

# Color Difference Keying mit Ultimatte und Keylight

## Diplomarbeit

Ausgeführt zum Zweck der Erlangung des akademischen Grades  
**Dipl.-Ing. für technisch-wissenschaftliche Berufe**

am Masterstudiengang Digitale Medientechnologien an der Fachhochschule  
St. Pölten, **Masterklasse Postproduktion**

von:

**Sebastian Mayrhober, BSc**

dm141549

Betreuer/in und Erstbegutachter/in: Dipl.- Ing. (FH) Mario Zeller  
Zweitbegutachter/in: Mag. Franz Schubert

[Wien, 15.05.2018]

# Ehrenwörtliche Erklärung

Ich versichere, dass

- ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfe bedient habe.
- ich dieses Thema bisher weder im Inland noch im Ausland einem Begutachter/einer Begutachterin zur Beurteilung oder in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe.

Diese Arbeit stimmt mit der vom Begutachter bzw. der Begutachterin beurteilten Arbeit überein.

.....  
Ort, Datum

.....  
Unterschrift

# Kurzfassung

Diese Arbeit befasst sich mit der Videoeffekt-Technik „Keying“ und setzt dabei den Fokus auf das Color Difference-Verfahren und der Analyse der beiden Keyer Ultimatte und Keylight.

Im praktischen Teil wird ein idealisiertes und ein realistisches Testszenario entworfen, um die Performance der genannten Keyer bewerten und vergleichen zu können. Dies geschieht durch das Messen von Farbunterschieden zwischen Referenzbildern und Keying-Resultaten.

Die Analyse der Testergebnisse konnte die Grundfunktion, auf der das Color Difference Verfahren beruht, nachweisen: Je höher die Pegeldifferenz im Kanal der gewählten Backing-Farbe zwischen Vordergrund und Hintergrund ausfällt, desto besser ist das Keyingergebnis.

# Abstract

This paper addresses the visual effects-technique „keying“ and thereby focuses on the Color Difference-method and on the analysis of the two keyers Ultimatte and Keylight.

In the applied part an idealised and a realistic testing-environment is developed to be able to assess and compare the performance of mentioned keyers. This is done by measuring color differences between reference images and keying results.

The analysis of the test results proved the basic principle the color difference method is based on: The greater the level difference in the color channels opted by the backing color between the foreground and the background, the better the keying result.



# Inhaltsverzeichnis

|                                                           |           |
|-----------------------------------------------------------|-----------|
| Ehrenwörtliche Erklärung.....                             | i         |
| Kurzfassung.....                                          | ii        |
| Abstract.....                                             | iii       |
| Inhaltsverzeichnis.....                                   | iv        |
| <b>1 Einleitung.....</b>                                  | <b>1</b>  |
| 1.1 Forschungsziel, -methode.....                         | 2         |
| 1.2 Gliederung der Arbeit.....                            | 4         |
| 1.3 Begriffsdefinitionen und Hinweise zur Lesbarkeit..... | 5         |
| <b>2 Der Keying-Prozess.....</b>                          | <b>6</b>  |
| 2.1 Mattes erstellen.....                                 | 11        |
| 2.1.1 Rotoskopie.....                                     | 11        |
| 2.1.2 Prozedurale Keyingverfahren im Überblick.....       | 12        |
| 2.1.2.1 Luminance Keying.....                             | 13        |
| 2.1.2.2 Chrominance Keying.....                           | 15        |
| 2.1.2.3 Difference Matting.....                           | 16        |
| 2.1.2.4 Color Difference Keying.....                      | 17        |
| 2.1.2.5 3D Keying / Distance Map Keying.....              | 17        |
| 2.1.2.6 Alternative Keyingmethoden.....                   | 18        |
| 2.2 Spill und Spill Suppression.....                      | 19        |
| 2.3 Überblenden von Vordergrund und Hintergrund.....      | 23        |
| <b>3 Das Color Difference-Verfahren.....</b>              | <b>28</b> |
| 3.1 Ultimatte.....                                        | 33        |
| 3.2 Keylight.....                                         | 38        |
| <b>4 Experimente.....</b>                                 | <b>40</b> |
| 4.1 Ausgangssituation und Herangehensweise.....           | 40        |
| 4.2 Messung der Matte-Qualität.....                       | 43        |
| 4.3 Experiment 1: Idealisiertes Setting.....              | 51        |
| 4.3.1 Herangehensweise.....                               | 51        |

|                                                                       |            |
|-----------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.3.2 Testergebnisse und Analyse.....                                 | 53         |
| 4.3.2.1 Hautfarben vor Grün und Blau.....                             | 54         |
| 4.3.2.2 Haarfarben vor Grün und Blau.....                             | 55         |
| 4.3.2.3 Weitere Farben vor Grün und Blau.....                         | 56         |
| 4.4 Experiment 2: Realistisches Setting.....                          | 58         |
| 4.4.1 Überlegungen zum Experimentablauf.....                          | 59         |
| 4.4.2 Auswahl der Vordergrundobjekte.....                             | 62         |
| 4.4.3 Auswahl der Hintergründe.....                                   | 66         |
| 4.4.4 Belichtung Vordergrund / Hintergrund.....                       | 67         |
| 4.4.5 RAW-Aufzeichnung.....                                           | 69         |
| 4.4.6 Testumgebung und genutzte Hardware.....                         | 73         |
| 4.4.7 Darstellung der Hintergrundbilder.....                          | 78         |
| 4.4.8 Ablaufdokumentation: Testaufnahmen.....                         | 80         |
| 4.4.8.1 Testaufnahmen 1 – Abfilmen des TV-Bildschirms.....            | 81         |
| 4.4.8.2 Testaufnahmen 2 – Kameraeinstellungen und Materialanalyse.... | 84         |
| 4.4.8.3 Testaufnahmen 3 – RAW-Aufnahme und -Postproduktion.....       | 87         |
| 4.4.8.4 Testaufnahmen 4 – Abgleich der Vorschaumonitore.....          | 90         |
| 4.4.9 Ablaufdokumentation: Finale Aufnahmen.....                      | 96         |
| 4.4.10 Materialaufbereitung zur Auswertung.....                       | 107        |
| 4.4.11 Testergebnisse und Analyse.....                                | 109        |
| 4.4.11.1 Hautfarben vor Grün und Blau.....                            | 111        |
| 4.4.11.2 Haarfarben vor Grün und Blau.....                            | 113        |
| 4.4.11.3 Weitere Farben vor Grün und Blau.....                        | 115        |
| 4.5 Interpretation der Ergebnisse.....                                | 117        |
| <b>5 Fazit und Ausblick.....</b>                                      | <b>120</b> |
| <b>6 Anhang.....</b>                                                  | <b>124</b> |
| 6.1 Literaturverzeichnis.....                                         | 124        |
| 6.2 Abbildungsverzeichnis.....                                        | 131        |
| 6.3 Tabellenverzeichnis.....                                          | 133        |

# 1 Einleitung

Gegenstand der Arbeit ist eine detaillierte Betrachtung der Videobearbeitungstechnik "Color Difference Keying" – ein Vorgang, welcher das Ziel verfolgt, Bildelemente von einem Hintergrund zu trennen, um sie später, im Zuge des Compositings, beliebig über andere Bilder legen zu können. Als Resultat entsteht eine Maske (ein Alphakanal), welche für Bildbereiche Transparenz-Werte definiert. Der Vorgang umfasst jedoch weiters auch die Farbkorrektur des freigestellten Materials ("Fill"), da dessen Farbwerte durch den beispielsweise grün-beleuchteten Hintergrund teils beträchtlich kontaminiert werden und diese Farbverschiebung wieder extrahiert werden muss (dieser Teil des Keyings wird u. a. als Despilling, Spill-/Flare-Suppression bezeichnet), sowie die eigentliche Überblendung dieses Fills mit einem beliebigen Hintergrund. Es existieren eine Reihe von Möglichkeiten Bildmaterial zu keyen – sowohl in Form dedizierter Keyinghardware, als auch über verschiedenste Softwarelösungen. Diese Arbeit stellt die wichtigsten Keyingverfahren überblicksmäßig dar und setzt den Fokus auf die zwei populären Softwarelösungen Ultimatte und Keylight. Der gesamte Keyingvorgang ist insofern problematisch, als das Zusammenspiel einer Vielzahl an Komponenten zum Endresultat beiträgt: vom Setup der Keyingumgebung, zur Videoaufnahme bis hin zum eigentlichen Freistell-Vorgang. Ohne ausreichendes, technisches Know-How und umfassende Erfahrungswerte, kann sich der Prozess zeitlich stark in die Länge ziehen, in dem beispielsweise mühsam Bild für Bild manuell Korrekturen vorgenommen werden müssen.

Ziel dieser Arbeit ist es, anhand des Studiums einschlägiger Literatur ein tiefergehendes Verständnis und anhand praktischer Tests Erfahrungswerte über die

Arbeitsweise der zwei Color Difference Keyer Ultimatte und Keylight zu generieren. Dabei werden zum einen Ergebnisse theoretischer Natur (mit generisch erzeugtem Bildmaterial) analysiert, als auch ein realitätsnahes Setting simuliert, unter Verwendung einer Videokamera, 3-Punkt-Ausleuchtung und Objekten, die verschiedenste Farbtöne, sowohl opak als auch transparent, abbilden. Durch die Erstellung von Referenzbildern, welche ohne Einsatz der Keyingtechnik zustande kommen, und dem Vergleich der Keyingresultate mit diesen, soll die Leistung der jeweiligen Keyer messbar und eine objektive Beurteilung der Keyingqualität ermöglicht werden.

Keying spielt im Bereich von Bewegtbildproduktionen, im speziellen bei der Erstellung von Visual Effects, eine wichtige Rolle. Ein Blick auf die hohe Popularität der Unterhaltungsindustrie (Kino, Quality TV-Serien, Video Games, etc.) macht die Relevanz der dahinterliegenden Technik deutlich. Die durch diese Arbeit gewonnenen Testergebnisse und qualitativen Aussagen zum Thema „Keying mit dem Farbdifferenzverfahren“ ermöglichen Compositing-Artists Keyingszenarien vorab besser einschätzen und den gesamten Prozess somit effizienter abhandeln zu können.

### 1.1 Forschungsziel, -methode

Grundlegendes Forschungsziel ist die Beantwortung folgender Fragen:

- Wie unterscheidet sich ein real aufgenommenes Bild mit Vordergrund- und Hintergrund-Objekten von einer exakt nachgestellten, aber mithilfe der Keying-Technik zusammengefügt Szene, wenn dabei von den Standard-Einstellungen der Keying-Software ausgegangen wird?
- Wie unterscheiden sich die zwei Software-Keyer Ultimatte und Keylight theoretisch und praktisch?

Die Einschränkung „mit Standard-Einstellungen“ bedeutet, dass der Keying-Software lediglich der Farbton des Szenenhintergrunds mitgeteilt wird und dient

dazu, eine gleichwertige Grundlage für die Analyse der Basisperformance der Keyer zu schaffen.

Erreicht werden soll das Forschungsziel einerseits durch eine qualitative Analyse themenspezifischer Referenzwerke, Artikel, Interviews, usw. Und andererseits durch die Durchführung eines praktischen Experiments mit den zwei Software-Keyern Ultimatte und Keylight – aufgesplittet in zwei Teile:

1) Zu Beginn wird erforscht, wie die Keyer grundsätzlich mit "störungsfreiem", computergenerierten Bildmaterial umgehen. D.h. mit einer Bildbearbeitungssoftware werden einfärbige Hintergrundflächen erstellt (mit reinem Grün, reinem Blau, etc.) und darüber Farbflächen und Farbverläufe platziert (z.B. von jeweils Rot, Grün und Blau zur Keyingfarbe, mit versch. Sättigungsstufen der Farben und versch. Helligkeitsabstufungen der Farben). Anschließend wird u. a. untersucht, welche Transparenzwerte die Keyer in diesem "idealen" Setting generieren und auch ob und wie die Despilling-Algorithmen der Keyer die Farbwerte der resultierenden Füll-Bereiche beeinflussen.

2) Der Ablauf des zweiten, praxisnäheren Teils sah wie folgt aus:

In einem ersten Schritt werden Referenzbilder erstellt: Sie setzen sich aus Vordergrundelemente, welche verschiedenste Farben und Transparenzwerte abbilden, und unterschiedlichen Hintergrundflächen zusammen (einfärbig, mit Foto-Motiven, etc.). Von vorne abgefilmt, ergeben sich so "natürliche" Kompositionen, die eindeutig zeigen, wie sich die Vordergrundobjekte mit den Hintergrundflächen „vermischen“.

In einem weiteren Schritt werden Vordergrund und Hintergründe separat aufgenommen. Die Kamera wird dabei nicht verändert. Alles wird stets aus dem selben Winkel, mit den exakt gleichen Ausschnitten aufgezeichnet. Zuletzt werden die Vordergrundelemente vor gleichmäßig ausgeleuchteten Hintergrundflächen aufgenommen (Rot, Grün, Blau, etc.). Diese Aufnahmen entsprechen „klassischen“ Greenscreen-/Bluescreen-/etc.-Aufnahmen.

Um die Qualität der zwei besagten Software-Keyer vergleichen zu können, werden

diese nun mit ihren Standardeinstellungen auf das zu keyende Material angewandt. Dabei werden ausschließlich die gemessenen Farbwerte der jeweils verwendeten Hintergrundfarbe gesetzt. Diese Keying-Resultate werden dann über die separaten Aufnahmen der Fotomotiv-Hintergründe gelegt und man erhält so Kompositionen, die den ursprünglichen Referenzbildern sehr nahe sein sollten. Festzustellen, wie nahe, wird Teil der Arbeit sein.

Im Detail werden hierbei die auftretenden Differenzen in den verschiedenen Farbkanälen in relevanten Bildbereichen berechnet und diese Daten schließlich statistisch so aufbereitet, dass sie miteinander verglichen werden können. Die auf diesem Wege objektiv-ermittelten Wertungen der Keyingqualität werden zuletzt zur Diskussion gestellt und mit subjektiven Eindrücken des Autors dieser Arbeit ergänzt.

## 1.2 Gliederung der Arbeit

Das aktuelle Kapitel stellt die Arbeit und ihre Ziele vor. Weiters werden vorab einige thematisch relevante Begriffe vorgestellt und definiert.

Das zweite Kapitel stellt den gesamten Prozess des Keyings allgemein vor und gibt einen Überblick über verschiedene, gängige Verfahren.

Kapitel 3 befasst sich schließlich mit der Theorie hinter dem Kernthema dieser Arbeit – dem Color Difference Keying-Verfahren – und stellt weiters die beiden populären Vertreter dieser Kategorie, Ultimatte und Keylight, näher vor.

Im Kapitel 4 ist die Umsetzung der beiden praktischen Experimente dokumentiert. Herangehensweisen, Durchführung, Ergebnisse und Analysen werden jeweils im Detail dargestellt.

