

# 5

Berichte aus dem  
Karl-Steinbuch-  
Forschungsprogramm

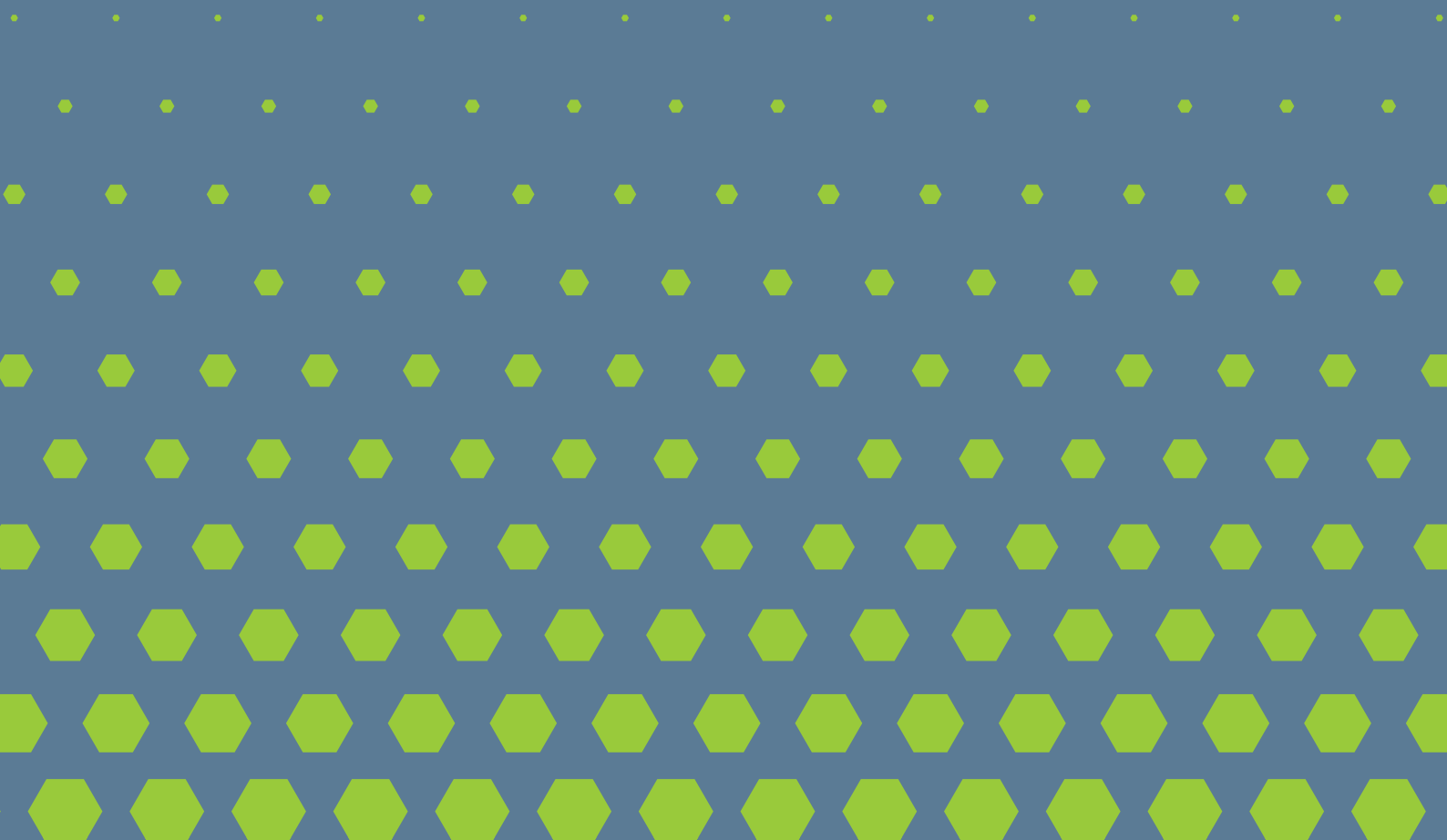
Karl  
**Steinbuch**  
Forschungsprogramm

MFG Stiftung  
Baden-Württemberg

Andreas Karge  
Jan Fröhlich  
Bernd Eberhardt

## Open Film Tools

Spektraldatenbasierte Farbkorrekturwerkzeuge  
für Filmschaffende



Berichte aus dem  
Karl-Steinbuch-  
Forschungsprogramm  
Nr. 5

Karl  
**Steinbuch**  
Forschungsprogramm

MFG Stiftung  
Baden-Württemberg

## Open Film Tools

Spektraldatenbasierte Farbkorrekturwerkzeuge  
für Filmschaffende

Andreas Karge  
Jan Fröhlich  
Bernd Eberhardt

# 5

## Zusammenfassung

Betrachtet man heutzutage eine größere Filmproduktion, so kommen bei der Bildaufnahme verschiedene, digitale Kameras zum Einsatz. Das hat zur Folge, dass das aufgezeichnete Filmmaterial der Kameras im allgemeinen farbliche Unterschiede aufweist. Ein Problem, was zu Zeiten des analogen Filmes in dieser Form nicht existierte, weil man das gleiche Filmmaterial in verschiedenen Kameras verwenden konnte. Für digitale Kameras mit unterschiedlichen, fest verbauten Sensoren ist jedoch die manuelle Nachbearbeitung des Filmmaterials in der Postproduktion die einzige Lösung für dieses Problem. Das bedeutet einen zusätzlichen, zeitaufwändigen Arbeitsschritt, der im Ergebnis zwar einen Farbabgleich, jedoch keine standardisierte Farbwiedergabe gewährleistet.

Hier setzen die vorgestellten Open Film Tools an. Sie greifen bestehende Normen und Industriestandards zur Kameracharakterisierung auf und passen diese an die Anforderungen der Filmbranche an. Das Resultat sind neuartige, frei verfügbare Werkzeuge in Form von Hard- und Software, die es Kamera-Rentals und Postproduktionen ermöglichen, eigene Kameraprofile zu erstellen. Basierend auf diesen Profilen kann nunmehr eine standardisierte und automatische Farbkorrektur in der Postproduktion stattfinden. Dabei berücksichtigen die Open Film Tools nicht nur die Kameras mit ihren Objektiven, sondern auch die am Set verwendeten Filmlichtquellen und die aufgenommenen Objekte in ihrer farblichen bzw. spektralen Eigenart, was einer zusätzlichen Qualitätssteigerung in der Genauigkeit der Farbwiedergabe dient.

### Impressum

Herausgeber:  
MFG Stiftung Baden-Württemberg  
Breitscheidstraße 4  
70174 Stuttgart  
Tel. +49 711.90 715 300  
Fax +49 711.90 715 350

Ansprechpartnerin:  
Dr. Andrea Buchholz  
buchholz@mfg.de

© MFG Stiftung Baden-Württemberg 2016 – <http://stiftung.mfg.de>

Gestaltung: Ingo Juergens, Südgrafik

# Inhalt

1

Zusammenfassung	3
Einleitung	
1.1 Problem der korrekten Farbbildaufzeichnung	6
1.2 Ansatz zur Sicherstellung der konsistenten Farbbildinformation	9
1.3 Vorgehen	10

2

Normen und Standards zur farbtechnischen Beschreibung des Bildaufnahmesystems	
2.1 Lichtquellencharakterisierung	12
2.2 Objektcharakterisierung	13
2.3 Kamerasystemcharakterisierung	14
2.4 Standardisierte Farbbildinformation nach AMPAS Standard P-2009-001	15
2.4.1 Bestimmung der spektralen Strahldichte gegebener Testfarben	17
2.4.2 Berechnung der XYZ Normvalenz Tristimuli für die Testfarben	17
2.4.3 Berechnung des XYZ Normvalenz Tristimulus für den Bezugsweißpunkt	18
2.4.4 Tristimuli Korrektur bedingt durch Verschiedenheit des Bezugsweißpunktes und des ACES Weißpunktes	18
2.4.5 Berechnung des Weißabgleichs für das Kamerasystem	19
2.4.6 Berechnung der kameraspezifischen Tristimuli	19
2.4.7 Bestimmung der Koeffizienten der Transformationsmatrix	20
2.4.8 Anwendung der bestimmten Transformation	20

3

Open Film Tools – Werkzeuge zur Sicherstellung korrekter Farbbildreproduktion	
3.1 Nutzeranforderungen	21
3.1.1 Werkzeuge zur Sicherstellung korrekter Farbwiedergabe	22
3.1.2 Verwendete Lichtquellen	22
3.1.3 Verwendete Kamerasysteme	22
3.1.4 Farbwiedergabe	22
3.1.5 Akzeptanz neuartiger Methoden zur korrekten Farbwiedergabe	23
3.1.6 Verwertbarkeit neuer Methoden zur korrekten Farbwiedergabe	24
3.1.7 Kenntnisse zu existierenden Standards	24
3.2 Open Film Tools-Ansatz unter Berücksichtigung von existierenden Farbkorrektur-Methoden und erhobenen Nutzeranforderungen	25

4

Lichtquellencharakterisierung – Erstellung einer Spektraldatenbank von Filmlichtquellen	27
4.1 Messmethode	28
4.2 Messprozess	30
4.3 Ergebnisse	33
4.4 Fehlerbetrachtung	39

5

Kamerasystemcharakterisierung – Implementierung der Erstellung von Kameraprofilen	
5.1 Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit des Kamerasystems	40
5.1.1 Design und Umsetzung des Spektroskopvorsatzes	41
5.1.2 Algorithmus und Implementierung	43
5.1.3 Test und Verifikation	46
5.2 Kameraprofilerstellung nach AMPAS Standard P-2009-001	48
5.2.1 Berücksichtigung der Lichtquellen und Testfarben	48
5.2.2 Abweichung zum AMPAS Standard P-2009-001	48
5.2.3 Test und Verifikation	49

6

Applikation zur webbasierten Kameraprofilerstellung	
6.1 Aufgabenstellung	52
6.2 Übersicht des Gesamtsystems	52
6.3 Anwender-Interaktion und Datenfluss	54

7

Schlussbetrachtung	59
Literatur und Quellen	61

Ausgehend von dem Problem der korrekten Farbbildinformation bei der Bildaufnahme, begründet in der Varianz der verwendeten Lichtquellen, der aufgenommenen Objekte und der verwendeten Kameras, wird ein möglicher Lösungsansatz zur standardisierten Farbkorrektur aufgezeigt und die Gliederung der nachfolgenden Kapitel besprochen.

### 1.1 Problem der korrekten Farbbildaufnahme

Die Signalflusskette in film- und fernsehtechnischen Systemen, von der beleuchteten Szene, der Aufnahme durch ein Kamerasystem, bis hin zur Betrachtung bei der Wiedergabe durch einen Bildgeber, ist in Abbildung 1 dargestellt.

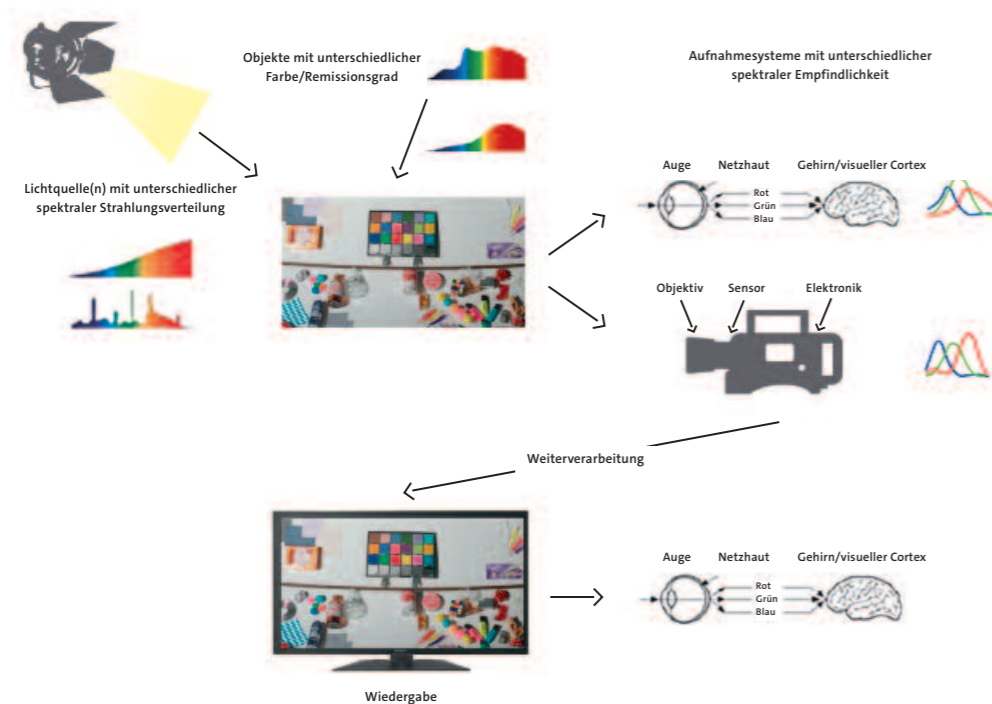


ABB.1 Signalflusskette bei Bildaufnahme und -wiedergabe

Das menschliche Auge stellt den schlussendlichen Betrachter und somit das Referenzsystem für die Farbbildaufnahme dar. Die Farbwiedergabe bei der Betrachtung der wiedergegebenen Signale soll der Farbwiedergabe der direkten Betrachtung der

Szene entsprechen. Der die Farbwiedergabe verursachende Farbreiz  $\mathbf{F}$  ist dabei abhängig von den Eigenschaften des Gesamtsystems bei der Bildaufnahme.

$$\mathbf{F} \sim \begin{pmatrix} \sum (\phi(\lambda_i) \rho(\lambda_i) r(\lambda_i)) \Delta\lambda \\ \sum (\phi(\lambda_i) \rho(\lambda_i) g(\lambda_i)) \Delta\lambda \\ \sum (\phi(\lambda_i) \rho(\lambda_i) b(\lambda_i)) \Delta\lambda \end{pmatrix} \quad (1)$$

$\phi(\lambda_i)$  stellt dabei die spektrale Strahlungsverteilung (spectral power distribution – SPD) der Beleuchtung dar. Diese ist gegeben durch eine der zueinander direkt proportionalen Messgrößen spektrale Strahldichte, spektraler Strahlungsfluss bzw. spezifische spektrale Ausstrahlung.  $\rho(\lambda_i)$  ist der spektrale Reflektanzgrad des beleuchteten Objektes und  $r(\lambda_i)$ ,  $g(\lambda_i)$ ,  $b(\lambda_i)$  die spektrale Empfindlichkeit des Beobachtersystems im Rot-, Grün- und Blau-Kanal dar. Für das menschliche Auge entsprechen diese im photopischen Bereich des Sehens den Normspektralwertkurven. In der Bildaufnahmetechnik ersetzt jedoch ein Kamerasystem während der Aufnahme den Beobachter. Für ein Kamerasystem ist die spektrale Impulsantwort proportional zur spektralen Transmission der Filterelemente, die sich vor den einzelnen Sensorelementen befinden, sowie der spektralen Empfindlichkeit des Sensors und weiterhin abhängig von der optoelektrischen Übertragungsfunktion (OETF). Für Kamera-Systeme ist insbesondere die spektrale Empfindlichkeit verschieden von der des menschlichen Auges, d. h. die Luther-Bedingung ist im allgemeinen nicht erfüllt<sup>1</sup>. Das Kamerasystem zeichnet eine Farbinformation auf, die im Weiteren bearbeitet wird und schlussendlich auf einem Bildgeber eine Leuchtdichte erzeugt, die beim Betrachter zu einem Farbreiz führt. Die Farbwiedergabe, bedingt durch diesen Farbreiz, ist ohne zusätzliche Korrekturmaßnahmen im Allgemeinen verschieden von der bei direkter Betrachtung der Szene durch das Auge. Dies führt zu dem Problem der korrekten Farbwiedergabe. Bei der Aufnahme ist dies bedingt durch das Problem der korrekten Farbaufzeichnung.

Des Weiteren kommen, bei größeren Filmproduktionen, verschiedene Kamerasysteme zum Einsatz, welche die Farbinformation verschieden registrieren, was bei einem gleichem Farbreiz ebenfalls zu einer unterschiedlichen Farbwiedergabe führt. Da jedoch im Film die zeitliche Aneinanderreihung verschiedener Aufnahmen verschiedener Kameras aus dramaturgischen Zwecken stattfindet, muss sichergestellt sein, dass der gleiche Farbreiz, bei Bildern aus verschiedenen Quellen, erzeugt wird. Dies führt zu dem zusätzlichen Problem der Konstanz der Farbwiedergabe.

Betrachtet man die wesentlichen bis zur Abspeicherung der Farbinformation im Kamerasystem beteiligten Elemente, so lassen sich diese in folgende Subsysteme unterteilen: die Szenenbeleuchtung, die Objektszene und das Kamerasystem.

Die Szenenbeleuchtung ist dabei eine räumliche Anordnung verschiedener, natürlicher oder künstlicher Lichtquellen. Diese lassen sich jeweils durch die spektrale Strahlungsverteilung beschreiben. Eine Linearkombination des spektralen Strahlungsflusses trifft nun auf Flächenelemente der Objekte aus der Szene, die durch den spektralen Reflektanzgrad beschrieben werden können. Dieser ist im Allgemeinen auch abhängig vom Einfallswinkel der Strahlung. Der resultierende

<sup>1</sup> Insbesondere sind die jeweiligen spektralen Empfindlichkeiten der Kanäle einer Kamera keine Linearkombination aus den Normspektralwertkurven.

Strahlungsfluss wird von einem dieser Flächenelemente auf ein Flächenelement des in der Bildebene des Kamerasystems positionierten Sensors abgebildet. Dieser wird zusätzlich durch das Objektiv gedämpft. Die Dämpfung kann durch eine spektrale Transmission beschrieben werden. Außerdem erfährt der Strahlungsfluss eine spektrale Dämpfung durch vor den Sensorelementen angebrachte Filterelemente, ebenfalls beschreibbar durch ihre spektrale Transmission. Diese Filterelemente sind üblicherweise Rot-, Grün- oder Blaufilter. Die heute im Einsatz befindlichen Halbleiter-Sensoren erzeugen durch den photoelektrischen Effekt einen Signalstrom, der analog verstärkt durch eine A/D Wandlung und einer digitalen Nachbearbeitung zu einer abgespeicherten Bildinformation mit einer spezifischen Kodierung führt.

Selbst bei konstanter Beleuchtung und Objektszene ist die pro Bildelement abgespeicherte RGB-Information im Allgemeinen unterschiedlich bei verschiedenen Kamerasystemen. Dieses Problem tritt bei aktuellen Produktionen verstärkt bei dem Einsatz von Kameras unterschiedlicher Hersteller auf. Vor dem Einsatz der halbleiterbasierten Sensoren wurde über lange Zeit silberbasierte Filmemulsionen verwendet. Die gleiche Emulsion konnte in verschiedenen Kameras eingesetzt werden. Der chemische Entwicklungsprozess der Emulsion war standardisiert und kameraunabhängig. Das Problem der Konstanz der Farbaufzeichnung war dadurch sensorunabhängig. Durch die große Bandbreite der mittlerweile verfügbaren digitalen Kamerasysteme mit modellspezifischen Sensoren sowie elektronischer Wandlung und Nachbearbeitung hat sich das Problem der korrekten Farbbildinformation verstärkt (Abbildung 2).

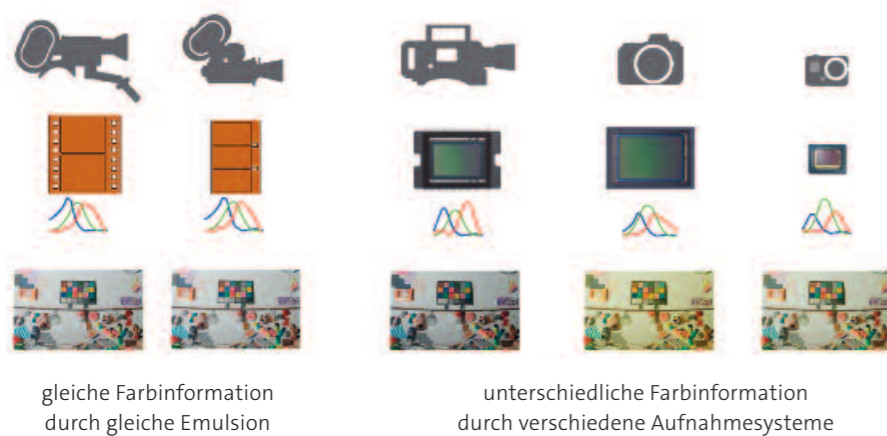


ABB. 2 Unterschiede zwischen analogem und digitalem Aufnahmesystem

Die Entstehung der Farbsignale ist also abhängig von der spektralen Charakteristik der verwendeten Lichtquellen, der aufzunehmenden Objekte und des Kamerasystems. Die aufgezeichnete Farbbildinformation ist im Besonderen sensorabhängig und kameraspezifisch. Eine gleichartige Farbwiedergabe der Daten verschiedener Aufnahmesysteme ist nur durch eine Farbbildinformation gewährleistet, die unabhängig von den spezifischen Kameraeigenschaften ist.

## 1.2 Ansatz zur Sicherstellung der konsistenten Farbbildinformation

Sowohl das Problem der korrekten Farbwiedergabe, aber auch ihrer zeitlichen Konstanz, ist somit zum Teil auf das Problem der korrekten Farbaufzeichnung zurückzuführen. Aus der Farbmatrik ergibt sich für die Umrechnung einer Farbvalenz einer Basis bezüglich einer anderen Basis folgender Ansatz:

$$\mathbf{F}_2 = \begin{pmatrix} R_2 \\ G_2 \\ B_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_1 \\ G_1 \\ B_1 \end{pmatrix} = \mathbf{M} \mathbf{F}_1 \quad (2)$$

In der Bildaufnahmetechnik spricht man hierbei von der sogenannten Matrizierung. Insbesondere werden gerätespezifische Valenzen so in das standardisierte Normvalenzsystem transformiert. Dieses repräsentiert dabei das menschliche Auge als Standardbeobachter. Hat man also zwei verschiedene Kamerasysteme  $\mathbf{F}_S^1$  und  $\mathbf{F}_S^2$  für die die Transformation in den Normvalenzraum mittels  $\mathbf{M}_{SN}^1$  und  $\mathbf{M}_{SN}^2$  gegeben sind, so lässt sich die Farbvalenz zwischen beiden Systemen über das Normvalenzsystem transformieren:

$$\mathbf{F}_S^2 = (\mathbf{M}_{SN}^2)^{-1} \mathbf{M}_{SN}^1 \mathbf{F}_S^1 \quad (3)$$

Setzt man die Beleuchtung und Objektremission als konstant voraus, benutzt jedoch verschiedene Kamerasysteme, ergibt sich mittels dieser Transformation folgender Ansatz zur standardisierten Farbbildinformation. Für ein linear arbeitendes Kamerasystem lässt sich eine lineare Transformation als Farbtransformation bestimmen, die die Valenz eines Gerätes in das Normvalenzsystem mit dem menschlichen Auge als Bezugssystem überführt. Somit wäre das Problem der korrekten Farbaufzeichnung bezüglich des Kamerasystems für eine Farbvalenz bei konstanter Beleuchtung und Objektremission gelöst. Setzt man Kameracharakteristik und Objektremission als konstant voraus, setzt aber z. B. verschiedene Lichtquellen z. B. mit Tageslichtcharakteristik aber unterschiedlicher spektraler Strahlungsverteilung ein, ergibt sich der gleiche Lösungsansatz.

