zeigt im Vergleich die ursprüngliche nahezu exponentiell verlaufende Monitorantwortkurve (blau), die Kurve der Gammakorrektur (magentafarben), sowie die korrigierte, linear verlaufende Antwortkurve nach erfolgter Gammakorrektur (schwarz).

Der Gammawert eines Monitors kann zwischen den Werten 1.4 und 3.5 variieren. So wurden zum Beispiel für die Microsoft Windows und OS X

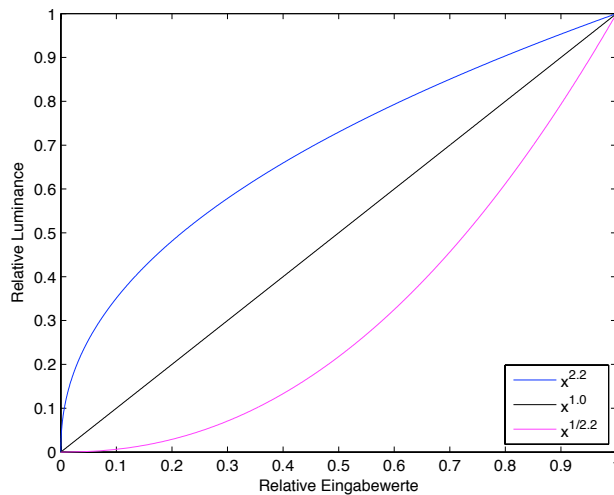


Abbildung 21: Typische Monitor-Antwortkurve

der Firma Apple unterschiedliche Standards für den Gammawert festgelegt. Windowsbasierte Systeme arbeiten mit einem standardisierten Gammawert von $\gamma = 2.2$, wohingegen die Firma Apple sich diesem Standard erst ab der im Juni 2009 erschienenen Version OS X 10.6 anschloss. Alle älteren Betriebssystemversionen haben einen Gammawert von $\gamma = 1.8$ als Standard.

4.3 Monitor-Gamut

Als Monitor-Gamut wird die Menge an Farben bezeichnet, die ein Monitor wiedergeben kann. Er ist ein Körper in dem Farbraum, den der Monitor für die Farbdarstellung benutzt. Visualisieren lässt sich der Gamut durch die Darstellung des Körpers (Dreieck) im CIE Chromatizitätsdiagramm. Das Dreieck wird hier durch drei definierte Farbwerte für Rot, Grün und Blau aufgespannt. Vom Monitor können hierbei all die Farbreize dargestellt werden, die sich aus Mischungen dreier, innerhalb des Gamut-Dreiecks befindlichen Farbwerte zusammensetzen. [RWPD06]

Der Gamut des in dieser Arbeit verwendeten LC-Display *NEC Spectraview 2690*, ist in Abbildung 22 dargestellt.

4.4 LC-Display *NEC Spectraview 2690*

Im Folgenden wird das im praktischen Forschungsteil dieser Arbeit verwendete LC-Display beschrieben.

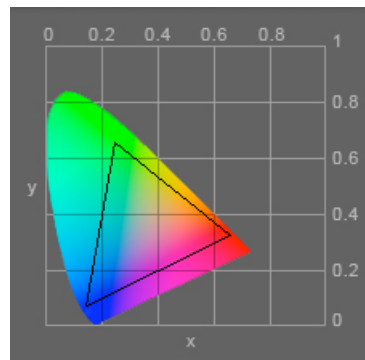


Abbildung 22: Gamut des NEC SpectraView 2690

Das Display *NEC SpectraView 2690* (vgl. Abbildung 23) ist ein 26-Zoll Widescreen LC-Display, welches speziell für farbkritische Anwendungen entwickelt wurde. Laut Herstellerangaben verfügt es über herausragende Eigenschaften im Bezug auf perfekte Bildqualität, Farbtreue, sowie Ergonomie. Dabei decken die *Color Gamuts* dieses Displays 102% des *NTSC-Farbraums*, sowie 107% des *Adobe RGB Farbraums* ab. [NEC10]

Das Anzeige-Panel basiert auf der H-IPS (Horizontal In-Plane-Switching) Technologie. Hierbei sind die Elektroden nebeneinander in einer Ebene, parallel zur Monitoroberfläche angeordnet. Ein Vorteil der H-IPS Technologie ist die Verbesserung der so genannten *Blickwinkelabhängigkeit* des Kontrastes, welche die Abhängigkeit zwischen Kontrast und Betrachtungsrichtung der Monitoroberfläche bezeichnet. [Bec05] Der Einblickwinkel liegt bei 178° in beiden Hauptrichtungen (horizontal und vertikal). Dies führt dazu, dass auch der Farbeindruck unabhängig vom Blickwinkel auf das Display stabil bleibt. [NEC10]

Wichtige technische Kenndaten gemäß Herstellerangaben:

- Panel Technologie vom Typ: LCD H-IPS
- Größe: 25,5 Zoll (entsprechend 64,9 cm)
- Betrachtungswinkel: 178° horizontal und vertikal
- Punktabstand: 0,287 mm
- Kontrastverhältnis: 1000 : 1
- Leuchtstärke: 320 cd/m^2
- Anzahl der Farben: 16,77 Mio.
- Optimale Auflösung: 1920 x 1200 bei 60 Hz

Im nachfolgenden Text dieser Arbeit wird, das hier vorgestellte Display vom Typ NEC SpectraView 2690, der Einfachheit halber als Monitor bezeichnet.



Abbildung 23: LC-Display NEC Spectraview 2690 [NEC10]

5 Related Work

5.1 Displaycharakterisierung

Die Displaycharakterisierung umfasst verschiedene Charakterisierungsmodelle, welche eine Transformation aus einem geräteunabhängigen - in den geräteabhängigen Farbraum des Bildschirms zur Verfügung stellen. Durch die Analyse der Bildschirmeigenschaften kann in diesem Zusammenhang die Auswahl eines passenden Charakterisierungsmodells vorgenommen werden, da je nach Charakterisierungsmodell gewisse Forderungen an die Eigenschaften des zu charakterisierenden Bildschirms erfüllt sein müssen. Hierzu gehören zum Beispiel die Farbkonstanz oder die räumliche Homogenität des Displays.

Die Abbildung zwischen den Farbräumen besteht aus einem nichtlinearen, sowie einem linearen Teil. Der nichtlineare Teil wird hierbei durch eine Funktion, der lineare Teil durch einen linearen Transformationsschritt abgebildet. Jedes Charakterisierungsmodell kann sowohl in ein Vorwärtsmodell als auch in ein Inverses Modell unterteilt werden. Dabei bezieht sich im Bereich der Displaycharakterisierung das Vorwärtsmodell auf die Transformation des geräteabhängigen Farbraumes in den geräteunabhängigen Farbraum. Das Inverse Modell beschreibt hingegen den umgekehrten Schritt, vom geräteunabhängigen - in den geräteabhängigen Farbraum des Monitors.

Die drei in [Koc09] beschriebenen Charakterisierungsmodelle, die zur Charakterisierung von Displays angewendet werden können, werden im Folgenden vorgestellt.

5.1.1 Matrix, Gamma and Offset (MGO) Modell

Die Voraussetzungen für die Anwendbarkeit des *MGO-Modells* sind die Farbkonstanz, sowie die Additivität der Farbkanäle des verwendeten Displays. Der lineare Abbildungsschritt wird in Anlehnung an [DTB04] durch eine 3×3 Matrix ausgeführt. Die zu verwendende 3×3 Matrix wird durch Messungen der drei Primärfarben Rot, Grün und Blau, angezeigt auf maximaler Intensitätsstufe, erstellt. Eine Matrixspalte entspricht somit $(X_{k,max}, Y_{k,max}, Z_{k,max})^T$ mit $k \in \{r, g, b\}$. Zusätzlich wird eine so genannte *Schwarzkorrektur* der ermittelten Farbwerte vorgenommen. Dazu wird der gemessene Tristimuluswert für das Schwarz des jeweiligen Displays in Form von $(X_0, Y_0, Z_0)^T$ von der jeweiligen Matrixspalte subtrahiert (vgl. [FW98]). Im nichtlinearen Schritt erfolgt die Transformation mit der nichtlinearen Exponentialfunktion $f(j) = j^{\gamma_k}$ mit $j \in \{R, G, B\}$ und $k \in \{r, g, b\}$.

Vorwärtsmodell

Das Vorwärtsmodell dient der Berechnung von CIE XYZ Tristimuluswerten auf der Grundlage von RGB-Eingabewerten. Dazu werden diese zunächst durch die nichtlineare Exponentialfunktion $f(j)$ transformiert (vgl. Gleichung 13). Der Gammawert kann hierbei einheitlich oder auch kanalspezifisch angewendet werden. Auf die hieraus resultierenden Werte R' , G' , B' wird im nächsten Schritt die bereits schwarzkorrigierte 3×3 Transformationsmatrix angewendet (vgl. Gleichung 14). Zusätzlich erfolgt auf die transformierten Werte die Addition eines Schwarzanteils. [Koc09]

$$\begin{pmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R^{\gamma_r} \\ G^{\gamma_g} \\ B^{\gamma_b} \end{pmatrix} \quad (13)$$

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{r,max} - X_0 & X_{g,max} - X_0 & X_{b,max} - X_0 \\ Y_{r,max} - Y_0 & Y_{g,max} - Y_0 & Y_{b,max} - Y_0 \\ Z_{r,max} - Z_0 & Z_{g,max} - Z_0 & Z_{b,max} - Z_0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} \quad (14)$$

Inverses Modell

Mit Hilfe des inversen MGO-Modells können geräteunabhängige XYZ Tristimuluswerte in geräteabhängige RGB-Werte transformiert und somit auf einem Display angezeigt werden. Im ersten Schritt des inversen Modells wird der XYZ Tristimuluswert mit der invertierten 3×3 Transformationsmatrix multipliziert (vgl. Gleichung 15). Gleichzeitig wird eine Schwarzkorrektur durchgeführt, indem der ermittelte Schwarzwert sowohl von dem zu transformierenden Tristimuluswert als auch von den Matrixkomponenten subtrahiert wird. Die daraus resultierenden linearen RGB-Werte $(R', G', B')^T$ werden im anschließenden nichtlinearen Schritt durch die Exponentialfunktion $f(j)$ (vgl. Gleichung 16) transformiert. Der Exponent (Gammawert des Monitors) wird hierbei im Vergleich zum Vorwärtsmodell (vgl. Gleichung 13), reziprok als Gammakorrektur verwendet. [Koc09]

$$\begin{pmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{r,max} - X_0 & X_{g,max} - X_0 & X_{b,max} - X_0 \\ Y_{r,max} - Y_0 & Y_{g,max} - Y_0 & Y_{b,max} - Y_0 \\ Z_{r,max} - Z_0 & Z_{g,max} - Z_0 & Z_{b,max} - Z_0 \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{pmatrix} \quad (15)$$

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R'^{1/\gamma_r} \\ G'^{1/\gamma_g} \\ B'^{1/\gamma_b} \end{pmatrix} \quad (16)$$

5.1.2 Matrix, 1D LUT and Offset (1D LUT) Modell

Das *1D LUT Modell* wurde von Fairchild und Wyble [FW98] entwickelt. Auch dieses Modell setzt als Forderungen an das verwendete Display die Farbkonstanz und die Additivität der Farbkanäle voraus. Genau wie beim MGO-Modell, kommt eine 3×3 Matrix zur Durchführung des linearen Transformationsschrittes zum Einsatz. Aufbau und Verwendung dieser Transformationsmatrix sind dabei zum MGO-Modell identisch. Im nichtlinearen Schritt kommt jedoch anstatt einer Exponentialfunktion mit Gamma-Exponent, eine eindimensionale Lookup-Tabelle (in Kurzform *LUT*) pro Farbkanal zum Einsatz. Zur Erstellung der Lookup-Tabellen, werden *luminance ramps* von 0 bis zur maximal darstellbaren Intensität eines jeden Farbkanals, vermessen. Die resultierenden Werte werden anschließend anhand der *luminance* für Schwarz korrigiert und auf Grundlage der maximal gemessenen *luminance* normalisiert.