Im finalen Kapitel 5 werden die gesammelten Erkenntnisse verwendet, um die Forschungsfragen zu klären und Handlungsempfehlungen im Bezug auf die Anwendung des Color Difference-Verfahrens gegeben. Vorschläge des Autors über mögliche Anknüpfungspunkte für fortsetzende Forschungsarbeiten bilden den Abschluss dieser Arbeit.

## 1.3 Begriffsdefinitionen und Hinweise zur Lesbarkeit

Unter „**Keying**“ versteht man den algorithmus-gestützten Vorgang ein Objekt von seinem Hintergrund zu trennen, um es in weiterer Folge mit einem anderen zu kombinieren.

Als „**Keyer**“ werden Computerprogramme oder Geräte bezeichnet, mit deren Hilfe Masken erstellt werden bzw. „gekeyt“ wird.

„**Backing**“ bezeichnet die gleichmäßige Hintergrundfarbe, die bei Keying-Videoaufnahmen eingesetzt wird. Also „Grün“ im Falle von Greenscreen-Aufnahmen, „Blau“ bei Bluescreen-Aufnahmen, usw.

„**Rec.709**“ wird als Abkürzung für „Recommendation ITU-R BT.709-6“ verwendet.

„**RGB**“ steht für die Farben Rot, Grün und Blau.

„**CMYK**“ steht für die Farben Cyan, Magenta, Gelb (Yellow) und Schwarz (Black).

Folgende Begriffe werden synonym verwendet:

- Color Difference-Verfahren / Farbdifferenzverfahren
- Backing / Backing-Farbe / Hintergrundfarbe / Keyingfarbe
- Key / Matte / Alpha

## 2 Der Keying-Prozess

Keying zählt zu den populärsten Techniken im Bereich der Visual Effects. Man versteht darunter den Prozess, gewisse Objekte von deren Hintergründen zu extrahieren, indem eine *Maske / Matte* angefertigt wird, die die transparenten Bereiche im Originalbild definiert (Schultz, 2006, S. 5).

Das American Cinematographer Manual definiert den Vorgang folgendermaßen: Computersoftware verwendet die Unterschiede zwischen den Farben im Vordergrund und denen im Hintergrund um folgende vier Aufgabenbereiche zu bewältigen (Goi, 2013, S. 606):

1. *Optimally it will correct nonuniformity in the backing (the screen correction function, not available in all software packages).*
2. *It must create a silhouette matte (the alpha channel) of the foreground action.*
3. *It must create a processed foreground in which all traces of the backing color are suppressed (turned black or neutralized), while the foreground color is carried through unchanged.*
4. *Finally, it must bring all the elements together into a believable composite.*  
(Goi, 2013)

Im Sprachgebrauch haben sich einige Begriffe und Redewendungen rund um das Thema Keying etabliert. Im deutschsprachigen Raum werden zudem oft auch die jeweils englischen Varianten verwendet. Man „erstellt eine Maske / einen Alpha-Kanal (to create a mask / matte / an alpha channel)“, „stellt etwas frei / keyed etwas (to pull a matte / mask / key, keying / matting)“, usw. Unter „eine Maske erstellen /



etwas freistellen“ versteht man mehrheitlich das händische, manuelle Erstellen von Transparenz-Informationen eines Bildes. Läuft der Prozess prozedural ab und betrifft eine Folge von Bildern, ist mehrheitlich von „etwas keyen“ (to pull a matte, to key) die Rede (Brinkmann, 2008, S. 189). Die Begriffe *matte*, *mask* und *alpha channel* werden oft synonym verwendet. Adobe definiert in seinem englischen Benutzerhandbuch der Software After Effects einen *alpha channel* als einen Bildkanal, der Transparenz-Informationen enthält. Eine *matte* sei eine Ebene, welche die transparenten Bereiche einer Ebene festlegt. Ein *alpha channel* würde oft als *matte* verwendet. Als *mask* wiederum definiert Adobe einen Pfad, der erstellt wird um, u. a., den Alphakanal einer Ebene zu modifizieren; also letztlich um festzulegen, wo eine Ebene transparent ist und wo nicht („Alpha channels, masks, and mattes“, 2017). Die Firma Foundry bezeichnet in seinem User Guide zur Software Nuke Pfade, die zum Zwecke der Erstellung von Transparenzinformationen erstellt werden, ebenfalls als *masks*. Diese werden mithilfe der Nodes *Roto* und *RotoPaint* generiert und stehen dann innerhalb dieser Funktionen als *alpha channels* zu Verfügung. Andere Funktionen können diesen alpha channels dann wiederum als *mattes* verwenden („Calling Channels“, o.D.).

Erwähnenswert ist weiters, dass unter „Keying“ üblicherweise nicht nur der Vorgang der Generierung einer Matte verstanden wird, sondern meist der gesamte Prozess – also inklusive der Zusammenführung des Keying-Resultats mit einem Hintergrund und die Anpassung der Farben – gemeint ist (Brinkmann, 2008, S. 189). Die Spaltung zwischen den Begriffen „Matte“ und „Key“ hat historische Gründe: „Matte“ stammt aus Zeiten des analogen Films und bezeichnet Streifen monochromen Filmmaterials, welche physisch über den Farbfilm gelegt wurden, um Teile des Films abzudecken (Schultz, 2006, S. 5; Smith & Blinn, 1996, S. 259). „Key“ hat sich im digitalen Zeitalter im Zusammenhang mit Video etabliert (Brinkmann, 2008, S. 189).

Steve Wright, ein Senior Visual Effects- und Compositing-Artist mit über 20 Jahren Berufserfahrung, weist darauf hin, dass das Keyen von Bildmaterial, selbst bei perfekt präparierten Hintergründen, lediglich als „cleveres Schummeln“ betrachtet werden kann – ein mathematisch inkorrekt Prozess, der glücklicherweise in vielen

Situationen zu brauchbaren Resultaten führt (Wright, 2010, S. 15). Dies wird deutlich, betrachtet man folgende, allgemeine Compositing-Formel, welche 1984 von den Informatikern Tom Duff und Thomas Porter im Rahmen des Computer Graphics Project der Lucasfilm Ltd. in der wissenschaftlichen Abhandlung „Compositing Digital Images“ aufgestellt wurde:

$$C = \alpha F + (1 - \alpha)B$$

(Porter & Duff, 1984, S. 256)

C steht dabei für den resultierenden Pixelwert (composition pixel), F für die Vordergrundfarbe, B für die Hintergrundfarbe und  $\alpha$  für den Transparenzwert. Christopher Schulz merkt an, dass in aktuellen digitalen Bildern Pixelinformationen meist in 3 Ebenen vorliegen; Rot, Grün und Blau. Bezieht man diesen Umstand mit ein, wird aus der Formel eine Gleichung mit 10 anstatt 4 Variablen (die Kanäle werden beispielhaft X, Y und Z bezeichnet):

$$\begin{pmatrix} C_X \\ C_Y \\ C_Z \end{pmatrix} = \alpha \begin{pmatrix} F_X \\ F_Y \\ F_Z \end{pmatrix} + (1 - \alpha) \begin{pmatrix} B_X \\ B_Y \\ B_Z \end{pmatrix}$$

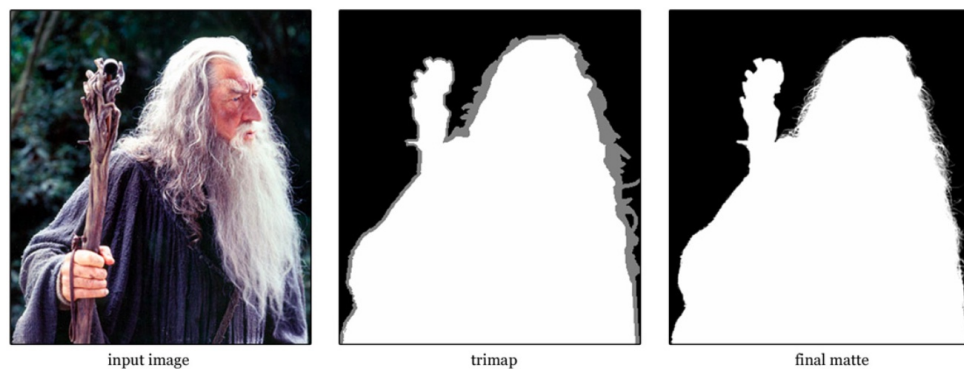
(Schultz, 2006, S. 5-6)

C ist das Ausgangsmaterial; im Falle eines Keying-Vorgangs also das bekannte, aus Vordergrund und Hintergrund „zusammengesetzte“ Bild. Keying kann also als ein Problem mit sieben unbekannten Variablen verstanden werden (Chuang, 2004, zitiert nach Schultz, 2006, S. 5-6). Zur Lösung dessen setzen Schulz zufolge viele Keying-Techniken auf das Vorhandensein mindestens einer der folgenden Bedingungen (Schultz, 2006, S. 5-6):

- **Ein kontrollierter Hintergrund:** B kann als bekannt bezeichnet werden, wenn es sich dabei um eine einzelne Farbe handelt (wie im Falle von Bluescreen, Greenscreen etc.) oder um ein Bild der Szene, in dem das freizustellende Objekt nicht vorhanden ist. Auf diesem Weg reduziert sich die Gleichung auf nun mehr 4 Unbekannte – mit dem Nachteil, dass äußerst strenge Studio-Bedingungen vorherrschen müssen (die Hintergrundfläche

muss perfekt gleichmäßig ausgeleuchtet sein) (Schultz, 2006, S. 5).

- **Mehrfache Aufzeichnungen:** Wird das gewünschte, freizustellende Objekt vor mehreren bekannten Hintergründen aufgenommen, ist es möglich die Technik der *Triangulation* einzusetzen (Alvy Ray Smith & James Blinn, 1996, zitiert nach Schultz, 2006, S. 5). Die Anwendung ist allerdings beschränkt auf unbewegliche Motive und erfordert ebenfalls eine perfekt-gleichmäßige Beschaffenheit des Hintergrunds (Schultz, 2006, S. 5).
- **Ein Vorwissen über Vordergrund- und Hintergrundbereiche im Bild:** Wird durch Benutzereingabe definiert, welche Bereiche im Bild zum Vordergrund und welche zum Hintergrund zählen, so verringert sich der *unbekannte* Bereich im Bild auf die Kante des freizustellenden Objekts. Die entstehenden Bildinformationen werden „trimaps“ bezeichnet:



*Abbildung 1: Trimap-Beispiel (mittleres Bild). Weiß definiert Vordergrundbereiche, schwarz Hintergrundbereiche und graue Flächen stellen unbekannte, zu berechnende Bereiche dar (Schultz, 2006, S. 6).*

Verschiedene Methoden existieren, um anhand dieser maps Transparenzwerte für die unbekannte Bereiche zu berechnen (Schultz, 2006, S. 5). Eine nähere Betrachtung dieser wäre für das Forschungsgebiet der vorliegenden Arbeit zu weitreichend. Für weitere Informationen hierzu wird an die Arbeiten „Video Matting of Complex Scenes“ (Chuang, Agarwala, Curless, Salesin & Szeliski, 2002) und „A bayesian approach to digital matting“ (Chuang, Curless, Salesin & Szeliski, 2001) verwiesen.

## 2 Der Keying-Prozess

Der Keying-Prozess lässt sich in zwei voneinander unabhängige Aufgabenbereiche gliedern bevor deren Ergebnisse zu einem Resultat zusammengeführt werden, den Maskenbereich und den Farbkorrekturbereich:

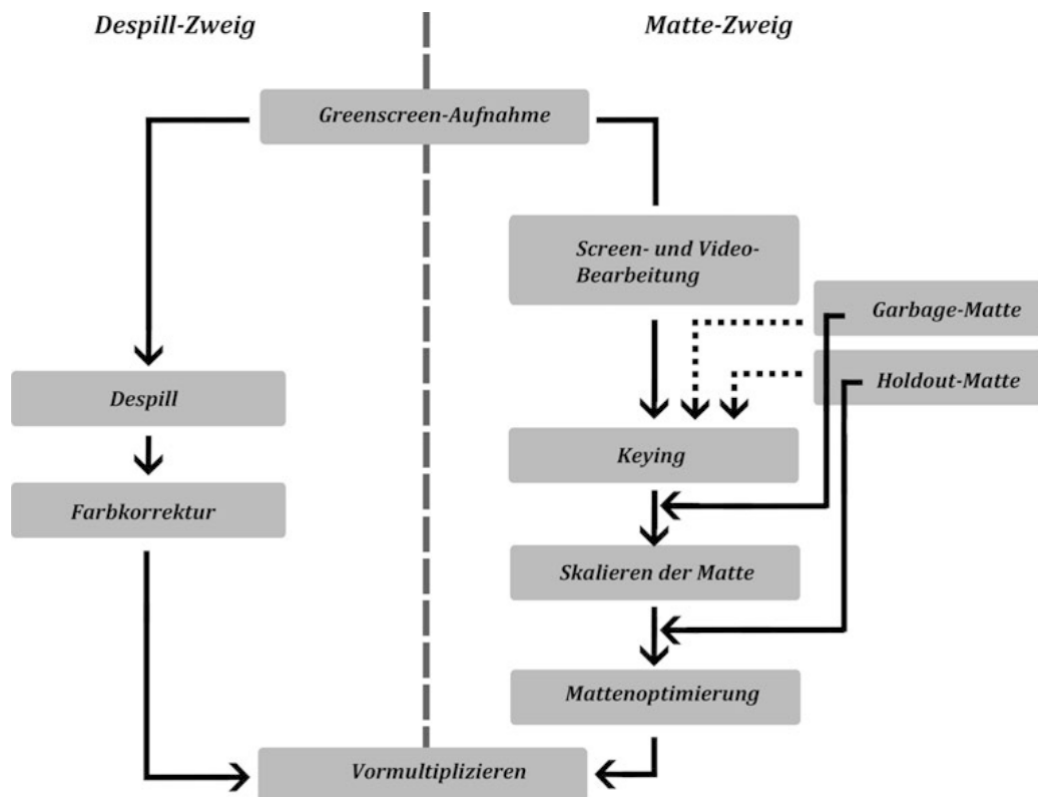


Abbildung 2: Keyingworkflow (Hasche & Ingwer, 2016, S. 267).

Oft wird der Vorgang der Einfachheit und Schnelligkeit halber zusammengefasst betrachtet bzw. geht automatisiert vonstatten – im professionellen Bereich werden die zwei Zweige jedoch meist getrennt voneinander bearbeitet, wodurch sich qualitativ höherwertigere Keyingresultate erzielen lassen (Hasche & Ingwer, 2016, S. 266).

Die 3 Aufgabenbereiche Matte-Generierung, Spill und Despilling und Überblendung von Vordergrund und Hintergrund werden in den folgenden Abschnitten 2.1, 2.2 und 2.3 betrachtet.