In der aufgenommenen Szene sind jedoch verschiedenfarbige Objekte enthalten. Für ein beliebiges Kamerasystem ergibt sich nunmehr keine eindeutige Lösung bei der Bestimmung der Matrixkoeffizienten. Vielmehr sind für eine sinnvolle Teilmenge der motivdominanten Farben, die Koeffizienten der Matrix durch Lösung folgenden Minimierungsproblems zu bestimmen.

$$\kappa^2 = \sum \|\mathbf{F}^2 - (\mathbf{M}_{SN}^2)^{-1} \mathbf{M}_{SN}^1 \mathbf{F}_S^1\| \quad (4)$$

Dabei stellt  $\kappa^2$  die zu minimierende Fehlersumme für eine Menge an gegebenen Farbzeiten dar.

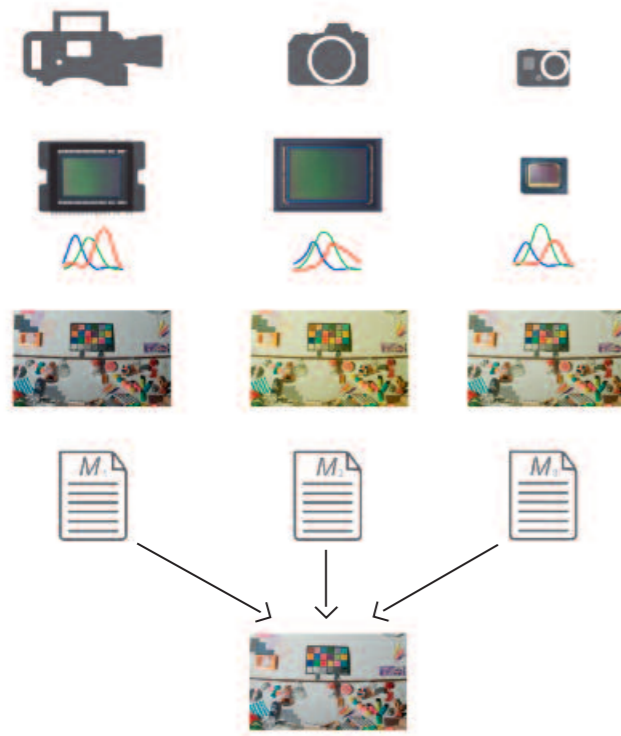


ABB. 3 Transformation in gleichartige Farbinformation

Die softwaretechnische Umsetzung dieses Lösungsansatzes spiegelt sich in der Bestimmung und Anwendung sogenannter Kameraprofile auf die gegebene Bildinformation wider (Abbildung 3). Diese enthalten im Wesentlichen die Koeffizienten der Transformationsmatrix und eine Linearisierungsfunktion. Somit lässt sich automatisiert aus dem unbearbeiteten Filmmaterial ein kameraunabhängiges Filmmaterial mit gleichartiger Farbinformation erzeugen. Es ist anzumerken, dass dabei nicht alle Valenzen eines Systems in den gültigen Wertebereich eines anderen Systems überführt werden können. Dies führt zum Problem des Gamut Mapping, welches momentan jedoch noch nicht Gegenstand der Untersuchungen innerhalb des Open Film Tools Ansatzes ist und zu einem späteren Zeitpunkt aufgegriffen werden soll.

### 1.3 Vorgehen

Die Modellierung des Bildaufnahmesystems lässt sich anhand seiner Subsysteme Beleuchtung, Objektszene und Kamera sowie ihrer Parametrierung durch radiometrische, optische, elektrische und farbmetrische Größen beschreiben. Ausgehend von der Betrachtung existierender Normen und Standards zur Beschreibung von Lichtquellen, Objektszenen und Kamerasystemen, wird die dieser Arbeit zugrunde liegende Methode einer standardisierten Repräsentation der Farbinformation im Detail besprochen. Diese Methode beinhaltet im Kern die Bestimmung der Transformationsmatrix und die Matrizierung des Bildmaterials, welche die

standardisierte Konvertierung der kameraabhängigen Farbbildinformation unter Berücksichtigung der spektralen Charakteristik der Beleuchtung, der Objekte und der Kamera ermöglicht. Anschließend wird ein Anwenderfragebogen hinsichtlich Akzeptanz von den neu anzunehmenden Arbeitsschritten im bestehenden Workflow der Filmproduktion bezüglich der Umsetzung dieser Methode diskutiert. Basierend darauf und aus den technischen Anforderungen der gewählten Methode wird der Open Film Tools-Ansatz mit seinen Bestandteilen abgeleitet. Er umfasst dabei den Aufbau einer spektralen Datenbank von Filmlichtquellen, selbst entwickelte Hardware zur Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit von Kamerasystemen sowie die Implementierung der Bestimmung der Farbtransformation und ihrer Abspeicherung in einem Profil. Diese werden detailliert und im Einzelnen besprochen, evaluiert, sowie die jeweiligen Ergebnisse diskutiert. Schlussendlich wird die entwickelte Web-Applikation zur Profilerstellung erläutert. Die Web-Applikation ermöglicht die Erstellung von Profilen unter Berücksichtigung der spektralen Charakteristiken der Beleuchtung, der Aufnahmeobjekte und der Kamera.

In diesem Kapitel wird auf die Charakterisierung der Lichtquellen, der Objektszene und des Kamerasystems hinsichtlich existierender Normen und Standards eingegangen. Ihre quantitative Beschreibung ist erforderlich für den danach erläuterten, abgeleiteten Lösungsansatz zur Erzeugung einer standardisierten Farbbildinformation.

## 2.1 Lichtquellencharakterisierung

Lichtquellen in der Filmproduktion dienen der Erzeugung einer ausreichenden Leuchtdichte der aufgenommenen Objekte. Darüber hinaus bilden sie natürliche und künstliche Lichtquellen aus der realen Welt nach. Hauptsächlich fällt hierunter die Reproduktion von Tages- oder Kunstlicht. In Anlehnung an die spektrale Strahlungsverteilung des Tageslichtes zu verschiedenen Tageszeiten und unterschiedlichem Wolkenbedeckungsgrad ist die Normlichtart D definiert. Kunstlicht wird u. a. durch die Normlichtart A definiert und basiert auf der spektralen Strahlungsverteilung eines idealen Temperaturstrahlers, die sich aus dem Planckschen Strahlungsgesetz ableiten lässt.

Als Filmlichtquellen kommen verschiedenen Lichtquellenarten zum Einsatz. Diese lassen sich nach ihrem primären Emissionsprinzip gruppieren in:

- ▶ Temperaturstrahler, meist Wolfram (Tungsten - TU)-basiert
- ▶ Fluoreszenzstrahler (FL)
- ▶ Hochdruck-Metaldampf-Strahler (HMI)
- ▶ Leuchtdioden (LED)-basierte Strahler

Die spektrale Strahlungsverteilung, insbesondere die der drei letztgenannten Lichtquellen, welche Tageslicht nachbilden, ist verschieden von der des realen Tageslichtes bzw. der Normlichtart D. Der Unterschied dieser Verteilung muss messtechnisch erfasst werden und in die Korrektur der Farbbildinformation eingehen, um dem natürlichen Tageslichteindruck bei einer beleuchteten Szene zu entsprechen.

Es existiert eine gängige und standardisierte Methode zur Messung der spektralen Strahlungsverteilung von Filmlichtquellen. Dies ist die diffuse Integralmessung über den gesamten abgestrahlten Lichtstrom mittels Ulbrichtkugel. Sie wird oft als 8° Geometrie bezeichnet und ist durch die CIE in (CIE 2004) spezifiziert.

Die Lichtquelle wird dabei an der Eintrittsöffnung einer ideal reflektieren-

den Hohlkugel positioniert und ein an der Austrittsöffnung befindliches Spektrometer erfasst die spektrale Bestrahlungsstärke. Allerdings hat diese Methode in der Praxis für gängige Filmbeleuchtung auch Nachteile. So besitzen manche Filmlichtquellen eine sehr große Ausdehnung von zum Teil über einem Meter.

Da jedoch eine Messbedingung lautet, dass die Flächensumme aus Lichteintritts- und Austrittsöffnung nicht mehr als 5% der gesamten Kugelinnenoberfläche haben darf, ist dies nur schwer realisierbar. Ulbricht-Kugeln in dieser Größe sind nur vereinzelt in Mess- und Prüflaboren vorhanden und nicht direkt zugänglich. Des Weiteren wird bei dieser Methode der gesamte Lichtstrom integriert, so auch die Randbereiche, die unter Umständen an der Fassung reflektiert werden.

Diese Messanordnung entspricht jedoch nicht der Praxis bei der Bildaufnahme, wo nur ein kleiner Strahlkegel durch ein Flächenelement des Objektes reflektiert wird und die Kamera an die Stelle des Spektrometers tritt. Die Lichtquelle beleuchtet das Objekt und die Kamera erfasst den remittierten Lichtstrom zur Aufzeichnung. Für diese Art der Anordnung gibt es als gute Näherung einen als 45°/0° Geometrie bezeichneten Standard zur Messgeometrie (ISO3664 2000). Die Lichtquelle strahlt dabei unter einem Winkel von 45° auf einen idealen Diffusor, d. h. einen Lambert-Strahler mit konstanter spektraler Remission von nahezu 1, der das Objekt ersetzt und an der Stelle der Kamera steht das Spektrometer. Dies misst nun die spektrale Strahlungsverteilung der reflektierten Strahlung. Diese Methode wird auch nach (Hunt/Pointer 2011:101) empfohlen.

Aus der spektralen Strahlungsverteilung lassen sich die licht- und farbtechnischen Größen ableiten, die durch die Lampenhersteller zur Verfügung gestellt werden. Dies sind vor allem die photometrische Größe der Leuchtdichte, die farbmetrischen u'v' Koordinaten aus dem gleichabständigen CIE 1976 Lu'v' Farbraum (uniform colour scale – UCS) und die korrelierte Farbtemperatur (CCT). Dabei geben die CCT Werte eine Maßzahl bezüglich der Abweichung der Lichtquelle hinsichtlich einer gegebenen Normlichtart als Referenzlichtquelle an.

## 2.2 Objektcharakterisierung

Da die Objektszene eine Vielzahl an verschiedenen Objekten enthält, muss entsprechend des theoretischen Ansatzes zur Matrizierung aus 1.2 eine sinnvolle Stichprobenmenge an Objektremissionen ausgewählt werden. Diese finden sich in sogenannten Testcharts wieder. Tabelle 1 zeigt eine Auswahl der zur Zeit üblichen Testtafeln.



Name	Hersteller
Colorchecker Digital SG	X-Rite
Colorchecker Classic	X-Rite
Colorchecker Passport	X-Rite
Spyder Checkr 8x6	Datacolor
Color Checker	MacBeth
QP 201	QP Card
QP 202	QP Card
QP 203 book	QP Card
CMPDigital Target 4	cmp-color.fr
ChromaDUMonde 28	DSC Labs
DreamCatcher 48	DSC Labs
DreamCatcher 76	DSC Labs
The CineChromaDuMonde	DSC Labs
ChromaDuMonde Galaxy	DSC Labs
Northern Lights	DSC Labs
RED CamBOOK	DSC Labs
Universal Test Target UTT 9x3 Color	Image Engineering

TAB. 1 Auswahl bestehender Testcharts

Des Weiteren sind in ISO 14524/15739 die Testcharts TE197, TE219, TE241, TE259 und TE264 spezifiziert. Wie später noch als Ergebnis aus der Anwenderbefragung gezeigt wird, findet hieraus der sogenannte Color Checker der Firma X-Rite (früher Gretag Macbeth) in der Praxis weit verbreitete Anwendung. Für diese Testtafel stehen auch in ausreichender Güte öffentlich zugängliche Referenzmessdaten zur Verfügung.

Beleuchtet man eine Menge an Farbfeldern mit einer bestimmten Lichtquelle, lässt sich eine weitere wichtige Größe, der Farbränderindex (color rendering index – CRI) bestimmen. Dieser ist eine Maßzahl für die Güte der farbrichtigen Abbildung für eine beliebige Lichtquelle gegenüber einer Beleuchtung der Farbfelder mit einer Normlichtart.

### 2.3 Kamerasystemcharakterisierung

Das Bildaufnahmesystem sollte idealerweise von der spektralen Empfindlichkeit die Normspektralwertkurven des menschlichen Beobachters nachbilden. Dies ist jedoch meist aus technischen Gründen schwer zu realisieren. Aus dem Film- und Fernsehtechnikbereich existieren folgende Standards für Referenzkamarasysteme, die die spektrale Empfindlichkeit eines Aufnahmesystems definieren:

- ▶ Academy of Motion Picture Arts and Sciences (AMPAS): Academy Color Encoding System (ACES); Referenc Imaging Camara Device (RICD); Image Interchange Framework
- ▶ European Broadcast Union (EBU): EBU-Tech 3353, Definition einer Referenzkamera

Diese Standards spezifizieren dabei eine eindeutige Relation der spektralen Empfindlichkeit der Kamera zu der Farbwahrnehmung bezüglich des menschlichen Auges. Zur Zeit gibt es weder Mess- und Prüfprozesse noch Prüfprotokolle zur farbtechnischen Kameraevaluierung entsprechend dieser Standards. Allerdings gibt es Vorschläge von Einrichtungen, Firmen und Standardisierungsgremien aus unterschiedlichen Anwendungsbereichen:

- ▶ Firma CinePostproduction: Camera Condition Report; Standard zur Bewertung von Filmkameras (Baumert 2011)
- ▶ European Machine Vision Association (EMVA): Standard for Characterization of Image Sensors and Cameras; Standard aus dem Bereich der industriellen Messtechnik (EMVA 2010)
- ▶ Visual Effects Society (VES): Camera Report; Vorschlag zu einem standardisierten Mess- und Prüfprotokoll im Filmbereich (dieser beinhaltet jedoch keine Daten zur Farbkalibration) (VES 2014)

Diese Dokumente definieren die Farbwiedergabe anhand kolorimetrischer Eingangsgrößen, beschreiben jedoch nicht die messtechnische Realisierung der spektralen Empfindlichkeit, die diesen Größen zu Grunde liegt. Einfach realisierbare Methoden zur Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit des Kamerasystems werden zur Zeit nicht angeboten. In 5.1 wird darauf noch näher eingegangen.

### 2.4 Standardisierte Farbbildinformation nach AMPAS Standard P-2009-001

Im filmtechnischen Bereich gibt es einen durch die Academy of Motion Picture Arts and Sciences definierten Standard zur Erzeugung kameraunabhängiger Farbbildinformation, basierend auf der spektralen Charakteristik der Filmlichtquellen, der Objekte und der verwendeten Kamera (Goldstone et al. 2009). Dieser basiert auf der Bestimmung einer Transformationsvorschrift gegebener geräteabhängiger RGB-Farbbildinformation in einen geräteunabhängigen ACES-Farbraum gleicher Dimension. Der ACES-Farbraum umfasst alle möglichen Farben. Damit wird die Problematik des Gamut Mapping auf einen späteren Zeitpunkt in der Verarbei-

tungskette verschoben. Der Standard definiert eine Referenzkamera (RICD) über ihre spektralen Empfindlichkeiten und daraus abgeleitet ihre Primärvalenzen. Es besteht ein eindeutiger Zusammenhang zwischen einer Farbvalenz aus dem ACES-Farbraum und dem CIE-Normvalenzraum. Eine ACES-Farbvalenz wird durch Matrizierung mittels der Matrix  ${}_{ACES-rgb}M_{CIE-XYZ}$  in den CIE-Normvalenzraum überführt.

$${}_{ACES-rgb}M_{CIE-XYZ} = \begin{pmatrix} 0,9525523959 & 0 & 0,0000936786 \\ 0,3439664498 & 0,7281660966 & -0,0721325464 \\ 0 & 0 & 1,0088251844 \end{pmatrix} \quad (5)$$

Hierzu existiert ebenso die inverse Abbildung. Die Farbvalenz bzw. der Tristimulus des Bezugsweisspunktes  $w_{ACES}$  ergibt sich durch Anwendung dieser Transformation auf den Einheitsvektor.

$$w_{ACES} = {}_{ACES-rgb}M_{CIE-XYZ} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

Der Weißpunkt ist in seinen Normfarbwertanteilen identisch zur Normlichtart D60 (Normfarbwertanteile  $x=0,3217$ ;  $y=0,3378$ ). Im Kern beinhaltet die Farbkalibration und Kamaraprofilierung die Bestimmung einer  $3 \times 3$  Farbtransformationmatrix  $B$  mittels Fehlerminimierung durch folgende nichtlineare Optimierung

$$\chi^2 = \sum \|f_{CAM}(x'_i, w_{ACES}) - f_{CAM}(MBv_i, w_{ACES})\| \quad (7)$$

mit den Parametern:

$\chi^2$  Zu minimierender Fehler, z. B. durch Levenberg-Marquardt Algorithmus (vorgegeben)

$f_{CAM}$  Abbildungsfunktion in einen im allgemeinen empfindungsgemäß gleichabständigen Farbraum (z. B. CIE-Lab) (vorgegeben)

$x'_i$  CIE-Normvalenz-Tristimuli für  $i$  Farbtestfelder unter Berücksichtigung eines gegebenen Bezugsweiß (aus Messung abzuleiten)

$w_{ACES}$  Tristimulus für ACES-Weiß aus IDTo9 (vorgegeben)

$M$   $3 \times 3$  Transformationsmatrix vom ACES in den CIE-XYZ Farbraum (vorgegeben)

$v_i$  Kamera-Tristimuli für  $i$  Farbtestfelder unter Berücksichtigung eines gegebenen Bezugsweiß (aus Messung abzuleiten)

Die Farbvalenzen werden hierbei noch in einen empfindungsgemäß gleichabständigen Farbraum transformiert. Damit ist sichergestellt, dass fehlerbedingte Farbunterschiede als ungefähr gleich empfunden werden. Für eine spektral basierte, genaue Profilerstellung, im weiteren IDTo9A genannt, ergeben sich folgende Messaufgaben.

- ▶ Durch Messung zu bestimmende Eingangsdaten zur Berechnung der  $x'_i$  ergeben sich aus der Ermittlung der spektralen Remission der Farbtestfelder mittels eines Spektrometers.
- ▶ Durch Messung zu bestimmende Eingangsdaten zur Berechnung der  $v_i$  ergeben sich aus der Ermittlung der spektralen Empfindlichkeit der Kamera.

Die Tristimuluswerte werden dann daraus abgeleitet. Daneben erlaubt (Goldstone et al. 2009) auch eine weniger genaue Bestimmung, im folgenden IDTo9B genannt. Diese ersetzt die beiden spektralen Messungen durch rein kolorimetrische Messungen, die dann unmittelbar als Tristimuli verwendet werden können. IDTo9B berücksichtigt aber nicht die spektrale Charakteristik der Lichtquellen, Objekte sowie der Kameras. Auf die Herleitung der Parameter zu IDTo9A wird im Folgenden genauer eingegangen.

#### 2.4.1 Bestimmung der spektralen Strahldichte gegebener Testfarben

Am Anfang sei eine Menge  $n$  an Testfarben gegeben. Diese kann aus einer Menge an Stichproben der Objekte aus der Szene bestehen oder unter Verwendung einer Standard-Farbtabelle, z. B. durch die Menge der Farbfelder eines Gretag Macth Color Checkers definiert sein. Die spektralen Strahldichten  $t_i$  der Farbfelder  $i \in [1, n]$  müssen bekannt sein oder können aus der spektralen Strahldichte  $h_w$  des Lichtes, welches das Bezugsweiß darstellt, sowie den relativen spektralen Remissionen der Farbfelder  $r_i$  bestimmt werden.

$$t_i = h_w r_i \quad (8)$$

#### 2.4.2 Berechnung der XYZ Normvalenz Tristimuli für die Testfarben

Unter Anwendung der Normspektralwertkurven eines CIE-Standardbeobachters  $X^T$  ergeben sich die Tristimuli  $x_i$  der Farbfelder bezüglich der virtuellen Normvalenzen XYZ zu:

$$x_i = X^T t_i \quad (9)$$

### 2.4.3 Berechnung des XYZ Normvalenz Tristimulus für den Bezugsweißpunkt

Ebenso benötigt wird der Normvalenz-Tristimulus für den Bezugsweißpunkt  $\mathbf{w}_w$ , der sich wie folgt bestimmt:

$$\mathbf{w}_w = \mathbf{X}^T \mathbf{h}_w \quad (10)$$

### 2.4.4 Tristimuli Korrektur bedingt durch Verschiedenheit des Bezugsweißpunktes und des ACES Weißpunktes

Im Allgemeinen unterscheiden sich der Bezugsweißpunkt bei der Szenenbeleuchtung und der Weißpunkt des ACES-Referenzkameranagements. Die Tristimuli der Farbttestfelder müssen in das RICD-System durch eine Weißpunktkompensation überführt werden. Hierzu gibt es den Ansatz der chromatischen Adaptation oder alternativ den Ansatz der Reillumination.

#### a) Chromatische Adaptation

Gegeben sei eine Abbildungsvorschrift bezüglich zweier Weißpunkte  $\mathbf{w}$  und eine 3x3 Matrix  $\mathbf{A}$

$$\phi(\mathbf{A}, \mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2) = \mathbf{A}^{-1} \begin{pmatrix} \rho & 0 & 0 \\ 0 & \gamma & 0 \\ 0 & 0 & \beta \end{pmatrix} \mathbf{A} \quad (11)$$

Die Gewichte  $\rho$ ,  $\gamma$  und  $\beta$  ergeben sich dabei wie folgt:

$$\begin{pmatrix} \rho \\ \gamma \\ \beta \end{pmatrix} = \frac{\mathbf{A} \mathbf{w}_2}{\mathbf{A} \mathbf{w}_1} \quad (12)$$

Sei des Weiteren  $\mathbf{A}$  gewählt zu

$$\mathbf{A}_{\text{Bradford}} = \begin{pmatrix} 0,8950 & 0,2664 & -0,1614 \\ -0,7502 & 1,7135 & 0,0367 \\ 0,0389 & -0,0685 & 1,0296 \end{pmatrix} \text{ oder } \mathbf{A}_{\text{CAT02}} = \begin{pmatrix} 0,7328 & 0,4296 & -0,1624 \\ -0,7036 & 1,6975 & 0,0061 \\ 0,0030 & -0,0136 & 0,9834 \end{pmatrix}.$$

Dann lassen sich die korrigierten Tristimuli bestimmen zu:

$$\mathbf{x}'_i = \phi(\mathbf{A}_{\text{Bradford}}, \mathbf{w}_w, \mathbf{w}_{\text{ACES}}) \mathbf{x}_i \quad (13)$$

oder

$$\mathbf{x}'_i = \phi(\mathbf{A}_{\text{CAT02}}, \mathbf{w}_w, \mathbf{w}_{\text{ACES}}) \mathbf{x}_i \quad (14)$$

#### b) Reillumination

Sei eine Matrix  $\mathbf{A}$  gegeben zu

$$\mathbf{A}_{\text{reillu}} = \begin{pmatrix} 1,6160 & -0,3591 & -0,2569 \\ -0,9542 & 1,8731 & 0,0811 \\ 0,0170 & -0,0333 & 1,0163 \end{pmatrix}$$

und eine Abbildungsvorschrift bezüglich zweier Weißpunkte  $\mathbf{w}$  und einer 3x3 Matrix  $\mathbf{A}$ :

$$\psi(\mathbf{A}, \mathbf{w}) = \mathbf{A}^{-1} \begin{pmatrix} \rho & 0 & 0 \\ 0 & \gamma & 0 \\ 0 & 0 & \beta \end{pmatrix} \mathbf{A}, \quad (15)$$

wobei die Gewichte  $\rho$ ,  $\gamma$  und  $\beta$  sich durch folgende Gleichung ergeben:

$$\begin{pmatrix} \rho \\ \gamma \\ \beta \end{pmatrix} = \frac{1}{\mathbf{A} \mathbf{w}_1} \quad (16)$$

Dann lassen sich die weißpunkt-korrigierten Tristimuli unter Anwendung von  $\mathbf{A}$  zu  $\mathbf{A}_{\text{reillum}}$  berechnen.

$$\mathbf{x}'_i = \psi(\mathbf{A}_{\text{reillum}}, \mathbf{w}_w) \mathbf{x}_i \quad (17)$$

Diese Tristimuli stellen schlussendlich die Referenz-Tristimuli dar. Dem gegenüber stehen die durch das Kamerasystem registrierten Tristimuli. Deren Herleitung soll nun betrachtet werden.