Vorwärtsmodell

Im ersten Schritt des Vorwärtsmodells werden die 1D LUTs pro Farbkanal für die Abbildung der digitalen Inputwerte R, G und B in die linearen RGB-Werte R', G' und B' verwendet (vgl. Gleichung 17).

$$\begin{pmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} LUT_r(R) \\ LUT_g(G) \\ LUT_b(B) \end{pmatrix} \quad (17)$$

Dazwischen liegende Werte, werden durch die nachfolgende Funktion (Gleichung 18) linear interpoliert. Der Wert x ist dabei der am dichtesten unterhalb des Inputwertes $j \in \{R, G, B\}$ liegende Messwert der LUT. $k \in \{r, g, b\}$ gibt dabei den jeweilig betreffenden Farbkanal an.

$$LUT_k(j) = LUT_k(x) + (j \cdot (LUT_k(x + 1) - LUT_k(x))) \quad (18)$$

Die Transformation der linearen RGB-Werte R', G' und B' in Tristimuluswerte, erfolgt analog zu Gleichung 14 des MGO-Modells, durch die Transformationsmatrix.

Inverses Modell

Das Inverse Modell des 1D LUT Modells transformiert zunächst die Tristimuluswerte in die lineare RGB-Werte R', G' und B' . Dies geschieht analog zu Gleichung 15 des MGO-Modells mit Hilfe der inversen Transformationsmatrix. Diese Werte werden im Anschluss mit dem Inversen der 1D LUTs transformiert, um die gewünschten RGB-Werte zu erhalten (vgl. Gleichung 19). [Koc09]

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} LUT_r(R') \\ LUT_g(G') \\ LUT_b(B') \end{pmatrix} \quad (19)$$

5.1.3 3D Tetrahedral LUT and Offset (3D LUT) Modell

Das *3D LUT Modell* (vgl. [TCH⁺08] und [THFG07]) nutzt eine tetraedrische, dreidimensionale Lookup-Tabelle für die Abbildung zwischen geräteabhängigen - sowie geräteunabhängigen Farbkoordinaten.

Im direkten Vergleich mit dem erläuterten 1D LUT Modell, werden Transformationsmatrix, sowie eindimensionale LUTs durch drei eindimensionale LUTs pro Kanal ersetzt. Damit eignet sich dieses Modell für die Displays, bei denen es trotz durchgeführter Schwarzkorrektur, zu Schwankungen in der Intensität der Farbkoordinaten kommt.

5.2 Charakteristiken von Liquid Crystal Displays (LCDs)

Displays besitzen einen gewissen Umfang gemeinsamer Charakteristiken, die sich trotz unterschiedlicher Konstruktions- und Bauart der Anzeigegeräte vergleichen lassen. Anhand dieser Eigenschaften kann eine Aussage über die Qualität der Bildschirme, sowie ihre Eignung für die Anwendung eines bestimmten Modells zur Displaycharakterisierung gemacht werden. Im Folgenden werden verschiedene Charakteristiken näher erläutert und auf Möglichkeiten für die Analyse dieser Eigenschaften eingegangen. In [Koc09] werden die erläuterten Charakteristiken für das *NEC SpectraView 2690* Display, welches im Forschungsteil dieser Arbeit verwendet wurde, analysiert. Auf diese Analyse wird in Kapitel 5.3 eingegangen.

5.2.1 Aufwärmphase

LC-Displays nutzen für die Hintergrundbeleuchtung eine Lichtquelle, die den Bildschirm von hinten flach, gleichmäßig und effizient beleuchtet. Diese benötigen eine gewisse Zeitspanne, um aufzuwärmen und die Hintergrundbeleuchtung des Displays zu stabilisieren. Da eine Displaycharakterisierung bei einer instabilen Hintergrundbeleuchtung des Displays nicht durchgeführt werden kann, ist es äußerst wichtig die Zeit der Aufwärmphase genau zu kennen und so Instabilitäten grundlegend auszuschließen. [Koc09]

5.2.2 Farbkonstanz

Die Charakteristik der Farbkonstanz ist die Eigenschaft des Displays die angibt, wie konstant die Farbkoordinaten bei Änderung der Intensität blei-

ben. Die Farbkonstanz ist eine der grundlegenden Bedingungen bei der Verwendung von Charakterisierungsmodellen für die Monitorcharakterisierung. [DTB04]

Die Farbkonstanz eines Monitors kann gezeigt werden, indem die Farbkordinaten gemessener Intensitätsverläufe in das Chromatizitätsdiagramm eingezeichnet werden. Wichtig hierbei ist die Durchführung der Schwarzkorrektur, da sich wie in [FW98] beschrieben, besonders im niedrigen Intensitätsbereich Veränderungen der *chromaticity* ergeben. [Koc09]

5.2.3 Kanalunabhängigkeit - Additivität

Die Kanalunabhängigkeit bezieht sich auf die gegenseitige Beeinflussung der einzelnen Primärkanäle. Diese kann durch eine Messung von Intensitätsverläufen für die drei Primärkanäle, sowie Grauwerte ermittelt werden. Eine Differenz von aufaddierten Tristimuluswerten der Primärkanäle im Bezug auf den des Grauwertes, gibt hierbei Aufschluss über die Abhängigkeit der Kanäle. [Koc09]

5.2.4 Räumliche Unabhängigkeit

Die räumliche Unabhängigkeit ist ein Maß, inwieweit die Farbausgabe an einer Displayposition von der Farbe einer anderen Position beeinflusst wird. Für den Fall zu starker räumlicher Abhängigkeit, ist das Display für die Durchführung einer Charakterisierung ungeeignet, da sich Farben nicht verlässlich anzeigen bzw. nicht vorausberechnen lassen.

Die räumliche Unabhängigkeit eines Bildschirms kann ermittelt werden, indem ausgewählte Farben in der Mitte des Displays, zum Beispiel als Farbiges Rechteck, angezeigt werden. Die angezeigte Hintergrundfarbe wird dabei verändert. Durch Farbmessungen, der in der Mitte des Displays angezeigten Farbe, kann untersucht werden, ob diese bei Veränderung der Hintergrundfarbe Differenzen aufweist. Diese Differenzen können als Indiz für eine vorliegende räumliche Abhängigkeit der Farben herangezogen werden. [Koc09]

5.2.5 Räumliche Homogenität

Die räumliche (spatiale) Homogenität eines Displays beschreibt die Farbdifferenzen zwischen verschiedenen, ausgewählten Bereichen eines Monitors. So ist es möglich, dass ein und derselbe Farbwert an unterschiedlichen Bildschirmpositionen verschiedene Ausgabewerte liefert. Die räumliche Homogenität eines Displays kann untersucht werden, indem verschiedene Farben oder Farbverläufe auf dem Monitor dargestellt und an verschiedenen Positionen gemessen und verglichen werden. Hierbei werden

die Veränderungen von *color* ΔE_{ab}^* , *lightness* ΔL^* , *chroma* ΔC_{ab}^* , sowie *hue* ΔH_{ab}^* als Differenzen, auf Basis des CIE L*a*b* Farbraums ermittelt.

Für die Berechnung der Differenzen eignet sich der Vergleich zwischen einem Bereich in der Bildschirmmitte und einem im linken oberen bzw. rechten unteren Bildschirmbereich. Gemessen werden hierbei RGB-Farbverläufe der einzelnen Farbkanäle Rot, Grün und Blau, sowie die Kombination der Kanäle zu Weiß, Gelb, Magenta und Cyan. Für die Umrechnung in den CIE L*a*b* Farbraum wird als Referenzweiß, das der Bildschirmmitte verwendet. [Koc09]

5.2.6 OETF

Die OETF (*optoelectronic transfer function*) beschreibt die nichtlineare Beziehung zwischen digitalen Eingabewerten und der Intensität des Ausgangssignals. Somit ist sie ein wichtiges Element der Displaycharakterisierung. [DTB04]

5.3 Analyse des NEC SpectraView 2690 Displays

Im Folgenden wird auf die in [Koc09] durchgeführte Analyse der in Kapitel 5.2 beschriebenen Charakteristiken für das Display *SpectraView 2690* des Herstellers *NEC* eingegangen.

5.3.1 Aufwärmphase des Monitors

Um Aussagen über die Stabilität von *luminance* und *hue* treffen zu können, wurden in [Koc09] konkrete Messungen der Aufwärmzeit des Monitors durchgeführt. Hierzu wurden die RGB-Werte für den relativen Weißpunkt $(1, 1, 1)^T$, sowie für ein mittleres Grau $(0.5, 0.5, 0.5)^T$ im Abstand von zwei Minuten gemessen. Aus diesen Daten konnten konkrete Aussagen über das Farbverhalten des Monitors während der Aufwärmphase getroffen werden. Das *NEC SpectraView 2690 Display* benötigt eine Zeitspanne von mindestens 90 Minuten, um eine Stabilität der Farbkoordinaten zu gewährleisten. Diese Messergebnisse, dargestellt in Abbildung 24, weichen damit in erheblichem Umfang von den Herstellerangaben ab, in welchen eine benötigte Aufwärmzeit von 20 Minuten angegeben wird.

5.3.2 Farbkonstanz des Monitors

Um die Farbkonstanz des Displays zu untersuchen, wurden RGB Farbverläufe in 52 Schritten gemessen und für jeden Primärfarbkanal, sowie als Kombination der Kanäle in das Chromatizitätsdiagramm eingetragen. Zuvor wurde eine Schwarzkorrektur durchgeführt. Im Chromatizitätsdiagramm (Abbildung 25) wird dabei deutlich, dass die Farbkoordinaten sehr

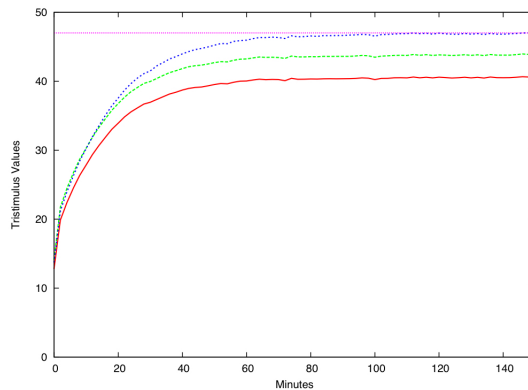


Abbildung 24: Darstellung der Aufwärmphase des NEC Monitors [Koc09]

dicht beieinander liegen. Somit sieht [Koc09] die Annahme der Farbkonstanz für das NEC Display als gerechtfertigt an.

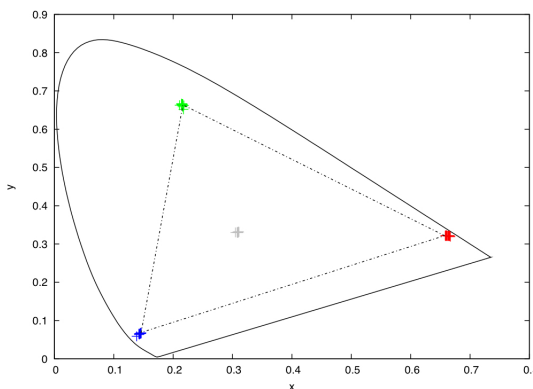


Abbildung 25: Chromatizitätsdiagramm für NEC SpectraView 2690 [Koc09]

5.3.3 Additivität des Monitors

Die Kanalunabhängigkeit (Additivität) des Monitors wird in [Koc09] anhand der Messung von Intensitätsverläufen ermittelt. Hierfür werden Intensitätsverläufe der drei Primärkanäle gemeinsam mit einem Grauverlauf in 52 Schritten gemessen. Anschließend werden die Tristimuluswerte für den R, G und B Kanal addiert und die Differenz zum korrespondierenden Grauwert gebildet. Die prozentualen Differenzen werden in Abbildung 26 dargestellt. Hier ist deutlich erkennbar, dass die Differenzen im Bereich unterhalb eines relativen Inputs von etwa 0.15 stark zunehmen. Dies führt [Koc09] auf Ungenauigkeiten des Messgerätes zurück. Oberhalb

dieses Wertes fallen die Differenzen jedoch sehr gering aus, was als Nachweis der Additivität angesehen werden kann. Die durchschnittliche Differenz beträgt hierbei 1.56%. Als globales Maximum bzw. Minimum wurden 1.68% sowie -5.08% ermittelt.