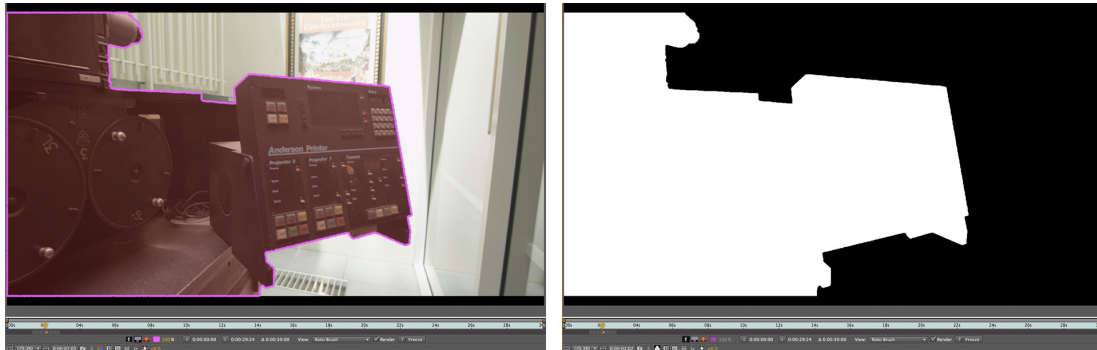
### 2.1 Mattes erstellen

Unter „Mattes“ versteht man Grafiken, in denen Transparenzinformationen in Form von Graustufenwerte abgebildet werden (siehe Abbildung 1). Durch sie ist es möglich, mehrere Bilder miteinander zu kombinieren. Verschiedene Techniken haben sich im Laufe der Zeit rund um die manuelle und prozedurale Generierung von Mattes entwickelt, die sich jeweils besonderer Eigenschaften wie beispielsweise Helligkeits- oder Farbunterschiede von Bildern bedienen, um daraus Informationen über den Grad der Transparenz bestimmter Bildbereiche zu gewinnen (Hasche & Ingwer, 2016, S. 249).

Keine Matte-Generierungstechnik ist für alle Situationen gleichermaßen geeignet. Für eine effiziente und optimierte Arbeitsweise ist es also sinnvoll, die verschiedenen Techniken zu studieren und sie fallabhängig einzusetzen (Wright, 2010, S. 15). Unterschieden kann dabei werden zwischen *manuellen, händischen* (Rotoskopie) und *prozeduralen*, d.h. auf bestimmten Regeln basierenden, Verfahren (Wright, 2010, S. 73). In folgenden Unterkapiteln wird ein Überblick über populäre Methoden geboten. Das Farbdifferenzverfahren stellt das Kernthema dieser Arbeit und wird deshalb gesondert im Abschnitt 3 behandelt.

#### 2.1.1 Rotoskopie

Rotoskopie bezeichnet den Vorgang Objekte in Bildern gezielt durch manuelles Erstellen von Masken (Pfade) zu selektieren bzw. freizustellen. Im Fall von Bewegtbildern, müssen die Masken Frame für Frame angepasst werden. Dieser ursprünglich sehr zeitintensive und mühselige Vorgang kann inzwischen softwareunterstützt erleichtert werden, in dem die Pfadformen nur mehr für besondere Schlüsselbilder angefertigt werden und ein Algorithmus die Erstellung der Zwischenzustände übernimmt (Brinkmann, 2008, S. 192).



*Abbildung 3: Rotoskopie: Links: Auswahl eines Objektes im Bild.  
Rechts: Resultierende Matte (Seymour, 2011)*

Ron Brinkmann, Visual Effects Supervisor und Mitentwickler der Digital Compositing Software *Shake*, zufolge, genießt die Technik und deren Ausführung einen ungerechtfertigt niederen Ruf in der Branche, ist sie doch im Produktionsalltag außerordentlich wichtig und unverzichtbar. Ihr Einsatz entscheidet oftmals über Erfolg oder Misserfolg einer Szene (Brinkmann, 2008, S. 192).

Neben allgemeinen Korrekturarbeiten oder Entfernungen von unerwünschten Objekten in Szenen, kommt die Technik vor allem bei der Entfernung von Seilen oder Sicherungskonstruktionen, wie sie beispielsweise für Stunt-Einstellungen notwendig sind, zum Einsatz. Essentiell ist sie auch bei der Konvertierung von 2D-Filmaufnahmen nach Stereo3D, da hier einzelne Bildelemente zuerst vom Hintergrund ausgeschnitten werden müssen, um sie später im dreidimensionalen Raum positionieren zu können (Hasche & Ingwer, 2016, S. 251).

### **2.1.2 Prozedurale Keyingverfahren im Überblick**

Bei prozeduralen Keyingvorgängen kommen Software-Algorithmen zum Einsatz, welche bestimmte Bildinformationen, wie Farb- oder Helligkeitsunterschiede, zur Erstellung von Mattes verwenden (Hasche & Ingwer, 2016, S. 260). Deren Effizienz ist dabei stark abhängig von den Bildinhalten selbst. Unterstützt werden diese durch den Umstand, dass wir im Vorfeld normalerweise bereits wissen, dass wir

bestimmte Objekte im Bild später freistellen wollen und deshalb die Aufnahmesituation dahingehend optimieren (Stichwort Green-/Bluescreen). Es existieren jedoch auch Methoden Objekte von beliebigen Hintergründen zu isolieren (Brinkmann, 2008, S. 206-207).

Im Folgenden werden wichtige Verfahren kurz dargestellt. Für tiefergehende Informationen sei an Literatur der Autoren Steve Wright und Ron Brinkmann verwiesen, beispielsweise „Digital Compositing for Film and Video“ (Wright, 2010) und „The Art and Science of Digital Compositing“ (Brinkmann, 2008). Für theoretisch-mathematische Grundlagen der dahinterliegenden Algorithmen bildet die Arbeit „New Models and Methods for Matting and Compositing“ von Yung-Yu Chuang einen guten Ausgangspunkt (Chuang, 2004).

### **2.1.2.1 Luminance Keying**

Beim Luminance Keying dienen die Helligkeitswerte von Bildern als Grundlage für die Erstellung von Mattes. Ein Schwellenwert wird definiert, und abhängig davon, ob ein Bildpunkt heller oder dunkler als dieser Wert ist, wird dieser als zum Vordergrund oder zum Hintergrund gehörend gewertet. Durch Invertieren der resultierenden Matte lässt sich diese Definition später ggf. recht einfach umkehren (Schmedes, 2014, S. 25).

Ein Luma-Keyer berechnet anfangs ausgehend von den RGB-Kanälen eine monochrome Version des Bildes, also ein 1-Kanal Graustufenbild (Wright, 2010, S. 16). Da das menschliche Auge sensibler auf die Primärfarbe Grün im Vergleich zu Rot und Blau reagiert, würde eine simple Drittelung jeder dieser Kanäle und anschließendes Aufsummieren dieser Helligkeiten zu einem falsch anmutenden Ergebnis führen. Eine grüne Wiese würde beispielsweise zu dunkel erscheinen, da der Grün-Wert bei einer 33 prozentigen Beteiligung unterrepräsentiert würde und ein blauer Himmel zu hell aufgrund der Überrepräsentation (Wright, 2010, S. 19). In der älteren Spezifikation ITU-R BT.601 für Standard-Fernsehen wird die Luminanz-Berechnung nach folgendem Schlüssel definiert:

## 2 Der Keying-Prozess

$$L_{SD} = 0,299 \text{ Rot} + 0,587 \text{ Grün} + 0,114 \text{ Blau}$$

Die modernere, für HD-Fernsehen ausgelegte Spezifikation ITU-R BT.709 gewichtet den Grün-Anteil noch stärker:

$$L_{HD} = 0,2126 \text{ Rot} + 0,7152 \text{ Grün} + 0,0722 \text{ Blau}$$

Durch den Einsatz nur eines Schwellenwertes entstehen erwartungsgemäß harte Kanten bei der Matte-Generierung. Deshalb erlauben viele professionelle Tools die Angabe weiterer Parameter, die weiche Übergänge zw. Vordergrund und Hintergrund ermöglichen. Bezeichnet werden diese u.a. als *innerer* und *äußerer* Schwellenwert/Maskendichtewert (Wright, 2010, S. 17) oder auch *softness* und *tolerance* (Schultz, 2006, S. 07).

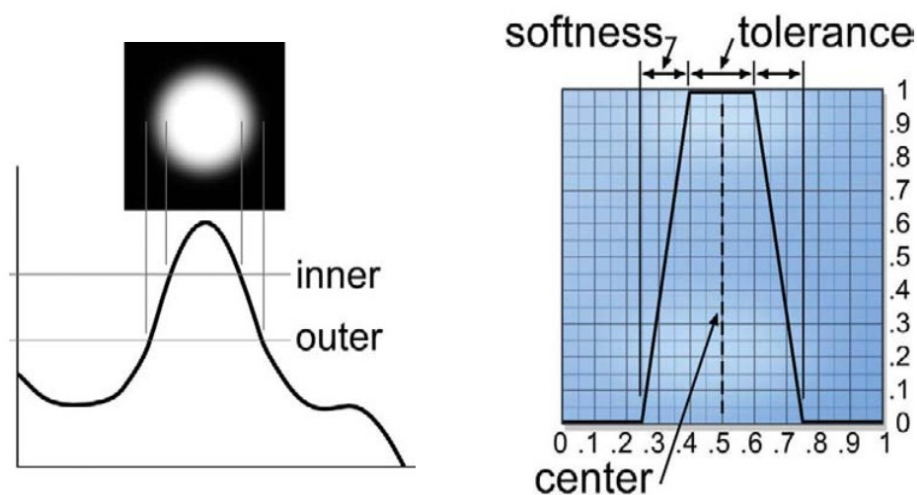


Abbildung 4: Innere und äußere Schwellenwerte, bzw. Softness und Toleranz-Werte ermöglichen weiche Verläufe innerhalb von Mattes.  
Bildquelle links: (Wright, 2010, S. 18), rechts: (Wright, 2010, S. 22).

Wichtige Anwendungsbereiche von Luma-Keying sind etwa die Farbkorrektur bestimmter Bildbereiche, das Ersetzen von Himmelsbereichen oder Spezial-situationen, wie beispielsweise der Extrahierung von schwarzem Text von einem weißen Hintergrund (Hasche & Ingwer, 2016, S. 260; Schultz, 2006, S. 7).



### 2.1.2.2 Chrominance Keying

Chrominance-Keying kann als Überbegriff für Keying-Verfahren verstanden werden, die Mattes auf Basis von Farbinformationen im Bild generieren. Pixel, die in einen bestimmten Farbbereich fallen, werden zum Vordergrund gezählt. Das Bild wird dabei intern von RGB in den für diesen Prozess geeigneteren HSV-Farbraum gewandelt (Wright, 2010, S. 23). Dieser definiert Farben über die Attribute *Hue* (Farbwert), *Saturation* (Sättigung) und *Value* (Hellwert). Dadurch stehen den Keyern, zusätzlich zum Farbton, Sättigungs- und Helligkeitswerte zur Verfügung, die, gepaart mit Toleranzangaben, genützt werden, um die Mattes weiter zu verfeinern (Brinkmann, 2008, S. 210).

Ron Brinkmann veranschaulicht das Prinzip in folgenden Bildern. Durch Selektion eines lila-blauen Farbbereichs wird es möglich, eine Matte für den Himmel zu erstellen. Im Bild ganz rechts wird sichtbar, dass durch Angabe von Falloff-Werten weiche Übergänge an den Maskenrändern erzeugt wurden, die harte Übergänge zwischen Vordergrund- und Hintergrundbereiche im Bild verhindern (Brinkmann, 2008, S. 210-212).

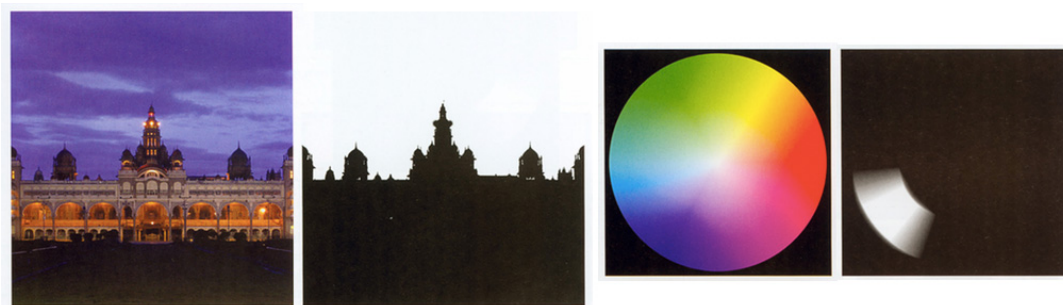


Abbildung 5: Chrominance-Keying (Brinkmann, 2008, S. 210ff).

Vorteilhaft beim Luminance-Keying ist der Umstand, nicht auf besondere Keyingfarben beschränkt zu sein. Jede im Bild vorkommende Farbe kann zur Selektion herangezogen werden. Weiters unterstützt die Möglichkeit der Angabe von Toleranzbereichen die Tatsache, dass sich in der Natur Oberflächen so gut wie immer über einen Bereich von Farbtönen, Sättigungen und Helligkeiten erstrecken –

und eben nicht durch einen einzelnen Farbwert definiert sind (Wright, 2010, S. 24).

Als nachteilig erwähnt Steve Wright die tendenziell geringe Matte-Qualität des Verfahrens und seine Unzulänglichkeit im Zusammenhang mit transparenten Flächen. Oftmals entstehen harte Kanten, die eine aufwendige, manuelle Nachbearbeitung benötigen (Wright, 2010, S. 24).

### **2.1.2.3 Difference Matting**

Wie der Name bereits verrät, werden beim Difference Matting-Verfahren Mattes auf Basis der Berechnung von Unterschieden zwischen zwei Bildern bzw. Bildsequenzen generiert. Dies geschieht, indem Bilder voneinander subtrahiert werden, die sich bis auf einen Umstand exakt gleichen müssen: Einmal muss das gewünschte, zu extrahierende Objekt im Bild vorhanden sein, und ein weiteres Mal nicht (Brinkmann, 2008, S. 218). Die alleinige Hintergrundaufnahme wird auch „clean plate“ bezeichnet (Wright, 2010, S. 27).

In der Theorie klingt dies nach einer eleganten Methode. In der Praxis führt die Technik leider meist zu minderwertigen Resultaten; speziell im Bereich der Objektkanten (Wright, 2010, S. 27). Dies beruht u. a. auf schwierig bzw. unmöglich zu kontrollierenden Gegebenheiten bei der Aufnahme: leichte Schwankungen der Lichtsituation, Schattenbildung, das Sensorrauschen von Kameras, minimale Kamerabewegungen usw. führen selbst bei inhaltlich exakt nachgestellten Szenen zu nicht-perfekt deckungsgleichen Aufnahmen (Wright, 2010, S. 28). Für Szenen mit Schauspielern, besonders wenn diese in Bewegung sind, eignet sich dieser Methode also kaum. Einstellungen mit bewegter Kamera sind zwar grundsätzlich möglich; setzen aber ein äußerst präzise-arbeitendes Equipment voraus, welches die exakte Wiederholung von Kamerabewegungen ermöglicht (Brinkmann, 2008, S. 218).