### 2.4.5 Berechnung des Weißabgleichs für das Kamerasystem

Hierbei sei wiederum der Weißpunkt  $\mathbf{h}_w$  gegeben. Die spektralen Empfindlichkeiten  $\mathbf{C}^T \in \mathbb{R}^{3 \times m}$  für die RGB-Kanäle durch das Kamerasystem werden als bekannt vorausgesetzt. Es ergibt sich dann der RGB-Normierungsfaktor für den Weißabgleich durch:

$$\mathbf{b} = \frac{1}{\mathbf{C}^T \mathbf{h}_w} \quad (18)$$

### 2.4.6 Berechnung der kameraspezifischen Tristimuli

Für die durch die Kamera aufgenommenen bzw. registrierten Messwerte der Farbttestfelder ergeben sich die kameraspezifischen Tristimuli nach folgender Berechnung:

$$\mathbf{v}_i = \mathbf{b} * \mathbf{C}^T \mathbf{t}_i \quad (19)$$

### 2.4.7 Bestimmung der Koeffizienten der Transformationsmatrix

Aus den ermittelten Referenztristimuli als Soll- und den kameraspezifischen Tristimuli als Ist-Werte können die Koeffizienten der Transformationsmatrix  $\mathbf{B}$  bestimmt werden.

Dies erfolgt, wie in 2.4 erläutert, durch Suchen der Lösung für das Fehlerminimierungsproblem

$$\chi^2 = \sum \|f_{CAM}(\mathbf{x}_i, \mathbf{w}_{ACES}) - f_{CAM}(\mathbf{M}\mathbf{B}\mathbf{v}_i, \mathbf{w}_{ACES})\|^2$$

Hierbei werden die Tristimuli üblicherweise noch in einen empfindungsgemäß gleichabständigen Farbraum mittels  $f_{CAM}$  transformiert. Wird dazu beispielsweise der CIE-Lab Farbraum gewählt, so handelt es sich um die Bestimmung der Matrix anhand des minimalen Mittelwertes der DE-Farbabstände für alle Testfarben.

Die bestimmte Matrix  $\mathbf{B}$  und der Weißabgleichsfaktor  $\mathbf{b}$  werden nun in einer standardisierten IDT-Profildatei abgespeichert. IDT steht hierbei für Imaging Device Transformation.

### 2.4.8 Anwendung der bestimmten Transformation

Die bei der Transformation von kameraspezifischen Farbwerten in RICD-Referenzfarbwerte benötigten Parameter ergeben sich wie folgt:

- ▶ 0,18 Faktor  $k$  zur Grauwertnormierung
- ▶ lineare 3x3 Transformationsmatrix  $\mathbf{B}$
- ▶ Beschneidung der Farbwerte bei nicht darstellbaren Farben als einfache Form des Gamut Mapping  $clip()$
- ▶ normierter Weißabgleich  $\mathbf{b}/min(\mathbf{b})$
- ▶ Gamma-Korrektur durch  $\gamma()$
- ▶ Original Farbwert aus den Bilddaten  $\mathbf{d}$

Eine in den RICD Raum konvertierte Farbe  $\mathbf{a}$  ergibt sich dann zu

$$\mathbf{a} = k \mathbf{B} clip\left(\frac{\mathbf{b} \gamma(\mathbf{d})}{min(\mathbf{b})}\right) \quad (20)$$

Bisher existiert keine frei verfügbare Applikation zur Erstellung von IDT-Profilen anhand spektraler Eingangsdaten. Um der Filmbranche die selbständige und unabhängige Kameracharakterisierung zu ermöglichen, realisiert der Open Film Tools-Ansatz diese Methode in einer Web-Applikation. Ausgehend von den Normen, Standards und Methoden zur Beschreibung der an der Bildaufnahme beteiligten Komponenten und der IDT-Profilerstellung soll nun anhand einer Nutzerbefragung der aktuelle Bedarf einer standardisierten Farbkorrektur und die Akzeptanz der hierzu erforderlichen neuen Arbeitsschritte in der Filmbranche bestimmt werden.

# 3 Open Film Tools – Werkzeuge zur Sicherstellung korrekter Farbbildreproduktion

In diesem Kapitel wird die Auswahl der innerhalb des Open Film Tools-Ansatzes entwickelten Hilfsmittel erläutert. Basierend auf den Inhalten der im letzten Abschnitt besprochenen Normen, Standards und Methoden insbesondere der spektral basierten IDT-Profilerstellung, wird der am Anfang des Projektes erstellte Fragebogen und seine Auswertung besprochen, um zum einen die farbtechnischen Probleme der Anwender, aber auch die Akzeptanz hinsichtlich benötigter und neu zu entwickelnder Hilfsmittel bei der Bildaufnahme zu bestimmen. Des Weiteren werden die auf dieser Auswertung basierten Lösungsansätze dargelegt, die den im Open Film Tools-Ansatz entwickelten Methoden zu Grunde liegen.

## 3.1 Nutzeranforderungen

Für die Ermittlung der Nutzeranforderungen wurde zu Beginn des Projektes ein Fragebogen erarbeitet. Dieser zielt auf die Umsetzung des AMPAS Standards zur IDT-Profilerstellung ab. Es erfolgte der Versand des Fragebogens an Kameraleute des Berufsverbandes Kinematographie (Deutschland), des Verbandes Österreichischer Kameraleute (Österreich) sowie an die Schweizerische Gesellschaft Chefkameraleute (Schweiz). Des Weiteren wurden gezielt Kameraleute auf der Cinec 2014 in München angesprochen und per Telefon interviewt. Der Fragebogen wurde auf der Open Film Tools-Webseite publiziert (OFTP-IDT 2015).

Die Gruppierung der Fragen ergibt sich wie folgt:

- ▶ Existierende und benutzte Werkzeuge zur Sicherstellung korrekter Farbwiedergabe
- ▶ Verwendete Lichtquellen
- ▶ Verwendete Kameras und Objektive
- ▶ Farbwiedergabe – unproblematische und problematische Lichtquellen, Objekte und Kamerasysteme
- ▶ Akzeptanz neuartiger Methoden zur Sicherstellung der korrekten Farbwiedergabe
- ▶ Verwertbarkeit neuartiger Methoden zur Sicherstellung der korrekten Farbwiedergabe
- ▶ Kenntnisse zu existierenden Standards

Dabei wurde im Fragebogen bewusst der Begriff „Farbwiedergabe“ in den Fragestellungen gewählt, da diese in erster Linie für die Zielpersonen die wesentliche Begrifflichkeit darstellt. Die Fragen selbst zielen jedoch auf das Problem der korrekten Aufzeichnung der Farbbildinformation und seine Abhängigkeit von Beleuchtung, Objekten und Kameras ab. Die Beantwortung soll nun im Einzelnen erläutert werden.

### 3.1.1 Werkzeuge zur Sicherstellung korrekter Farbwiedergabe

Es wurde nach bereits verwendeten Werkzeugen zur Sicherstellung korrekter Farbwiedergabe gefragt. Es ergab sich, dass die Mehrheit der Anwender die Gretag Macbeth Color Checker Farbtesttafel nutzt, die vor dem Dreh mit aufgenommen wird. Eine Auswertung wird jedoch meist nicht selbst gemacht, sondern den Kameraassistenten, den „Digital Imaging Technicians“ (DITs) oder der Postproduktion in der Weiterverarbeitung überlassen.

### 3.1.2 Verwendete Lichtquellen

Bezüglich der Häufigkeit der verwendeten Lichtquellen ergab sich folgendes Bild. Aus dem Filmbereich kommen mehrheitlich Fluoreszenz-, Tungsten- sowie HMI-Lichtquellen zum Einsatz. LED-Lichtquellen kommen bisher nicht zur Anwendung. Ein Anwender benutzt auch verstärkt Briese-Lichtquellen aus dem Foto-Bereich. Dedolight-Lichtquellen werden hauptsächlich ohne Softbox-Vorsätze eingesetzt. Sonnenlicht verwenden alle Nutzer. Einige Kameramänner/frauen benutzen zusätzlich Reflektoren. Die Verwendung von jeder Art von am Drehort existierenden Licht (Available Light) ist besonders im Reportage- sowie Dokumentarfilmbereich üblich.

### 3.1.3 Verwendete Kamerasysteme

Gefragt wurde nach der Verwendung von Hard- sowie Software, die mit der Kamera verbunden ist, um einen möglichen Datentransfer in der zu entwickelnden Applikation zu evaluieren. Die überwiegende Mehrheit der Kameraleute hat die Kamera nicht mit PCs oder Webbrowser-fähigen Geräten verbunden. Jedoch werden meist Kameras verwendet, die austauschbare Speicherkarten als Aufzeichnungsmedium benutzen.

### 3.1.4 Farbwiedergabe

Als Erstes wurde nach farblich unproblematischen Aufnahmen gefragt. Hierbei zeigte sich, dass Haut beleuchtet mit Sonnenlicht oder Temperaturstrahlern gene-

rell keine Probleme bereitet. Es werden mit einer breiten Streuung Zeiss Ultra-Prime/MasterPrime, Fujinon, Angenieux sowie Olympus Objektive eingesetzt, ohne dass diese signifikante Farbunterschiede aufweisen. Bei den Kameras findet hauptsächlich die ARRI Alexa Verwendung. Höhere ISO-Zahlen ab 800 ISO werden ebenso häufig eingesetzt und bezüglich der Farbwiedergabe als problemfrei angesehen. Bei der Postproduktion gibt es eine große Streuung. Ungefähr die Hälfte der Anwender nutzt in der Nachbearbeitung die von den Kameraherstellern angebotenen Gammakurven zur Linearisierung und Gradationskorrektur, jedoch keine IDT Profile.

Zum Zweiten wurde die Frage nach farblich inkorrekt wiedergegebenen Aufnahmen gestellt. Als problematisch wird insbesondere die Wiedergabe von Haut beleuchtet mit LED-Lichtquellen oder Umgebungslicht bestehend aus Energiesparlampen angesehen. Ein Anwender berichtete von blauen OP-Handschuhen, die nicht korrekt wiedergegeben werden konnten. Probleme bereiten weiterhin ND-Filter hoher Dichte mit einer Farbverschiebung nach Rot. Bei Objektiven wird insbesondere bei Einsatz von älteren Canon-Festbrennweiten, Cooke 35 mm 25–250 sowie Zeiss 16 mm 11–110 von Problemen berichtet. Bei Kameras wurde von einem Anwender die Sony EX3 als problematisch angesehen.

### 3.1.5 Akzeptanz neuartiger Methoden zur korrekten Farbwiedergabe

Als mögliche Einsatzorte einer neuen Methode zur Farbkorrektur wurden im Fragebogen folgende Orte vorgeschlagen:

- ▶ im Kameraverleih bei der Produktionsvorbereitung
- ▶ bei der Vorabbesichtigung der Drehorte
- ▶ nach Beendigung des Lichtsetzens
- ▶ unmittelbar vor der Aufnahme
- ▶ während der Klappe
- ▶ nach dem Dreh

Hierbei wurde der Kameraverleih von allen Anwendern als guter Platz für eine IDT-Profilerstellung als neuen Arbeitsschritt angesehen. Alle anderen Einsatzorte wurde von jeweils mindestens der Hälfte der Befragten als ungeeignet angesehen. Die Frage nach der Arbeitszeit, die für diesen Schritt maximal akzeptabel ist, zeigt, dass die Mehrheit der Kameraleute im Verleih eine Zeitdauer von 30–90 min akzeptiert. Für alle anderen Einsatzorte liegt die Akzeptanz deutlich gestreut bei Zeiten unter 5 Minuten und wird häufig gänzlich abgelehnt. Die im Detail zur Gewinnung der IDT-Profilen anfälligen einzelnen Arbeitsschritte, also die Veränderung der Kameraeinstellung, die optionale Aufnahme eines Weiß- sowie Schwarzwertbildes sowie die Aufnahme eines Testchart-Bildes wird ebenso mehrheitlich nur im Kamera-Verleih akzeptiert. Als zusätzlich akzeptierter Zeitpunkt ergibt sich aber auch eine tägliche Überprüfung, insbesondere früh vor Produktionsbeginn. Mehrheitlich ab-

gelehnt wurden die Anwendung unmittelbar nach erfolgter Ausleuchtung sowie kurz vor der Szenen-Aufnahme.

Nach der Frage eines möglichen Operators wurde der DIT als diejenige Position ermittelt, die die erforderlichen Arbeitsschritte realisieren könnte. Daneben können sich einige Anwender auch den ersten bzw. zweiten Kameraassistenten in dieser Rolle vorstellen.

### 3.1.6 Verwertbarkeit neuer Methoden zur korrekten Farbwiedergabe

Eine Farbkorrektur von Testaufnahmen während der Vorabbesichtigung findet selten statt. Die Beurteilung der Beleuchtung erfolgt rein visuell. Die Mehrheit der Kameraleute korrigiert Einzelbilder jedoch während des Drehs zu Testzwecken. Davon beurteilt die Mehrheit die Bilder auf einem kalibrierten (Laptop)-Monitor. Die Resultate werden fast ausschließlich zur Eigenbeurteilung verwendet. Lediglich ein Anwender bezieht intensiv weitere Personen der Produktion mit ein. Anzumerken ist des Weiteren auch ein Befragungsergebnis, dass sogar eine Korrektur des Makeups von Schauspielern in Anpassung an die Szenenbeleuchtung stattfinden kann.

### 3.1.7 Kenntnisse zu existierenden Standards

Es wurde nach der Kenntnis des AMPAS Profilerstellungsstandards und seiner Anwendung gefragt. Die Hälfte der Anwender kennt die IDT Profilerstellung sowie das ACES-Framework nicht. Bei der anderen Hälfte ist zwar ACES bekannt, IDT-Profile werden jedoch z. Zt. nur von einem Anwender und auch nur selten verwendet.

Zusammenfassend betrachtet zeigt sich, dass momentan keine standardisierte Farbbeurteilung und Weiterverarbeitung in der Filmproduktion Anwendung findet. Einer möglichen IDT-Profilerstellung gegenüber zeigt man sich dagegen aufgeschlossen, sieht jedoch als hauptsächlichen Einsatzort für die Profilerstellung lediglich den Kamerverleih, da nur hier das entsprechende Zeitbudget zur Verfügung steht.

Daneben konnten wertvolle Informationen über problematische Objekt/Licht- sowie Kamera/Objektivkombinationen gewonnen werden (s. 3.1.4), die beim Test der im Open Film Tools-Ansatz implementierten IDT-basierten Methode berücksichtigt wurden, aber auch zukünftig bei der weiteren Entwicklung eine Rolle spielen werden.

## 3.2 Open Film Tools-Ansatz unter Berücksichtigung von existierenden Farbkorrektur-Methoden und erhobenen Nutzeranforderungen

Die IDT-Profilerstellung und -anwendung ist der einzige aktuell existierende Standard in der Filmindustrie, der nach der Bildaufnahme die Erzeugung einer kameraunabhängigen Farbbildinformation ermöglicht. Diese Profile berücksichtigen dabei auch die Szenenbeleuchtung und die aufgenommenen Objekte. In die nach diesem Standard bevorzugte spektral basierte Methode IDTo9A gehen hierzu die spektrale Strahlungsverteilung der Lichtquellen, die spektralen Remissionen der Objekte und die spektrale Empfindlichkeit des Aufnahmesystems ein. Die daraus erzeugten Profile müssen nun auf das Bildmaterial zur Konvertierung angewandt werden. Die gängige, auf dem Markt befindliche Software zur Filmbearbeitung ermöglicht die Integration und Anwendung solcher Profile.

IDT-Profile selbst stehen aber aktuell nur für einige aktuelle High-End Kameras in Zusammenhang mit einigen Normlichtarten und definierten Objektfarben zur Verfügung. Diese berücksichtigen insbesondere nicht das verwendete Objektiv sowie Lichtquellen beliebiger spektraler Charakteristik. Eine Auswertung des Angebots an Profilerstellungsapplikationen zeigt, dass zur Zeit auch noch keine frei zugängliche Anwendung zur Erstellung von IDT-Profilen anhand spektraler Eingangsdaten existiert. Die Analyse des existierenden Angebotes an spektralen Daten ergab, dass momentan noch keine Datenbanken zur spektralen Strahlungsverteilung von den aktuell im Einsatz befindlichen Filmlichtquellen existieren. Des Weiteren gibt es zwar Standards zur Erzeugung dieser Daten aus der Lichtmesstechnik, doch sind diese nur schwer durch Anwender aus der Filmproduktion umzusetzen. Ein ähnliches Bild zeichnet sich für Referenzdaten an Objektspektren ab. Es existieren keine spektralen Datensätze typischer Objektszenen bei Filmaufnahmen. Jedoch gibt es hier zumindest seit längerem Farbstesttafeln, die auch dem Anwender bekannt sind. Diese werden aktuell nur direkt mit ihren Farbwerten benutzt. Spektrale Daten zu Testtafeln sind zum Teil veröffentlicht oder durch einen einfachen Messprozess zugänglich. Schlussendlich gibt es zwar ebenfalls standardisierte Messmethoden zur Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit von Kamerasystemen, aber auch diese sind für den Anwender schwer realisierbar. In 5.1 werden wir hierzu einen Lösungsansatz zeigen. Datensätze zur spektralen Empfindlichkeit für Kamerasysteme werden leider generell nicht veröffentlicht.

Der Open Film Tools-Ansatz möchte die Situation der fehlenden Datensätze zu Lichtquellen und Kameras, den schwer umsetzbaren Messmethoden zur Bestimmung dieser Daten und der fehlenden Applikation zur IDT-Profilerstellung sowie den durch die Befragung aufgezeigten Probleme bei der Farbwiedergabe verbessern. Innerhalb des Projektes wurden bestehende Messmethoden zur Bestimmung der spektralen Strahlungsverteilung von Lichtquellen weiterentwickelt und unter Anwendung dieser eine spektrale Datenbank gängiger Filmlichtquellen aufgebaut, sowie dem Anwender zur Verfügung gestellt. Ebenso wurde eine Hardware zur Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit von Kameras in einem Prototypen

entwickelt. Dabei wurde darauf geachtet, dass sämtliche Bauelemente frei zugänglich sind und mit einem geringem Investitionsvolumen verbunden sind. Schließlich wurde eine webbasierte Applikation zur Erstellung der IDT Profile anhand spektraler Daten entwickelt, die dem Anwender ebenfalls frei zur Verfügung steht. Resultierend aus der Anwenderbefragung wurde darauf geachtet, dass die Applikation zur Profilerstellung nur einen minimalen Eingriff und zeitlichen sowie materiellen Zusatzaufwand in oder vor der Filmproduktion bedeutet. Die entwickelten Methoden und Hilfsmittel sowie Datensätze sollen nun in den nächsten Kapiteln im Detail besprochen werden.

# 4

## Lichtquellencharakterisierung – Erstellung einer Spektraldatenbank von Filmlichtquellen

Wie bereits erwähnt, spielt neben dem Kamerasystem und den aufzunehmenden Objekten die spektrale Strahlungsverteilung der verwendeten Lichtquellen eine wichtige Rolle bei der Aufnahme. Bei der Kameraprofilerstellung nach (Goldstone et al. 2009) stellt sie einen der wesentlichen Parameter dar. Dieser muss bekannt sein. Er kann entweder aus einer Messung der verwendeten Lichtquellen gewonnen oder aber aus einem gegebenen Datensatz verwendet werden.

Es wurde festgestellt, dass zur Zeit keine öffentlich zugängliche Datenbank zur spektralen Strahlungsverteilung von gängigen Filmlichtquellen existiert. Weder die Anbieter für Filmlichtquellen wie ARRI, Kino Flo (KINO FLO 2015) oder Dedo-light noch die Hersteller von Leuchtmitteln selbst, so General Electric (GE 2015), Philips oder Osram (OSRAM 2000) veröffentlichen numerische Datensätze, sondern, wenn überhaupt, sind diese ausschließlich als graphische Darstellungen verfügbar. Nicht unerwähnt bleiben sollen jedoch zwei Datenbanken mit numerischen Daten von Lichtquellen, die jedoch in der Filmtechnik kaum Verwendung finden. Eine besteht aus einer Ansammlung an künstlichen Lichtquellen, die in Kunstgalerien verwendet werden (Padfield 2015). Die andere enthält Daten für eine Anzahl an Straßenbeleuchtungen und Fahrzeugscheinwerfern (UEF 2015). Auch ist anzumerken, dass für all diese Daten keine präzise Beschreibung des Messaufbaus, der Messgeometrie und des Messprozesses zu finden ist. Hieraus ergibt sich als Konsequenz der Bedarf einer solchen Datenbank für den film- und kinotechnischen Bereich!

Neben der Nutzung der spektralen Strahlungsverteilung der Filmlichtquelle bei der Kameracharakterisierung zur IDT-Profilerstellung ergeben sich durch die Datenbank zusätzlich Vorteile im Bereich der Filmproduktion. Datensätze aus der Datenbank können zum Vergleich von Lichtquellen untereinander dienen, um eine Abschätzung zur Farbwiedergabe zu geben. So können Defekte, fehlerhafte Justierung und Alterungseffekte durch den Abgleich der Daten mit der Datenbank erkannt werden. Schlussendlich kann eine unbekannte Lichtquelle entsprechend der bestehenden Datensätze zugeordnet werden (Alvarez et al. 2015).

Da die Hochschule der Medien in Stuttgart einen Querschnitt gängiger Filmlichtquellen aus dem Bereich der Temperatur-, Fluoreszenz-, sowie HMI-Strahler besitzt, wurden basierend auf diesem Bestand spektrale Messungen durchgeführt. Des Weiteren sind aber auch neuartige LED-Lichtquellen vermessen worden.

Sämtliche Messungen stehen als spektrale Datenbank zur Verfügung (OFTP-SD 2015). Nachfolgend werden die Messmethode, der Messaufbau sowie Messergebnisse der erstellten Datenbank präsentiert, die zum ersten mal auf der Color and Imaging Conference 2015 in Darmstadt einer breiten Öffentlichkeit vorgestellt wurde (Karge/Fröhlich/Eberhardt 2015).