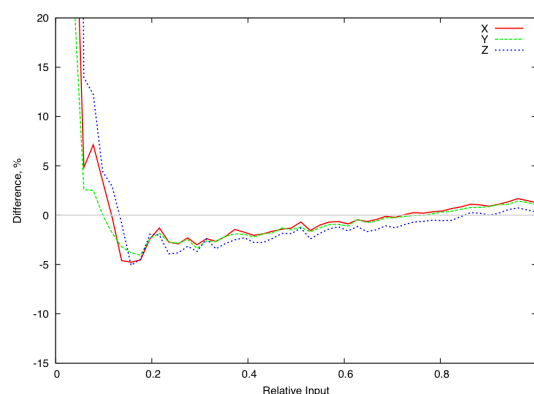


Abbildung 26: Additivitätsberechnung für NEC SpectraView 2690 [Koc09]

5.3.4 Räumliche Unabhängigkeit des Monitors

Die Analyse der räumlichen Unabhängigkeit des *NEC SpectraView 2690* Displays wurde in [Koc09] anhand eines dargestellten Farbfeldes mit einer Größe von 400×400 Pixeln in der Bildschirmmitte durchgeführt. Für die Anzeige wurden die RGB-Werte für die Farben Rot, Grün, Blau, Weiß, Schwarz, Grau, Gelb, Magenta, sowie Cyan verwendet. Die Hintergrundfarbe wurde dabei zwischen Schwarz und Weiß variiert. Aufgrund der Testergebnisse, dargestellt in Tabelle 1, spricht [Koc09] von einer exzellenten räumlichen Unabhängigkeit des *NEC SpectraView 2690*. Als durchschnittliche Differenz wurde $0.19 \Delta E_{ab}^*$ gemessen.

5.3.5 Räumliche Homogenität des Monitors

Für die konkrete Analyse der räumlichen Homogenität des *NEC SpectraView 2690* Displays, wurden in [Koc09] Messwerte aus der Bildschirmmitte und dem rechten unteren Bildschirmbereich für die Differenzbildung verwendet. Hierfür wurden die in Kapitel 5.2.5 beschriebenen Farbkanäle vermessen. Die Tabelle 2 gibt eine Übersicht über die ermittelten Maximal- bzw. Durchschnittswerte für die Differenzen *color* ΔE_{ab}^* , *lightness* ΔL^* , *chroma* ΔC_{ab}^* , sowie *hue* ΔH_{ab}^* .

Es wird ersichtlich, dass das NEC Display einen gewissen Grad an räumlicher Inhomogenität aufweist. Dies sollte bei der Displaycharakterisierung beachtet werden.

Farbwert	ΔE_{ab}^*
Rot	0.18
Grün	0.34
Blau	0.19
Weiß	0.10
Schwarz	0.08
Grau	0.36
Gelb	0.21
Magenta	0.10
Cyan	0.09

Tabelle 1: Farbdifferenzen für NEC SpectraView 2690 [Koc09]

max. ΔL^*	max. ΔC_{ab}^*	ΔH_{ab}^*	max. ΔH_{ab}^*	$\Delta \bar{E}_{ab}^*$	max. ΔE_{ab}^*
6.43	8.36	0.53	1.65	3.32	10.08

Tabelle 2: Differenzen für NEC SpectraView 2690 [Koc09]

Eine weitere Möglichkeit die räumlichen Inhomogenitäten zu verdeutlichen, ist eine dreidimensionale Darstellung der Leuchtdichte. In [Koc09] wurde hierfür die Leuchtdichte an neun unterschiedlichen Punkten des Bildschirms gemessen. Ausgewählt wurden hierfür die Bildschirmmitte, die Bildschirmecken, sowie jeweils die Mitte der Bildschirmränder. Die Intensität war hierbei für alle Kanäle auf maximaler Einstellung. Das NEC Display wies hierbei eine maximale Abweichung von $49.99 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ auf. Die räumliche Verteilung der gemessenen Leuchtdichte in $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$, wird in Abbildung 27 gezeigt.

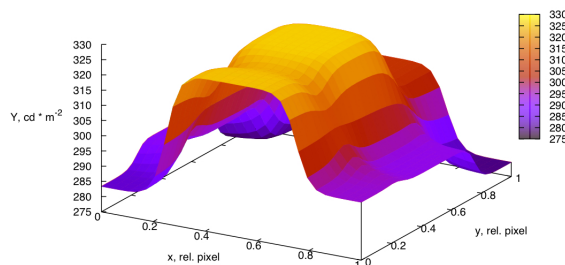


Abbildung 27: Leuchtdichtewerte des NEC SpectraView 2690 [Koc09]

5.3.6 OETF des Monitors

Die Analyse der OETF für einen Bildschirm kann auf Grundlage gemessener Intensitätsverläufe aller Farbkanäle stattfinden. In [Koc09] wird ein Intensitätsverlauf, unterteilt in 52 Schritte, für alle Farbkanäle gemessen. Die Abbildung 28 zeigt die in [Koc09] ermittelte OETF für das *NEC SpectraView 2690* Display auf Grundlage der relativen Inputwerte des Grünkanals im Vergleich zur Exponentialfunktion mit dem Gammawert $g(x) = x^{2.2}$. Eine relativ gute Annäherung an diese, sowie leichte Abweichungen im Bereich oberhalb eines Inputs von 0.6 sind erkennbar.

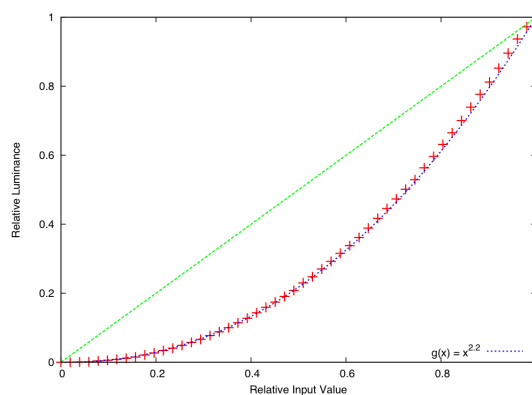


Abbildung 28: OETF für NEC SpectraView 2690 [Koc09]

5.4 Photometrische Kalibrierung

HDR-Kameras mit CMOS-Sensorelement liefern Werte, die der Leuchtdichte der aufgenommenen Pixel entsprechen. Sie unterliegen jedoch einer nicht-linearen Transformation. In [Ebl07] wird ein Verfahren für die Annäherung einer Abbildung beschrieben, welche die Leuchtdichte eines Pixelwertes angibt.

Die Grundlegende Annahme dieses Verfahrens ist, dass sich die Abbildung durch eine parametrische Funktion beschreiben lässt. Nach [Hoe07] wird eine Funktion der folgenden Form angenommen:

$$p = a \cdot \log(L + 1) + b \quad (20)$$

p ist hierbei der normierte Pixelwert P , der durch $p = P/(2^{12} - 1)$ auf eine Kameraauflösung von 12 Bit normalisiert, im Wertebereich zwischen $[0..1]$ betrachtet wird. L beschreibt in der Funktion die Leuchtdichte, a und b sind einflussnehmende Funktionsparameter, die es zu bestimmen gilt.

Die Bestimmung der Funktionsparameter findet auf Grundlage einer Messreihe statt. Hierfür werden die *MacBeth* Farbtafeln mit der zu kalibrierenden Kamera in unterschiedlichen Beleuchtungssituationen aufgenommen. Gleichzeitig werden die Leuchtdichten der einzelnen Farbkacheln mittels Chromameter (Minolta CS 100) vermessen. Anschließend werden aus den Pixelwerten einer Farbkachel (in RGB) Leuchtdichtewerte berechnet. Die Formel für diese Umrechnung lautet

$$m = y^T \cdot p_{rgb} \quad (21)$$

mit $p_{rgb} = (r, g, b)^T$ und $y = (0.212; 0.715; 0.072)^T$. Der Vektor y ist hierbei die zweite Zeile der Transformationsmatrix vom RGB- in den XYZ-Farbraum nach [PH04]. Unter der Annahme, dass die Kennkurven der HDR-Kamera für alle drei Farbkanäle identisch sind, werden die Kanäle gemeinsam betrachtet. Nach Aussage von [Ebl07] ist dies jedoch "*keineswegs ideal*". Aus den Wertepaaren p, L die sich aus der Messung der Farbkacheln ergeben, kann ein lineares Gleichungssystem aufgestellt werden. Dieses ist mittels Singulärwertzerlegung lösbar.

Eine zweite Variante dieses Berechnungsansatzes berücksichtigt zusätzlich die Blende der Kamera, durch welche einfallende Beleuchtungsstärken eine Skalierung erfahren. Die neue Abbildungsfunktion mit integriertem Blendenfaktor c lautet nun:

$$p = a \cdot \log(c \cdot L + 1) + b \quad (22)$$

Bei dieser Variante lassen sich die Parameter a und b , sowie der Blendenfaktor c durch ein nichtlineares Lösungsverfahren bestimmen. [Ebl07] verwendet hier die *MATLAB*-Funktion *lsqnonlin*, welche mit der *Interior-Reflective Newton Methode* arbeitet.

Die Möglichkeit, die vom verwendeten Leuchtdichtemessgerät ermittelten Farbinformationen in die Berechnung einzubeziehen, beschreibt [Ebl07] in einer dritten Variante. Hierdurch kann die Kalibrierung im Vergleich zu den zuvor beschriebenen Varianten verbessert werden, da die RGB-Pixelwerte dort durch $y = (0.212; 0.715; 0.072)^T$ in einem Wert zusammengefasst - und so die einzelnen Farbkanäle unterschiedlich gewichtet werden. Da sich die Messergebnisse des Leuchtdichtemessgerätes im Lxy-Farbraum befinden, müssen diese jedoch zunächst in XYZ-Werte überführt werden. Hierfür wird die folgende Transformation genutzt, welche das photometrische Strahlungsäquivalent $K_m = 683 \text{ lm/W}$: enthält:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \frac{1}{K_m} \begin{pmatrix} Lx/y \\ L \\ L(1-x-y)/y \end{pmatrix} \quad (23)$$

Ermittelt werden soll nun eine gerätespezifische Transformationsmatrix für die HDR-Kamera, welche die in XYZ-Werte umgerechneten Leuchtdichtemesswerte in geräteabhängige RGB-Werte überführt. Betrachtet man dabei die Farbkanäle $k \in \{r, g, b\}$ getrennt voneinander, so ergibt sich für diesen Ansatz eine Abbildung der Form:

$$p_k = a \cdot \log(c \cdot m_k \cdot L_{xyz} + 1) + b \quad (24)$$

Die Parameter können wie in der zuvor beschriebenen Variante gemeinsam für jeden Farbkanal als (a, b, c) oder aber auch kanalspezifisch als (a_k, b_k, c_k) angewendet werden. Für das nichtlineare Optimierungsverfahren wird auch hier die MATLAB-Funktion *lsqnonlin*, sowie die Leuchtdichtemesswerte aller Kacheln der *MacBeth* Farbtafeln verwendet.

6 Kameracharakterisierung

In diesem Abschnitt wird auf die Charakterisierung einer HDR-Kamera mit logarithmischer Kennlinie eingegangen. Hierbei steht das Entwickeln eines geeigneten Charakterisierungsmodells, welches auf die spezifischen Eigenschaften der Kamera eingeht und eine farbmétrisch korrekte Transformation, der von der Kamera gemessenen Pixelwerte aus dem geräteabhängigen Farbraum der Kamera in den geräteunabhängigen XYZ-Farbraum bietet, im Vordergrund.