Aus den genannten Gründen wird dieses Verfahren meist nur für die Erstellung von groben Keys oder Garbage-Mattes verwendet. Trotz dieser Einschränkungen gibt es aber Situationen, in denen es zu akzeptablen Resultaten führt. Positiv zu erwähnen

ist weiters die Ungebundenheit des Szenenhintergrunds. Eine solide, gleichmäßige Farbe ist nicht notwendig (Brinkmann, 2008, S. 218).

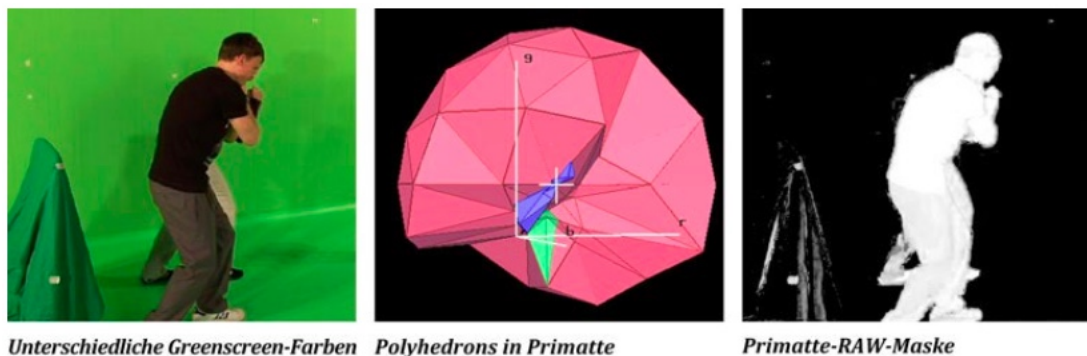
### **2.1.2.4 Color Difference Keying**

Das Farbdifferenzverfahren generiert Transparenzinformationen anhand der Auswertung der Pegelwerte der Farbkanäle Rot, Grün und Blau von Bildern (Hasche & Ingwer, 2016, S. 262). Kapitel 3 dieser Arbeit bietet einen detaillierten Einblick in diese Technik.

### **2.1.2.5 3D Keying / Distance Map Keying**

Die Grundidee beim 3D Keying basiert auf dem Ansatz alle Bildpunkte eines gegebenen Bildes in einem dreidimensionalen Raum abzubilden. Für die Positionierung in den X-, Y- und Z-Achsen werden üblicherweise die Rot-, Grün- und Blau-Werte herangezogen. Der User wählt anschließend Farbwerte aus, die gekeyed, also transparent werden sollen, Farbwerte, welche halbtransparent erscheinen sollen, Farbwerte welche zum Vordergrund gehören und welche, die von der Hintergrundfarbe kontaminiert wurden. Für diese Farbwerte werden im Raum 3D-Körper erstellt. Ein Algorithmus analysiert schließlich, welche Bildpunkte sich wo innerhalb dieser 3D-Körper befinden und weist ihnen, je nach Position, Transparenzwerte zu (Hasche & Ingwer, 2016, S. 263-264).

Ein populärer Vertreter dieses Verfahrens ist der Keyer „Primatte“ der Firma Photron.



*Abbildung 6: Links: Greenscreen-Szene mit verschiedenen Grünschattierungen. Mitte: Visualisierung der generierten 3D-Objekte durch Primatte. Der rosafarbene Körper umfasst räumlich die zum Vordergrund gehörenden Bildpunkte, der blaue die Screenfarben und der grüne 3D-Körper repräsentiert die Spill-Farben im Bild. Rechts: Die unskalierte Ergebnismatte des Primatte-Keyingvorgangs (Hasche & Ingwer, 2016, S. 264).*

Hervorzuheben ist bei dieser Technik der Umstand, dass im Vergleich zu anderen Verfahren „mehrere“ Backing-Farben angegeben werden können. Bei ungleichmäßig ausgeleuchteten Hintergründen kann dies von Vorteil sein.

### 2.1.2.6 Alternative Keyingmethoden

Neben den vorgestellten Keyingverfahren existieren eine Vielzahl weiterer Technologien, die auf unterschiedlichste Art und Weise versuchen, Vordergrundobjekte von Hintergründen zu trennen. Für einen groben Überblick seien einige davon im Folgenden aufgelistet:

- **Truematte.** Ein von der BBC entworfenes Chroma-Keying-Verfahren, welches auf besondere Materialien für den Hintergrund setzt, die eine präzise Steuerung von Lichtreflexionen und Lichtstreuung ermöglichen (Schmedes, 2014, S. 27).
- **Flash-Keying.** Eine Technik, die aus Bilderpaaren, die sich aus jeweils unterschiedlich beleuchteten Bildern zusammensetzen, Mattes errechnet

(Schmedes, 2014, S. 28).

- Verfahren, die polarisiertes Licht zur Segmentierung der Bildelemente nutzen (Schultz, 2006, S. 15).
- Keying anhand der Auswertung von Tiefeninformationen, die bei der Aufnahme entstehen. Beispielsweise durch Einsatz eines Kamerapaars zur Erzeugung stereoskopischer Bilder oder auch durch Einsatz von Infrarotlicht (Schmedes, 2014, S. 29; Schultz, 2006, S. 16).
- Thermo-Keying. Eine Verfahren, welches auf Thermokameras und die Analyse der im Bild visualisierten Wärmestrahlungen setzt (Schmedes, 2014, S. 29).
- U.s.w.

Als Ausgangspunkt für weiterführende Informationen zu diesen und weiteren Methoden wird auf die Arbeiten von Ulrich Schmedes (2014) und Christopher Schultz (2006) verwiesen.

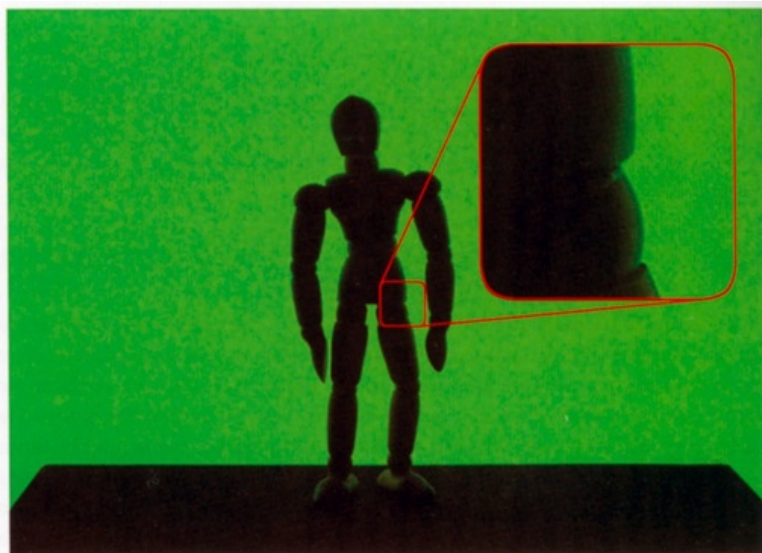
## 2.2 Spill und Spill Suppression

Als „Spill“ wird die Farbverunreinigung auf den Vordergrundobjekten verstanden, die zwangsläufig in Keyingszenarien bei gut ausgeleuchteten Bluescreens bzw. Greenscreens entsteht. Jede Oberfläche reflektiert zu einem gewissen Grad sein Umgebungslicht. Dies bedeutet, das vom Hintergrund reflektierende, stark gefärbte Licht wird nicht nur von hochreflexiven Materialien wie z.B. Metalle aufgefangen und weiter reflektiert. Davon betroffen sind auch Haut, Haare und Kleidung; im besonderen helle Oberflächen und halbtransparente Materialien (Hasche & Ingwer, 2016, S. 273). Wie hoch die Färbung der Umgebung ausfällt, wird oft erst bei der genaueren Betrachtung von Aufnahmen am Monitor deutlich. Folgendes Bild zeigt beispielhaft die farbliche Kontaminierung einer grauen Decke eines Greenscreen-Studios:



*Abbildung 7: Spill an der Decke eines Greenscreen-Studios  
(Hasche & Ingwer, 2016, S. 273).*

An Objekten zeigt sich Spill am deutlichsten als ein nach innen gerichteter Schein entlang der Kanten:



*Abbildung 8: Spill entlang von Objektkanten  
(Brinkmann, 2008, S. 360).*

Dieser verfälscht nicht nur die eigentliche Original-Ausleuchtung des Vordergrunds, die Objektkanten nehmen somit einen ähnlichen Farbton an, wie jener, der eigentlich entfernt werden soll. Für den Keyer wird es also schwieriger zu unterscheiden, wo der Vordergrund aufhört und wo der Hintergrund beginnt (Brinkmann, 2008, S. 359).

Die Entfernung eines solchen Farbstichs ist also neben dem Entfernen des Hintergrunds ein äußerst wichtiger Schritt, um das gekeyte Objekt später glaubhaft in andere Bilder integrieren zu können. Viele Keyer sind aus diesem Grund mit Algorithmen zur Spill Suppression (auch *despill operation*) ausgestattet. Oftmals passiert dieser Schritt sogar automatisch im Hintergrund.

Steve Wright erläutert in seinem Buch „Digital Compositing for Film and Video“ mehrere Varianten, wie Software bei der Entfernung von Spill vorgeht und weist auf das Auftreten möglicher Bildartefakte in diesem Zusammenhang hin. Diese sind stark abhängig vom vorliegenden Szeneninhalte, weshalb es sinnvoll ist, verschiedene Methoden zu kennen um bestmöglich reagieren zu können (Wright, 2010, S. 85 ff.). Neben der möglichen Zunahme des Noiselevels im Bild, identifiziert Wright Farbtonverschiebungen und Helligkeitsabnahmen als die größten Problembereiche beim Despilling. Die Farbveränderung entsteht unausweichlich, da bei der Reduktion von Grün- bzw. Blau-Werten jedenfalls das farbbestimmende Verhältnis der drei Farbkanäle Rot, Grün und Blau zueinander verändert wird. Der mögliche verringerte Helligkeitseindruck hat wiederum mit der verstärkten Sensibilität des menschlichen Auges im grünen Farbspektrum zu tun. In diesem Fall kann die Verwendung eines Bluescreens vorteilhaft sein (Wright, 2010, S. 88).

Mögliche Wege Spill zu unterdrücken basieren auf der Definition gewisser Regeln. Diese können am Beispiel von Greenscreen-Aufnahmen lauten: Der Pegel im Grünkanal des Bildes darf den des Rotkanals nicht überschreiten (Wright, 2010, S. 89 ff.). Bzw. analog dazu darf der Grünwert nicht größer als der Blaukanal werden (Wright, 2010, S. 93 ff.). Laut Steve Wright führt speziell die Beschränkung auf den Rotkanal in vielen Fällen zu akzeptablen Ergebnissen (2010, S. 95). Naturgemäß werden durch diese Vorgehensweise aber mögliche andere Farbtöne im Bild stark

verändert, wie folgende Grafik zeigt:



*Abbildung 9: Links: Ausgangs-Testbild. Mitte: Ergebnis einer Despill-Operation, wenn der Grün-Kanal max. den Wert des Rotkanals annimmt. Rechts: Ergebnis einer Despill-Operation, wenn der Grün-Kanal max. den Wert des Blaukanals annimmt (Wright, 2010, S. 94).*

Ein dritter Ansatz versucht die jeweiligen Nachteile der genannten Algorithmen einzuschränken, indem zuerst der Durchschnittswert von Rot und Blau von Grün abgezogen wird. Dieses Differenz wird anschließend von Grün subtrahiert womit sich das neue, korrigierte Grün ergibt:

$$\text{Korrigiertes Grün} = G - (G - \text{Durchschnitt}(R, B))$$

Die Artefaktbildung wird so besser auf den gesamten Farbraum verteilt – die durchschnittliche Farbverschiebung fällt geringer aus (Wright, 2010, S. 95-96).

Wright listet im erwähnten Buch weitere Varianten und gibt die logische Inkorrektheit der gesamten Operation zu bedenken. Perfekte Resultate seien nicht möglich und oftmals ist eine Trial-and-Error-Vorgehensweise notwendig, um eine Lösung zu finden, die für die jeweilige Szene in den kritischen Bereichen des Bildes „funktioniert“ (Wright, 2010, S. 96-97).



## 2.3 Überblenden von Vordergrund und Hintergrund

Steve Wright definiert „Digital Compositing“ und dessen Ziel folgendermaßen:

*The ultimate artistic objective of a digital composite is to take images from a variety of different sources and combine them in such a way that they appear to have been shot at the same time, under the same lighting conditions, with the same camera. (2010, S. 1)*

Zur Erreichung dieses finalen, künstlerischen Ziels, stellt Compositing also, besonders im Hinblick auf Keying-Prozesse, das letzte, logische Glied in einer Kette von Arbeitsabläufen dar und zielt darauf ab, digitale Assets zusammen mit einem Hintergrund zu einem stimmigen und glaubhaften Gesamtbild zu kombinieren (Hasche & Ingwer, 2016, S. 341).

Der Themenbereich Compositing ist äußerst umfassend. Grundsätzlich kann bei der Bildverknüpfung unterschieden werden, ob es sich dabei um Bilder *mit* Masken handelt, oder *ohne*. Die verschiedenen Verfahren werden oft „Überblendungsmodus“ oder „Füllmethode“ bezeichnet und führen die RGB-Werte zweier Elemente über bestimmte Regeln und mathematische Operationen zusammen:

## 2 Der Keying-Prozess

| Überblendungs-modi | mathematische Funkti-onen                                                                                                    |            | Überblendungs-modi | mathematische Funkti-onen                                                         |                  |
|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------|
| average mode       | $f(a,b) = (a+b)/2$                                                                                                           |            | dodge modes        | $f(a,b) = a/(1-b)$                                                                | color dodge      |
| multiply mode      | $f(a,b) = a * b$                                                                                                             |            |                    | $f(a,b) = b/(1-a)$                                                                | inv. color dodge |
| screen mode        | $f(a,b) = 1 - (1-a) * (1-b)$                                                                                                 |            |                    | $f(a,b) = \frac{1}{2}a/(1-b)$ (for $a+b < 1$ )<br>$1 - \frac{1}{2}(1-b)/a$ (else) | inv. color dodge |
| Darken mode        | $f(a,b) = a$ (for $a < b$ )<br>$b$ (else)                                                                                    |            | burn modes         | $f(a,b) = 1 - (1-a)/b$                                                            | color burn       |
| lighten mode       | $f(a,b) = a$ (for $a > b$ )<br>$b$ (else)                                                                                    |            |                    | $f(a,b) = 1 - (1-b)/a$                                                            | inv. color burn  |
| difference modes   | $f(a,b) =  a-b $                                                                                                             | difference |                    | $f(a,b) = \frac{1}{2}b/(1-a)$ (for $a+b < 1$ )<br>$1 - \frac{1}{2}(1-a)/b$ (else) | soft burn        |
|                    | $f(a,b) = 1 -  a-b $                                                                                                         | negation   | additive mode      | $f(a,b) = a+b$                                                                    |                  |
|                    | $f(a,b) = a+b-2ab$                                                                                                           | exclusion  | subtractive mode   | $f(a,b) = a+b-1$                                                                  |                  |
| Overlay mode       | $f(a,b) = 2ab$ (for $a < \frac{1}{2}$ )<br>$1 - 2 * (1-a) * (1-b)$ (else)                                                    |            | Opacity mode       | $f_{\text{opacity}}(a,b,o) = o * f(a,b) + (1-o) * a$                              | o opacity factor |
| hardlight mode     | $f(a,b) = 2ab$ (for $b < \frac{1}{2}$ )<br>$1 - 2 * (1-a) * (1-b)$ (else)                                                    |            |                    |                                                                                   |                  |
| softlight mode     | $f(a,b) = 2 * a * b + a^2 * (1 - 2 * b)$ (for $b < \frac{1}{2}$ )<br>$\text{sqrt}(a) * (2 * b - 1) + (2 * a) * (1-b)$ (else) |            |                    |                                                                                   |                  |

Abbildung 10: Liste gebräuchlicher Überblendungsmodi und deren mathematische Berechnung für zwei Bilder  $a$  und  $b$  (Hasche & Ingwer, 2016, S. 347). Bearbeitet.