## 4.1 Messmethode

Unter Anwendung des auf dem in Kapitel 2.1 erörterten ausgewählten Standards zur Messung mittels einer  $45^\circ/0^\circ$  Geometrie ergab sich die Aufgabe, Hilfsmittel im Messaufbau und Messprozess zu integrieren, welche Reproduzierbarkeit und Effizienz sicherstellen.

Abbildung 4 zeigt hierzu den entwickelten und eingesetzten prinzipiellen Messaufbau mit den Elementen Lichtquelle, Weißprobe und Spektrometer. Die zusätzlich verwendeten Elemente sind eine Kamera unterhalb der Weißprobe und eine an der Decke angebrachte Zielmarke, ein verschwenkbarer und in Höhe und Weite variabler Hilfsarm, ein Tisch mit einer höhenvariablen Plattform, auf der das Spektrometer angebracht ist sowie ein Diffusor. Diffusor und Weißprobe sind austauschbar auf einem x/y Tisch positioniert. Die Parameter zur Beschreibung der Geometrie ergeben sich nach Abbildung 4 wie folgt:

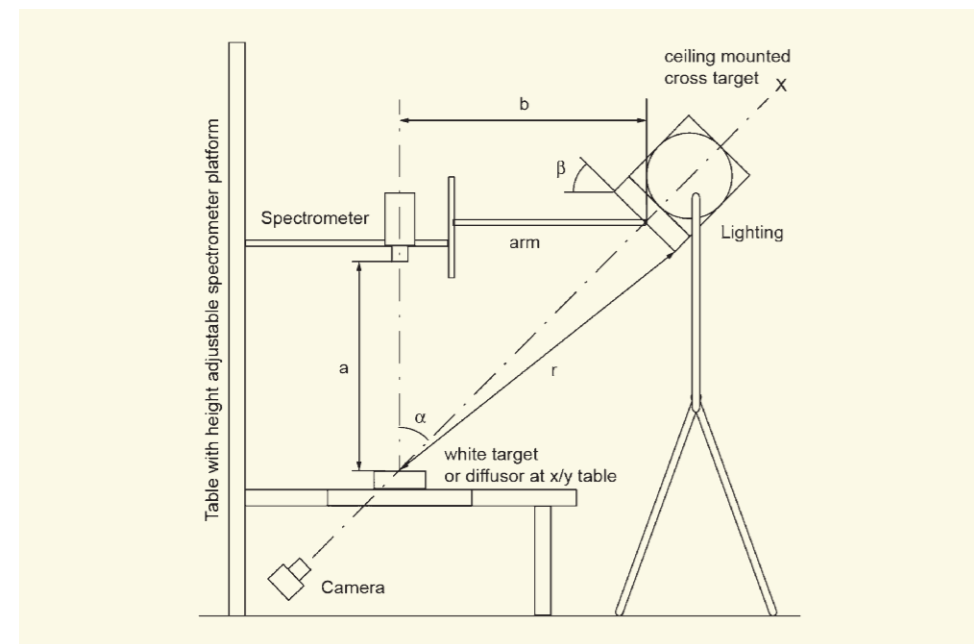


ABB. 4 Messaufbau

- ▶ **a** vertikaler Abstand Weißprobe – Mitte Spektrometer Objektivintrittsöffnung
- ▶ **b** horizontaler Abstand optische Achse Spektrometer – Mitte der maximalen vertikalen Lichtaustrittsöffnung der Lichtquelle
- ▶ **r** Abstand Weißprobenmitte – Randpunkt der Lichtaustrittsöffnung
- ▶ **α** Winkel zwischen optischer Achse des Spektrometers und der Oberflächennormalen auf der Mitte der Lichtaustrittsöffnung
- ▶ **β** Winkel zwischen der Ebene definiert durch die Randpunkte der Lichtaustrittsöffnung und der Horizontalebene

Bei idealer  $45^\circ/0^\circ$  Geometrie ergibt sich  $\alpha=45^\circ$  und **a** ist kongruent zur optischen Achse des Spektrometers. Der horizontale Abstand **b** ist variabel in einem Bereich von 1 bis 2,5 m in Abhängigkeit zur Strahlungsleistung der zu vermessenden Lichtquelle und der Dynamik des Spektrometers. Für eine schnelle Einstellung von **b** kommt der verschwenkbare Hilfsarm zur Anwendung. Der Arm ist in Höhe und Auslenkung verstellbar. Dabei wird der als Spitze geformte Endpunkt auf der idealen  $45^\circ$  geneigten Achse positioniert. Der Parameter **r** ist eine Funktion von **a**, **b**, **α** und den geometrischen Eigenschaften der Lichtaustrittsöffnung, welche kreisförmig oder rechteckig ist. Misst man entsprechend eine Anzahl von Abständen **r**, d. h. die Abstände zu den vier Eckpunkten bei einer rechteckförmigen bzw. 3 Randpunkte bei einer kreisförmigen Öffnung, kann eine Abschätzung für **β** angegeben werden. Im Idealfall sollte der Wert von **β** identisch zu **α** sein. In der Praxis ergeben sich Abweichungen, die im nächsten Abschnitt genauer diskutiert werden.

Um **α** reproduzierbar einstellen zu können, befindet sich eine kreuzförmige Zielmarke an der Decke des Messlabors. Diese wurde einmal eingerichtet und genau vermessen. Sie liegt auf der  $45^\circ$  geneigten Achse, welche durch den Mittelpunkt der Weißkachel verläuft. Eine ebenfalls einmalig eingerichtete Kamera unterhalb der Probe schaut auf diese Zielmarke. Die Kamera wird bildmittig auf die Weißkachel ausgerichtet. Die ebenfalls um  $45^\circ$  geneigte optische Achse des Kamerasystems verläuft somit durch die Mitte der Weißprobe. Der Endpunkt des Hilfsarms wird ebenso auf die Bildmitte der Kamera abgebildet. Um störendes Streulicht zu vermeiden, welches direkt aus der Lichtquelle auf das Spektrometer fällt, muss sichergestellt sein, dass **b** > **a** gilt.

Als Weißprobe kommt gesintertes Polytetrafluorethylen zur Anwendung (Zenith-Polymer von SphereOptics). Das eingesetzte Spektrometer ist ein PhotoResearch PR650, welches die spektrale Strahldichte mit einem Öffnungswinkel von  $1^\circ$  erfasst. Die gemessenen spektralen Strahldichten stellen hier die spektrale Strahlungsverteilung dar. Bedingt durch die nicht konstante spektrale Remission der Weißprobe werden die gemessenen Daten diesbezüglich nachträglich korrigiert. Zudem wird der Mittelwert aus 100 Messungen in einem Zeitraum von maximal 5 min bestimmt.

Für die verwendete Probe mit einem Durchmesser von 5 cm wird der Abstand **a** = 1 m gewählt. Weiterhin zeigen Testmessungen, dass eine Integrationszeit des Spektrometers im Bereich 500 ms zu wählen ist. Dies ergibt sich aus der Variation der Verschlusszeiten und der Schwankung der Strahlungsleistung auf Grund der Netzfrequenz von 50 Hz. Alle Messungen werden nach einer Zeit von 15–30 min nach dem Einschalten durchgeführt. Das Messlabor ist durchgängig klimatisiert. Die Messungen finden bei ca.  $23^\circ\text{C}$  und 30% relativer Luftfeuchte statt. Der gewählte Messaufbau gewährleistet die geforderte Präzision und Reproduzierbarkeit und dient als Basis des nun erläuterten Messprozesses.



## 4.2 Messprozess

Der Messprozess lässt sich in drei Teilprozesse unterteilen. Die Einrichtung der korrekten Positionen des Spektrometers, der Weißkachel und der Lichtquelle. Die beiden Erstgenannten können einmalig durchgeführt werden, die Positionierung für die Lichtquellen variiert je nach Lichtaustrittsöffnung und muss somit jedes Mal neu durchgeführt werden.

Die Einrichtung der  $45^\circ/0^\circ$  Geometrie beginnt mit der horizontalen Ausrichtung der waagrecht positionierten Weißprobe. Hierzu wird diese durch einen waagerechten Spiegel ersetzt. Das Spektrometer wird dann solange ausgerichtet, dass das Spektrometerobjektiv mittig im Sucher des Spektrometers abgebildet wird (Autokollimationsprinzip). Danach wird der Spiegel wieder durch die Weißprobe ersetzt. Diese wird auf dem x/y-Tisch solange verschoben, bis diese ebenfalls mittig im Sucher abgebildet wird. Anschließend kann die Entfernung  $\alpha$  eingestellt werden. Als nächstes wird die Weißprobe nochmals entfernt und die Kamera auf das Deckenkreuz ausgerichtet, sodass es in der Bildmitte erscheint. Danach wird der Hilfsarm in der Höhe für ein gegebenes  $b$  eingestellt. Der Endpunkt wird dann ebenfalls so lange variiert, bis er mittig abgebildet wird. Die Einrichtung zu diesem Zeitpunkt soll nun als konstant für alle folgenden Messungen verschiedener Lichtquellen gelten.

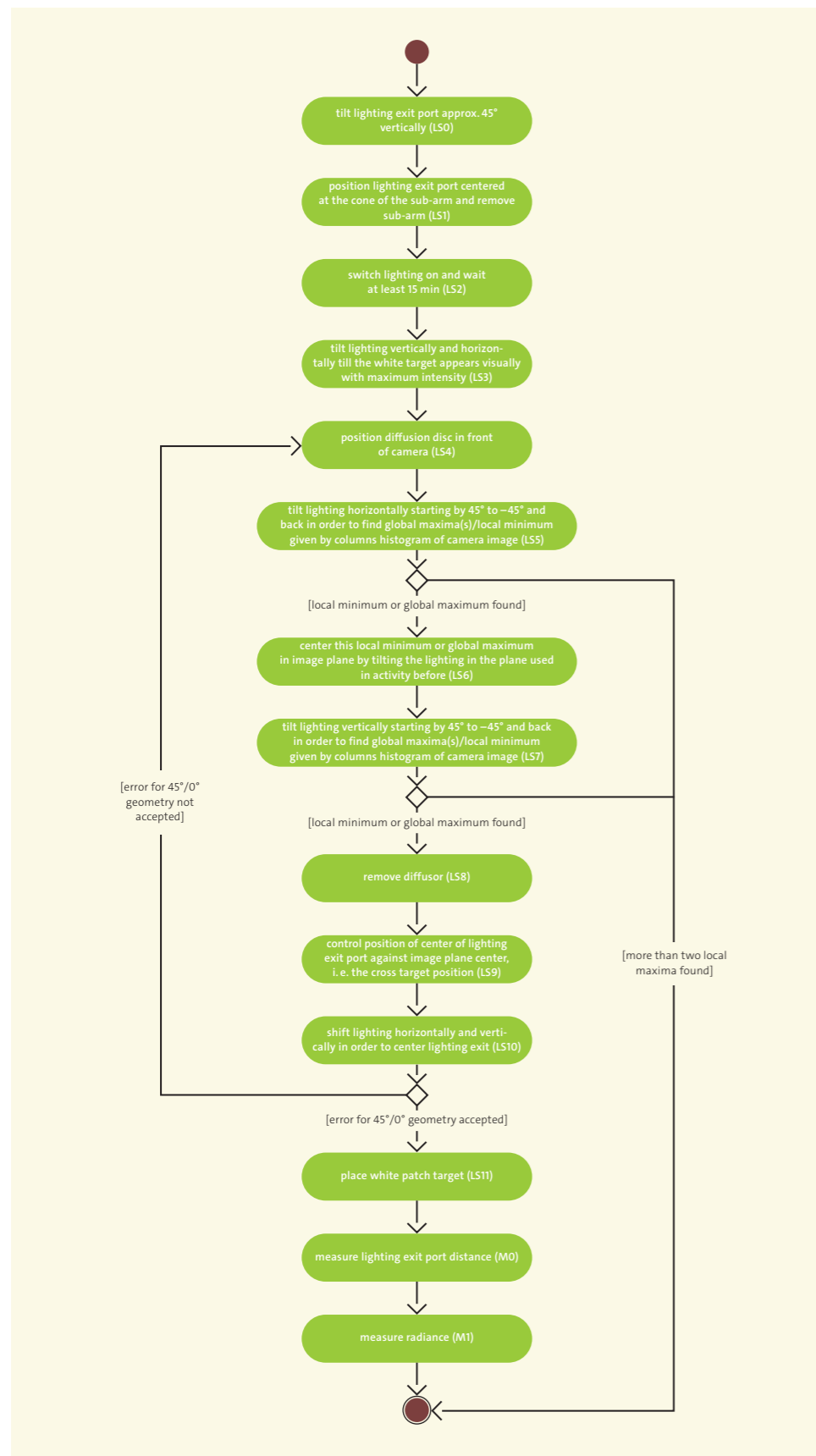
Nun folgt die Ausrichtung der jeweiligen Lichtquelle. Hierzu muss Folgendes berücksichtigt werden: Der aus der Lichtaustrittsöffnung austretende Lichtkegel ist kein ideales Gauß-Strahlbündel. Das Maximum liegt meist nicht exakt mittig und klingt auch nicht Gauß-förmig zum Rand hin ab. Dies ist eine Folge der lichtstrahlformenden Elemente, die vor dem Leuchtmittel positioniert sind. Hier kommen unter anderem Fresnel-Linsen oder reflektierende Wabengitter zum Einsatz. Weiterhin erlauben manche Lichtquellen die Verschiebung der optischen Vorsatzelemente, um die Öffnung des Kegels zu variieren, sogenannte Spot/Weitwinkel- bzw. Spot/Flood-Einstellungen. Für einige Lichtquellen wurde festgestellt, dass der Lichtkegel mittig ein lokales Minimum aufzeigte, eingebettet in zwei Maxima. Dies wurde insbesondere für die Weitwinkleinstellung beobachtet. Außerdem lag bei einigen Lichtquellen die Mitte des Kegels nicht auf der optischen Achse der Lichtaustrittsöffnung, eine Folge der Positionstoleranz oder auch einer Fehljustierung der lichtstromformenden Elemente.

Die gewählte Methode zur Positionierung berücksichtigt diese Effekte ebenso wie die gängige Praxis der Beleuchtungseinstellung bei einer Filmproduktion. Hierbei richtet der Lichtoperator im Allgemeinen die Lichtquelle solange visuell aus, bis die maximale Intensität auf das Objekt in der Szene fällt. Dies bedeutet jedoch, dass  $b$  geringfügig verschieden von  $\alpha=45^\circ$  und somit vom Idealwert ist. Um trotzdem näherungsweise den Idealwert zu erreichen, wurden die Aktivitäten des Messprozesses wie folgt definiert und kamen bei allen Messungen zur Anwendung (in Klammern ist der jeweilige Schritt eindeutig durch ein Kürzel: LS für Licht-Setup sowie M für Messung und einem nachfolgendem Index gekennzeichnet, s. a. Abbildung 5):

- ▶ vertikales Verschwenken der Lichtaustrittsöffnung zu näherungsweise  $45^\circ$  (LS0)
- ▶ Positionierung der Mitte der Lichtaustrittsöffnung an der Spitze des Hilfsarmes, Herausschwenken des Hilfsarmes (LS1)
- ▶ Einschalten der Lichtquelle und Wartezeit von mindestens 15 min zur Vermeidung des Einflusses des Einschaltverhaltens (LS2)
- ▶ vertikales und horizontales Verschwenken, bis Weißprobe visuell am hellsten erscheint (LS3)
- ▶ Austausch der Weißprobe mit dem Diffusor (LS4)
- ▶ horizontales Verschwenken von  $-45^\circ$  bis  $45^\circ$  und zurück zur Bestimmung des globalen Maximums/Minimums anhand des Spaltenhistogramms der Helligkeitswerte des Kamerabildes (LS5)
- ▶ falls ein lokales Minimum zwischen zwei Maxima oder ein globales Maximum gefunden wurde, wird dieses durch Verschwenken in der Ebene wie im Schritt zuvor (LS5 oder LS8) bildmittig positioniert (LS6)
- ▶ vertikales Verschwenken von  $-45^\circ$  bis  $45^\circ$  und zurück zur Bestimmung des globalen Maximums/Minimums anhand des Spaltenhistogramms der Helligkeitswerte des Kamerabildes (LS7), danach nochmals LS6
- ▶ Entfernen des Diffusors (LS8)
- ▶ Sichtkontrolle der Scheinwerfermitte in Bezug auf die Bildmitte (LS9)
- ▶ horizontales und vertikales Verschieben bis Scheinwerfermitte mit Bildmitte zusammenfällt (LS10)
- ▶ Wiederholung der Schritte LS4–LS10 iterativ, um den Fehler für  $\alpha$  zu minimieren bzw. um sich dem Idealwert von  $\alpha=45^\circ$  zu nähern
- ▶ Positionierung der Weißprobe (LS11)
- ▶ Messung der Entfernungen der Randpunkte der Lichtaustrittsöffnung zur Mitte der Weißprobe, für rechteckförmige Austrittsöffnungen die vier Eckpunkte  $r_{c1}$ – $r_{c4}$ , für kreisförmige Öffnungen drei Randpunkte der Öffnung  $r_{c1}$ – $r_{c3}$ , mittels dieser kann  $\beta$  abgeschätzt werden (Mo)
- ▶ Messung mittels Spektrometer (M1)

Abbildung 5 zeigt zu diesen Schritten das UML-Aktivitätsdiagramm. Zusätzlich ist der Abbruch der Messung im Verlauf abgebildet, wenn mehr als zwei Maxima gefunden werden. Dieses Abbruchkriterium deutet auf fehlerhaft justierte oder defekte Lichtquellen hin.

ABB.5 Aktivitätsdiagramm des Messprozesses bezüglich der Lichtquellenausrichtung



### 4.3 Ergebnisse

Es wurden Lichtquellen vermessen, die den drei bisher gängigen Emissionsprinzipien Temperaturstrahler (TU), Fluoreszenzstrahler (FL) sowie Halogen-Metaldampf Gasentladungsstrahler (HMI) sowie den neu aufkommenden LED-Strahlern (LED) zuzuordnen sind. Darunter bieten einige Lichtquellen die Variation des Lichtkegels als „Spot“ sowie „Flood“ Einstellung an. Dies wird durch Verschiebung der lichtstrahlformenden Elemente erreicht. Weiterhin bieten einige Lichtquellen variable Leistungsstufen aber auch variable Farbtemperaturen an. Es wurden dann – wenn möglich – Messungen für die maximale/halbe Leistung, Spot/Flood Einstellung bzw. mit und ohne eingesetztem Diffusor und bei Variation der Farbtemperatur durchgeführt.

Im Folgenden werden ausgewählte spektrale Strahlungsverteilungen sowie daraus abgeleitete kolorimetrische Größen dargestellt. Dies sind die korrelierte Farbtemperatur (CCT), der Farbrender-Index (CRI) und die Farbwerte  $u'$  und  $v'$  des CIE 1976 Farbraumes (UCS) unter Anwendung des 2° Standardbeobachters. Außerdem werden die absoluten und relativen Strahldichten im Vergleich zum idealen Planckschen Strahler für Temperaturstrahler bzw. im Vergleich zum Tageslicht nach Normlichtart D der entsprechenden Temperatur bei FL- sowie HMI-Strahlern dargestellt. Zusätzlich werden die Abweichungen für  $u'$   $v'$  im Vergleich zu den Hersteller spezifizierten CCT Werten verglichen.

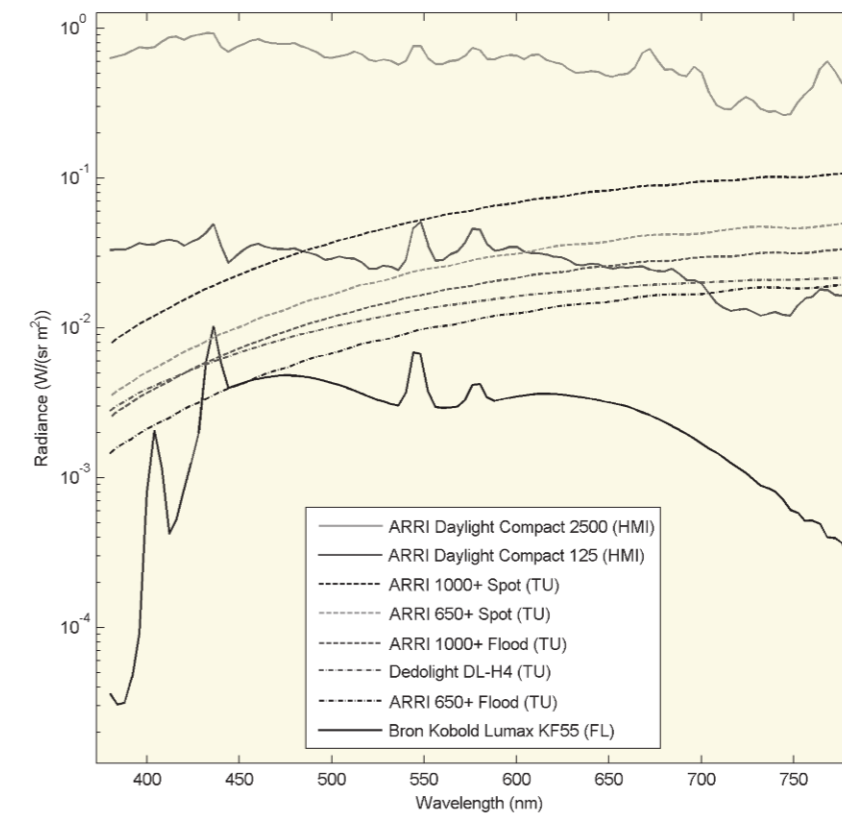


ABB.6 Stichproben verschiedener Lichtquellen

Abbildung 6 zeigt die Bandbreite der Leistung der Stichproben für spektrale Strahldichten von Temperatur-, Fluoreszenz- sowie HMI-Strahlern. Die Strahldichten umfassen dabei ca. 3 Zehnerpotenzen beginnend bei den schwächeren Fluoreszenz-Strahlern Bron Kobold Lumax KF 55 über Temperaturstrahler (ARRI 650/1000+ and Dedolight DL-H4) sowie HMI-Strahler (ARRI Daylight Compact 650) bis hin zu Hochleistungs-HMI-Strahlern (ARRI Daylight Compact 2500). Für ARRI 650/1000+ sind auch die Spot/Flood-Einstellungen mit abgebildet.

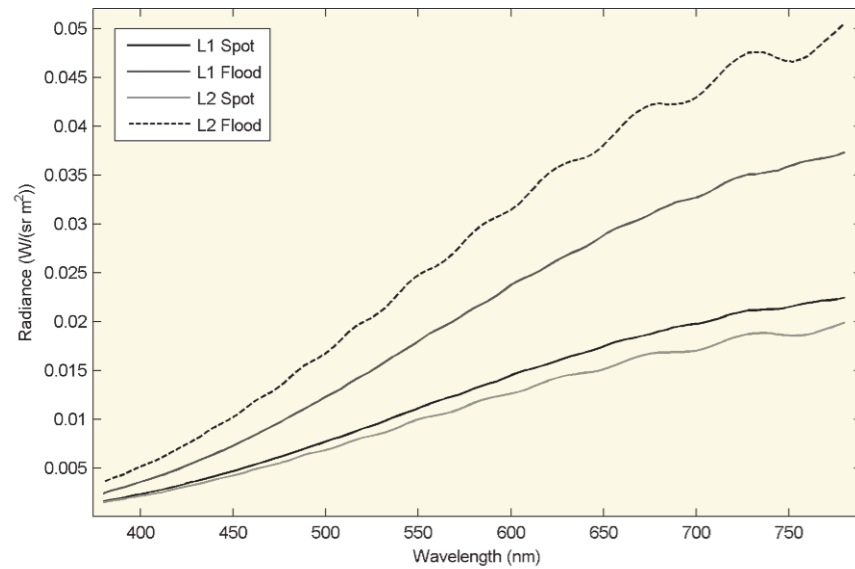


ABB. 7 ARRI 650+,  
L1 korrekt justiert und  
L2 fehlerhaft

Für Temperaturstrahler zeigt Abbildung 7 die spektralen Strahldichte zweier ARRI 650+, wobei die eine korrekt (L1) und die andere fehlerhaft (L2) justiert ist. Abbildung 8 zeigt die relativen spektralen Strahldichten und den CRI Wert für eine ARRI 1000+ in Spot-Position sowie die des idealen Temperaturstrahlers der Temperatur des ermittelten CCT-Wertes.