6.1 Modellbildung

Anforderungen an das Charakterisierungsmodell sind die Verwendung einer nichtlinearen Abbildungsfunktion für die grundlegende Linearisierung der Inputdaten, sowie die Anwendung einer Transformationsmatrix für die lineare Abbildung zwischen den Farbräumen. Als ein in Ansätzen ähnliches Modell aus dem Bereich der Displaycharakterisierung (vgl. Kapitel 5.1) ist in diesem Zusammenhang das *Matrix, Gamma and Offset Modell* (MGO-Modell) zu nennen.

Grundlage für das zu entwickelnde Charakterisierungsmodell der Kamera ist das physikalische Modell der HDR-Kamera GEVILUX CAM1xCL Color. Diese Kamera enthält einen logarithmischen CMOS-Bildsensor vom Typ *HDRC*. Das Pixelverhalten dieses Sensors kann durch die Modellgleichung 25 modelliert werden (vgl. [Hoe07]). Für einen Pixelwert y gilt somit:

$$y = b + a \cdot \ln(x + c) \quad (25)$$

Die Parameter a und b sind hierbei kameraspezifische Parameter für Skalierung und Offset der Kamerafunktion. x ist die von der Kamera aufgenommene Beleuchtungsstärke. Der Parameter c modelliert den 3dB-Punkt der Kamera (vgl. Kapitel 3.3.1). Nach [Sch06] und [Ebl07] wird für den 3dB-Punkt $c = 1$ gewählt.

Für das Charakterisierungsmodell der Kamera bedeutet dies, dass für einen Pixelwert p der Kamera die folgende Funktion angenommen werden kann:

$$p = a \cdot \ln(x + 1) + b \quad (26)$$

Nach [Ebl07] wird die einfallende Beleuchtungsstärke zusätzlich durch die Kamerablende skaliert, sodass diese als Blendenfaktor d in der Abbildungsfunktion berücksichtigt werden muss. Die bereits erwähnte Transformationsmatrix zur linearen Transformation in den Farbraum der Kamera wird als 3×3 Matrix M , bestehend aus den Zeilenvektoren $(m_r, m_g, m_b)^T$, angenommen. Die in die Kamera einfallende Beleuchtungsstärke wird in diesem Modell als Tristimuluswert betrachtet. Somit gilt $x = (XYZ)^T$.

Dem Charakterisierungsmodell liegt somit die folgende Kamerafunktion (Gleichung 27) zugrunde.

$$p_k = a_k \cdot \log_{10}(d_k \cdot (m_k \cdot (XYZ)^T) + 1) + b_k \quad (27)$$

Die Parameter werden hierbei kanalspezifisch mit $k \in \{r, g, b\}$ betrachtet. Aus der Vorschrift zur Basisumrechnung von Logarithmen (Gleichung 28) folgt, dass die Wahl des Logarithmus beliebig ist (vgl. [Ebl07]). Für die Kamerafunktion wird der Logarithmus zur Basis 10 (\log_{10}) gewählt.

$$\log_b(x) = \frac{\log_a(x)}{\log_a(b)} \quad (28)$$

Das zu entwickelnde Charakterisierungsmodell wird begrifflich in zwei Teilmodelle unterteilt. Für das erste Teilmodell wird in dieser Arbeit die Bezeichnung *Vorwärtsmodell* verwendet. Das Vorwärtsmodell beinhaltet die Transformation, die von der Kamerafunktion (Gleichung 27) ausgeht. Es transformiert von der Kamera aufgenommene, geräteunabhängige XYZ-Tristimuluswerte in den geräteabhängigen RGB-Farbraum der Kamera. Es bildet somit die eigentliche Kamerafunktionalität nach. Das zweite Teilmodell wird hier als *Inverses Modell* bezeichnet. Es beinhaltet die Transformation geräteabhängiger Farbwerte aus dem RGB-Farbraum der Kamera in den geräteunabhängigen XYZ-Farbraum und kehrt somit die eigentliche Funktionalität der Kamera um.

Nachfolgend werden die Transformationsgleichungen beider Teilmodelle, ausgehend von der Kamerafunktion (Gleichung 27), dargestellt. Eine Realisierung beider Transformationsmodelle in Form einer MATLAB-Implementierung findet sich auf der beiliegenden CD-ROM.

6.1.1 Vorwärtsmodell

Die Transformationsgleichung für die Transformation eines geräteunabhängigen Tristimuluswertes $(X_i, Y_i, Z_i)^T$ mit $i \in \mathbb{N}$ in den geräteabhängigen RGB-Farbraum der Kamera wird in Gleichung 29 unter Berücksichtigung aller drei Farbkanäle, resultierend aus der beschriebenen Kamerafunktion (Gleichung 27), dargestellt. Hierbei gilt es zu beachten, dass gewisse Multiplikationsschritte komponentenweise ausgeführt werden müssen.

$$\begin{pmatrix} R_i \\ G_i \\ B_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_r \\ a_g \\ a_b \end{pmatrix} \cdot \log_{10} \left(\begin{pmatrix} d_r \\ d_g \\ d_b \end{pmatrix} \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} R_x & R_y & R_z \\ G_x & G_y & G_z \\ B_x & B_y & B_z \end{pmatrix}}_M \cdot \begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_r \\ b_g \\ b_b \end{pmatrix} \right) \quad (29)$$

6.1.2 Inverses Modell

Durch mathematische Umformung erhält man aus der Gleichung 29 die nachfolgende Gleichung 30. Auch hierbei muss auf eine komponentenweise Multiplikation bzw. Division geachtet werden. Gleichung 30 transformiert einen bekannten Farbwert $(R_i, G_i, B_i)^T$ mit $i \in \mathbb{N}$ aus dem RGB-Farbraum der Kamera, in einen geräteunabhängigen Wert im XYZ-Farbraum.

$$\begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{pmatrix} = M^{-1} \cdot \frac{10^u - \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}}{\begin{pmatrix} d_r \\ d_g \\ d_b \end{pmatrix}} \text{ mit} \quad (30)$$

$$u = \frac{\begin{pmatrix} R_i \\ G_i \\ B_i \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} b_r \\ b_g \\ b_b \end{pmatrix}}{\begin{pmatrix} a_r \\ a_g \\ a_b \end{pmatrix}}$$

6.2 Kameracharakteristiken

Im Bereich der Charakterisierung von Displays kann eine Matrix für den linearen Transformationsschritt nur dann eingesetzt werden, wenn für das zu charakterisierende Gerät gewisse Eigenschaften (Charakteristiken) erfüllt sind. Analog zur Charakterisierung von Displays, ist dies auch in der Kameracharakterisierung zu beachten. Zu diesen Charakteristiken gehören die Farbkonstanz, die spatiale (räumliche) Homogenität des Sensorelementes, sowie die Additivität der Primärkanäle. Nur wenn diese Kameraeigenschaften erfüllt sind, ist der Einsatz einer Transformationsmatrix im linearen Transformationsschritt des Charakterisierungsmodells möglich. Im Folgenden werden die erwähnten Charakteristiken erläutert.

6.2.1 Farbkonstanz

Im Bezug auf visuelle Systeme versteht man unter Farbkonstanz die Fähigkeit, die Farbe von Objekten unter sich ändernden Beleuchtungsverhältnissen, als relativ konstant wahrzunehmen. [Geg00] Die Farbkonstanz trägt damit als einer der beteiligten Faktoren, zur Wiedererkennung von Objekten bei. So kann zum Beispiel ein grüner Apfel sowohl unter dem weißen Licht der Mittagssonne als auch unter dem eher rötlichen Licht der untergehenden Abendsonne als grüner Apfel erkannt werden, obwohl sich die Beleuchtungsverhältnisse wesentlich verändert haben. Das visuelle System reduziert hierbei die Informationen im Wesentlichen auf die Reflexion, die neben der Intensität der Beleuchtung, die wahrnehmbare Farbe im hohen Maße bestimmt.

In der Computergrafik ist Farbkonstanz eine gewünschte Charakteristik und Grundvoraussetzung für die Verwendung von Charakterisierungsmodellen. Das Ziel der computergestützten Farbkonstanz ist die Reduzierung von Beleuchtungseffekten und eine präzisere Wiedergabe des physikalischen Inhaltes der Szene. [Bar99]

Als farbkonstant können Farbwerte bezeichnet werden, wenn ihr Farbanteil des jeweiligen Farbkanals eine Konstanz aufweist. Nach [RKAJ08] muss der Reflexions- und Beleuchtungsanteil einer Farbe getrennt werden, um den wirklichen Farbanteil feststellen und vergleichen zu können. Da ein Farbwert das Produkt aus Beleuchtung und Reflexion (Farbanteil) ist, lässt sich der reine Farbanteil durch die Division eines Farbwertes durch den Beleuchtungsanteil separieren. Formal ausgedrückt bedeutet dies, dass für die Farbkonstanz folgende Bedingung erfüllt sein muss:

$$k_{\text{Farbanteil}} = \frac{k_i}{R_i + G_i + B_i} = \text{const.} \quad (31)$$

für alle $i \in \mathbb{N}$ mit $k \in \{R, G, B\}$

6.2.2 Räumliche Homogenität

Die räumliche (spatiale) Homogenität einer Kamera, genauer gesagt des Sensorelementes einer Kamera, beschreibt die Differenzen in der Farbaufnahme eines Pixels im Bezug auf ein anderes aufgenommenes Pixel. Sie kann gemessen werden, indem eine homogene Farbfläche aufgenommen wird und für die unterschiedlichen Primärfarbkanäle ein Vergleich der Pixelwerte stattfindet.

Im Bezug auf die Verwendung farblich homogener Kamerabilder, ist die räumliche Homogenität des Sensorelementes ein wichtiges Entscheidungs-

kriterium, ob die Farbmittelwerte eines gesamten Bildes stellvertretend für die Farbwerte aller Pixel des Bildes benutzt werden dürfen. So kann davon ausgegangen werden, dass bei nachgewiesener räumlicher Homogenität, die einzelnen Farbwerte der Pixel nur minimal vom berechneten Mittelwert abweichen.

Zur Analyse der räumlichen Homogenität eines Kamerabildes, kann für alle drei Primärkanäle die Abweichung der einzelnen Pixelwerte zum jeweiligen Mittelwert der Primärkanäle berechnet werden. Interessant ist in diesem Zusammenhang die Auswertung der durchschnittlichen Abweichung in beide, positive als auch negative Richtungen. Liegen positive und negative Abweichungen in gleicher Größenordnung vor, so kann als Ursache für diese Abweichungen ein gleichmäßiges Rauschen in Betracht gezogen werden. Die Verwendung der Mittelwerte führt in diesem Fall jedoch zu genauen Ergebnissen, da sich positive und negative Abweichungen gegeneinander aufheben. Diese Mittelwerte gleichen somit denen, eines vollständig räumlich homogenen Bildes.

6.2.3 Additivität der Primärkanäle

Die Additivität der Primärkanäle ist ein Indiz für die Unabhängigkeit der kameraspezifischen Primärkanäle. Dabei bezieht sich diese Kanalunabhängigkeit auf die vorhandene bzw. nicht vorhandene gegenseitige Beeinflussung der Farbkanäle. Bei vorliegender Unabhängigkeit der Kanäle muss die Addition zweier Tristimuluswerte im RGB-Farbraum das gleiche Ergebnis liefern, wie der RGB-Farbwert der addierten Tristimuluswerte. Formal bedeutet dies, dass Gleichung 32 gelten muss.

$$RGB(X_i, Y_i, Z_i) + RGB(X_j, Y_j, Z_j) = RGB(X_i + X_j, Y_i + Y_j, Z_i + Z_j) \quad (32)$$

für alle $i, j \in \mathbb{N}$

7 Praktische Umsetzung der Kameracharakterisierung

In diesem Kapitel wird die praktische Umsetzung des zuvor beschriebenen Charakterisierungsmodells erläutert. Es wird der praktische Versuchsaufbau für die Durchführung der Farbaufnahmen mittels Kamera, die Kalibrierung und Charakterisierung des verwendeten Monitors, die Darstellung von Farben auf Grundlage geräteunabhängiger Farbkoordinaten, sowie die Aufnahme der dargestellten Farben mit der Kamera beschrieben. Im letzten Teil dieses Kapitels werden die Analyse der aufgenommenen Bilder, die Untersuchung der Kameracharakteristiken und schließlich die Berechnung der Parameter, sowie der Transformationsmatrix für die Farbraumtransformation erläutert.