Der Fokus soll im Folgenden auf die Zusammenführung eines Vordergrundbildes  $A$  über einen Hintergrund  $B$  mithilfe einer generierten Matte  $M$  gelegt werden:

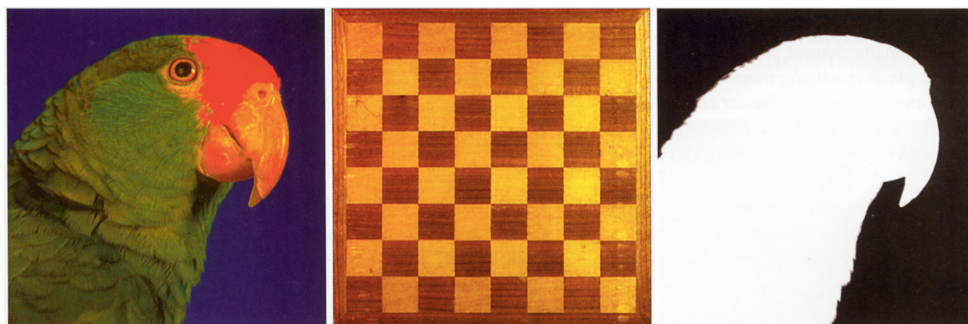


Abbildung 11: Links: Vordergrund  $A$  (Brinkmann, 2008, S. 150), Mitte: Hintergrund  $B$  (Brinkmann, 2008, S. 150), Rechts: Maske für Vordergrund  $A$  (Brinkmann, 2008, S. 155). Bearbeitet.

Die Überlagerungsoperation wird u.a. als „Mix“, „Add Mix“ oder „Keymix“ bezeichnet und lautet in ihrer Grundform:

$$\text{Composite } O = (A \times M) + [(1 - M) \times B]$$

(Brinkmann, 2008, S. 156)



*Abbildung 12: Vormultiplizierter Vordergrund A*

*(Brinkmann, 2008, S. 157)*

Zu Beginn wird das Vordergrundbild Pixel für Pixel mit der Maske multipliziert. Dadurch entsteht ein sogenanntes *vormultipliziertes* Bild (engl. premultiplied). In den Bereichen, in denen die Maske weiß ist, bleibt die Farbinformation erhalten (die Farbwerte werden mit „1“ multipliziert). Die schwarzen Bereiche der Maske definieren eine vollständige Transparenz – das vormultiplizierte Bild wird an diesen Stellen schwarz, da die Farbwerte mit „0“ multipliziert werden. Graustufenwerte der Maske (Farbwerte zwischen 0 und 1) sorgen für eine gewichtete Übernahme der Farbwerte. Verfügt der Alphakanal in einem Pixel beispielsweise über ein 30%iges Grau, so werden 30% der korrespondierenden RGB-Werte des Vordergrundbildes übernommen und der Rest mit Schwarz gefüllt (Hasche & Ingwer, 2016, S. 352).

In einem nächsten Schritt wird der Hintergrund mit der invertierten Version der Maske multipliziert. Die Invertierung lässt sich durch den einfachen Schritt „1 - M“ durchführen. Resultat dieser Rechenoperation ist ein Hintergrund, bei welchem der Vordergrund sozusagen „ausgeschnitten“ wurde:



*Abbildung 13: Links: Hintergrund B (Brinkmann, 2008, S. 150),  
Mitte: Invertierte Maske M (Brinkmann, 2008, S. 159),  
Rechts: B multipliziert mit Maske (Brinkmann, 2008, S. 159).*

Beide Terme der Gleichung sind nun soweit vorbereitet, dass sie miteinander addiert das finale Composite ergeben:



*Abbildung 14: Resultat O der Keymix-Operation  
(Brinkmann, 2008, S. 156).*

Der erläuterte Vorgang bezieht sich auf 3-Kanal-Bilder (RGB) und dem Vorhandensein einer externen Matte. Existieren zu einem Bild Transparenzinformationen, ist es in der Praxis jedoch üblich, diese innerhalb der Datei als vierten Kanal abzulegen. Tatsächlich ist dies sogar das Standardverfahren beispielsweise bei 3D-generierten Bildern (Brinkmann, 2008, S. 157).

Zur Überlagerung solcher 4-Kanal-Bilder wird der „Over“-Algorithmus verwendet. Dieser gleicht effektiv dem Keymix-Vorgang, setzt jedoch für den Vordergrund zwingend ein vormultipliziertes 4-Kanal-Bild voraus. Die erweiterte Schreibweise für diesen Algorithmus lautet also:

$$\text{Composite } O_{\text{rgba}} = A_{\text{rgba}} + [(1 - A_a) \times B_{\text{rgba}}]$$

(Brinkmann, 2008, S. 160)

Bei der Anwendung dieser Funktion gilt es besonders auf den Zustand der Vordergrundes zu achten. Beliebte Fehler sind der Einsatz von nicht-vormultiplizierten oder mehrfach vormultiplizierten Bildern als Vordergrund. Im finalen Composite äußern sich diese Fehler dann u. a. als zu dunkle Ränder rund um die Vordergrundobjekte oder inkorrekte Transparenzen (Hasche & Ingwer, 2016, S. 352-354).

Für weiterführende Informationen zum Thema Digital Compositing sei auf Werke der Autoren Steve Wright und Ron Brinkmann und auf das Kapitel „1.2 Related work“ der wissenschaftlichen Abhandlung „New Models and Methods for Matting and Compositing“ von Yung-Yu Chuang verwiesen (Chuang, 2004, S. 5).

## 3 Das Color Difference-Verfahren

Das Farbdifferenzverfahren geht zurück auf das Jahr 1958, in dem der herausragende Filmtechniker Petro Vlahos ein Verfahren zur Matte-Erstellung von Bluescreen-Aufnahmen entwickelte (Goi, 2013, S. 658). Diese „color difference technique“ war ein optischer Prozess zur Masken-Extrahierung aus analogem Film und kam erstmals 1959 im Film Ben Hur zum Einsatz (Brinkmann, 2008, S. 214). In den darauffolgenden Jahren führte sie zur Entwicklung analoger und digitaler Hardware- und Software-Varianten von „Ultimatte“ – dem ersten hochwertigen, elektronischen Compositing System, auf welches im Kapitel 3.1 näher eingegangen wird.

Laut Steve Wright zählt das Color Difference-Verfahren, aufgrund der hervorragenden Kantenabbildungsqualität und der guten Wiedergabe von halbtransparenten Flächen, zu den besten Extrahierungsmethoden für Bluescreens (Wright, 2010, S. 34). Die Anwendung beschränkt sich dabei aber nicht auf besonders aufbereitete Szenen vor ausschließlich blauem Hintergrund – viele Bildinhalte mit dominanten, herausstechenden Farben lassen sich oft sehr gut freistellen; selbst ohne Vorhandensein gleichmäßig eingefärbter Hintergrundflächen (Wright, 2010, S. 35). Dies hat mit dem Grundprinzip des Verfahrens zu tun, welches bereits sein Name offenbart:

Zur Bestimmung der Transparenz-Werte im Bild werden die Differenzen der 3 Farbkanäle Rot, Grün und Blau herangezogen (Schultz, 2006, S. 12). Die Idee ist davon auszugehen, am Beispiel von Greenscreen, im Bereich der Hintergrundfläche einen hohen Anteil an Grün vorzufinden, im Vergleich zu den verbleibenden Farbanteilen Rot und Blau. Im Bereich des Vordergrunds sollte diese Differenz weit

geringer ausfallen, bzw. kann sie, abhängig von der Farbe, sogar negativ sein.

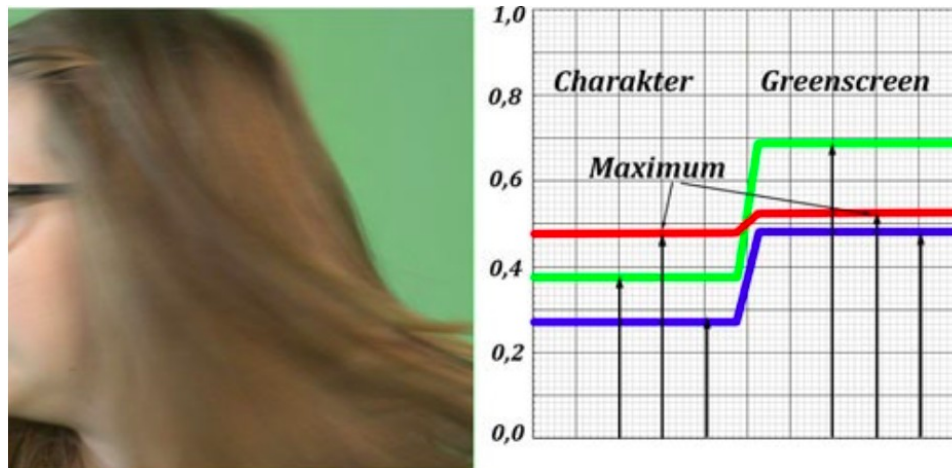


Abbildung 15: Darstellung von Farbkanal-Pegel beispielhaft am Übergang zwischen Person und Greenscreen. (Hasche & Ingwer, 2016, S. 262).

Stellt man diese Differenzen grafisch dar – „0“ sei dabei Schwarz und „1“ Weiß – so ergeben sich 2 Regionen mit verschiedenen Helligkeitswerten. Steve Wright verwendet für diesen ersten, ursprünglichen Zustand den Begriff „raw matte“. Im Bereich des Hintergrundes herrscht eine niedrige „Dichte“ (= Helligkeit), während sie im Vordergrund gegen Null geht, bzw. Null (= Schwarz) ist (Wright, 2010, S. 35):



Abbildung 16: Beispiel einer raw matte (Wright, 2010, S. 36).

### 3 Das Color Difference-Verfahren

Mathematisch formuliert wird also eine einfache Subtraktion der Farbkanäle vorgenommen:

$$\text{Raw matte} = G - R$$

beziehungsweise

$$\text{Raw matte} = G - B$$

Ziel ist, eine möglichst große Differenz zwischen Hintergrundfarbe und Vordergrund zu erhalten. Deshalb wird für jeden Pixel evaluiert, durch Subtraktion welcher Farbe der größtmögliche Kontrast entsteht. Das bedeutet, von der Backing-Farbe wird jeweils die Farbe mit dem zweit-stärksten Anteil im Signal subtrahiert; also das Maximum der beiden übrigen Kanäle:

$$\text{Raw matte} = G - \max(R, B)$$

Steve Wright weist in diesem Zusammenhang auf den Nachteil dieser Vorgehensweise hin – *Matte Edge Penetration* (2010, S. 42):

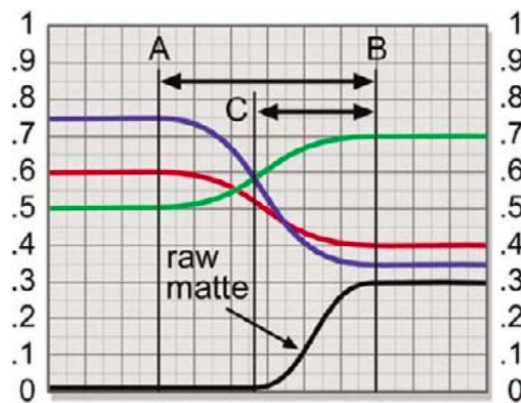


Abbildung 17: *Matte Edge Penetration*  
(Wright, 2010, S. 42).

Dargestellt wird hier beispielhaft der Verlauf von RGB-Kanälen eines weichen Übergangs zwischen einem Vordergrundobjekt und einem Greenscreen. Beginn und Ende des Übergangs sind mit den vertikalen Linien A und B markiert. Die schwarze Linie betitelt mit „raw matte“ stellt die Dichte der resultierenden Matte dar, unter



Anwendung der vorhin erwähnten Formel „ $G = \max(R, B)$ “. Wie man erkennen kann, beginnt die Matte erst an jenem Punkt, an dem der grüne Kanal größer wird, als Rot und Blau (hier markiert durch die vertikale Linie C). Der Übergang der Matte erstreckt sich also effektiv nur von C bis B, obwohl er korrekterweise von A bis B reichen müsste. Anders ausgedrückt: die Matte reicht nicht soweit in den Vordergrund, wie sie eigentlich sollte. Wie weit sie in den Vordergrund dringt, hängt von der **Sättigung der Vordergrundfarbe** ab. Ein neutrales Grau zeichnet sich beispielsweise über gleich hohe Anteile in den RGB-Kanälen aus. Eine errechnete Raw Matte würde in diesem Fall an der „richtigen Stelle“ beginnen und einen entsprechend realistisch-wirkenden Übergang erzeugen:

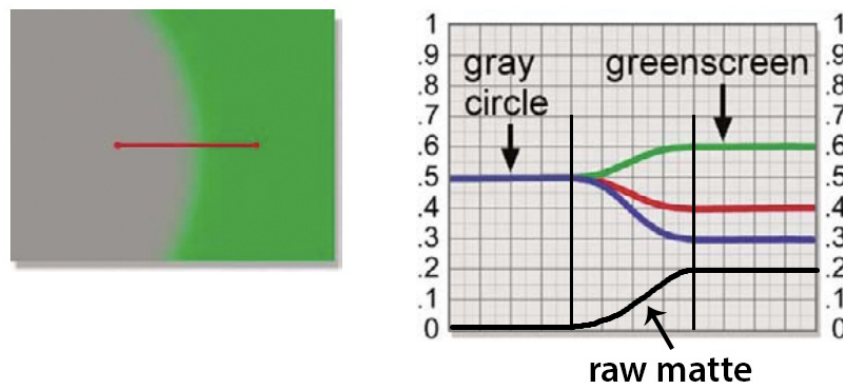


Abbildung 18: Matte Edge Penetration am Beispiel eines neutral grauen Kreises (Wright, 2010, S. 37). Bearbeitet.