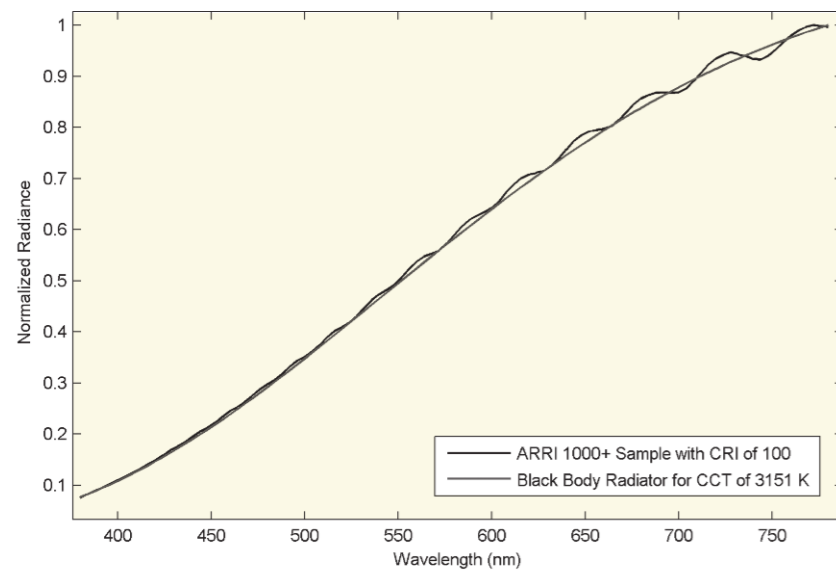


ABB. 8 ARRI 1000+ Stich-  
probe und idealer schwar-  
zer Strahler der CCT

Um die farbmetrischen Abweichungen zu beurteilen, zeigt Abbildung 9 die  $u'v'$  Werte für die durch den Hersteller angegebenen CCT Werte sowie Dedolight DL-H4 Stichproben in Flood-Position. Der Kreis hat dabei einen Radius der kleinsten noch wahrnehmbaren Farbdifferenz von  $\Delta c=0.01$  (JND) um den  $u'v'$  Ort der durch den Hersteller spezifizierten CCT für diese Lichtquelle (ebenso wie für alle folgenden  $u'v'$  Diagramme).

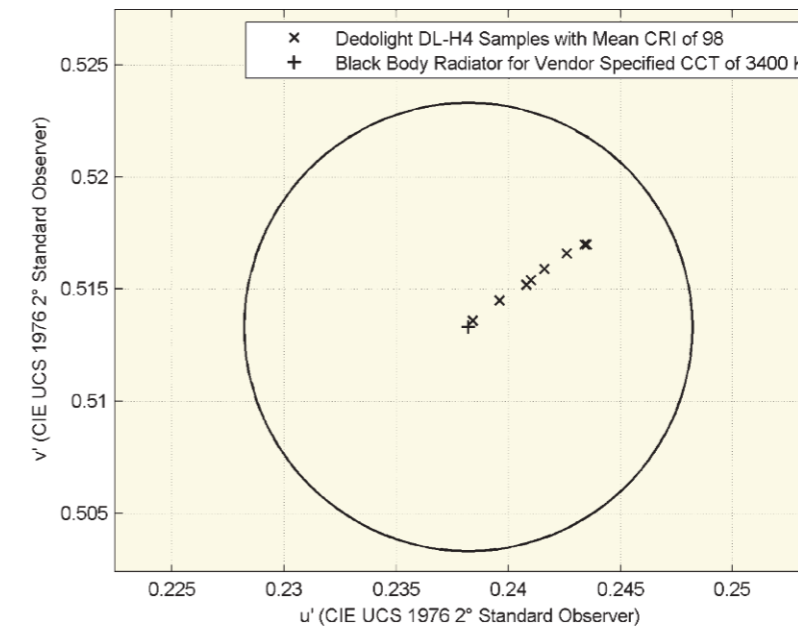


ABB. 9  $u'v'$  Koordinaten  
für Dedolight DL-H4 Stich-  
proben

Für Temperaturstrahler basierte Lichtquellen (ARRI 650/1000+ and Dedolight DL-H4 Modelle) kann im Allgemeinen gesagt werden, dass die spektrale Strahldichte in der Nähe des Erwartungswertes eines gegebenen, idealen schwarzen Strahlers gleicher Temperatur liegt. Ebenfalls liegen die  $u'v'$  Koordinaten in der Nähe des Erwartungswertes. Jedoch weicht die CCT öfter von den Herstellerangaben ab. Dies spielt jedoch farbtechnisch eine unwesentliche Rolle. Der CRI-Wert liegt für alle Messungen nahe 100. Auffällig waren jedoch Schwankungen im roten Bereich des Spektrums. Diese traten bei Lichtquellen mit Fresnel-Linsen auf. Der Grund hierzu ist jedoch unklar und muss noch diskutiert werden.

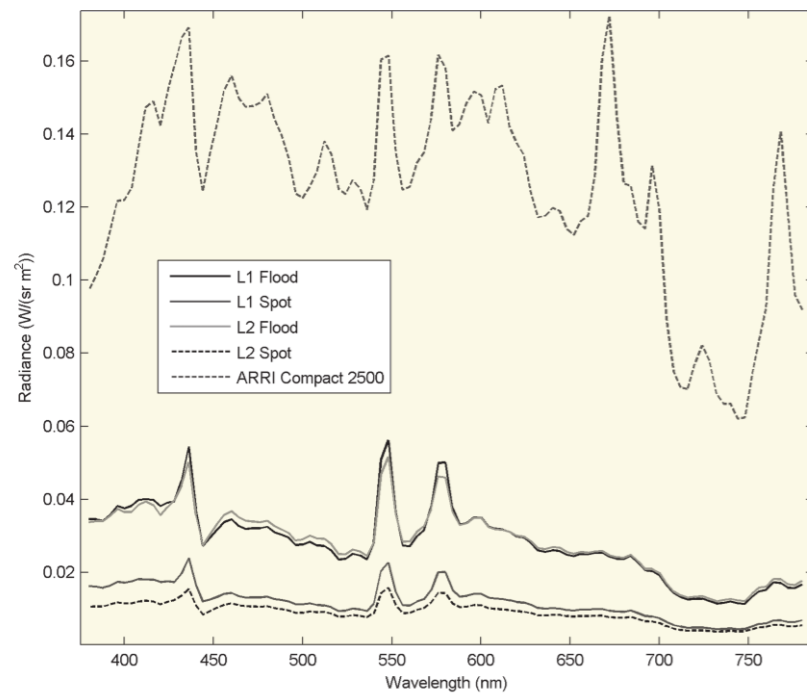


ABB.10 ARRI Daylight Compact 125 (L1/L2) und ARRI Compact 2500 Stichproben

Für HMI-Lampen zeigt Abbildung 10 die spektrale Strahldichte von ARRI Daylight Compact Lichtquellen, einer Compact 2500 mit hoher Leistung in Flood-Position sowie Compact 125 Stichproben für Spot/Flood-Position. Die u'v' Koordinaten aus Abbildung 11 basieren auf ARRI Compact 125 Stichproben der Abbildung 10. Sie liegen im Allgemeinen außerhalb der JND für die Normlichtart D der entsprechenden Temperatur, die durch den Hersteller angegeben ist.

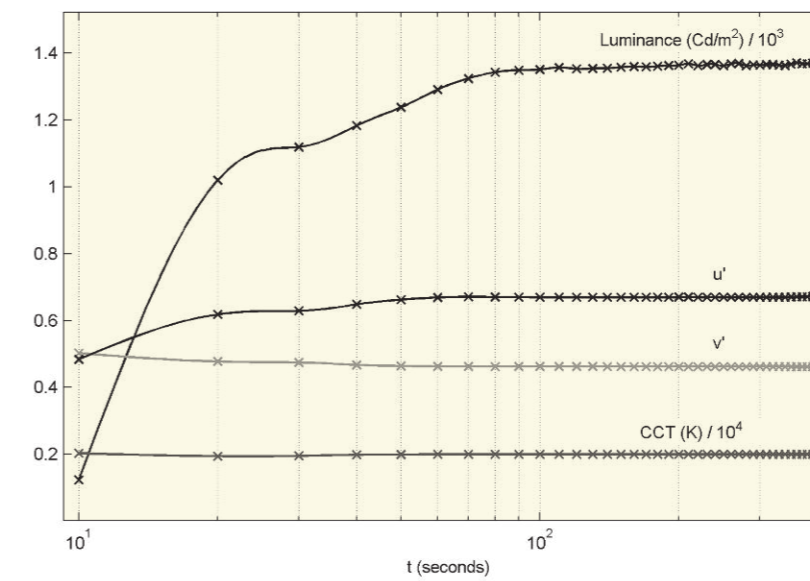


ABB.12 zeitlicher Verlauf der Leuchtdichte, der u'v' Koordinaten und der CCT nach dem Einschalten einer HMI-Lichtquelle

Neben der hauptsächlich durchgeführten Bestimmung der spektralen Strahlungsverteilung von HMI-Filmlichtquellen wurden auch Messungen zum Einschaltverhalten durchgeführt. Hintergrund hierzu ist eine mögliche Kostenersparnis bedingt durch einen früheren Drehbeginn, sobald die eingesetzten Lichtquellen eine zeitlich stabile Abstrahlcharakteristik aufweisen. So gilt zur Zeit bei der Beleuchtung mit HMI-Lichtquellen am Drehort die Regel, dass erst nach einer Zeitdauer von 5–10 Minuten nach dem Einschalten mit der Aufnahme begonnen werden kann. Erste Auswertungen von einzelnen Stichproben der durchgeführten Messungen hierzu zeigen aber, dass für diese bereits nach ca. 2 Minuten der Farbort u'v', die Leuchtdichte aber auch der CCT-Wert sich nicht mehr signifikant ändern (Abbildung 12)!

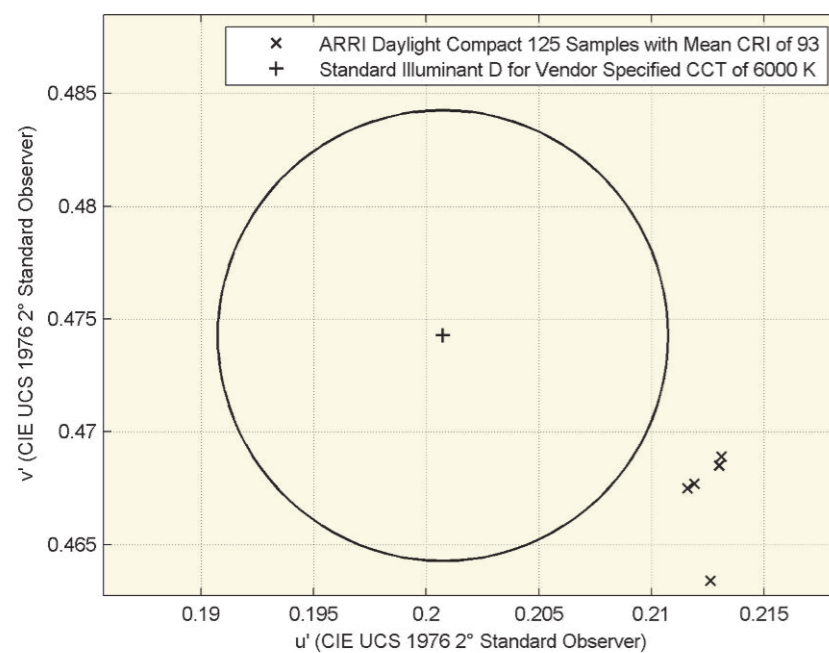


ABB.11 u'v' Koordinaten von ARRI Daylight Compact 125 Stichproben

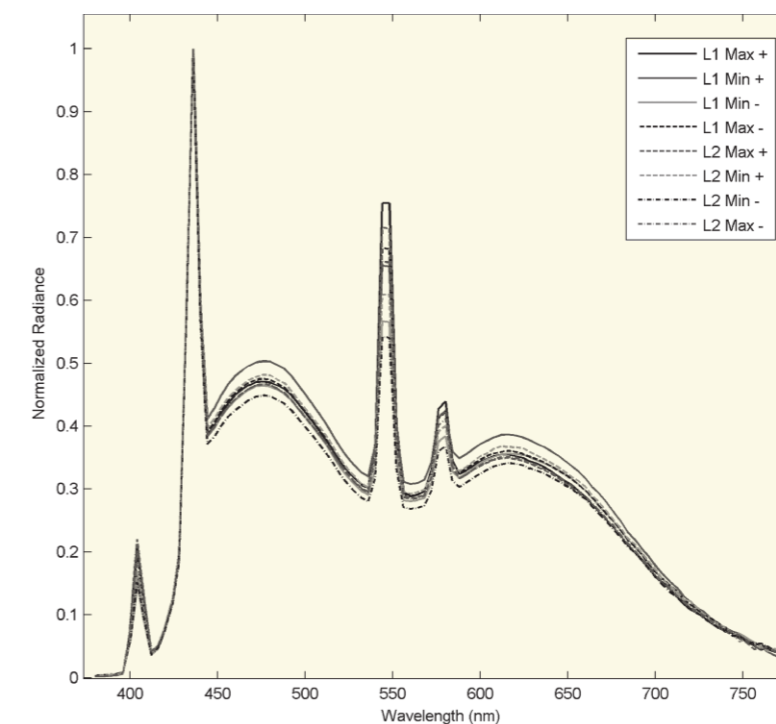


ABB.13 Bron Kobold Lumax KF55

Die Fluoreszenz-Strahler in Abbildung 13 zeigen relative spektrale Strahldichten von Bron Kobold Lumax Lichtquellen. Das Netzteil erlaubte hierbei zwei Leistungsstufen (Max=100%, Min=50%). Ebenso bieten diese die Möglichkeit, ein Wabengitter zur Lichtformung einzusetzen. Mit + gekennzeichnete Messungen fanden mit eingesetztem Wabengitter statt, mit – gekennzeichnete ohne dieses. Neben der Schwankung der spektralen Strahldichte muss angemerkt werden, dass die Lage der charakteristischen Linien konstant ist, ihre Intensität jedoch variiert. Eine Ursache liegt in der herstellungsbedingten Schwankung der Dotierung der Fluoreszenzschicht sowie in der Streuung der spektralen Remission des Reflektors.

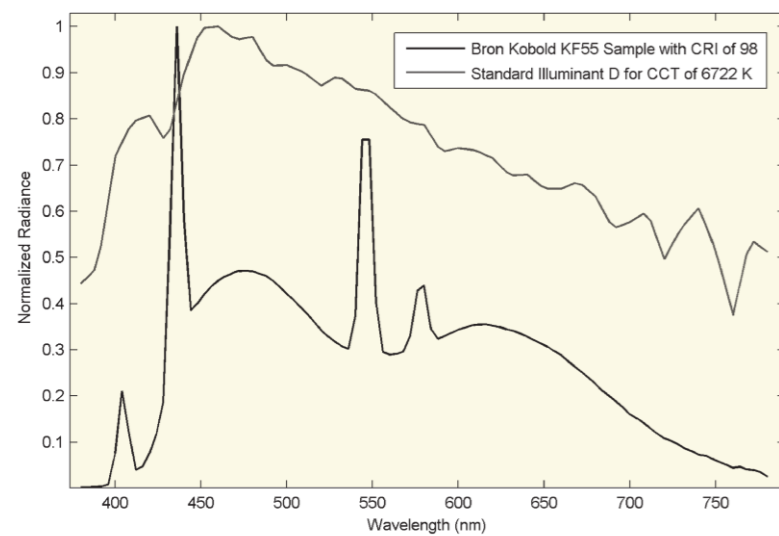


ABB. 14 Bron Kobold Lumax KF55 Stichprobe und Normlichtart D des CCT-Wertes

Ebenso wie bei den vorangehend betrachteten HMI-Lichtquellen sind die UCS-Koordinaten der Fluoreszenz-Strahler außerhalb der angegebenen JND für die durch den Hersteller spezifizierte CCT der entsprechenden Normlichtart D. Hauptsächlich ist dies durch die Varianz der Strahldichte der signifikanten Linien im Spektrum beider Lichtquellenarten bedingt. Abbildung 14 zeigt die relative spektrale Strahldichte für eine Bron Kobold Lumax sowie die der dazugehörigen Normlichtart D der herstellerepezifizierte CCT.

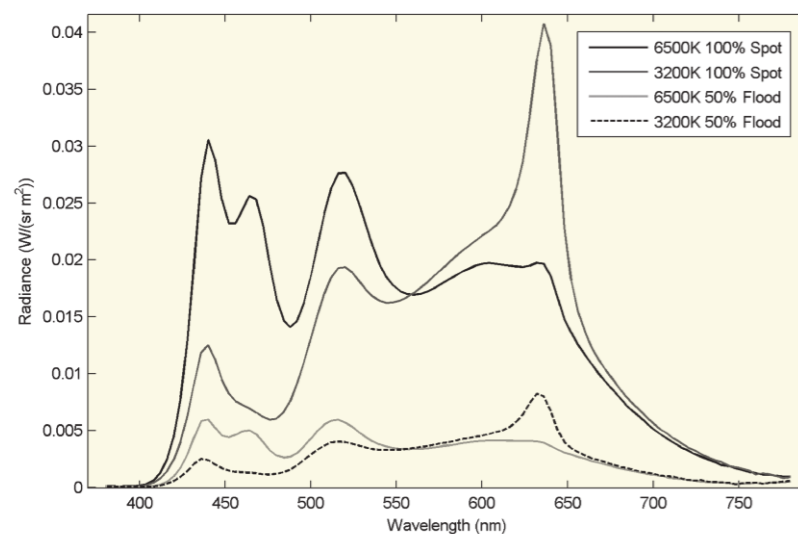


ABB. 15 Spektrale Strahldichte einer ARRI L5-C LED Lichtquellen Stichprobe

Abbildung 15 stellt exemplarisch die spektrale Strahldichte einer LED basierten Lichtquelle dar. Die Messungen fanden sowohl für volle Leistung in Spot-, als auch für halbe Leistung in Flood-Position jeweils für eine eingestellte CCT von 3200 K sowie 6500 K statt. Im Allgemeinen erlauben LED-Lichtquellen die Variation der CCT. Realisiert wird diese durch eine unterschiedlich gewichtete Bestromung der einzelnen verschiedenfarbigen LED-Bauelemente.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass alle temperaturstrahlerbasierten Lichtquellen mit ihren gemessenen Strahldichten in der Nähe der des idealen schwarzen Strahlers liegen. Die CCT- und CRI-Werte, wie auch die u'v' Koordinaten liegen in der Nähe der Werte, die durch den Hersteller spezifiziert sind. Fluoreszenz- sowie HMI-Strahler weichen stärker ab. Eine farbtechnische Relevanz z. B. bei der Kameraprofilerstellung sollte in Zukunft näher untersucht werden.

#### 4.4 Fehlerbetrachtung

Die Differenzen zwischen Mess- und Erwartungswert der spektralen Strahlungsverteilung können unterteilt werden in geometrisch und radiometrisch bedingte Fehler. Die ideale  $45^\circ/0^\circ$  Messbedingung wird meist nicht erfüllt, hauptsächlich wegen der Verschiebung und Verschwenkung während der Positionierung der Lichtquelle oder auch wegen falscher Justierung der Lichtaustrittsöffnung. Jedoch kann der Fehler hierzu anhand der gemessenen Abstände von den gemessenen Randpunkten der Lichtaustrittsöffnung  $r_{c1}-r_{c3}$ , bzw.  $r_{r1}-r_{r4}$  abgeschätzt werden.

Radiometrische Fehler und die Fehler der daraus abgeleiteten photometrischen sowie farbtechnischen Größen sind bedingt durch die Messunsicherheit des Spektrometers, nicht idealer Remission der Weißprobe und Streulicht. Das hier verwendete zertifizierte Spektrometer hat eine Unsicherheit für die Normvalenzen X, Y und Z von annähernd 3%. Fehler bedingt durch die Weißprobe sind Abweichungen von Reflexionsverhalten des idealen Lambert-Strahlers (PTB 2007). Das führt auch zu einem Fehler bei der Anwendung der Korrektur der Messdaten durch die spektrale Remission der Weißprobe. Diese ist durch den Hersteller der Weißprobe für eine diffuse  $8^\circ$  Geometrie spezifiziert, während im gewählten Aufbau eine  $45^\circ/0^\circ$  Geometrie verwendet wird.

Außerdem tritt ein Fehler bedingt durch die Oberflächenrauigkeit der Weißprobe insbesondere bei ausgedehnten Lichtaustrittsöffnungen auf. Die Lichtaustrittsöffnung muss berücksichtigt werden, da diese keine ideale Punktlichtquelle darstellt. Bron Kobold Lumax Lichtquellen mit einer Ausdehnung bis zu einem Meter führen zum Beispiel zu einem unterschiedlichen Streuverhalten in Abhängigkeit der Entfernungen **a** und **b**.

Das Dunkelrauschen des verwendeten Spektrometers und auch das Streulicht im gewählten Messaufbau können hingegen vernachlässigt werden. Messungen zeigten hierbei ein Signal-Rausch-Verhältnis von  $10^5:1$  und der Streulichtanteil lag um vier Zehnerpotenzen unter dem Messsignal. Beide liegen somit weit unter der Messunsicherheit aus den vorher diskutierten Ursachen.

In diesem Kapitel wird zuerst auf die umgesetzte Methode zur Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit eingegangen. Es werden sowohl die entwickelte Hardware als auch der Algorithmus zur Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit erläutert und die Ergebnisse zu ihrer Verifizierung dargestellt. Als Zweites wird auf die Implementierung der IDT-Profilerstellung eingegangen, insbesondere werden Modifikationen zum in 2.4 dargelegten Standard erläutert und erste Ergebnisse in der Anwendung der gewonnenen Profile aufgezeigt.

## 5.1 Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit des Kamerasystems

Die messtechnische Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit des Kamerasystems wird in Mess- und Prüflaboren mittels einer stabilisierten Lichtquelle, eines Kollimators und eines Monochromators realisiert, der vor der Kamera (ohne Objektiv) angebracht ist. Diese genaue Methode ist sehr kostenintensiv. Zum einen liegen die Anschaffungskosten für diese Arbeitsmittel sehr hoch, zum anderen ist die Messung zeitintensiv, da für jede erfasste Wellenlänge eine Einzelmessung durchgeführt werden muss. Kostengünstigere Methoden verwenden statt des Monochromators Bandpassfilter-basierte Systeme zur Erzeugung einer homogenen, schmalbandigen Beleuchtung des Sensors. Der Zeitaufwand zur Messung ist jedoch ebenfalls sehr hoch.