7.1 Aufnahmephase

Für den Versuchsaufbau wurde ein Arbeitsplatz im *Mixed-Reality-Labor* der Arbeitsgruppe Computergrafik an der Universität Koblenz-Landau verwendet. Der ausgewählte Arbeitsbereich bot die Möglichkeit einer teilweisen Fensterverdunklung, um seitlich in den Versuchsaufbau einfallendes Tageslicht weitestgehend auszuschließen.

Für die Farbaufnahmen auf Grundlage der Monitordarstellung wurde die Kamera in einem festen Abstand zum Monitor positioniert. Das Kameraobjektiv wurde dabei durch die Konstruktion einer Verdunklungsvorrichtung zusätzlich gegen einfallendes Umgebungslicht geschützt. Diese Vorrichtung diente gleichzeitig als Abstandshalter, sodass ein konstanter Abstand zwischen Monitor und Objektiv gewährleistet werden konnte.

Im Bezug auf Veränderungen der Umgebungsbeleuchtung, zum Beispiel ausgelöst durch Tageslichtschwankungen, wurden stichprobenartige Messungen durchgeführt. Diese zeigten, dass minimale Schwankungen in der Umgebungsbeleuchtung keinen feststellbaren Einfluss auf die Messwerte hatten und daher für die Versuchsdurchführung vernachlässigt werden konnten.

Um eine farbmétrisch korrekte Farbdarstellung auf dem verwendeten Monitor zu gewährleisten, muss für diesen eine Aufwärmzeit von mindestens 90 Minuten beachtet werden (vgl. Kapitel 5.2). Für die verwendete Kamera gilt es zu beachten, dass der AD-Wandler sowie die Sensorkennlinie der Kamera von der Temperatur der Sensorplatine abhängig sind. Daher wird diese, wie in Kapitel 3.5.1 beschrieben, durch einen Peltier-Kühler auf einer konstanten Solltemperatur gehalten. Um, sowohl dem Bildschirm als auch die Kamera auf eine konstante Arbeitstemperatur zu bringen, wurden beide Geräte mindestens 120 Minuten vor Versuchsbeginn in den Betriebszustand versetzt.

7.1.1 Monitorkalibrierung

Der in Kapitel 4.4 vorgestellte Monitor wurde als Lichtquelle für die Charakterisierung der Kamera verwendet. Er bietet im Vergleich zu anderen, für Kalibrierungs- und Charakterisierungszwecke eingesetzten Lichtquellen entscheidende Vorteile, nämlich eine sehr präzise Steuerbarkeit der Leuchtdichte und Farbausgabe, sowie eine zuverlässige und konstante Anzeige von Farben.

Für eine korrekte Einstellung des Gammawertes, sowie der Farbtemperatur ist eine Kalibrierung des LC-Displays erforderlich. Der Kalibrierungsschritt erstellt ein Farbprofil für den Monitor und justiert damit die Werte für Gamma und Farbtemperatur.

Vor dem Kalibrierungsvorgang wurde das Display per Firmware-Funktion in den Auslieferungszustand zurückgesetzt. Dies garantiert in jedem Versuchsdurchlauf eine konstante Einstellung der Monitorparameter. Die Kalibrierung des Monitors wurde mit Hilfe des *il* Kolorimeters und einer spezifischen Kalibrierungssoftware durchgeführt. Werte für Gamma (vgl. Kapitel 4.2), sowie Farbtemperatur müssen hierbei vorgegeben werden. Für den Gammawert wurde 2.2, für die Farbtemperatur wurde der native Weißpunkt des Monitors gewählt. Für den Kalibrierungsvorgang wird von der Software eine Reihe von charakteristischen Farben auf dem Monitor dargestellt und per *il* Kolorimeter vermessen. Aus dieser Vorgabe von *Soll-Werten*, sowie den gemessenen *Ist-Werten* wird das Farbprofil berechnet und als Standardprofil für die Farbdarstellung des Monitors gespeichert.

7.1.2 Charakterisierung und Farbdarstellung

Ziel war es, Farben aus dem geräteunabhängigen XYZ-Farbraum farbmetrisch korrekt auf dem Monitor darzustellen, um diese mit der Kamera aufnehmen zu können. Für die farbmetrisch korrekte Farbdarstellung auf dem Monitor muss für diesen zusätzlich, zu der bereits beschriebenen Kalibrierung, eine Charakterisierung erfolgen. Da nach [Koc09] die Charakteristiken Farbkonstanz und Additivität der Farbkanäle für das verwendete Display erfüllt sind (vgl. 5.3), wurde zur Monitorcharakterisierung das MGO-Charakterisierungsmodell (vgl. Kapitel 5.1.1) verwendet. Dafür war die Berechnung der Transformationsmatrix für die Umrechnung der anzuzeigenden geräteunabhängigen Tristimuluswerte in den Farbraum des Monitors notwendig.

Die benötigte Transformationsmatrix wurde mit Hilfe der Farbanalysefunktion des *il* Kolorimeters berechnet. Hierzu wurden die Primärfarben Rot, Grün und Blau in maximaler Intensität auf dem Bildschirm angezeigt. Das

Kolorimeter ermittelte hierbei die Farbkoordinaten dieser angezeigten Primärfarben im XYZ-Farbraum. Gleiches wurde für den Schwarzwert $(0, 0, 0)^T$ durchgeführt. Um Messungenauigkeiten zu minimieren, wurde jeweils mit dem Mittelwert aus drei Messungen gearbeitet. Die ermittelten Farbkoordinaten ergaben eine Transformationsmatrix der Form:

$$\begin{pmatrix} X_{r,max} & X_{g,max} & X_{b,max} \\ Y_{r,max} & Y_{g,max} & Y_{b,max} \\ Z_{r,max} & Z_{g,max} & Z_{b,max} \end{pmatrix} \quad (33)$$

Die konkrete Transformation nach MGO-Modell beinhaltet zusätzlich die Schwarzkorrektur durch den ermittelten Tristimuluswert für Schwarz $(X_0, Y_0, Z_0)^T$. Für die Schwarzkorrektur wurde dieser Wert sowohl von der ermittelten Matrix als auch von dem zu transformierenden Tristimuluswert subtrahiert. Für den nichtlinearen Transformationsschritt wurden die entstehenden RGB-Werte zusätzlich gammakorrigiert. Die vollständige Transformation entsprach somit:

$$\begin{pmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{r,max} - X_0 & X_{g,max} - X_0 & X_{b,max} - X_0 \\ Y_{r,max} - Y_0 & Y_{g,max} - Y_0 & Y_{b,max} - Y_0 \\ Z_{r,max} - Z_0 & Z_{g,max} - Z_0 & Z_{b,max} - Z_0 \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{pmatrix} \quad (34)$$

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R'^{1/\gamma_r} \\ G'^{1/\gamma_g} \\ B'^{1/\gamma_b} \end{pmatrix} \quad (35)$$

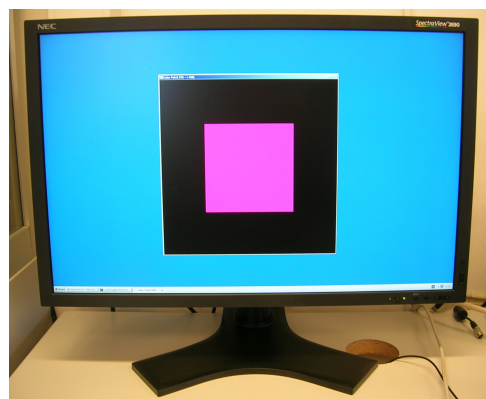


Abbildung 29: Farbdarstellung auf dem Monitor

7.1.3 Bildaufnahme

Im nächsten Schritt wurde die dargestellte Farbe mit der Kamera aufgenommen. Hierzu wurden die in den RGB-Farbraum der Kamera trans-

formierten Tristimuluswerte mit Hilfe eines OpenGL Tools auf dem Monitor angezeigt (vgl. Abbildung 29) und von dort mit der Kamera aufgenommen. Die bereits erwähnte Verdunkelungsvorrichtung garantierte dabei eine konstante Entfernung zur Bildschirmoberfläche (vgl. Abbildung 30). Aus Kapitel 5.3.5 folgt, dass für die Bildschirmmitte die beste räumliche Homogenität angenommen werden kann. Daher wurde dieser Bereich für die Farbdarstellung und Aufnahme verwendet.

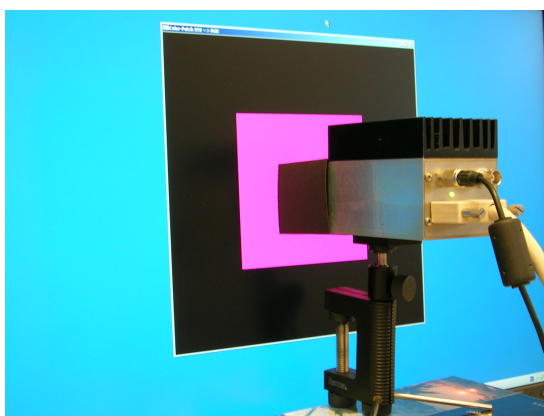


Abbildung 30: Farbaufnahmeszenario

Die aufgenommenen Bilder wurden zur Weiterverarbeitung im RAW-Format gespeichert. Da es bei der Farbdarstellung, bedingt durch den Monitor, zu minimalen Abweichungen der dargestellten Farbkoordinaten von den eigentlich definierten Tristimuluswerten kommen kann, wurde zusätzlich zur Farbaufnahme mit der Kamera, jede dargestellte Farbe mit dem Kolorimeter vermessen und die auf diesem Wege ermittelten Tristimuluswerte als Referenzwerte notiert. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass für alle nachfolgenden Berechnungen und Evaluationen stets diese, mit dem i1 Kolorimeter überprüften - und nicht die ursprünglich festgelegten Tristimuluswerte - als grundlegende geräteunabhängige Werte verwendet wurden. Der Verständlichkeit halber werden diese nachfolgend trotzdem als *definierte Tristimuluswerte* bezeichnet.

7.2 Analyse der Kameracharakteristiken

Die Anwendung des entwickelten Charakterisierungsmodells für die Kamera setzt die Existenz gewisser Kameracharakteristiken voraus (vgl. Kapitel 6). Zu diesen gehören die Farbkonstanz, die spatiale (räumliche) Homogenität des Sensorelementes und die Additivität der Farbkanäle. Eine genaue Beschreibung dieser Charakteristiken wird in Kapitel 6 gegeben.

Für die Kamera wurden die Charakteristiken anhand des in der Aufnahme

mephase gewonnenen Bildmaterials analysiert. Dieser Vorgang, sowie die daraus resultierenden Ergebnisse werden im Folgenden beschrieben.

7.2.1 Farbkonstanz

In Kapitel 6.2.1 wurde die Farbkonstanz der Kamera in Bezug auf das entwickelte Charakterisierungsmodell erläutert. Farbwerte sind demzufolge farbkonstant, wenn ihr Farbanteil des jeweiligen Farbkanals eine Konstanz aufweist. Formal ausgedrückt bedeutet dies, dass die Gleichung 31 gelten muss.