Trotz der offensichtlichen Schwachstelle dieser Technik im Bezug auf weiche Übergänge zwischen Vordergrund und Hintergrund führt sie, laut Steve Wright, in realen Anwendungsfällen selten zu unlösbaren Problemen. Durch verschiedene Filter und Parametereinstellungen lässt sich der tatsächliche Übergangsbereich einer Matte gut justieren und den gegebenen Situationen anpassen (Wright, 2010, S. 43).

In seinem aktuellen Zustand kann die Matte noch nicht verwendet werden. Eine Kontrasterhöhung ist notwendig, um die vollständig opaken Bereiche des Vordergrundes schwarz (0) erscheinen zu lassen und die Hintergrundfläche weiß (1).

### 3 Das Color Difference-Verfahren

---

Dieser oftmals als „**Skalieren**“ der Matte bezeichnete Vorgang, geschieht über die Einstellungsmöglichkeiten der jeweiligen Keyingsoftware (Wright, 2010, S. 43). Zu beachten ist hierbei, dass im Zuge dieses Prozesses die Kante des Vordergrundobjekts *jedenfalls* verhärtet, sprich die Abbildungsqualität negativ beeinflusst, wird. Veränderungen der Weiß- und Schwarzwerte im Bild beeinflussen sich gegenseitig – es gilt also nach einem idealen Mittelmaß an Anpassungen zu suchen, um die Skalierung so gering wie möglich zu halten (Wright, 2010, S. 44-45).

Hinzu kommt der Umstand, dass die meisten Compositing-Tools eine invertierte Darstellung der Matte voraussetzen – sprich, der weiße Bereich wird als Vordergrund betrachtet und Schwarz als Hintergrund (Hasche & Ingwer, 2016, S. 263). Dieser Umrechnungsvorgang ist jedoch einfach und verlustfrei möglich und eine Standardfunktion vieler Bildbearbeitungsprogramme.

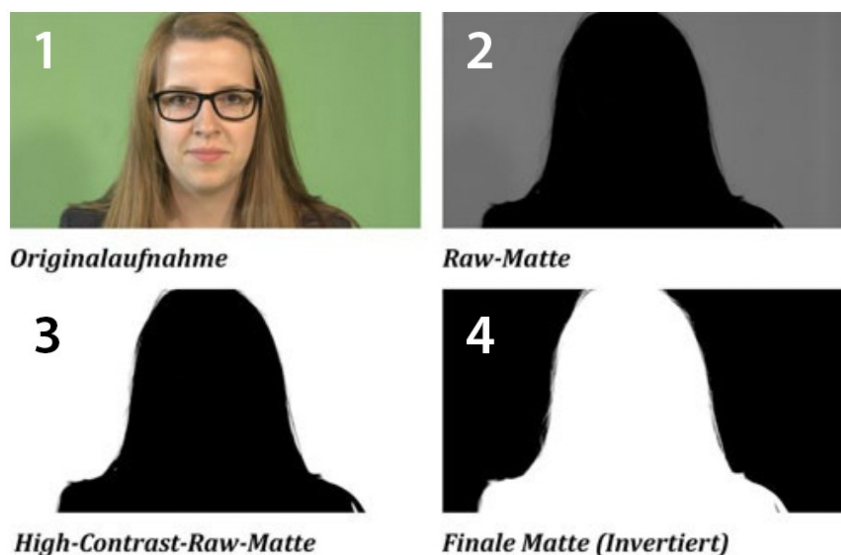


Abbildung 19: Phasen der Matteerstellung im Color Difference Verfahren (Hasche & Ingwer, 2016, S. 263).

In der Praxis bedarf es meist weiteres Finetuning verschiedener Softwareparameter. Nähere Angaben hierzu im Bezug auf die Keyer Ultimatte und Keylight finden sich in den folgenden 2 Unterkapitel.

Zusammengefasst lässt sich sagen: Der Erfolg der Color Difference Keying Methode ist stark abhängig von den Verhältnissen der Farbkanäle zueinander. Je purer und gleichmäßiger die Hintergrundfarbe (Rot, Grün oder Blau) und je weniger „farbig“, d.h. sprich „weißer“ oder „schwärzer“, der Vordergrund, desto effizienter arbeitet das Verfahren (Brinkmann, 2008, S. 216).

## 3.1 Ultimatte

Ultimatte zählt zu den state-of-the-art Keyinglösungen und setzt dabei auf die Color Difference-Methode (Seymour, 2005).

Wie bereits eingangs im vorangegangenen Kapitel erwähnt, ist Petro Vlahos Schöpfer von „Ultimatte“. Hinter der Bezeichnung stecken zum einen Hardware und Software zur Matte-Erstellung, als auch die Firma „Ultimatte Corporation“, die Vlahos 1976 gemeinsam mit seinem Sohn Paul Vlahos zum Zwecke der Weiterentwicklung und Vermarktung dieser Produkte gründete („Petro Vlahos“, 2018).

Für die Motion Picture Research Council entwickelte Vlahos die ursprüngliche *color difference bluescreen* Technik. Sie basierte auf grundsätzlich simplen, mathematischen Operationen, die durch optische und chemische Behandlung des analogen Filmmaterials umgesetzt wurden (Seymour, 2005). In einem Bestreben diese Technik für die aufkommende digitale Videotechnik verwendbar zu machen, erschuf er die „Ultimatte“-Box – die erste elektronisch arbeitende Compositing-Hardware.

Laut Alvy Ray Smith und James F. Blinn ist eine Entdeckung maßgeblich für Petro Vlahos' Arbeit – sie nennen sie die *Vlahos Annahme*:

*Blue screen matting is performed on foreground objects for which the blue is related to the green by  $B0 \leq a2G0$ . The usual range allowed by his technique is  $.5 \leq a2 \leq 1.5$  (Vlahos, 1978, zitiert nach Smith, 1996, S. 2). That this should work as often as it does is not obvious. We shall try*

*to indicate why in this paper.*

*The Vlahos formula for  $\alpha_0$ , abstracted from the claims of his earliest electronic patent (Vlahos, 1971, zitiert nach Smith, 1996, S. 2) and converted to our notation, is  $\alpha_0 = 1 - a_1(B_f - a_2G_f)$ , clamped at its extremes to 0 and 1, where the  $a_i$  are tuning adjustment constants (typically made available as user controls). We will call this the First Vlahos Form. (Smith, 1996, S. 2)*

Die Formeln wurden in weiterer Folge verfeinert und weiterentwickelt (Smith, 1996, S. 2).

Die Entwicklungen von Vlahos wurden stets durch Patente abgesichert. Zum Zeitpunkt März 2018 sind über 20 Patente der Firma Ultimatte Corporation gemeldet (<https://patents.google.com/?assignee=Ultimatte+Corporation&oq=Ultimatte+Corporation=>). Dies ist wohl mit ein Grund, weshalb Ultimatte zu den führenden Anbietern professioneller Keying-Lösungen auf Basis des Farbdifferenzverfahrens ist (Schultz, 2006, S. 12).

Vlahos führte auch den Einsatz von Motion Control Kameras bei Bluescreen-Produktionen ein. Darunter versteht man Kamera-Systeme, deren Bewegungen computergesteuert und somit beliebig oft und exakt wiederholt werden können. Seine Technologien waren essentiell bei der Erstellung von Blockbustern wie der Star Wars Trilogie, Titanic u.v.m. („Petro Vlahos“, 2018).

Seine Leistungen wurden mit einer Vielzahl an Auszeichnungen honoriert – darunter 1964 mit einem Oscar für „conception and perfection of techniques for color traveling matte composite cinematography“, 1978 mit einem Emmy Award für seine „Ultimatte Compositing Technology“ und mit einem dritten Oscar 1995, den er gemeinsam mit seinem Sohn Paul für „blue-screen advances made by Ultimatte Corporation“ entgegen nahm („Petro Vlahos“, 2018).

#### Hardware

Im September 2016 wurde die Übernahme der Ultimatte Corporation durch die Firma Blackmagic Design angekündigt („Blackmagic Design Announces the Acquisition of Ultimatte“, 2016). Der für die Produktion und den Verkauf von Broadcast- und Kino-Hardware, sowie die Entwicklung der Software DaVinci Resolve und Fusion bekannte Hersteller, vertreibt also fortan die Hardware-Variante von Ultimatte. Mit März 2018 ist diese bei Version 12 angelangt und verspricht durch seinen fortschrittlichen Echtzeitprozessor Live-Keying von Szenen in Broadcastqualität in UHD (3.840 x 2.160) bei 60 Bildern/s, 10 Bit Farbtiefe und 4:2:2 Farbabtastung:



*Abbildung 20: Ultimatte 12 Hardware  
(Blackmagic Design Pty. Ltd. (o.D.). Bearbeitet.*

Gesteuert kann diese über die separat erhältliche Ultimatte Smart Remote 4 werden. Über einen 10,1"-Touchscreen und physische Bedienelemente ist es möglich, bis zu acht Ultimatte 12-Geräte gleichzeitig zu steuern:



*Abbildung 21: Ultimatte Smart Remote 4  
(Blackmagic Design Pty. Ltd. (o.D.). Bearbeitet.*

#### **Software**

1995 wurde, noch unter der Führung von Ultimatte Corporation, der Keying-Algorithmus als Computer Software unter den Namen „Ultimatte AdvantEdge“ verfügbar gemacht. Seine Plug-in-Architektur ermöglichte den Einsatz in zahlreichen Grafik- und Compositing-Tools, wobei die Benutzeroberfläche überall nahezu identisch aussah. Hervorhebenswert ist die neu hinzugekommene *Screen Correction*-Funktion, um Imperfektionen des Hintergrundes zu reduzieren (Seymore, 2005).

Unter dem Namen „Ultimatte RT“ erschien weiters eine in der Funktionalität reduzierte Variante der Software speziell für die Host-Programme Apple Final Cut Pro und Apple Motion. Diese war, im Gegensatz zur regulären Version, GPU-beschleunigt – es konnten also unterstützte Grafikkarten zur Beschleunigung der Berechnungen verwendet werden („Frequently Asked Questions (FAQ) about the AdvantEdge and RT plugins“, o.D.).

Ultimatte AdvantEdge und RT sind mit März 2018 veraltet. Die Unterstützung beispielsweise für die Adobe Tools endete mit der 2008 erschienen Version CS4. Der Support für die Apple Mac-Umgebung reicht bis zur 2011 erschienen Betriebssystemversion Mac OS X 10.7 Lion („Frequently Asked Questions (FAQ)

### 3 Das Color Difference-Verfahren

---

about the AdvantEdge and RT plugins“, o.D.).

2010 wurde das Ultimatte AdvantEdge Plug-in gemeinsam mit der Software Nuke von Foundry ausgeliefert und damit in 32-Bit Farbtiefe nutzbar (Goi, 2013, S. 656).

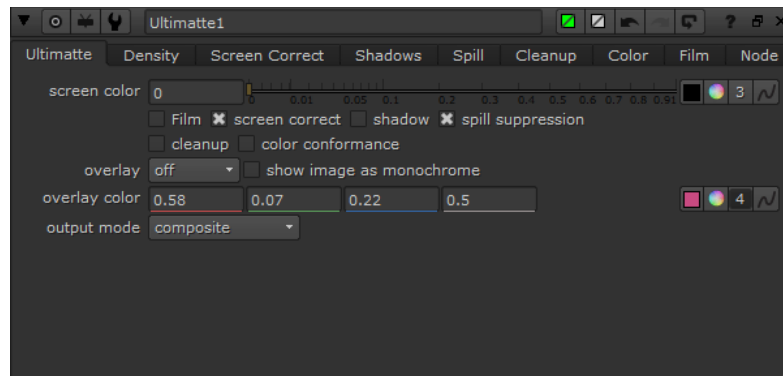


Abbildung 22: Screenshot Ultimatte-Node in NukeX 10.0v1

Zum Zeitpunkt März 2018 kann Ultimatte in der Software-Variante nicht mehr separat für verschiedene Host-Programme erworben werden. Auf der Herstellerwebsite der Hardware-Version <https://www.blackmagicdesign.com> wird sie nicht erwähnt und auch sonst ergab eine Internet-Recherche nur den Vertrieb der vorhin erwähnten, veralteten Version über die Website <http://www.ultimatte-software.com>. Das Plug-in kann aktuell nur als Funktion innerhalb der Software Nuke genutzt werden (bis inkl. Nuke-Version 11.1v1, Stand März 2018). Überprüft wurde dies unter Betrachtung folgender Tools: Blackmagic Design Fusion 9, Adobe After Effects und Premiere Pro CC 2018, Apple Final Cut Pro X, Apple Motion 5.4, Avid Media Composer 2018.2, Autodesk IFF 2018.

#### Anwendung der Software

Detaillierte Anwendungshinweise sind hier online abrufbar:

- [https://learn.foundry.com/nuke/content/comp\\_environment/keying\\_with\\_ultimatte/keying\\_ultimatte.html](https://learn.foundry.com/nuke/content/comp_environment/keying_with_ultimatte/keying_ultimatte.html)
- [https://learn.foundry.com/nuke/content/reference\\_guide/keyer\\_nodes/ultimatte.html](https://learn.foundry.com/nuke/content/reference_guide/keyer_nodes/ultimatte.html)

### 3.2 Keylight

Keylight zählt zur Kategorie der Color Difference Keyer, ist aber im Unterschied zu Ultimatte ein reines Software-Produkt.



*Abbildung 23: Screenshot Keylight Plug-in  
in After Effects CC 2018*

Entwickelt wurde das Programm ursprünglich von Wolfgang Lempp und Oliver James in der Firma „Computer Film Company“ – heute bekannt unter dem Namen „Framestore“ – zur Unterstützung von schwierig zu keyenden Szenen in Filmen. Erweitert und vermarktet wurde es anschließend von der Firma „The Foundry“ in London (Goi, 2013, S. 656; The Foundry Visionmongers Ltd., 2008, S. 5).

1996 wurde die Software von der „Academy of Motion Picture Arts and Sciences“ mit einem Technical Academy Award ausgezeichnet und kam seither in hunderten von Filmen erfolgreich zum Einsatz (The Foundry Visionmongers Ltd., 2008, S. 5).

Der Keyer wird nach OFX-Richtlinien programmiert. OpenFX ist ein offener, auf einer BSD Open Source-Lizenz basierender Standard, der für 2D Visual Effects entwickelt wurde (openfx.sourceforge.net). Dies ermöglicht grundsätzlich die



Software für beliebige OFX-kompatible Hostprogramme auf unterschiedlichen Plattformen zu kompilieren.