Eine sinnvolle Alternative mit wesentlicher Zeitersparnis ist die Messung mittels genau einer Aufnahme eines komplett auf den Sensor abgebildeten Spektrums aus dem Bereich des sichtbaren Lichtes (Krüger 2006). Dabei durchtritt ein kollimierter Lichtstrahl einen Spalt und danach ein dispergierendes Element. Die spektral aufgespaltete Wellenfront wird über eine abbildende Optik in die Sensorebene der Kamera abgebildet. Zusätzlich ist eine Referenzmessung mittels einer Photodiode am Ort des Sensors zu erfassen. Diese Methode verringert den Zeitaufwand deutlich, die Betriebsmittel sind jedoch ebenfalls hochpreisig.

Vereinfacht man den Aufbau noch weiter und verwendet ein separates Referenzspektrometer, setzt statt eines Kollimators einen Diffusor vor dem Spalt ein und verwendet das später bei der Aufnahme verwendete Objektiv direkt zur Abbildung des Spektrums, verringert sich der Kostenaufwand entsprechend. Da die Referenzmessung jedoch nicht in der Bildebene der Kamera erfolgt, müssen die optischen Eigenschaften des Diffusors, des Gitters und der Optik bekannt sein.

### 5.1.1 Design und Umsetzung des Spektroskopvorsatzes

Als wesentliche Anforderung für den spektralen Vorsatz ergibt sich die radiometrisch korrekte relative spektrale Empfindlichkeit mit einer spektralen Auflösung idealerweise von 1 nm (ebenso wie die Auflösung der Normspektralwertkurven) als Untergrenze. Die verwendeten Referenzspektrometer haben eine spektrale Auflösung im Bereich von 10–30 nm. Dies ist als Obergrenze anzusehen.

Als dispergierendes Element kommt ein kostengünstiges Transmissionsgitter zum Einsatz, das für den Einsatz in erster Ordnung optimiert ist. Anhand des Rayleigh-Kriteriums ergibt sich für Gitter ein Auflösungsvermögen nach der Dispersionsgleichung  $\lambda/\Delta\lambda = nN$ . Für die erste Ordnung  $n=1$  und  $\lambda=550$  nm als ungefähre Mittelwert des sichtbaren Lichts und Näherung für den Maximalwert der Hellempfindung für photopisches Sehen von  $\lambda=555$  nm sowie einer Auflösung von 1 nm als Anforderung ergibt sich eine erforderliche Linienzahl von ungefähr 550 Linien. Betrachtungsmäßig muss also die Linienzahl gleich der Wellenlänge sein, also als Obergrenze für 800 nm darf eine Linienzahl von 800 nicht unterschritten werden. Das hier verwendete Gitter besitzt 830 Linien pro mm.

Damit nur die erste Ordnung durch den Sensor erfasst wird, wird der Vorsatz so gekippt, dass die erste Ordnung für 550 nm ungefähr bildmittig abgebildet wird. Es ergibt sich eine Verkippung  $\beta$  nach der Interferenzgleichung  $k\lambda = g \sin \beta$  für die erste Ordnung von  $k=1$  und der Gitterkonstanten  $g$  gegeben durch den Kehrwert der Linienanzahl  $N$  von annähernd  $28^\circ$ .

Die Breite des Spektrumbildes ergibt sich aus der Interferenzgleichung und dem Abbildungsmaßstab, der z. B. für den ARRI Alexa Sensor und einem Normalobjektiv von 40 mm zu einer Breite des Spektrums von ca. 400 Pixeln führt. Es wird also ungefähr 1 nm pro Pixel abgebildet. Die Gittereffizienz, also die spektrale Dämpfung auf Grund der Strukturfunktion des Gitters ist linear fallend und gegenläufig zur spektralen Strahlungsverteilung der verwendeten Temperaturstrahler basierten Filmlichtquelle. Aktuell ist ein Signal/Rausch Verhältnis gewährleistet, welches innerhalb einer Zehnerpotenz im Bereich des sichtbaren Lichtes schwankt.

Die Breite des Spaltes ist durch die förderliche Spaltbreite als Folge der beugungsbegrenzten Abbildung nach unten begrenzt. Die Intensität der einfallenden Lichtmenge muss jedoch zu einer ausreichenden Belichtung durch den Sensor, also der Kamera führen. Nach Vorversuchen wurde eine Spaltbreite von 0,9 mm als sinnvoll ermittelt und umgesetzt. Bei einer ARRI Alexa mit 800 ISO Empfindlichkeit und einer maximalen möglichen Verschlusszeit bei einer Bildfrequenz von 25 B/s sowie einer Abblendung auf eine mittlere Blende von 8 ergab sich bei einem Arbeitsabstand einer 300 W Tungsten Filmlichtquelle von ca. 30 cm vor der Spaltöffnung mit vorgesetztem Diffusor ein Bildsignal von ca. 80 % der maximalen Aussteuerung.

Der Spalt ist dabei ca. 300 mm von der Hauptebene des Objektivs entfernt (Objektweite). Es ergibt sich bei 40 mm Brennweite nach der Abbildungsgleichung ein Abbildungsmaßstab von ca. 0,13. Das Spaltbild ist somit bei geometrisch-

optischer Abbildung ca. 0,12 mm breit. Daher wird der Spalt z.B. bei einem Alexa Sensor auf ca. 14 Pixel abgebildet. Der Spalt stellt somit das begrenzen Element bei der spektralen Auflösung dar.

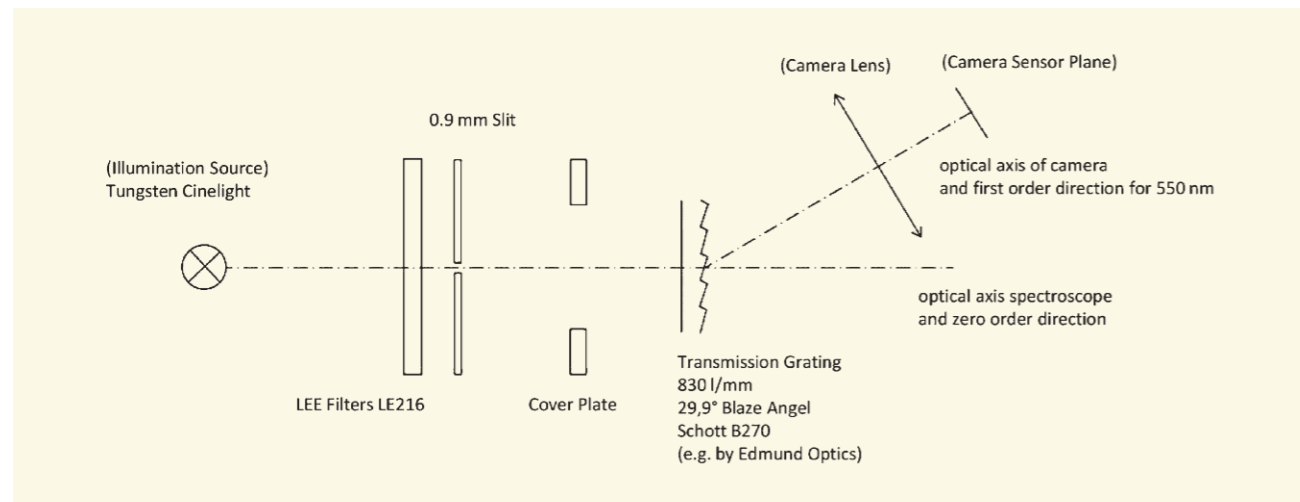


Abbildung 16 zeigt den prinzipiellen Aufbau des Spektroskops, sowie seine Anordnung bezüglich der Beleuchtung und der Kamera. Als weitere Kostenersparnis bei dem gewählten Ansatz ergibt sich der Wegfall des Kollimators vor dem Spalt. Allerdings muss mit den gegebenen Mitteln versucht werden, ein homogenes Lichtfeld zu erzeugen. Dies wird im ersten Ansatz durch ein vor dem Spalt angebrachten Diffusor erreicht. Die Aufnahme der Komponenten erfolgt in einem ebenfalls im Rahmen dieses Projektes entwickelten Gehäuse. Ansatzadapter für gängige Objektiv- und Kompdienvorsätze wurden ebenso entwickelt (Abbildung 17).

ABB.16 Anordnung des Gesamtsystems und der optischen Elemente des Spektroskops

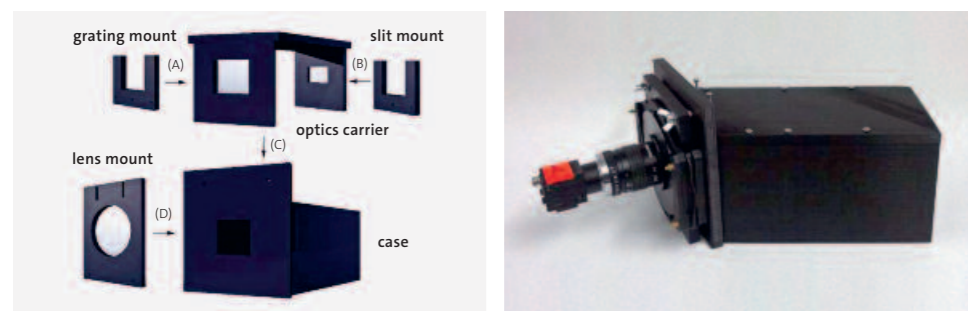


ABB.17 3D Druck Gehäuse, links Bauelemente-Datensatz, rechts Prototyp vor Industriekamera

Es wurde ein erster Prototyp des Gehäuses mittels eines Druckers Replicator 2 der Firma MakerBot erstellt. Dazu wurden als erstes die Abmessungen eines existierenden Modells in die Modellierungssoftware Maya 3D der Firma Autodesk übertragen. Dieses Programm wurde statt eines CAD-Programms gewählt, so können die zukünftig als Open Source zur Verfügung gestellten 3D-Datensätze in der Filmbranche besser modifiziert werden, da dort dieses Programm verbreiteter ist als CAD-Soft-

ware. Die 3D-Dateien stehen neben der Materialliste der optischen Komponenten allen Anwendern frei zur Verfügung, sodass der Spektroskopvorsatz leicht nachzubauen ist. Der gesamte Kostenaufwand für das Material liegt bei ca. 200 Euro.

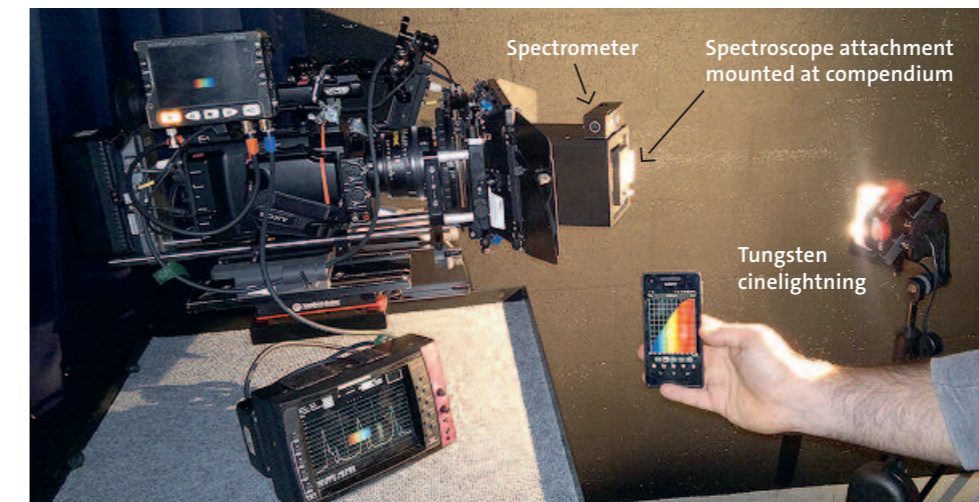


ABB.18 Gesamtanordnung zur Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit des Kamerasystems

In Abbildung 18 ist eine verwendete Messanordnung zu sehen. Dabei wird das Referenzspektrometer durch ein Smartphone ausgelöst. Aus den mittels des Spektroskopvorsatzes aufgenommenen Spektrenbildern und den Messungen des Referenzspektrometers kann die relative spektrale Empfindlichkeit bestimmt werden. Die Implementierung soll nun erörtert werden.

### 5.1.2 Algorithmus und Implementierung

Die Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit mittels des Spektroskopvorsatzes erfordert eine Kalibrierung zur Bestimmung der Relation zwischen Bildpunktort, d. h. der Pixel-Koordinate und der Wellenlänge (geometrische Kalibrierung). Hierzu muss eine Kameraaufnahme sowie eine Referenzmessung mittels eines Spektrometers von einer Lichtquelle mit ausgeprägten Linien erfolgen. Aus dem kinotechnischen Bereich kommen hierfür Fluoreszenzstrahler, wie KinoFlo Lampen in Fragen. Fluoreszenzstrahler haben eine Überlagerung des ausgeprägten Linienspektrums mit einem Kontinuumsspektrum bedingt durch die Sekundäremission. Neben der KinoFlo Lichtquelle kam auch eine Energiesparlampe zum Einsatz, da diese mehr und ausgeprägtere Linien besitzt, die sich leichter detektieren lassen. Hierzu wurde ein Leuchtmittel Lumilux der Firma OSRAM mit einer Leistung von 20 W erfolgreich eingesetzt.

Die Messdaten durchlaufen folgende Prozessschritte:

- Einlesen der Bilddatei

- ▶ Konvertierung in Grauwertbild
- ▶ Vignettierungskorrektur anhand des  $\cos^4$  Gesetzes unter Anwendung der Sensorgeometrie und Brennweite des Objektivs
- ▶ Median-Filterung zum Entfernen von Störungen
- ▶ Bestimmen des Spektrum-Bildbereiches
- ▶ Integration über die Zeilen des Spektrum-Bildbereiches, sowie Mittelwertbildung
- ▶ Kreuzkorrelation zwischen erster und letzter verwendeter Bildzeile zur Bestimmung der Verkippung
- ▶ Rotation des Bildes zur Korrektur der Verkippung
- ▶ Mapping der zwei stärksten Maxima aus Referenzmessung zu den Bilddaten unter Mittelwertbildung der gefundenen Maxima im Bild anhand der links- sowie rechtsseitigen Ableitung der Bilddaten und Subpixelinterpolation der Maxima der Referenzdaten
- ▶ Bestimmung der linearen Funktion zur Pixel-Wellenlängen-Abbildung anhand der gefundenen Maxima

Die genaue Bestimmung der Lage der Referenzlinien im Spektrum ermöglicht somit die Verknüpfung der Pixelkoordinaten mit der jeweiligen Wellenlänge im Bild des Spektrums. Da das verwendete Referenzmessgerät X-Rite EyeOne nur 30 nm Auflösung besitzt, wurde zur genaueren Bestimmung der Maxima der Referenzdaten ein Polynom zweiten Grades anhand der detektierten Maxima sowie der beiden angrenzenden Punkte berechnet und diese Maxima des bestimmten Polynoms zur weiteren Berechnung herangezogen. Abbildung 19 zeigt eine solche gefundene Pixel/Wellenlängenrelation.

Im Spektrumbild wurde der Mittelwert aus allen Bildzeilen ermittelt. Zusätzlich wurde über Kreuzkorrelation die Verkippung des Spektrums bedingt durch Verdrehung des Gitters gegenüber dem Spalt berechnet, um das Bild ggf. vor der Mittelwertbildung zu rotieren. Schlussendlich wurden für die beiden größten Maxima die Parameter einer linearen Abbildungsfunktion bestimmt, um die Abbildung von Pixelkoordinaten auf die Wellenlänge zu ermöglichen.

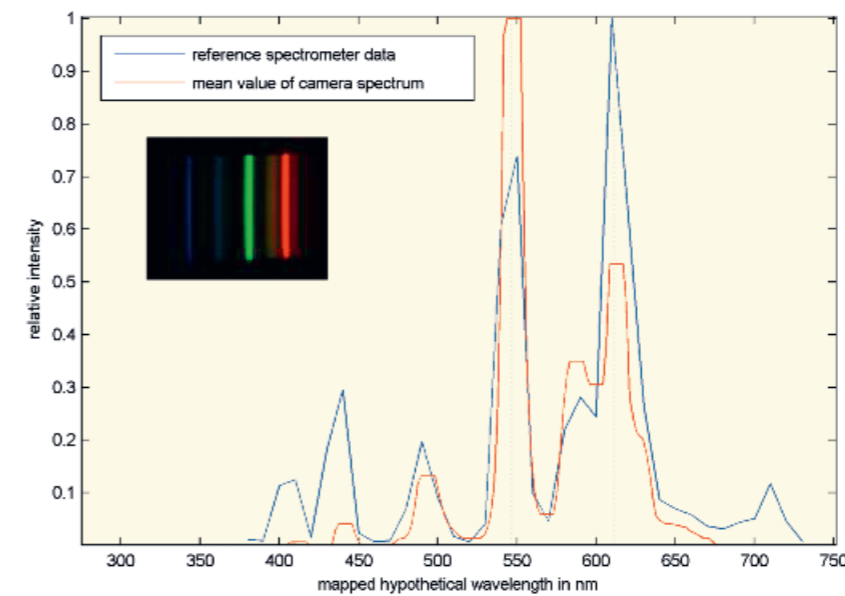


ABB.19 Eingangsdaten und Resultat der geometrische Kalibration

Im zweiten Teil wird anhand einer Kameraaufnahme eines Temperaturstrahlers, üblicherweise einer Tungsten-Filmlichtquelle, die spektrale Empfindlichkeit bestimmt. Dies stellt die radiometrische Kalibration dar. Die Referenzmessung der Lichtquelle erfolgt dabei ebenfalls mit der Diffusorfolie vor dem Referenzspektrometer. Die Daten durchlaufen folgende Prozessschritte:

- ▶ Einlesen der Bilddatei
- ▶ Vignettierungskorrektur anhand des  $\cos^4$  Gesetzes unter Anwendung der Sensorgeometrie und Brennweite des Objektivs
- ▶ Median-Filterung zum Entfernen von Störungen
- ▶ Bestimmen des Spektrum-Bildbereiches
- ▶ Integration über den Spektrum-Bildbereich sowie Mittelwertbildung
- ▶ Rotation des Bildes zur Korrektur der Verkippung
- ▶ Abbildung der Bildpunktorte als Funktion der Wellenlänge (unter Anwendung des Ergebnisses aus der geometrischen Kalibration)
- ▶ Korrektur der Intensität bezüglich der spektralen Strahlungsverteilung der Lichtquellen
- ▶ Korrektur der Intensität bezüglich der spektralen Dämpfung des Gitters bzw. Gittereffizienz
- ▶ Normierung der Empfindlichkeit auf den Maximalwert des Grünkanals



Im Idealfall würde eine Lichtquelle mit einem energiegelichen Spektrum durch das Gitter ungedämpft aufgespalten und durch die Kamera registriert werden. Wesentlich für die radiometrische Kalibration ist jedoch die Korrektur der spektralen Strahlungsverteilung der verwendeten Lichtquelle sowie der spektralen Dämpfung des Gitters, also der Gittereffizienz.

Abbildung 20 zeigt das unkorrigierte Spektumbild und die ermittelte relative spektrale Empfindlichkeit für eine Point Grey Industriekamera FL2-03S2C (Sensor Sony ICX424AQ).

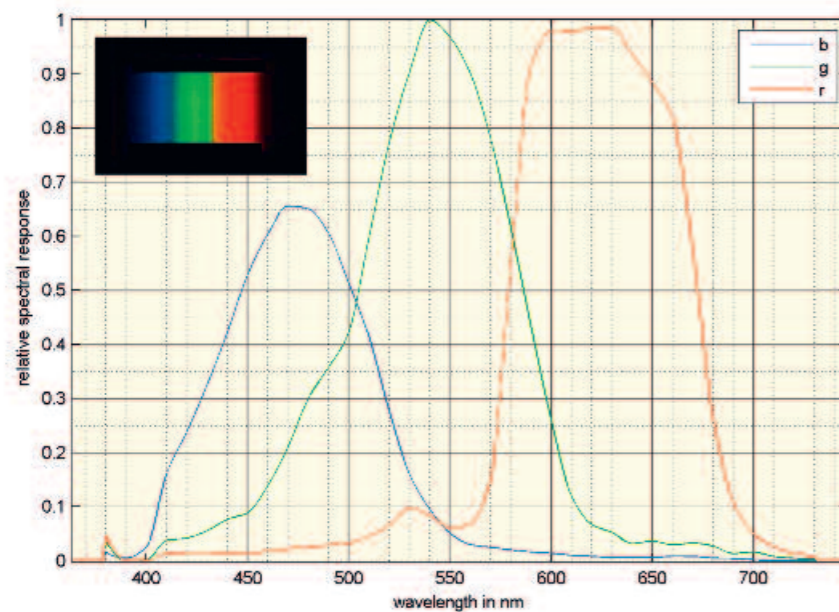


ABB. 20 Eingangsbild der radiometrischen Kalibration und ermittelte relative spektrale Empfindlichkeit

### 5.1.3 Test und Verifikation

Zur Überprüfung der Genauigkeit der Methode zur Ermittlung der relativen spektralen Empfindlichkeit wurde ein erster qualitativer Vergleich mit Referenzdaten durch einen Hersteller durchgeführt. Es handelt sich um die ermittelte spektrale Empfindlichkeit einer ARRI Alexa in Verbindung mit einem Zeiss UltraPrime 40 mm Objektiv. Als qualitatives Maß für die Güte der geometrischen Kalibration lässt sich in Abbildung 21 erkennen, dass der prinzipielle Verlauf mit seinen Orten der globalen und lokalen Maxima als auch Minima übereinstimmt. Zur Beurteilung der Güte der radiometrischen Kalibration muss dagegen die ermittelte Empfindlichkeit verglichen werden. Diese zeigt eine Abweichung um das globale Maxima im Rotkanal im Prozentbereich.

Als Referenzmessgerät kam ein X-Rite EyeOne zum Einsatz. Dieses bietet eine spektrale Auflösung von 30 nm. Das wirkt sich negativ auf die Ermittlung der Pixel-Wellenlängen Relation bzw. geometrischen Kalibration anhand von Spektrallinien aus. Außerdem ist die Pixel-Wellenlängen Abbildungsfunktion zur Zeit linear, da sie nur die zwei stärksten, detektierten Linien nutzt. Da die Distorsion jedoch durch

ein Polynom dritten Grades gut modelliert werden kann (Seidel-Summe), muss zukünftig unter Einbeziehung von 4 Linien, möglichst gleich verteilt im Spektrum diese Abbildung genauer ermittelt werden. Das bedeutet, dass die verwendete Energiesparlampe hierzu besser geeignet ist als Fluoreszenzstrahler wie z. B. die KinoFlo Filmlichtquellen.

Ursachen für Fehler in der radiometrischen Kalibration finden sich zum einen in der Anwendung der  $\cos^4$  Korrektur, die nur das theoretische Modell der Vignettierung darstellt. Die reale, konstruktionsbedingte Vignettierung der Abbildungsoptik wird zur Zeit nicht berücksichtigt. Außerdem wird bezüglich des Spektroskopvorsatzes die durch den Hersteller angegebene Gittereffizienz zur Korrektur verwendet. Diese müsste messtechnisch noch genauer bestimmt und verifiziert werden.