Die Farbkonstanz wurde für die Kamera unter Verwendung eines aufgenommenen Grauwertverlaufes und der Gleichung 31 analysiert. Der Grauwertverlauf als Analysegrundlage, wurde dabei als farbkonstant vorausgesetzt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 31 dargestellt. Die Kamera zeigte für Tristimuluswerte unterhalb $(55, 55, 55)^T$ leichte Schwankungen, oberhalb dieses Wertes wurde jedoch eine gute Farbkonstanz festgestellt.

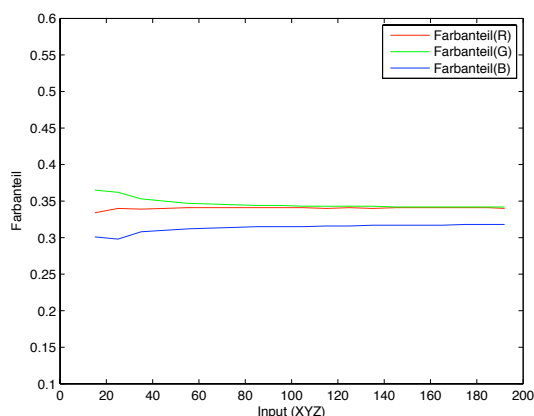


Abbildung 31: Farbkonstanztanalyse für den Grauwertverlauf

7.2.2 Räumliche Homogenität

Die Analyse der räumlichen Homogenität des Sensorelementes, wurde auf Grundlage einer Aufnahmeserie eines Grauwertverlaufes durchgeführt. Mit dieser Serie konnte ein möglichst breites Spektrum an Intensitäten für alle drei Farbkanäle abgedeckt und untersucht werden. Die dargestellten Bilder wurden dabei als vollständig homogen vorausgesetzt. Für die aufgenommenen Bilder wurden zunächst die Mittelwerte berechnet. Anschließend wurde für alle drei Farbkanäle die minimale, sowie maximale Abweichung der Pixelwerte, vom errechneten Mittelwert bestimmt. Darüber hin-

aus wurde für jeden Farbkanal eines Bildes die durchschnittliche Farbdifferenz vom Mittelwert kalkuliert. Dies wurde sowohl für die Abweichung in die positive als auch in die negative Richtung durchgeführt.

Die über die Aufnahmeserie gemittelte prozentuale Farbdifferenz in positive - und negative Richtung ist in Tabelle 3 dargestellt. Prozentual betrachtet wurde nur eine geringe Farbabweichung der einzelnen Sensorpixel vom Mittelwert festgestellt. Die maximale mittlere Abweichung betrug hierbei 0.353% in positive - und -0.444% in negative Richtung, woraus eine gute räumliche Homogenität abgeleitet werden konnte.

Δ	[%]
Δ_{R+}	0.353
Δ_{G+}	0.255
Δ_{B+}	0.260
Δ_{R-}	-0.444
Δ_{G-}	-0.270
Δ_{B-}	-0.281

Tabelle 3: Durchschnittliche Abweichung der Pixelwerte

Eine weitere Möglichkeit, die räumliche Homogenität der Kamera nachzuweisen bestand darin, eine dreidimensionale Darstellung der aufgenommenen Farbwerte anzufertigen. Abbildung 32 zeigt eine solche Darstellung für eine Aufnahme aus dem verwendeten Grauwertverlauf. Aus der ersichtlichen homogenen Verteilung der Farbwerte konnte auch eine gute räumliche Homogenität des Sensorelementes abgeleitet werden.

7.2.3 Additivität der Primärkanäle

Die Additivität der Farbkanäle der Kamera wurde anhand eines aufgenommenen Grauwertverlaufs untersucht. Hierbei wurde die bereits in Kapitel 6.2.3 vorgestellte Modellgleichung (Gleichung 32) zum Nachweis der Additivität der Primärkanäle verwendet.

Für die untersuchten Tristimuluswerte des Grauwertverlaufs wurde eine durchschnittliche prozentuale Abweichung von 0.64% berechnet. Als maximale Abweichung wurden hierbei in positiver Richtung 2.12% bzw. -0.12% in negativer Richtung ermittelt. Dies weist auf eine gute Additivität des Kamerasignals hin und impliziert die Unabhängigkeit der Primärkanäle.

7.2.4 Abschließende Bewertung

In der beschriebenen Analyse der Kameracharakteristiken konnten die Farbkonstanz, die räumliche Homogenität des Sensorelementes, sowie die Ad-

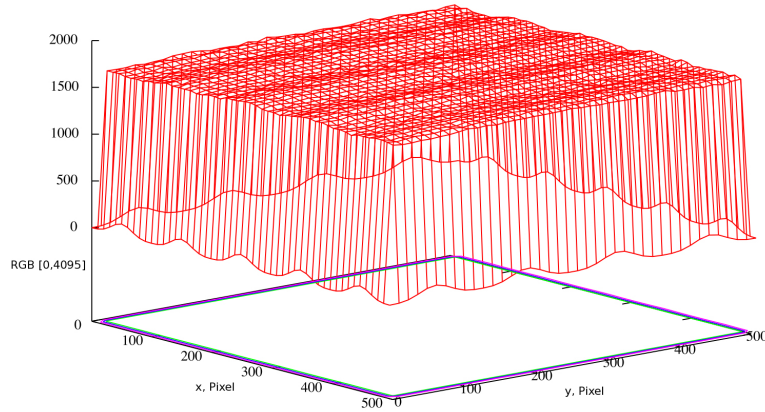


Abbildung 32: Räumliche Homogenität des Rotkanals

ditivität der Farbkanäle nachgewiesen werden. Im Bezug auf das in Kapitel 6 entwickelte Charakterisierungsmodell, kann damit der Einsatz einer linearen Transformationsmatrix gerechtfertigt werden.

7.3 Transformationsmatrix bestimmen

Die Bestimmung der Transformationsmatrix für die Kamera wurde gemeinsam mit den Parametern für die nichtlineare Abbildung berechnet. Ausgangspunkt hierfür war die in Kapitel 6.1 erläuterte Abbildungsgleichung der Kamera (Gleichung 27).

Die Berechnung erfolgte unter Verwendung des *Levenberg-Marquardt-Algorithmus*, einem numerischen Optimierungsverfahren zur Lösung nichtlinearer Ausgleichsprobleme. *MATLAB* stellt in seiner *Optimization Toolbox* eine Implementation des Levenberg-Marquardt-Verfahrens zur Verfügung. Als Fehlerfunktion für die Optimierung wurde die Differenz $e_{i,k}$ aus dem mit der Kamera gemessenen Farbwert $q_{i,k}$ und dem zu berechnenden Farbwert $p_{i,k}$ mit $k \in \{r, g, b\}$ und $i \in \mathbb{N}$ gewählt (Gleichung 36).

$$e_{i,k} = (p_{i,k} - q_{i,k}) \text{ mit} \quad (36)$$

$$p_{i,k} = a_k \cdot \log_{10}(d_k \cdot (m_k \cdot (X_i Y_i Z_i)^T) + 1) + b_k$$

Der Eingabedatensatz umfasste eine Messreihe aus 69 definierten XYZ-Tristimuluswerten $(X_i Y_i Z_i)^T$ mit den dazugehörigen RGB-Farbwerten der Kameraaufnahmen $q_{i,k}$. Die Kamerablende war auf den Wert $\kappa = 3$ eingestellt. Der Levenberg-Marquardt-Algorithmus optimierte hierbei die zu bestimmenden Parameter und die Koeffizienten der Transformationsmatrix so, dass die quadratische Differenz von $e_{i,k}$ für alle übergebenen Messwerte möglichst minimal wurde.

Die Optimierung nach dem Levenberg-Marquardt-Verfahren benötigte für jeden zu optimierenden Parameter einen Startwert. Dieser sollte möglichst nahe an dem Ergebniswert liegen. Für die hier durchgeführte Optimierung wurden für die Farbkanäle des oben beschriebenen Eingabedatensatzes anhand einer Excel-Tabellenkalkulation möglichst gute Startwerte bestimmt. Diese sind in Tabelle 4 dargestellt.

Farbkanal k	m_k	Skalierung a	Offset b	Blende d
Rot	(3.75, -0.47, -0.55)	381.0	-290.0	3
Grün	(-1.15, 4.46, 0.00)	364.2	-288.1	3
Blau	(-0.87, 2.01, 2.00)	348.5	-283.6	3

Tabelle 4: Startwerte für das Levenberg-Marquardt-Verfahren

Die *Stopping Criteria* des Levenberg-Marquardt-Algorithmus wurden dabei verwendet, wie in Tabelle 5 angegeben. Alle übrigen Optionen wurden in der Standardeinstellung verwendet.

Max iterations	1000
Max function evaluation	1000
X tolerance	1e-10
Function tolerance	1e-10

Tabelle 5: Einstellung der Stopping criteria in der Optimization Toolbox

Ergebnis der durchgeführten Optimierung sind die Transformationsmatrix M , bestehend aus den drei optimierten Zeilenvektoren m_k und die Spaltenvektoren a_{rgb} , b_{rgb} und d_{rgb} bestehend aus den Parametern a_k , b_k und d_k mit jeweils $k \in \{r, g, b\}$.

$$M = \begin{pmatrix} 1.774 & -0.150 & -0.230 \\ -0.305 & 2.915 & 0.357 \\ 0.033 & -0.113 & -0.109 \end{pmatrix} \quad (37)$$

$$a_{rgb} = \begin{pmatrix} 523.34 \\ 496.34 \\ 513.0 \end{pmatrix} \quad (38)$$

$$b_{rgb} = \begin{pmatrix} -31.03 \\ -9.63 \\ -22.99 \end{pmatrix} \quad (39)$$

$$d_{rgb} = \begin{pmatrix} 0.13 \\ 0.07 \\ -0.77 \end{pmatrix} \quad (40)$$

8 Evaluation des Charakterisierungsmodells

Der folgende Abschnitt befasst sich mit der Evaluation des in Kapitel 6 entwickelten Charakterisierungsmodells. Hierbei werden die in Kapitel 7.3 berechneten Parameter, sowie die Transformationsmatrizen für das Vorwärtsmodell und das Inverse Modell auf Genauigkeit und Fehlertoleranz hin untersucht.

8.1 Evaluation des Vorwärtsmodells

Zur Überprüfung des entwickelten Vorwärtsmodells (vgl. Kapitel 6.1) im Bezug auf Genauigkeit und Fehlertoleranz, wurde eine Reihe von definierten Tristimuluswerten mit der Kamera aufgenommen. Dabei wurden die Monitorkalibrierung und -charakterisierung, die Darstellung der Farben auf dem Monitor, sowie die Bildaufnahme und gleichzeitige Referenzmessung mit dem i1 Kolorimeter, wie in Kapitel 7.1 beschrieben durchgeführt. Anschließend wurden für jede Aufnahme die Mittelwerte der drei primären Farbkanäle berechnet, welche den geräteabhängigen RGB-Werten der aufgenommenen Farbe entsprechen.

Gemäß der Definition des Vorwärtsmodells sollten diese RGB-Farbwerte, auf Grundlage der für die Aufnahmen definierten Tristimuluswerte, berechnet werden können. Um dieses zu überprüfen, wurden die für die oben beschriebene Aufnahmeserie definierten Tristimuluswerte, unter Anwendung der Transformationsgleichung des Vorwärtsmodells (Gleichung 29) in den RGB-Farbraum der Kamera transformiert. Dabei wurden die in Kapitel 7.3 berechneten Parameter, sowie Matrixkomponenten benutzt. Im Folgenden werden die Ergebniswerte der Transformation mit den aus der Farbmessung mittels Kamera gewonnenen Farbwerte verglichen. Hierbei werden die Abweichungen in positive -, sowie in negative Richtung getrennt voneinander betrachtet.

In Abbildung 33 wird die prozentuale Abweichung zwischen den von der Kamera gemessenen und durch die Transformationsgleichung errechneten RGB-Farbwerte pro Farbmessung dargestellt. Erkennbar ist hieraus, dass die mittels Transformation errechneten Farbwerte eine nur sehr geringe Abweichung aufweisen.