Mit Stand März 2018 wird die Software nicht mehr aktiv auf der Herstellerwebsite <http://www.foundry.com> beworben. Im Support-Bereich findet sich kein gesonderter Eintrag für Keylight (<https://www.foundry.com/user-guides>). Der Letztstand der drei verfügbaren User Guides kann über folgende veraltete URL abgerufen werden: <https://www.thefoundry.co.uk/support/user-guides>. Das Handbuch für die Nuke-Variante von Keylight mit Namen „Keylight2.1v3\_Nuke.pdf“ ist mit 2008 datiert, das der After Effects-Version („Keylight\_1.2v12\_AE.pdf“) mit 2010 und das Dokument für die Final Cut Pro-Variante („Keylight2.0v3\_FCP.pdf“) mit 2009. Daraus lässt sich schließen, dass die Standalone-Varianten des Keyers nicht mehr aktiv weiter entwickelt werden. Zum Zeitpunkt März 2018 wird Keylight jedoch als Bestandteil der Nuke-Produktfamilie (v11) und Adobe After Effects CC 2018 ausgeliefert.

#### **Anwendung der Software**

Anwendungshinweise für Keylight innerhalb Nuke sind unter diesen Adressen online abrufbar:

- [https://learn.foundry.com/nuke/content/reference\\_guide/keyer\\_nodes/keylight.html](https://learn.foundry.com/nuke/content/reference_guide/keyer_nodes/keylight.html)
- [https://learn.foundry.com/nuke/content/comp\\_environment/keying\\_with\\_keylight/keying\\_keylight.html](https://learn.foundry.com/nuke/content/comp_environment/keying_with_keylight/keying_keylight.html)

Bzw. im Handbuch abrufbar unter dieser Adresse:

- [http://thefoundry.s3.amazonaws.com/downloads/Keylight2.1v3\\_Nuke.pdf](http://thefoundry.s3.amazonaws.com/downloads/Keylight2.1v3_Nuke.pdf)

Anwendungshinweise für Keylight innerhalb Adobe After Effects sind unter dieser Adresse online abrufbar:

- <https://helpx.adobe.com/de/after-effects/using/keying.html>

Bzw. im Handbuch abrufbar unter dieser Adresse:

- [http://thefoundry.s3.amazonaws.com/products/keylight/ae/documentation/Keylight\\_1.2v12\\_AE.pdf](http://thefoundry.s3.amazonaws.com/products/keylight/ae/documentation/Keylight_1.2v12_AE.pdf)

## 4 Experimente

### 4.1 Ausgangssituation und Herangehensweise

Dieser Teil der Arbeit demonstriert und vergleicht die Funktionen der beiden Color Difference Keyer Ultimatte und Keylight durch praktische Anwendung.

Es ist dabei nicht das Ziel "perfekte" Keys zu generieren oder eine perfekte Keyingumgebung herzustellen und diese zu beschreiben – primär dienen die Experimente dazu, die Forschungsfragen dieser Arbeit beantworten zu können. Es ist also von Interesse, zu welchen Ergebnissen besagte Keyer in einer speziellen, realistisch gehaltenen Testumgebung kommen und die Gegenüberstellung derer.

Die Qualität von Keying-Vorgängen ist grundsätzlich sehr stark von der Qualität des Ausgangsmaterials abhängig. Daher werden im folgenden 2 Szenarien betrachtet:

**Experiment 1** behandelt ein „idealisiertes“ Testsetting. Es wird untersucht, wie die Keyer grundsätzlich mit störungsfreiem, computergenerierten Bildmaterial umgehen. Die Testbilder setzen sich aus verschiedenen Farbflächen und Farbverläufen, abgebildet auf verschiedenen, einfärbigen Hintergründen, zusammen (siehe Kapitel 4.3). Diese werden als „Referenzbilder“ definiert. In weiterer Folge wird ein normaler Keying- und Compositing-Vorgang durchgeführt: Unter Verwendung der jeweiligen Hintergrundfarbe (Backing-Color) werden die Referenzbilder gekeyt. Ergebnis dieser Keyingvorgänge sind Bilder mit Alpha-Kanäle. Diese werden schließlich wieder über die jeweils verwendeten, einfärbigen Hintergründe gelegt und zusammengefügt.

Die Messergebnisse werden aufzeigen, welche Keying-Qualität erreicht werden kann, stellt man den Keyern ein „makellostes“ Eingangsmaterial zur Verfügung. Es gilt zu verifizieren, ob in dieser idealisierten Umgebung mit perfekten Resultaten gerechnet werden kann, d.h. ob sich Referenzbilder und Keying-/Compositing-Resultate zuletzt exakt gleichen. Interessant wird in diesem Zusammenhang nicht nur Feststellung der Performance der jeweiligen Keyer, sondern auch der Vergleich beider zueinander.

**Experiment 2** folgt vom Grundprinzip her dem ersten, bildet aber einen realistischen, praktischen Anwendungsfall ab. Auch hier werden die Ergebnisse der 2 Keyer Ultimatte und Keylight gegenübergestellt. In diesem Szenario werden relevante Motive, wie etwa Haut- und Haarfarben, vor verschiedenen, einfärbigen Hintergründen und jeweils auch vor regulären Foto-Motiven platziert und frontal mit einer Video-Kamera abgefilmt. Weiters werden die einfärbigen Hintergründe / Foto-Motive auch separat, also ohne Vordergrund-Objekte, aufgezeichnet.

Die Aufnahmen, welche Vordergrund *und* Hintergrund abbilden, sollen in weiterer Folge als „Referenzaufnahmen“ bezeichnet werden – sie zeigen, wie sozusagen auf natürliche Weise die Vordergrundobjekte mit dem Hintergrund verschmelzen, wenn diese frontal betrachtet werden.

Die Bilder, die im Zuge des Keying- und Compositing-Vorgangs entstehen und letztlich mit den Referenzbildern verglichen werden, sollen in weiterer Folge als „Keyingresultate“, „Keyingergebnis“ oder „Composites“ bezeichnet werden.

Ziel ist es letztlich herauszufinden, wie nahe die mithilfe der Keying-Technik künstlich zusammengefügte Szenen den Referenzaufnahmen sind, wenn dabei von den Standard-Einstellungen der Keying-Software ausgegangen wird. Durch spezielle, im Kapitel „4.2. Messung der Matte-Qualität“ angeführte, Evaluierungsmethoden werden die Leistungen beider Keyer meßbar und können gegenübergestellt werden.

Vor der tatsächlichen Erstellung der Experimentaufnahmen fanden insgesamt vier Testaufnahmen mit jeweils verschiedenen Schwerpunkten statt. Die dadurch

erworbenen Erfahrungswerte und Erkenntnisse trugen maßgeblich zur Struktur und zur Optimierung des finalen Ablaufs bei.

Folgendes soll an dieser Stelle nochmals verdeutlicht werden:

In der Praxis „perfekte“ Rahmenbedingungen für einen Keying-Vorgang zu schaffen, ist ein nahezu unmögliches und auch unrealistisches Unterfangen und nicht Ziel dieser Untersuchung. Dieser Umstand wird auch von erfahrenen Branchenexperten, beispielsweise im American Cinematographer Manual, bestätigt (Goi, 2013, S. 615). Keying-Aufnahmen, mitsamt ihrer Makel, entsprechen dem zu Folge sogar ganz gut den bei diesem Experiment angestrebten realen Bedingungen.

Auf technischer Ebene wird versucht, möglichst einen Standard zu erreichen, der dem hochwertiger, aktueller Filmproduktionen gerecht wird bzw. nahe kommt. Dies bedingt den Einsatz professioneller Hardware und die Optimierung der Aufnahmequalität (technisch korrekte Ausleuchtung, Aufnahme in verlustfreier RAW-Qualität, etc.). Das eigentliche Geschehen vor der Kamera entspricht situationsbedingt wenig dem Bild, das man üblicherweise von klassischen Green-/Bluescreen-Produktionen im Kopf hat, mit Schauspielern, die vor großen, einfärbigen Leinwänden agieren – sondern ist beispielsweise vergleichbar mit Miniatur-Aufnahmen, wie sie für Effekt-Szenen bei Stop-Motion Filmproduktionen zum Einsatz kommen würden:



Abbildung 24: Behind the Scenes-Aufnahme am Set des Films „Kubo and the Two Strings“ (Animataurus, 2017).

Es besteht keine Intention die Ergebnisse der beiden Experimente *direkt* miteinander vergleichbar zu machen. Vielmehr ist die Idee, einen gemeinsamen Erfahrungspool zu generieren, anhand eines *theoretischen*- und auch eines *praktisch-orientierten* Zugangs.

Durch die Wahl der Vordergrundmotive/Farben und Hintergründe sind die Experimente darauf ausgerichtet, ein möglichst breites Feld an Keying-Situationen abzudecken und tragen so dazu bei, wertvolle, allgemeingültige Richtlinien aufstellen zu können.

Die Keying-Resultate werden in Zahlen gefasst, tabellarisch aufbereitet und anschließend diskutiert, um die Vorgänge dahinter besser verständlich zu machen und eine Hilfestellung für Compositors zu liefern, künftig schneller zu besseren Ergebnissen zu gelangen.

## 4.2 Messung der Matte-Qualität

Für die Durchführung der Experimente maßgeblich ist die Definition eines nachvollziehbaren, reproduzierbaren Bewertungsschemas für die Leistungen der Keyer. Das Aufgabenfeld der Erzeugung von Mattes, sowohl aus Stand- als auch

aus Bewegtbildern, ist grundsätzlich kein Neues und wurde bereits in einigen wissenschaftlichen Arbeiten behandelt. Dennoch ist die Bewertung von Keyer-Performances, abseits von subjektiven Eindrücken, kein triviales Unterfangen:

Es wurden komplexe, mathematische Verfahren entwickelt, die beispielsweise auf der Idee enger Korrelationen benachbarter Pixel beruhen: Verfügen diese über ähnliche Farbwerte, so sind statistisch gesehen deren Matte-Parameter (Alpha-Wert, ...) oftmals auch sehr ähnlich (Wang & Cohen, 2007, S. 7).

Ein weiterer Ansatz setzt weniger auf die Messung der eigentlichen Pixelwerte, sondern geht von einer grundsätzlichen „Verbundenheit“ benachbarter Pixel aus und nutzt diese um Matte-Informationen zu generieren (Wang & Cohen, 2007, S. 17).

Die Studie „Image and Video matting: A Survey“ von Jue Wang and Michael F. Cohen (2007) bietet hierzu eine gute Übersicht diverser Ansätze und sei für ein tiefergehendes Studium der Thematik empfohlen.

Speziell die Erforschung von Matting von Bewegtbildern kommt aber erst seit kurzem, mit der Verfügbarkeit leistungsfähigerer Rechner, richtig in Fahrt (Erofeev, Gitman, Vatolin, Fedorov, & Wang, 2015, S. 2). Im Rahmen eines groß angelegten Forschungsprojekts ist beispielsweise 2014 ein erster, öffentlich zugänglicher, objektiver Online-Benchmark für Video-Matting-Algorithmen entstanden – erreichbar unter der Webadresse <http://videomatting.com>. Das Projekt entstand aus einer Motivation heraus, eine Standard-Testmethode zur Bewertung von Video-Matting-Methoden zu schaffen und auch die dafür notwendigen Test-Bildsequenzen zur Verfügung zu stellen. Dies soll ermöglichen, existierende Lösungen zu reihen und Entwickler dabei unterstützen, die Leistung ihrer Methoden zu verbessern („Overview“, o.D.).

Denn, wie auch der Autor dieser Arbeit auf der Suche nach geeigneten Messmethoden feststellen musste, werden zur Beurteilung der Qualität oftmals lediglich visuelle Vergleiche angestellt werden, bzw. diese verbal beschrieben (Wang & Cohen, 2007, S. 17; Erofeev, Gitman, et al., 2015, S. 1). Die Autoren des Online-Benchmarks schreiben in ihrer zum Projekt gehörigen Abhandlung:

*For video matting, the general approach is to combine estimates of overall method accuracy, typically measured using mean square error (MSE) and temporal-coherence error [11, 19, 22]. MSE is still the best known measure of overall accuracy, yet it provides only 30 % to 50 % correlation with human perception [15]. Measurement of temporal consistency is even less well studied, and approaches vary among authors. (Erofeev, Gitman, et al., 2015, S. 5)*

Ein ähnlicher Standpunkt wird auch in der bereits erwähnten Studie „Image and Video matting: A Survey“ vertreten (Wang & Cohen, 2007, S. 34). Auch diese Arbeit setzt zur quantitativen Bewertung der Algorithmen u. a. auf die Berechnung von Mean Squared Errors (Wang & Cohen, 2007, S. 36).

Die vorliegende Arbeit geht einen anderen Weg und setzt zur quantitativen Bewertung der Mattes auf die Messung von Farbunterschieden zwischen Referenzbildern und Keyingresultaten in relevanten Bereichen im Bild und bezieht dabei den Faktor der menschlichen Wahrnehmung mit ein, indem sogenannte  $\Delta E$ , also „Delta-E“-Werte, errechnet werden.

In der Farbwissenschaft werden Unterschiede zwischen Farben allgemein als *Distanzen* beschrieben („Farbmetrik“, o.D.). Dabei bezieht man sich auf den *Euklidischen Abstand* – der Abstand zweier Punkte in einer Ebene oder in einem Raum, der beispielsweise mit einem Lineal gemessen werden könnte. In einem kartesischen Koordinatensystem kann dieser Abstand mit Hilfe des Satzes von Pythagoras berechnet werden („Pi“, o.D.).

Das Messen von Farbunterschieden wird sofort komplexer, berücksichtigt man die besondere, ungleichmäßige Art und Weise, wie Menschen Farben und Helligkeiten wahrnehmen. So ist die Deutung von Farben stark abhängig von der Beschaffenheit des Betrachtungsraumes, dem vorherrschenden Umgebungslicht, usw. (Sczepek, 2011, S. 61). Es geht sogar soweit, dass wir bestimmte Farben als identisch bezeichnen, obwohl sie sich diese in ihrer spektralen Zusammensetzung stark voneinander unterscheiden. Solche Farben werden in der Fachsprache Metamere genannt (Sczepek, 2011, S. 63).

## 4 Experimente

---

Die *International Commission on Illumination (CIE)* hat mit *Delta-E* eine Metrik geschaffen, um besagte Distanzen unter Miteinbeziehung der menschlichen Wahrnehmung beschreiben zu können (Fraser, Murphy, & Bunting, 2005, S.43). Dabei existierenden mehrere Varianten, welche auf unterschiedlichen Formeln beruhen und für verschiedene Zwecke entworfen wurden, wie etwa „CIE76“, „CIE94“ oder „CMC l:c (1984)“ („Delta E: The Color Difference“, 2015).