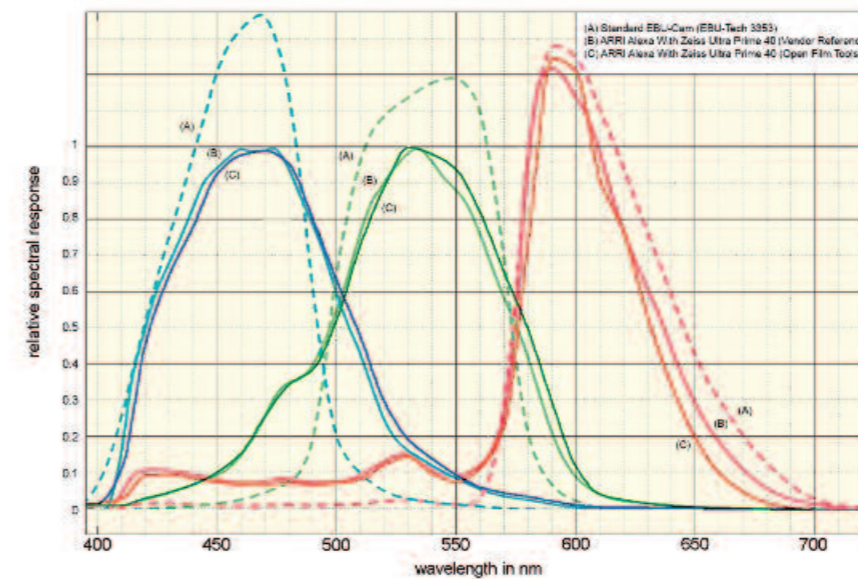


ABB. 21 Ermittelte relative spektrale Empfindlichkeit einer ARRI Alexa mit Zeiss UltraPrime 40

Jedoch ist der Fehler bei der radiometrischen Kalibration auch eine Folge des geometrischen Fehlers, da die Korrektur für die spektrale Strahldichte der Lichtquelle, als auch für die Gittereffizienz eine Funktion der Wellenlänge ist. Beide lassen sich jeweils in erster Näherung, wie bereits erläutert durch eine lineare Funktion beschreiben, jedoch einmal mit positivem und einmal mit negativem Anstieg. Die sich daraus ergebende Gesamtkorrektur ist ein Polynom zweiten Grades mit einem globalen Maxima ungefähr in der Mitte des sichtbaren Spektrums. Zu den Rändern des Spektrums verstärkt sich jedoch der Anstieg der Korrekturfunktion und somit der radiometrische Fehler bei nicht korrekter geometrischer Kalibration.

## 5.2 Kameraprofilerstellung nach AMPAS Standard P-2009-001

### 5.2.1 Berücksichtigung der Lichtquellen und Testfarben

In die Berechnung der Transformationsmatrix gehen numerische Datensätze zur spektralen Strahlungsverteilung der Lichtquellen, insbesondere für den Zielweißpunkt  $\mathbf{h}_w$  sowie die spektrale Remissionen von Testfarben  $\mathbf{r}_i$  ein. Diese liegen in verschiedener spektraler Auflösung aus einer Messung vor. Insbesondere Spektrometer liefern meist eine Auflösung von 1 nm oder schlechter. Jeder Datensatz wird vor der weiteren Verwendung standardisiert auf 1 nm Auflösung interpoliert.

Alternativ zur direkten Verwendung spektraler Messdaten von Filmlichtquellen kann die Normlichtart D für verschiedene Farbtemperaturen bei der Profilerstellung simuliert werden. Die Bestimmung der spektralen Strahlungsverteilung erfolgt dabei mittels Näherung durch ein Polynom nach (Lindbloom 2015).

In Zusammenhang mit der Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit des Kamerasystems als Vorverarbeitungsschritt ist zu erwähnen, dass die 2 spektralen Datensätze für den Linien- und Kontinuumsstrahler, z. B. KinoFlo (Tageslicht) und Tungsten (Kunstlicht), ebenso zusätzlich zur Berechnung von Profilen für diese Beleuchtungsarten verwendet werden können. Für die Testfarben des Gretag Macbeth Color Checkers kommen Messdaten aus (BabelColor 2012) zur Anwendung.

### 5.2.2 Abweichung zum AMPAS Standard P-2009-001

Im Standard zur IDT-Profilerstellung wird zum einen, so wörtlich, von einem „gut belichteten Bild“ („well exposed image“) gesprochen. Dies lässt aber eine Varianz der spektralen Strahlungsstärke bei der Bildentstehung zu. Andererseits geht in die Profilbestimmung die Strahldichte ein. Um jedoch eine Unabhängigkeit von der Varianz der Belichtung zu erreichen, wird in der Implementierung die relative spektrale Strahldichte (oder andere äquivalente spektrale Strahlungsverteilungen) und auch die relative spektrale Empfindlichkeit der Kamera benutzt. Somit werden  $\mathbf{t}_i$  und insbesondere  $\mathbf{h}_w$  als relativ betrachtet. Des Weiteren wird die Normvalenz des Weißpunktes  $\mathbf{w}_w$  so normiert, dass Y den Wert 100 ergibt. Dies entspricht der Praxis bei der Angabe von Valenzen für Normlichtarten. Die spektrale Empfindlichkeit der Kamera  $\mathbf{C}^T$  ist ebenfalls relativ und geht unmittelbar aus der Berechnung aus dem zuvor beschriebenen Algorithmus ein. Dabei erfolgt eine Normierung der Empfindlichkeit auf den Maximalwert im Grün-Kanal.

Als Änderung zur IDT09A Standard-Implementierung werden die kameraspezifischen Valenzen für eine Menge an Testfarben modifiziert bestimmt. Dies erlaubt die Berechnung von Profilen für eine spektrale Strahlungsverteilung einer beliebigen Lichtquelle, die im Allgemeinen nicht mit der Aufnahmebeleuchtung und ihrer spektralen Strahldichte  $\mathbf{h}_{illum}$  übereinstimmt. Es ergibt sich dann

$$\mathbf{v}_i = \mathbf{b} * \mathbf{C}^T \mathbf{h}_{illum} \mathbf{r}_i \quad (21)$$

Die zur Zeit erstellten Profile berücksichtigen nur die Weißpunktnormierung unter Anwendung von  $\mathbf{b}$  und die Matrizierung mittels  $\mathbf{B}$ . Die anderen Schritte wie Graunormierung, Beschnitt und Gamma-Korrektur werden in einem ersten Ansatz nicht im Profil angewendet. Dies geschieht, um die Einflüsse der Helligkeitsnormierung aber auch des erforderlichen Gamut Mapping in einem nächsten Schritt genauer untersuchen zu können. Die Gamma-Korrektur wird nicht benötigt, da in der aktuellen Implementierung lineare Bilddaten vorausgesetzt werden. Es ergibt sich also unmittelbar

$$\mathbf{a} = \mathbf{B} \frac{\mathbf{b} \mathbf{d}}{\min(\mathbf{b})} \quad (22)$$

Diese Gleichung liegt insbesondere den nun betrachteten Ergebnissen und der Verifikation zu Grunde.

### 5.2.3 Test und Verifikation

Innerhalb des Projektes erfolgten zwei Testproduktionen unter Verwendung von spektral vermessenen Filmlichtquellen und verschiedenen Kamerasystemen insbesondere mit verschiedenen Objektiven. Es kamen HMI-, Fluoreszenzbasierte sowie Tungsten-Lichtquellen zum Einsatz. Die Kamerasysteme umfassten die Bandbreite HighEnd-Consumer. Es wurde eine Arri Alexa, eine Sony F55, eine BlackMagic sowie eine Gopro verwendet. Die drei erstgenannten wurden unter Variation der Objektiv eingesetzt. Es kamen Zeiss UltraPrime sowie Bausch & Lomb Objektiv zum Einsatz.

Die Testproduktionen teilten sich in eine Folge von Außen- bzw. Innenaufnahmen mit einer Dramaturgie auf, um ein Zusammenschneiden des unterschiedlichen unprofilierten sowie profilierten Materials zu ermöglichen. In der zweiten Testproduktion wurden Tabletop-Aufnahmen einer konstanten Szene gemacht. Diese beinhalteten Kunstwerke mit einer besonders großen Variation an Farben.

Das gewonnene Material kann zukünftig in einer genaueren Untersuchung zum Einsatz kommen. Als Basis einer ersten Auswertung wurde eine Tabletop-Aufnahme unter konstanter Beleuchtung mit gleicher Kamera aber unterschiedlichem Objektiv verwendet. Es kam eine ARRI Kunstlichtquelle und eine ARRI Alexa zum Einsatz. Es wurde zum einen mit einem farbneutral arbeitenden Zeiss UltraPrime und zum anderen mit einem warmfarbig arbeitenden Bausch & Lomb gedreht.



ABB. 22 Vergleich ARRI Alexa mit Zeiss UltraPrime (links) und Bausch & Lomb (rechts), beide mit gleicher Profilierung

Abbildung 22 zeigt beide Aufnahmen im Vergleich unter Anwendung des IDT-Profiles mit der zuvor ermittelten spektralen Empfindlichkeit der Kombination ARRI Alexa mit UltraPrime. Als Objektremissionen wurden die Farbfelder des Color Checkers gewählt. Zielweißpunkt des Profils ist die Normlichtart D50. Beleuchtet wurde mit einer Temperaturstrahler basierten Filmlichtquelle (CCT=3400K). Die Farbwerte wurden für die Ausgabe in den sRGB Farbraum mit einem Weißpunkt der Normlichtart D65 konvertiert. Die warmfarbige Tönung der Bausch & Lomb Aufnahme tritt visuell deutlich hervor. Unter Berücksichtigung der spektralen Empfindlichkeit der ARRI Alexa mit vorgesetztem Bausch & Lomb ergibt sich ein zweites IDT Profil, welches diesen Fehler berücksichtigt und ausgleicht. Dies ist in Abbildung 23 dargestellt.



ABB. 23 Vergleich ARRI Alexa mit Zeiss UltraPrime (links) und Bausch & Lomb (rechts), diesmal wurde die rechte Aufnahme unter Berücksichtigung der spektralen Transmission des Bausch & Lomb profiliert

Zusätzlich wurde ein quantitativer Vergleich zwischen der spektral basierten Methode IDTo9A zur Chart basierten Methode IDTo9B gemacht. Der IDTo9B Algorithmus wurde ebenfalls implementiert.

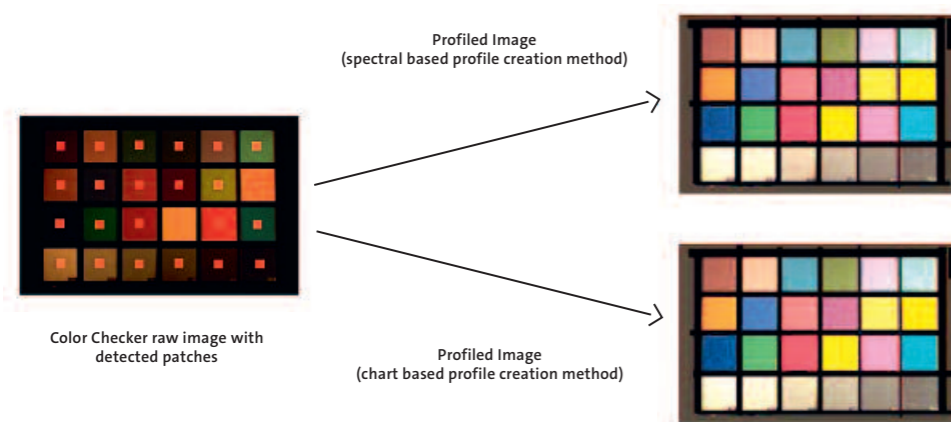


ABB. 24 Color Checker Bild (mit detektierten Patches), unprofiliert und profiliert mittels spektral und Chart basierter Methode

In Abbildung 24 ist das 8bit Rohbild der verwendeten Industriekamera Point Grey FL2-03S2C sowie die jeweils profilierten Bilder zu sehen. Zielweißpunkt, Aufnahmebeleuchtung und Ausgabeprofil entspricht denen der zuvor erörterten ARRI Alexa Aufnahmen. Abbildung 25 (spektral basiert) und Abbildung 26 (Chart basiert) zeigen die Auswertung hinsichtlich der  $\Delta E$  Werte der Farbttestfelder der Color Checker Testtafel. Hierzu wurde die Helligkeit zuvor auf den Y Wert des profilierten

Weißfeldes der Chart normiert. Die einzelnen Abweichungen sowie der Mittelwert sind ähnlich. Die  $\Delta C$  Werte sind kleiner und liegen bei 8 für die spektralbasierte und bei 7,5 für die chartbasierte Methode. Beide führen also zu näherungsweise ähnlichen Ergebnissen.

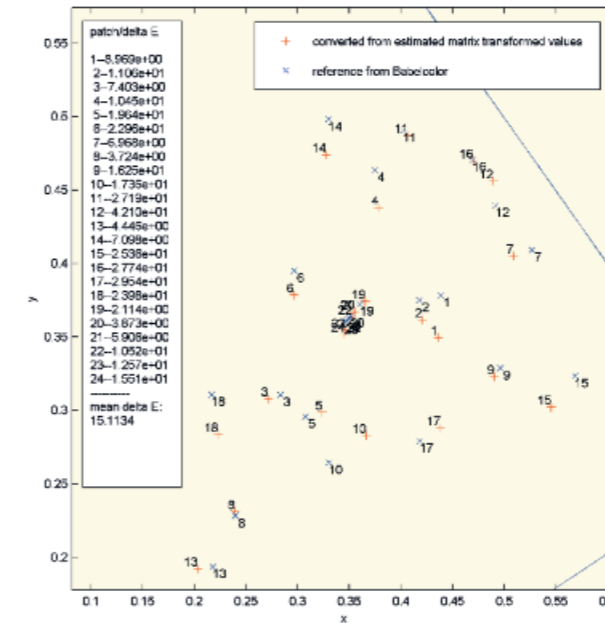


ABB. 25 Orte der Normfarbwertanteile des Color Checkers nach spektral basierter Profilierung (blaue Linie – Spektralfarbzug)

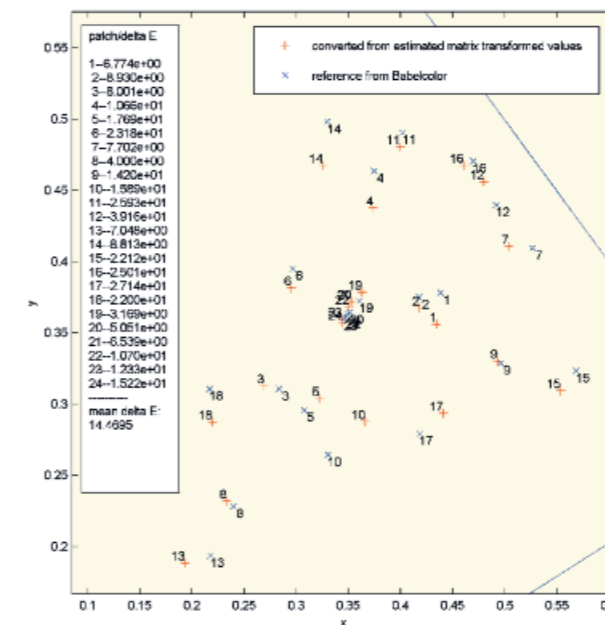


ABB. 26 Orte der Normfarbwertanteile des Color Checkers nach Chart basierter Profilierung (blaue Linie – Spektralfarbzug)

# 6 Applikation zur webbasierten Kameraprofilerstellung

Zu der im vorigen Kapitel besprochenen Methode zur Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit des Kamerasystems als Vorverarbeitungsschritt und der eigentlichen IDT-Profilberechnung wurde innerhalb der Umsetzung der Open Film Tools eine webbasierte Anwender-Applikation entwickelt, die die Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit des Kamerasystems sowie die Profilberechnung für den Anwender zugänglich macht. Diese wird in diesem Abschnitt vorgestellt.

## 6.1 Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung der Web-Plattform ergibt sich wie folgt:

a) für die Schnittstelle zum Anwender:

- ▶ Bereitstellung der Webbrowser-Schnittstelle aller zur Berechnung der spektralen Empfindlichkeit und des Kamera-Profiles erforderlichen Daten
- ▶ Visualisierung des Fortschritts bei der Berechnung
- ▶ zur Verfügung Stellung des berechneten Kameraprofils

b) für die Schnittstelle zur Implementierung der Kamera-Profil-Berechnung

- ▶ standardisierte Bereitstellung der durch den Anwender bereitgestellten Daten

Insbesondere unterstützt die Anwendung die Eingabe spektraler Daten zu den verwendeten Filmlichtquellen aber auch von Aufnahmeobjekten. Alternativ können aber auch Normlichtarten als Lichtquelle sowie eine vordefinierte Color Checker Testtafel mit bekannten Remissionen ausgewählt werden.

## 6.2 Übersicht des Gesamtsystems

Abbildung 27 zeigt die Systemübersicht zur Erstellung eines IDT-Profiles. Die PHP-basierte Web-Plattform befindet sich im mittleren Teil und setzt sich aus dem Web-Client und dem Web/File Server zusammen. Im oberen Drittel ist dabei die Anwen-

derseite dargestellt, die die Erstellung der Spektrenaufnahmen und Messungen unter Einsatz des Spektroskopvorsatzes bzw. des Referenzspektrometers realisiert. Über einen Browser werden die Messdaten des Referenzspektrometers und die Spektrenbilder der Kamera eingegeben. Zusätzlich kann der Anwender ein Testbild und filmproduktionsspezifische Metadaten hochladen. Das Testbild wird bei erfolgreicher Profilierung profiliert und visualisiert.

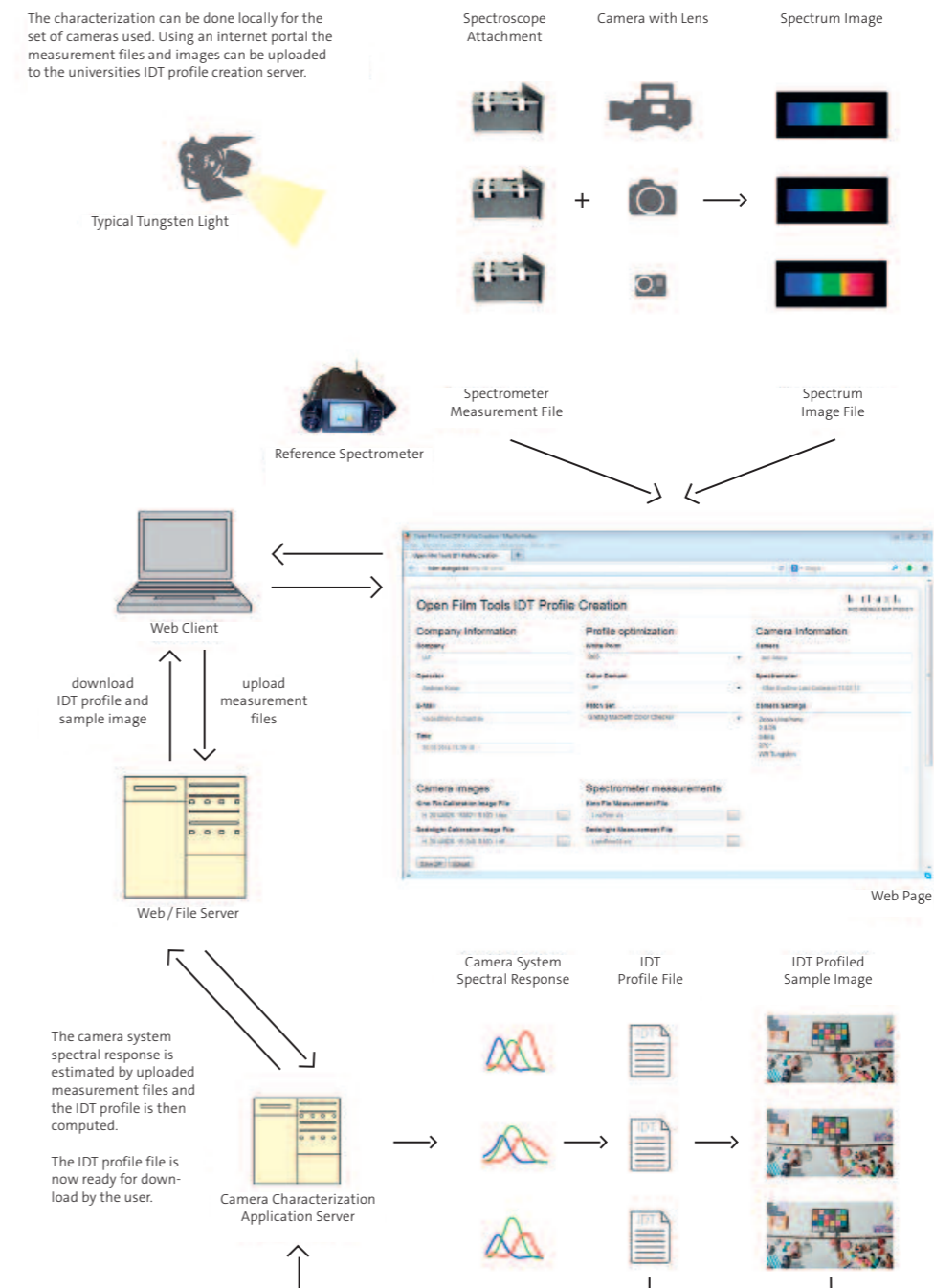


ABB. 27 Gesamtsystem zur Profilberechnung

Nach dem Betätigen des „Upload“-Knopfes werden die Metadaten sowie Dateireferenzen in einer XML-Datei abgespeichert und zusammen mit den Messdateien in einen Zip Ordner komprimiert. Der Upload der Zip-Datei auf dem Web-Server erfolgt in ein definiertes Verzeichnis. Im unteren Drittel der Abbildung 27 ist der „Camera Characterization Application Server“ abgebildet, welcher die Matlab basierte Profilberechnung implementiert. Hierzu wird über ein Shell-Script der Upload-Ordner zyklisch auf neue Uploads überprüft und ggf. die Berechnung über ein Matlab-Script gestartet. Das berechnete Profil und die Datei mit der ermittelten spektralen Empfindlichkeit werden am Ende im Upload-Ordner abgelegt und im Web-Browser durch Aktivierung des Download-Knopfes zur Verfügung gestellt. Parallel wird eine Information mit den Download-Links an die angegebene E-Mail-Adresse verschickt.

### 6.3 Anwender-Interaktion und Datenfluss

In Abbildung 28 ist das Hauptfenster zur Dateneingabe dargestellt. Im Bereich „Production Information“ können dabei filmproduktionsspezifische Metadaten erfasst werden. Die angegebene E-Mail wird benutzt, um den Anwender über das Ende der Profilberechnung zu informieren. Die Daten aus „Profile Optimization“ definieren die IDT-Profilierstellungsparameter: den Zielweißpunkt über die Normlichtarten, die Testfarben (z. Zt. Color Checker) sowie den Farbraum Lab oder Luv zur Optimierung. Die „Camera Information“ Parameter teilen sich auf in Metadaten und Parameter für die Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit (Brennweite sowie Sensordiagonale).

ABB. 28 Hauptansicht zur Dateneingabe der spektraldatenbasierten Profilerstellung

Im unteren Drittel befinden sich für die spektraldatenbasierte Profilerstellung der „Calibration Mode“ die Auswahl „spectral“. Dieser beinhaltet die Bereiche „Camera Images“ und „Spectrometer Measurements“. Sie dienen der Eingabe der Kamerabilder des Linien- (z. B. Kino Flo) sowie Temperaturstrahlers (z. B. Dedolight) und der zugehörigen Messungen des Referenzspektrometers. Schlussendlich kann ein Testbild im Bereich „Test Image“ angegeben werden. Dies wird bei erfolgreicher Profilerstellung profiliert und visualisiert.