Die maximale Abweichung in positive Richtung zeigt sich im Grünkanal mit einem Wert von 0.30%. In negative Richtung ist die maximale Abweichung im Blaukanal festzustellen. Sie beträgt -0.12%. Bezogen auf die ermittelte mittlere Abweichung, kann insgesamt von einer Fehlertoleranz von +/- 0.1% gesprochen werden. Die Tabelle 6 fasst die ermittelten prozentualen Abweichungen zusammen.

Farbkanal	Δ_{max-} [%]	Δ_{max+} [%]	$\Delta_{Mittel-}$ [%]	$\Delta_{Mittel+}$ [%]
R	-0.03	0.29	-0.02	0.13
G	-0.09	0.30	-0.09	0.14
B	-0.12	0.29	-0.05	0.11

Tabelle 6: Prozentuale Abweichung

Die vorliegenden Ergebnissen zeigen, dass das Vorwärtsmodell eine sehr präzise Transformation von geräteunabhängigen Tristimuluswerten in den RGB-Farbraum der Kamera ermöglicht. Zur Verdeutlichung sind in den Abbildungen 34 und 35 die Ergebniswerte der durchgeführten Transformation im Vergleich zur idealen Kamerakurve dargestellt.

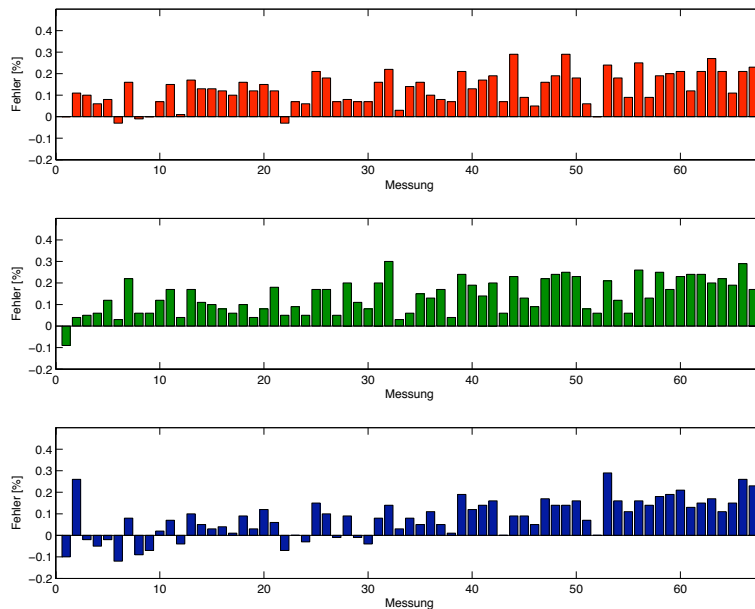


Abbildung 33: Abweichung nach Transformation in %

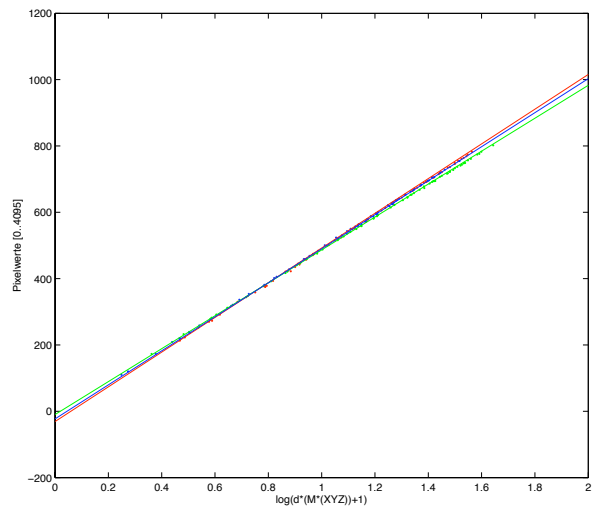


Abbildung 34: Ergebnisse im Vergleich zur idealen Kurve

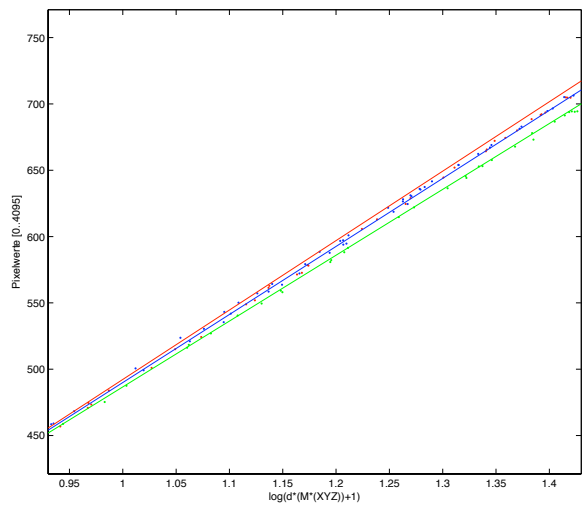


Abbildung 35: Ergebnisse im Vergleich zur idealen Kurve (Zoom)

8.2 Inverses Modell

Das Inverse Modell soll laut Definition die Transformation, mittels Kameraaufnahme gemessener, geräteabhängiger RGB-Farbwerte in geräteunabhängige Tristimuluswerte durchführen. Hierbei soll Gleichung 30 zum Einsatz kommen.

Auch für die Evaluation des Inversen Modells fand die in Kapitel 8.1 benutzte Aufnahmeserie Verwendung. Dabei wurden die RGB-Werte der kamera-basierten Messung gemäß Gleichung 30 des Charakterisierungsmodells, in geräteunabhängige Tristimuluswerte transformiert. Nachfolgend werden die Ergebniswerte dieser Transformation mit den, für die Aufnahmeserie definierten Tristimuluswerten verglichen. Auch hier wird die prozentuale Abweichung in positive - und negative Richtung separat betrachtet.

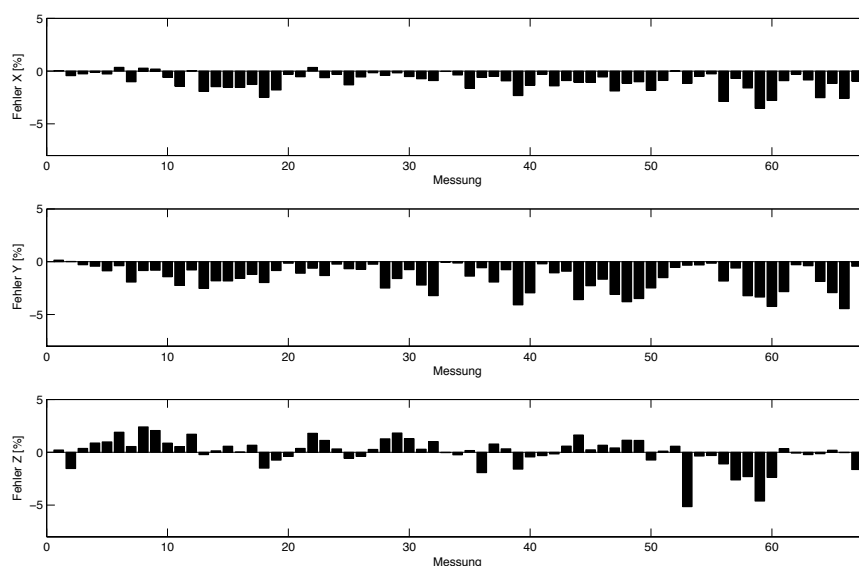


Abbildung 36: Abweichung nach Transformation in %

In Abbildung 36 ist die prozentuale Abweichung für jeden transformierten Kameramesswert des für die Aufnahmeserie definierten Tristimuluswert grafisch dargestellt. Tabelle 7 listet zudem alle berechneten prozentualen Abweichungen auf. Die maximalen Differenzen zwischen Transformationsergebnissen und definiertem Wert, liegen bei -5.15 % in negativer -, sowie bei 2.41 % in positiver Richtung. Dabei ist auffällig, dass wesentlich mehr Abweichung in negative Richtung existiert. Die mittlere Abweichung liegt zwischen -1.09 % und -1.55 % in negativer -, sowie zwischen 0.09 % und 0.82 % in positiver Richtung.

Aus den berechneten Abweichungen ist ersichtlich, dass wesentlich mehr Differenzen in negative Richtung existieren. Die mittels Transformation berechneten Tristimuluswerte liegen also im allgemeinen eher etwas unterhalb der ursprünglich definierten Werte. Aus den mittleren Abweichungen lässt sich erkennen, dass das Inverse Modell trotz kleinerer Schwankungen, eine hinreichend gute Transformation in den geräteunabhängigen XYZ-Farbraum liefert.

Wert	Δ_{max-} [%]	Δ_{max+} [%]	$\Delta_{Mittel-}$ [%]	$\Delta_{Mittel+}$ [%]
X	-3.52	0.36	-1.09	0.18
Y	-4.45	0.15	-1.55	0.09
Z	-5.15	2.41	-1.14	0.82

Tabelle 7: Prozentuale Abweichung

Die Abbildungen 37 und 38 zeigen die definierten und die durch Transformation aus den Kameramessungen berechneten Tristimuluswerte, sowie ihre Differenzen, dargestellt im $L^*a^*b^*$ -Farbraum. Hierzu erfolgte die Umrechnung der zu vergleichenden Tristimuluswerte anhand der in Kapitel 2.7 erläuterten Formeln, unter Verwendung des Weisspunktes (192, 192, 192).

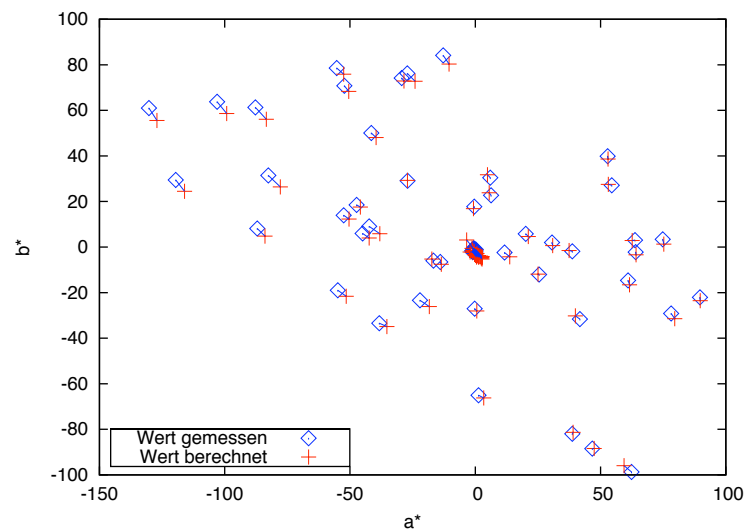


Abbildung 37: Abweichung in der Farbdomäne

Aus Abbildung 37 ist eine homogene Abweichung der Werte in der Farbdomäne ersichtlich. Zudem ist erkennbar, dass hierbei keine signifikanten Ausreißer existieren. Die Abbildung 38 zeigt die Abweichung der

Werte in der Leuchtdichtedomäne. Hier ist erkennbar, dass das Charakterisierungsmodell die Abschätzung der Leuchtdichte eher etwas zu niedrig vornimmt. Auch sind in dieser Auswertung keine signifikanten Ausreißer zu erkennen.