Nach Betätigen des „Upload“-Knopfes werden die Daten clientseitig standardisiert erfasst. Zur Implementierung der Schnittstellen des Datenmodells zwischen den verschiedenen Subsystemen wurde dabei ein Zip-Dateiordner gewählt, der die durch den Anwender eingegebenen Messdaten und Bilddateien sowie ein XML mit den angegebenen Prozessparametern, Metadaten und Dateireferenzen enthält. Diese sind wie folgt im XML abgebildet (Fallbeispiel):

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" ?>
<OFT-IDT-Creation-Params>
  <ReportLog>
    <In>
      <Production>First Test Production</Production>
      <Company>HdM Stuttgart</Company>
      <Time>08.09.2014 10:40:34</Time>
      <Operator>Andreas Karge</Operator>
      <e-mail>karge@hdm-stuttgart.de</e-mail>
    </In>
  </ReportLog>
  <DeviceLog>
    <In>
      <Camera>Arri D21</Camera>
      <ImageFormat>Linear</ImageFormat>
      <Spectrometer>X-Rite EyeOne</Spectrometer>
      <Comment>ultraprime 1.8/28 25 f/s 270 arri raw</Comment>
    </In>
  </DeviceLog>
  <SpectralResponse ProcessID="1">
    <In>
      <LineCalibrationSpectrum>LineCali15042014.xls</LineCalibrationSpectrum>
      <LineCalibrationImage>LineTake021_Img0000050.TIF</LineCalibrationImage>
      <LightCalibrationSpectrum>LightCali15042014.xls</LightCalibrationSpectrum>
      <LightCalibrationImage>LightTake022_Img0000050.TIF</LightCalibrationImage>
    </In>
  </SpectralResponse>
  <IDTCreationConstraints ProcessID="2">
    <In>
      <WhitePoint>D65</WhitePoint>
      <ErrorMinimizationDomain>Luv</ErrorMinimizationDomain>
      <PatchSet>Gretag Macbeth Color Checker</PatchSet>
    </In>
  </IDTCreationConstraints>
</OFT-IDT-Creation-Params>
```

Der Zip-Ordner und das Prozess-XML werden dabei clientseitig erzeugt und danach auf dem Server im Upload-Verzeichnis in einem Ordner mit der gleichen GUID abgelegt (IDT-Task Verzeichnis). Dieser Datensatz kann auch zur Archivierung über den „Save ZIP“ Knopf abgespeichert werden.



ABB. 29 Konfigurationsoberfläche

Zusätzlich zur eben besprochenen Hauptansicht zur Dateneingabe gibt es noch eine Konfigurationsoberfläche „General Settings“ zu den im Allgemeinen konstanten Parametern (Abbildung 29). Zur Zeit kann darüber der Developer-Mode eingeschaltet werden. Dieser lässt im Hauptfenster dann auch die Eingabe spektraler Daten zum Zielweißpunkt und den Testfarben zu. Zur zukünftigen Untersuchung von Normspektralwertkurven anderer Standardbeobachter bei der IDT-Profilerstellung wurde das Feld „CIE Standard Observer“ definiert.

Neben der spektraldatenbasierten Methode bietet die Oberfläche des Haupteingabefensters auch die Möglichkeit, die chartbasierte IDT-Profilerstellung anzuwählen. Über den „Calibration Mode“ „Color Checker“ kann dann im Bereich „Color Checker“ die erforderliche Aufnahme dieser Testtafel eingegeben werden.



ABB. 30 Unterer, dynamischer Teil der Browser-Oberfläche für die Eingabe der Daten zur Color Checker basierten Profilerstellung

### Serverseitiger Zustand während Profilberechnung

Während der Profilberechnung durch den Matlab-Profilserverschreibt dieser in das IDT-Task Verzeichnis des Web/File-Servers eine XML-Datei, die den Anwender über den aktuellen Fortschritt informiert. Der Fortschritt wird im Web-Client Browser Fenster aktualisiert dargestellt (Abbildung 31 sowie folgendes XML-Fallbeispiel):

```
<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
<OFT-IDT-Creation-Params Version="1.0.0.0">
  <ProgressLog>
    <Out>
      <Message>
        <UserMessage>start camera characterization</UserMessage>
        <Level>User</Level>
        <Date>2014 09 22 1.54.45 PM</Date>
      </Message>
      <Message>
        <UserMessage>estimate camera spectral response</UserMessage>
        <Level>User</Level>
        <Date>2014 09 22 1.54.47 PM</Date>
      </Message>
      <Message>
        <UserMessage>compute IDT profile</UserMessage>
        <Level>User</Level>
        <Date>2014 09 22 1.54.56 PM</Date>
      </Message>
      <Message>
        <UserMessage>finish camera characterization</UserMessage>
        <Level>User</Level>
        <Date>2014 09 22 1.55.02 PM</Date>
      </Message>
    </Out>
  </ProgressLog>
</OFT-IDT-Creation-Params>
```

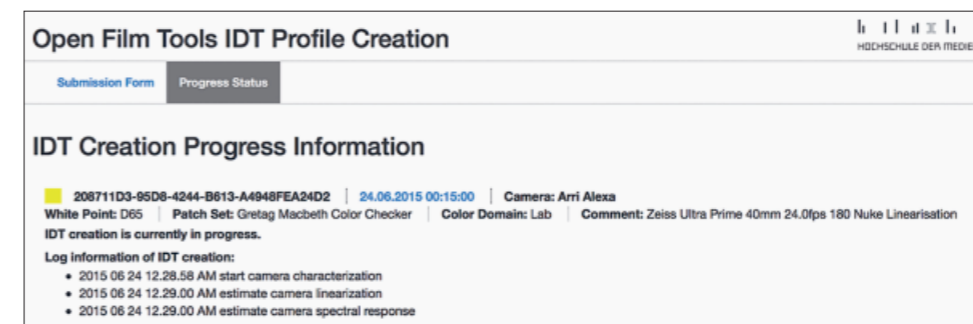


ABB. 31 Anzeige während der Berechnung

### Serverseitiger Zustand nach erfolgreicher Profilberechnung

Nach erfolgreicher Profilberechnung (Abbildung 32) werden im IDT-Task Ordner des Web/File-Servers zusätzlich die Datei mit der ermittelten spektralen Empfindlichkeit und das IDT-Kameraprofil abgelegt. Beim Download der Daten („Download IDT“) werden diese wiederum zusammen mit den Eingangsdaten in einen ZIP-Ordner komprimiert.

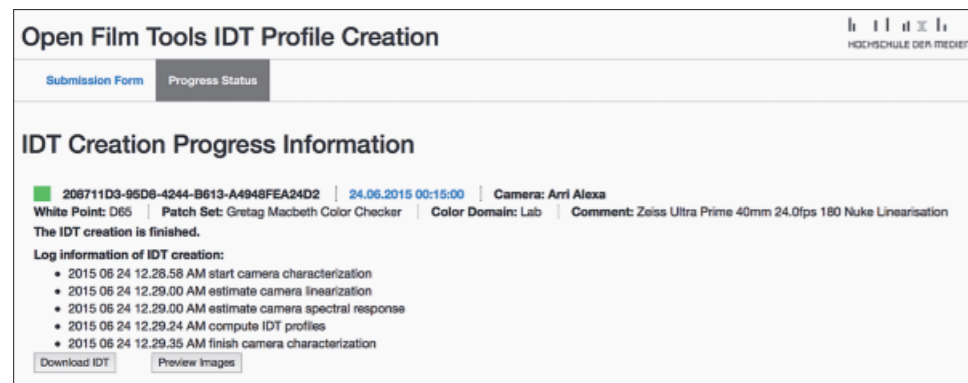


ABB. 32 Progress Anzeige nach erfolgreicher Profilberechnung

Der „Preview Images“-Knopf ermöglicht den Zugang zu einer Vorschau des profilierten Testbildes (Abbildung 33 – rechts unten). Darüber hinaus werden auch die linearen Rohdaten (links) sowie die profilierten Spektrenbilder dargestellt.

Render preview:  
208711D3-95D8-4244-B613-A4948FEA24D2

Dedolight Calibration



Linear

RGB

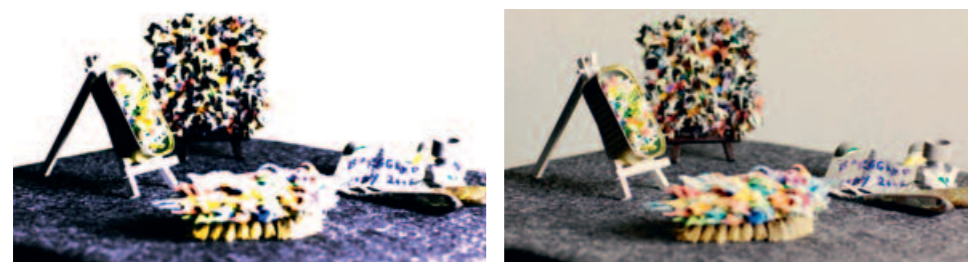
Kino Flo Calibration



Linear

RGB

Test Image



Linear

RGB

ABB. 33 Vorschauansicht mit unbearbeiteten und profilierten Bildern

# 7 Schlussbetrachtung

Eine wesentliche Voraussetzung für eine standardisierte und farbrichtige Bildwiedergabe ist die farbtechnisch korrekte Bildinformation bezüglich des Gesamtsystems bei der Bildaufnahme. Dieses System besteht dabei aus den verwendeten Lichtquellen, den aufgenommenen Objekten und den eingesetzten Kameras.

Die im Bildaufnahmesystem aufgezeichnete Bildinformation variiert bei Einsatz verschiedener Lichtquellen, Objekte und Kamerasysteme. Die Lösung für dieses Problem ist zur Zeit meist eine manuelle Nachbearbeitung des Materials. Die Farbe wird für ein bestimmtes Wiedergabesystem individuell korrigiert. Dies ist unökonomisch, nicht reproduzierbar und abhängig vom Bildwiedergabegerät.

Hier setzt der Ansatz der Open Film Tools an. Basierend auf dem ACES IDT-Standard der Academy of Motion Picture Arts and Sciences zur kameraunabhängigen und standardisierten Abspeicherung der Farbbildinformation und den Ergebnissen einer Befragung von Kameralauten wurden Methoden realisiert, um die standardisierte und automatisierte Nachbearbeitung des Filmmaterials durch die Erstellung und Anwendung von IDT-Kameraprofilen zu unterstützen. Die Eingangsdaten zur Profilerstellung sind die spektrale Charakteristik der Beleuchtung, die spektralen Remissionen der Aufnahmeobjekte und die spektrale Empfindlichkeit des Kamerasystems.

Im Rahmen des Projektes wurde deshalb eine Datenbank zur spektralen Strahlungsverteilung gängiger Filmlichtquellen erstellt (OFTP-SD 2015). Die Messungen basieren dabei auf einem eigens hierzu entwickelten Messprozess und Messaufbau. Dieser ermöglicht eine effiziente und reproduzierbare Messung und wurde erfolgreich eingesetzt. Die gewonnenen Daten stellen somit in ihrer Form die erste frei zugängliche spektrale Datenbank zu gängigen Filmlichtquellen dar! Diese Datenbank wurde erstmals auf der Color and Imaging Conference 2015 in Darmstadt dem Fachpublikum vorgestellt (Karge/Fröhlich/Eberhardt 2015) und stieß dabei u. a. bei der Firma ARRI und dem Bereich Lichttechnik der Universität Darmstadt auf starkes Interesse.

Außerdem wurde Hard- sowie Software entwickelt, die die kostengünstige und schnelle Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit von Kamerasystemen ermöglicht. Die Hardwarekomponenten sind dabei ebenfalls veröffentlicht (OFTP-IDT 2015) und der Aufbau der Hardware für den Anwender leicht realisierbar. Die hier vorgestellte prototypische Umsetzung der Hardware, deren Ansatz und die Umsetzung wurde erfolgreich getestet. Die bestimmte spektrale Empfindlichkeit einer Industriekamera und einer ARRI Alexa liegen dabei sehr nahe an den durch die Hersteller spezifizierten Daten.

Es wurde die standardisierte Erstellung von ACES IDT-Kameraprofilen implementiert. Diese berücksichtigt die spektrale Charakteristik der Filmlichtquellen, der Objekte und der Kamerasysteme. Die Profilerstellung steht dem Anwender über eine Web-Applikation frei zur Verfügung (OFTP-IDT 2015). Die Profile hängen dabei von der Kenntnis der spektralen Strahlungsverteilung der verwendeten Lichtquellen und der spektralen Empfindlichkeit der Kamerasysteme ab.

Zur Evaluierung der erstellten Profile wurde eine Testproduktion durchgeführt. In dieser kamen verschiedene Lichtquellen, Kameras sowie Objektive zum Einsatz. Das Rohfilmmaterial wurde mittels der erstellten IDT-Profile konvertiert. Für eine ARRI Alexa konnte dadurch unter anderem ein Farbstich, bedingt durch ein älteres Objektiv im Vergleich zu einem farbstichfreien Objektiv, erfolgreich korrigiert werden.

Die entwickelte Methode sowie die Web-Applikation zur Profilerstellung wurden auf der Conference on Animation, Effects, Games and Transmedia FMX 2015 in Stuttgart einem möglichen Anwenderkreis unter breiter Beachtung präsentiert. So zeigte insbesondere die Filmakademie Baden-Württemberg (Ludwigsburg) Interesse an einer Vorführung und einem Einsatz.

Durch den hier vorgestellten Stand der entwickelten Open Film Tools Methoden und Werkzeuge und ihrer prototypischen Umsetzung ist eine Basis geschaffen, die spektraldatenbasierte Profilerstellung einem breiten Kreis der Filmschaffenden zukünftig zur Verfügung zu stellen. Profile können nicht nur für neue High-End-Kameras sondern auch für Consumer-Geräte und ältere Kamerasysteme erstellt werden.

In einem nächsten Schritt sollte die Hard- sowie Software zur Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit verbessert werden. Die Lösungsansätze hierzu wurden abgeleitet und definiert. Zur Verifikation der umzusetzenden Optimierung steht das bereits gewonnene Filmmaterial der Testproduktion zur Verfügung. Daran anschließend sollte in einer abschließenden Verifikation die Profilierung des Materials verschiedener Kameras der Testproduktion erfolgen und ein Vergleich der gewonnenen Profile mit Referenzprofilen von Herstellern vorgenommen werden. Damit wäre dann auch die Basis zur Untersuchung von neuartigen Methoden geschaffen. So wäre es interessant, Kameraprofile dynamisch in Abhängigkeit von der Variation der Objektszene und der Lichtquellen zu erstellen.

- ALVAREZ, S./PRESA, L./KUNKEL, T./MASIA, B. 2015: Low Cost Recovery of Spectral Power Distributions. Spanish Computer Graphics Conference – Eurographics
- BABELCOLOR 2012: The Color Checker. Online abrufbar unter: [www.babelcolor.com/main\\_level/ColorChecker.htm](http://www.babelcolor.com/main_level/ColorChecker.htm)
- BAUMERT, G. 2011: Camera Condition Report
- CIE 2004: Colorimetry – Technical Report. Commission Internationale de L'Eclairage
- EMVA (EUROPEAN MACHINE VISION ASSOCIATION) 2010: Standard for Characterization of Image Sensors and Cameras.
- GE (GENERAL ELECTRIC GE LIGHTING) 2015: Spectral Power Distribution Curves. Online abrufbar unter: [www.gelighting.com/LightingWeb/na/resources/tools/lamp-and-ballast/spectral-power-distribution-curves.jsp](http://www.gelighting.com/LightingWeb/na/resources/tools/lamp-and-ballast/spectral-power-distribution-curves.jsp)
- GOLDSTONE ET AL. 2009: Procedure P-2009-001 Recommended Procedures for the Creation and Use of Digital Camera System Input Device Transforms. Academy of Motion Picture Arts and Sciences
- HUNT, R. W. G. /POINTER, M. R. 2011: Measuring Color. Chichester: John Wiley & Sons, S. 101
- ISO3664 2000: ISO 3664 Viewing Conditions – Graphic Technology and Photography.
- KINO FLO (KINO FLO LIGHTING SYSTEMS) 2015: Lamp Choices. Online abrufbar unter: [www.kinoflo.com/Top%20Buttons/Kino\\_U/FAQs.html#LampChoices](http://www.kinoflo.com/Top%20Buttons/Kino_U/FAQs.html#LampChoices)
- KARGE, A./FRÖHLICH, J./EBERHARDT, B. 2015: A Spectral Database of Commonly Used Cine Lighting. Proceedings of the 23th Color and Imaging Conference. Darmstadt, Germany.
- KRÜGER, U. 2006: Bestimmung ausgewählter Parameter und Kennwerte digitaler Kamerasysteme, in Photonik 2:2006, S. 66–69
- LINDBLOOM, B. 2015: Spectral Power Distribution of a CIE D-Illuminant. Online abrufbar unter: [www.brucelindbloom.com/index.html?Eqn\\_DIIlluminant.html](http://www.brucelindbloom.com/index.html?Eqn_DIIlluminant.html)
- OFTP-IDT 2015: Hochschule der Medien Stuttgart – Open Film Tools Kameracharakterisierung. Online abrufbar unter: [www.hdm-stuttgart.de/open-film-tools/kamera\\_charakterisierung](http://www.hdm-stuttgart.de/open-film-tools/kamera_charakterisierung)
- OFTP-SD 2015: Hochschule der Medien Stuttgart – Open Film Tools Spektraldatenbank von Filmlichtquellen. Online abrufbar unter: [www.hdm-stuttgart.de/open-film-tools/lichtquellen\\_spektren](http://www.hdm-stuttgart.de/open-film-tools/lichtquellen_spektren)
- OSRAM (OSRAM SYLVANIA) 2000: Spectral Power Distributions of SYLVANIA Fluorescent Lamps. Online abrufbar unter: [assets.sylvania.com/assets/documents/faq0041-0800.83f1d8de-3fe1-4d24-a209-d95f6cac74b9.pdf](http://assets.sylvania.com/assets/documents/faq0041-0800.83f1d8de-3fe1-4d24-a209-d95f6cac74b9.pdf)
- PADFIELD, J. 2015: Spectral Power Distribution (SPD) Curves. Online abrufbar unter: [research.ng-london.org.uk/scientific/spd/](http://research.ng-london.org.uk/scientific/spd/), National Gallery London
- PTB (PHYSIKALISCH TECHNISCHE BUNDESANSTALT BRAUNSCHWEIG) 2007: Zur Rotationsinvarianz von Reflexionsnormalen. Online abrufbar unter: [www.ptb.de/de/org/4/nachrichten4/2006/metro\\_6.htm](http://www.ptb.de/de/org/4/nachrichten4/2006/metro_6.htm)
- UEF (UNIVERSITY OF EASTERN FINLAND SPECTRAL COLOR RESEARCH GROUP) 2015: Spectral Database. Online abrufbar unter: <http://www.uef.fi/fi/spectral/artificial-lights>
- VES (VISUAL EFFECTS SOCIETY) 2014: Camera Report.



## Über die Autoren



ANDREAS KARGE (geboren 1971 in Halle/Saale) arbeitete 2013–2015 im Rahmen des Open Film Tools Projektes als akademischer Mitarbeiter an der Hochschule der Medien in Stuttgart. Seit Februar 2016 promoviert er am kooperativen Promotionskolleg Digital Media der HdM, der Universität Stuttgart und der Eberhard-Karls-Universität Tübingen mit dem Thema „Farbkorrektur digitaler Aufnahme- und Wiedergabegeräte“. Er studierte Medieninformatik sowie Photoingenieurwesen an der Fachhochschule Köln mit den Abschlüssen M.Sc. (2005) sowie Dipl.-Ing.(FH) (2001) und ist Mitglied der Society for Imaging Science and Technology.

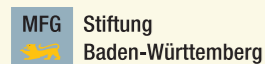


JAN FRÖHLICH (geb. 1979 in Freiburg) studierte Audiovisuelle Medien in Stuttgart. Von 2004 bis 2012 gestaltete er als Technischer Leiter die Entwicklung der CinePost-production GmbH von einem traditionellen Filmlabor zu einem führenden digitalen Postproduktionsdienstleister. Seit April 2012 promoviert er am kooperativen Promotionskolleg Digital Media der Hochschule der Medien in Stuttgart, der Universität Stuttgart und der Eberhard-Karls-Universität Tübingen mit dem Thema „High Dynamic Range“. Er ist Lehrbeauftragter für den Bereich Postproduktion und Mitglied der IS&T, SPIE, SMPTE, FK TG sowie dem Bundesverband Kamera (BVK).



BERND EBERHARDT ist Professor für Informatik, Computeranimation und computergraphisch erzeugte Bilder an der Hochschule der Medien in Stuttgart. Er studierte Mathematik und Physik an der Eberhard-Karls-Universität Tübingen, erwarb einen M.Sc. in Mathematics von der University of Massachusetts in Amherst und promovierte in Mathematik an der Universität Tübingen. Bernd Eberhardt habilitierte sich im Fach Informatik am Institut für Graphisch Interaktive Systeme an der Universität Tübingen und erhielt die Lehrbefugnis für Informatik. Er ist Mitglied der Gesellschaft für Informatik und der Eurographics Association sowie Sprecher des kooperativen Promotionskollegs Digital Media Production an der HdM, welches in Kooperation mit den Universitäten Stuttgart und Tübingen durchgeführt wird.

## Über die MFG Stiftung Baden-Württemberg



Die gemeinnützige MFG Stiftung wurde 2003 als Geschäftsbereich der MFG Medien- und Filmgesellschaft Baden-Württemberg ins Leben gerufen. Stifter ist die Wirtschafts- und Clusterinitiative bwcon (Baden-Württemberg: Connected). Das Ziel der MFG Stiftung ist die Aus- und Weiterbildung sowie die Förderung von Kunst, Kreativität und Kultur. Dabei sind ihre Schwerpunkte die Forschung und Entwicklung in den Bereichen Medien, IT und Film. Die MFG Stiftung vergibt Stipendien, leitet Forschungsprogramme und beauftragt wissenschaftliche Studien.

Mehr Informationen finden Sie im Internet unter <http://stiftung.mfg.de>

## Über die Reihe

Die Berichte aus dem Karl-Steinbuch-Forschungsprogramm präsentieren aktuelle Erkenntnisse und Lösungen an der Schnittstelle von Kreativwirtschaft und Informations- und Kommunikationstechnologie. Ziel der Reihe ist es, Forschungsergebnisse praxisorientiert aufzubereiten und damit neben Wissenschaftlern auch Anwenderbranchen anzusprechen.

Mit dem Karl-Steinbuch-Forschungsprogramm unterstützt die MFG Stiftung Baden-Württemberg seit 2011 besonders innovative Forschungsarbeiten an baden-württembergischen Hochschulen für Angewandte Wissenschaften. In fünf Ausschreibungsrunden (2011 – 2015) werden Projekte mit einer Laufzeit von bis zu zwei Jahren realisiert. Das Programm wird aus Mitteln der Zukunftsoffensive III des Landes Baden-Württemberg finanziert. Weitere Informationen und aktuelle Neuigkeiten finden sich im Internet unter [www.stiftung.mfg.de](http://www.stiftung.mfg.de).