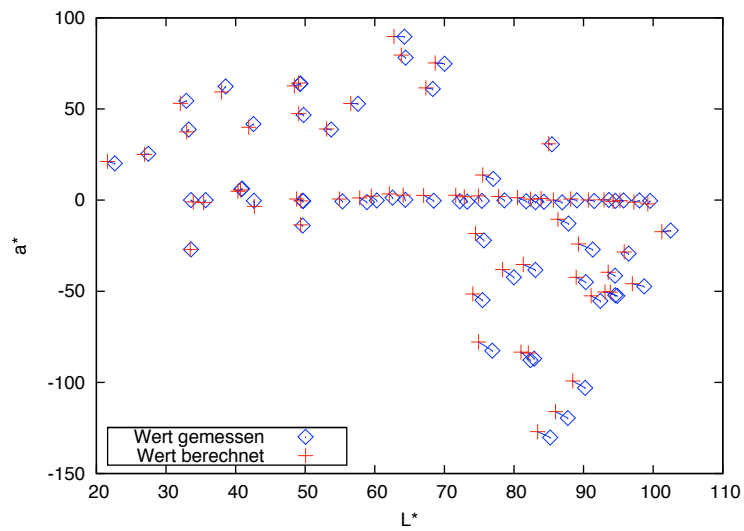


Abbildung 38: Abweichung in der Leuchtdichtedomäne

9 Fazit und Ausblick

Im Mittelpunkt dieser Diplomarbeit stand die Entwicklung eines Modells zur Charakterisierung einer HDR-Kamera mit CMOS-Sensorelement und logarithmischer Kamerakennlinie. Unter Beachtung der spezifischen Eigenschaften der Kamera sollte ein Verfahren gefunden werden, um von der Kamera aufgenommene Farbwerte, farbmétrisch korrekt in einen geräteunabhängigen Farbraum zu überführen.

Zu diesem Zweck wurde im Rahmen dieser Arbeit ein zweiteiliges Charakterisierungsmodell entwickelt, welches zwischen Vorwärtsmodell und Inversem Modell unterscheidet. Das Vorwärtsmodell stellt eine Transformation geräteunabhängiger Tristimuluswerte in geräteabhängige RGB-Werte im Farbraum der Kamera zur Verfügung. Es bildet somit die eigentliche Kamerafunktion nach. Das Inverse Modell ist in der Lage, geräteabhängige Farbwerte aus dem RGB-Farbraum der Kamera in geräteunabhängige Tristimuluswerte zu transformieren. Dabei wurde für die Linearisierung der Kameradaten die Schwarzkorrektur, sowie eine nichtlineare Abbildung verwendet. Die lineare Transformation zwischen den Farbräumen wurde durch eine 3×3 Matrix realisiert.

Die Verwendung einer linearen Transformationsmatrix ist jedoch abhängig von den spezifischen Eigenschaften der Kamera. Die Charakteristiken Farbkonstanz, räumliche Homogenität der Sensorantwort, sowie Additivität der Farbkanäle müssen erfüllt sein, um eine Matrixtransformation erfolgreich im Charakterisierungsmodell anwenden zu können.

Für die vorliegende Arbeit wurde die HDR-Kamera GEVILUX CAM1xCL Color des Herstellers Gevitec, mit einer maximalen Auflösung von 768×496 Pixel, sowie einem Dynamikumfang von 140 dB verwendet. Durch eine Analyse auf Grundlage von Farbmessungen konnte im Bezug auf die Kameracharakteristiken eine gute Farbkonstanz, räumliche Homogenität, sowie Additivität der Farbkanäle für die verwendete Kamera nachgewiesen werden. Somit wurde für das entwickelte Charakterisierungsmodell der Einsatz einer Transformationsmatrix gerechtfertigt.

Die nichtlineare Abbildungsfunktion, wie auch die Transformationsmatrix beinhalten gewisse kameraspezifische Parameter bzw. Matrixkomponenten, welche es im Bezug auf das verwendete Kameramodell zu bestimmen galt. Dies wurde unter Verwendung des Levenberg-Marquardt-Algorithmus, einem numerischen Verfahren zur Lösung nichtlinearer Optimierungsprobleme, durchgeführt. Um eine höhere Genauigkeit zu erzielen, erfolgte die Berechnung der zu bestimmenden Parameter separat für jeden Farbkanal.

Die optimierten Parameter und Matrixkomponenten wurden in einer anschließenden Evaluation auf ihre Genauigkeit hin überprüft. So wurde gezeigt, dass die Transformation geräteabhängiger Kamerafarbwerte in den geräteunabhängigen XYZ-Raum, unter Verwendung des entwickelten Charakterisierungsmodells möglich ist. Die dabei entstehenden Ungenauigkeiten liegen innerhalb einer durchschnittlichen Fehlertoleranz von etwa +/- 1%.

Die anlässlich dieser Arbeit durchgeführten Versuche haben gezeigt, dass ein hinreichend genaues Messen von Farben mittels des entwickelten Charakterisierungsmodells und der beschriebenen HDR-Kamera, unter Verwendung des erläuterten Versuchsaufbaus, möglich ist.

In zukünftige Testszenarien könnte eine Abstraktion von den, für die Charakterisierung verwendeten, idealen Laborbedingungen in Betracht gezogen werden.

Da das zur Kameracharakterisierung verwendete LC-Display nur einen begrenzten Umfang an Beleuchtungsstärken zur Verfügung stellen konnte, wäre die Farbdarstellung auf einem echten HDR-Display, welches Beleuchtungsstärken von mehr als 2.700 cd/m^2 bieten könnte, ein vorstellbares Versuchsszenario für das entwickelte Charakterisierungsmodell. In diesem Zusammenhang wäre auch eine Extrapolation in den Dynamikumfang natürlicher Lichtverhältnisse denkbar.

Des Weiteren wäre der Einsatz der Kamera als Farbmessgerät für Objekte in einer realer Umgebung denkbar. Dabei könnte die parallele Verwendung eines Spektrometers Referenzwerte liefern. Vorstellbar ist die Verwendung der Kamera auch zur Farbmessung von Projektionen oder Texturen, sowie für die Validierung in der physikalisch basierten Bildsynthese.

Im Bezug auf die Messung von *Environment Maps* könnte ein zur Kamera gehörendes Fischaugenobjektiv eingesetzt werden.

Die Versuchsdurchführungen dieser Arbeit haben gezeigt, dass die Kamera in der Lage ist, den gesamten Gamut des verwendeten Monitors zu erfassen. Es existieren jedoch keine Erkenntnisse über den gesamten Umfang des Kamera-Gamuts. In der Bestimmung desselben zeigt sich ein weiterer interessanter Arbeitsansatz.

Literatur

- [Bar99] K. Barnard. *Practical color constancy*. PhD thesis, Simon Fraser University, School of Computer Science, 1999.
- [BD80] J. K. Bowmaker and H. J. A. Dartnall. Visual pigments of rods and cones in a human retina. *The Journal of Physiology - The Physiological Society*, pages 115 – 130, 1980.
- [Bec05] M. Becker. Kristallmanufaktur – Schritte auf dem Weg zum sehrichtungsunabhängigen LC-Schirm. *c't-Magazin*, (22):222–226, 2005.
- [Ber00] R. S. Berns. *Billmeyer and Saltzman's Principles of Color Technology*. Wiley-Interscience, 3 edition, 3 2000.
- [CIE91] CIE. CIE Standard Colorimetric Observers. ISO/CIE 10527-1991, 1991.
- [Cor07] NVIDIA Corporation. *GPU Gems 3*. Addison-Wesley Professional, 2007.
- [DTB04] E. Day, L. Taplin, and R. Berns. Colorimetric characterization of a computer-controlled liquid crystal display. *Color Research and Application*, (29):365–373, 2004.
- [Ebl07] Tobias Eble. Echtzeitbeleuchtung virtueller Objekte in natürlicher Umgebung unter Berücksichtigung lokaler indirekter Lichteffekte. Diplomarbeit, Institut für Computervisualistik, Universität Koblenz-Landau, 5 2007.
- [Ebn07] M. Ebner. *Color Constancy*. Wiley, 2007.
- [Fou09] Nobel Foundation. Nobel Prize 2009. <http://nobelprize.org>, 2009.
- [FW98] M. D. Fairchild and D. R. Wyble. Colorimetric characterization of the apple studio display (flat panel lcd). Technical report, Munsell Color Science Laboratory, 1998.
- [Gär08] Armin Gärtner. LCD-Monitore - Teil 1: Grundlagen und Technologie. *mt-Medizintechnik*, 128, 2/2008.
- [Geg00] K. R. Gegenfurtner. Retinale und kortikale Beiträge zu Farbadaption und Farbkonstanz. In *TWK 2000*, Tübingen, Germany, 2000.
- [Gen06] Volker Gengenbach. *HDRC-Kamera CAM1xCL Color*. Gevitec, Ettlingen, 2006.

- [GM09] Edward J. Giorgianni and Thomas E. Madden. *Digital Color Management: Encoding Solutions*. John Wiley & Sons, 2 edition, 2009.
- [Gre01] Richard L. Gregory. *Auge und Gehirn - Psychologie des Sehens*. Rohwohlt Taschenbuch Verlag GmbH, Reinbek, 2001.
- [Has] Dr. I. Hasewinkel. www.augenarzt-nuertingen.de.
- [HGF⁺06] W. Hans, T. Grosch, T. Feldmann, D. Paulus, and S. Müller. Modell der Bildentstehung mit HDR-Kameras, 2006. Universität Koblenz-Landau, Institut für Computervisualistik.
- [Hoe07] Bernd Hoefflinger. *High-Dynamic-Range (HDR) Vision*. Springer, 2007.
- [HUB] CCD-Bildsensor. www2.informatik.hu-berlin.de.
- [Idl03] Corvin Idler. Farbkalibrierung. Studienarbeit im Fachbereich Informatik, Universität Koblenz-Landau, 2003.
- [Koc09] Jörg Koch. Color Confidence in Computer Graphics. Diplomarbeit im Fachbereich Informatik, Universität Koblenz-Landau, 2009.
- [NEC10] NEC Display Solution Deutschland. SpectraView 2690 Spezifikation. <http://www.nec-display-solutions.de/>, 24.01.2010.
- [New96] Isaac Newton. *Optik oder Abhandlung über Spiegelungen, Brechungen, Beugungen und Farben des Lichtes*. Wissenschaftlicher Verlag Harry Deutsch GmbH, Frankfurt am Main, 1996.
- [PH04] Matt Pharr and Greg Humphreys. *Physically Based Rendering: From Theory to Implementation*. The Interactive 3d Technology Series. Morgan Kaufmann, 8 2004.
- [Reh99] Volker Rehrmann. Vorlesung Digitale Bildverarbeitung, 1999. Foliensammlung. Universität Koblenz-Landau.
- [Ric81] Manfred Richter. *Einführung in die Farbmeterik*. Gruyter, 1981.
- [RKAJ08] E. Reinhard, E. A. Khan, A. O. Akyüz, and G. M. Johnson. *Color Imaging: Fundamentals and Applications*. A K Peters, 2008.
- [RWPD06] E. Reinhard, G. Ward, S. Pattanaik, and P. Debevec. *High Dynamic Range Imaging: Acquisition, Display, and Image-Based Lighting*. The Morgan Kaufman series in computer graphics. Elsevier, 2006.

- [Sch06] Verena Schneider. *Fixed-Pattern Korrektur von HDRC-Bildsensoren*. PhD thesis, Universität Stuttgart, 2006.
- [Sha08] Stephen Shankland. Dxo sheds light on camera sensor performance. <http://www.cnet.com.au>, 2008.
- [Stö98] H. Stöcker. *Taschenbuch der Physik*. Verlag Harry Deutsch, Frankfurt, 1998.
- [TCH⁺08] J. B. Thomas, P. Colantoni, J. Y. Hardeberg, I. Foucherot, and P. Gouton. An inverse display color characterization model based on an optimized geometrical structure. In *Color Imaging XIII: Processing, Hardcopy, and Applications*, volume 6807. Proceedings of the SPIE, 2008.
- [THFG07] J. B. Thomas, J. Y. Hardeberg, I. Foucherot, and P. Gouton. Additivity based lc display color characterization. In *Proc. of Gjøvik Color Imaging Symposium*, volume 4, pages 50–55, 2007.
- [vH83] A. van Helden. Roemer’s speed of light. *JOURN. HISTORY OF ASTRONOMY*, 14:2(40):137, 1983.