Die Interpretation von Delta-E-Werten ist nicht exakt definiert. Vielen Studien gelangen, bedingt durch die niemals exakt-identischen Teststrahlenbedingungen bzw. Untersuchungsziele, zu unterschiedlichen Ergebnissen – als Richtwert kann aber wohl festgehalten werden, dass für gewöhnliche Betrachter **Farbunterschiede ab Delta-E-Werte von 1 bis 2,5 erkennbar** werden:

| $\Delta E$   | Bewertung                                        |
|--------------|--------------------------------------------------|
| 0,0 ... 0,5  | nahezu unmerklich                                |
| 0,5 ... 1,0  | für das geübte Auge bemerkbar                    |
| 1,0 ... 2,0  | geringer Farbunterschied                         |
| 2,0 ... 4,0  | wahrgenommener Farbunterschied                   |
| 4,0 ... 5,0  | wesentlicher, selten tolerierter Farbunterschied |
| oberhalb 5,0 | die Differenz wird als andere Farbe bewertet     |

*Tabelle 1: Interpretation von Farbabständen  $\Delta E$  als euklidischer Abstand der  $L^*a^*b^*$ -Werte oder aus den Polarkoordinaten  $L^*C^*h^*$  („Delta E“, 2018).*

Die folgenden Experimente setzen auf die aktuelle, von der CIE empfohlenen Farbstandardformel „CIEDE2000“, welche 2014 in der Norm ISO/CIE 11664-6 festgelegt wurde („Colorimetry-Part 6: CIEDE2000 Colour-Difference Formula“, o.D.; „Delta E“, 2018). Die teilweise sehr komplizierten Modifikationen der CIELAB-Farbabstandsformel führten zu einer noch besseren Annäherung an eine visuelle Gleichabständigkeit:



## 4 Experimente

$$\Delta E_{00}^* = \sqrt{\left(\frac{\Delta L'}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H'}{k_H S_H}\right)^2 + R_T \frac{\Delta C'}{k_C S_C} \frac{\Delta H'}{k_H S_H}}$$

$$\Delta L' = L_2^* - L_1^*$$

$$\bar{L} = \frac{L_1^* + L_2^*}{2} \quad \bar{C} = \frac{C_1^* + C_2^*}{2}$$

$$a'_1 = a_1^* + \frac{a_1^*}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{\bar{C}^7}{\bar{C}^7 + 25^7}}\right) \quad a'_2 = a_2^* + \frac{a_2^*}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{\bar{C}^7}{\bar{C}^7 + 25^7}}\right)$$

$$\bar{C}' = \frac{C'_1 + C'_2}{2} \text{ and } \Delta C' = C'_2 - C'_1 \quad \text{where } C'_1 = \sqrt{a_1'^2 + b_1'^2} \quad C'_2 = \sqrt{a_2'^2 + b_2'^2}$$

$$h'_1 = \text{atan2}(b'_1, a'_1) \mod 360^\circ, \quad h'_2 = \text{atan2}(b'_2, a'_2) \mod 360^\circ$$

$$\Delta h' = \begin{cases} h'_2 - h'_1 & |h'_1 - h'_2| \leq 180^\circ \\ h'_2 - h'_1 + 360^\circ & |h'_1 - h'_2| > 180^\circ, h'_2 \leq h'_1 \\ h'_2 - h'_1 - 360^\circ & |h'_1 - h'_2| > 180^\circ, h'_2 > h'_1 \end{cases}$$

$$\Delta H' = 2\sqrt{C'_1 C'_2} \sin(\Delta h'/2), \quad \bar{H}' = \begin{cases} (h'_1 + h'_2)/2 & |h'_1 - h'_2| \leq 180^\circ \\ (h'_1 + h'_2 + 360^\circ)/2 & |h'_1 - h'_2| > 180^\circ, h'_1 + h'_2 < 360^\circ \\ (h'_1 + h'_2 - 360^\circ)/2 & |h'_1 - h'_2| > 180^\circ, h'_1 + h'_2 \geq 360^\circ \end{cases}$$

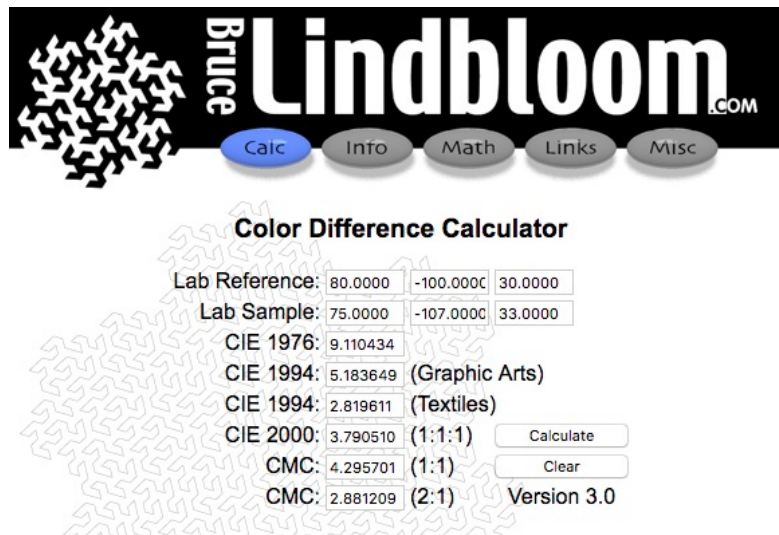
$$T = 1 - 0.17 \cos(\bar{H}' - 30^\circ) + 0.24 \cos(2\bar{H}') + 0.32 \cos(3\bar{H}' + 6^\circ) - 0.20 \cos(4\bar{H}' - 63^\circ)$$

$$S_L = 1 + \frac{0.015(\bar{L} - 50)^2}{\sqrt{20 + (\bar{L} - 50)^2}} \quad S_C = 1 + 0.045\bar{C}' \quad S_H = 1 + 0.015\bar{C}'T$$

$$R_T = -2\sqrt{\frac{\bar{C}'^7}{\bar{C}'^7 + 25^7}} \sin\left[60^\circ \cdot \exp\left(-\left[\frac{\bar{H}' - 275^\circ}{25^\circ}\right]^2\right)\right]$$

**Abbildung 25: Formel zur Berechnung des empfundenen Farbabstands Delta-E in der Version CIEDE2000 (Sharma, Wu, & Dalal, 2004, S. 21ff).**

Zur Berechnung dieser Werte werden der *Color Difference Calculator* und der CIE Color Calculator der Website des renommierten Farbwissenschaftlers Bruce Justin Lindbloom verwendet:



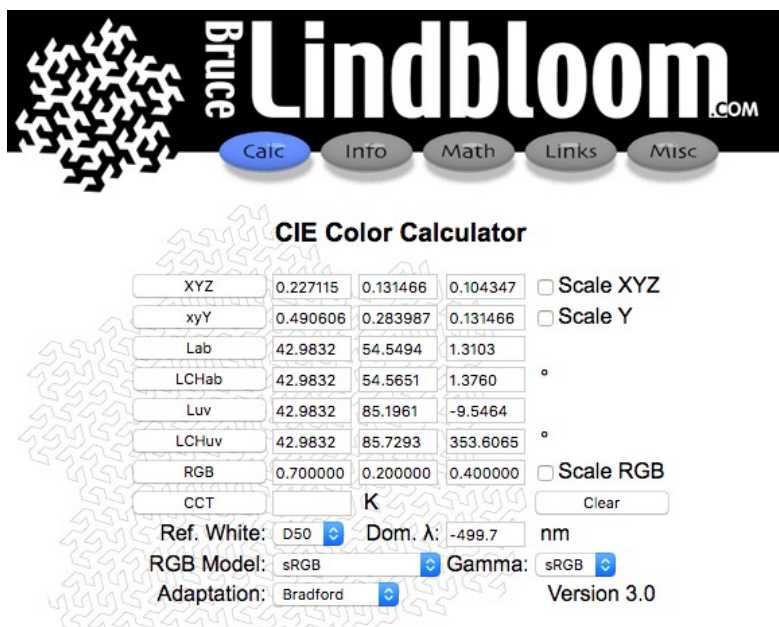
**Bruce Lindbloom** .COM

Calc Info Math Links Misc

### Color Difference Calculator

|                |          |                |             |
|----------------|----------|----------------|-------------|
| Lab Reference: | 80.0000  | -100.0000      | 30.0000     |
| Lab Sample:    | 75.0000  | -107.0000      | 33.0000     |
| CIE 1976:      | 9.110434 |                |             |
| CIE 1994:      | 5.183649 | (Graphic Arts) |             |
| CIE 1994:      | 2.819611 | (Textiles)     |             |
| CIE 2000:      | 3.790510 | (1:1:1)        | Calculate   |
| CMC:           | 4.295701 | (1:1)          | Clear       |
| CMC:           | 2.881209 | (2:1)          | Version 3.0 |

Abbildung 26: Color Difference Calculator – Modul auf der Website [www.brucelindbloom.com](http://www.brucelindbloom.com) (Lindbloom, 2012-c).



**Bruce Lindbloom** .COM

Calc Info Math Links Misc

### CIE Color Calculator

|             |          |          |          |                                    |
|-------------|----------|----------|----------|------------------------------------|
| XYZ         | 0.227115 | 0.131466 | 0.104347 | <input type="checkbox"/> Scale XYZ |
| xyY         | 0.490606 | 0.283987 | 0.131466 | <input type="checkbox"/> Scale Y   |
| Lab         | 42.9832  | 54.5494  | 1.3103   |                                    |
| LCHab       | 42.9832  | 54.5651  | 1.3760   | °                                  |
| Luv         | 42.9832  | 85.1961  | -9.5464  |                                    |
| LCHuv       | 42.9832  | 85.7293  | 353.6065 | °                                  |
| RGB         | 0.700000 | 0.200000 | 0.400000 | <input type="checkbox"/> Scale RGB |
| CCT         |          | K        |          | Clear                              |
| Ref. White: | D50      | Dom. λ:  | -499.7   | nm                                 |
| RGB Model:  | sRGB     | Gamma:   | sRGB     |                                    |
| Adaptation: | Bradford |          |          | Version 3.0                        |

Abbildung 27: CIE Color Calculator – Modul auf der Website [www.brucelindbloom.com](http://www.brucelindbloom.com) (Lindbloom, 2012-b).

Sowohl der Farb-Differenz-Rechner, als auch der Farb-Umrechner zeichnen sich durch einen vergleichsweise hohen Funktionsumfang aus und lassen durch die hohe Anzahl an Nachkommastellen auf eine präzise Arbeitsweise schließen. Besonders relevant im Zusammenhang mit der Umsetzung von Experiment 2, ist die Möglichkeit bei der Farbumrechnung den Weißpunkt gezielt setzen zu können, da die Ausleuchtung der Szene mit 5.500 K anstatt der sonst bei Rec.709/sRGB üblichen 6.500 K erfolgte (siehe Kapitel 4.4.6. Testumgebung und genutzte Hardware).

Die hinter den Berechnungen liegenden Formeln können im Bereich „Math“ auf der Website eingesehen werden. Stichprobenartig werden die Ergebnisse mit den Online-Rechnern der Websites <http://www.jpereira.net/apps/delta/> und <http://www.boscarol.com/DeltaE.html> oder mit der Android App *Color Math* von Shahar Klinger verglichen.

Die **konkrete Vorgehensweise** ist wie folgt:

- Für die Durchführung beider Experimente wird der Einsatz von Bildmaterial im sRGB-Standard definiert, welcher mit Bruce Lindbloom's Color Calculator kompatibel ist. Das Bildmaterial zu Experiment 1 (idealisiertes Setting) wird zur Gänze innerhalb der Software Nuke erstellt. Hier kann also ohne Umwege direkt im sRGB-Farbraum gearbeitet werden; zur weiteren Farbanalyse sind keine zusätzlichen Schritte notwendig. Die bei Experiment 2 (realistisches Setting) entstehenden Bildsequenzen sind im Rec.709-Farbraum codiert. Die Konvertierung dieser Bilder in den sRGB-Standard erfolgt in der Software Adobe After Effects, wo sie abschließend als verlustfreies 16-Bit- TIFF-Bildformat exportiert werden (weitere Informationen siehe Kapitel „4.4.10. Materialaufbereitung zur Analyse“).
- Das Bildmaterial für Experiment 2 ist, bedingt durch den Einsatz einer digitalen Filmkamera, mit einem Rauschsignal überlagert. Dieses Phänomen tritt bei digitalen Bildwandlern auf und äußert sich durch stetig wechselnde, kleinere Flecken im Bild, d.h. Abweichungen im Bezug auf die eigentlich vorhandenen Farb- und Helligkeitsinformationen. Ursachen dafür sind u. a. das bei der Photonen-Absorption entstehende Schrotrauschen, Dunkelstromrauschen und das thermische Rauschen

(Schmidt, 2013, S. 325). Über Mittelwertbildungen lässt sich das Rauschsignal eliminieren bzw. auf ein Minimum reduzieren (Schmedes, 2014, S. 90). In diesem Fall wird dabei wie folgt vorgegangen:

Aus dem Videomaterial werden jeweils 12-Frames-andauernde Bildsequenzen mit relevanten Bildinhalten als TIFF exportiert. Mithilfe des Blend-Nodes in der Software Nuke werden diese Sequenzen anschließend jeweils zu durchschnittlich-gewichteten Einzelbildern zusammengefügt. Diese werden schließlich für die weitere Analyse herangezogen.

- Das Auslesen der Farben findet ebenso in der Software Nuke statt. Gemessen werden dabei nicht einzelne Pixel-Werte, sondern Durchschnittswerte relevanter Bildausschnitte, wie beispielsweise den Übergängen von Farbpatches zum Hintergrund bzw. die Mitte von Farbpatches.
- Für beide Experimente gilt: Im Referenzbild und dem fertigen Keyingergebnis wird an jeweils exakt der gleichen Stelle eine Pixelgruppe selektiert, wodurch sich automatisch der Durchschnittswert dieser Selektion ablesen lässt - und zwar in Form linearisierter, floating-point RGB-Werte, also Werte zwischen 0 und 1.
- Zur Farbdifferenzberechnung sind jedoch CIELAB-Werte notwendig. Für eine Wandlung der RGB-Werte nach Lab müssen diese als Zwischenschritt nach XYZ gewandelt werden. Diese Aufgabe übernimmt der CIE Color Calculator der Bruce Lindbloom-Website automatisch (Lindbloom, 2012-c).
- Die errechneten Lab-Werte werden in den Color Difference Calculator übertragen. Ein Klick auf „Calculate“ berechnet, neben anderen Werten, den gesuchten CIEDE2000-Wert, hier mit „CIE 2000“ betitelt.
- Die Ergebnis-Werte werden schließlich über Tabellen visuell aufbereitet und zur Diskussion gestellt. Generell gilt: Je niedriger die Delta-E-Werte ausfallen, desto *ähnlicher* sind sich Referenzbilder und Keyingresultate – und dementsprechend *gelungener* ist das Resultat des Keying- und Compositing-Vorgangs zu werten.

### 4.3 Experiment 1: Idealisiertes Setting

Dieser Test demonstriert die Arbeitsweise der Keyer Ultimatte und Keylight in einer künstlichen, idealisierten Umgebung ohne äußere Störeinflüsse wie beispielsweise dem Sensor-Rauschen von Kameras.

#### 4.3.1 Herangehensweise

Eingesetzt wird hierfür die Software *Nuke* von Foundry. Der Einfachheit und Genauigkeit halber, und auch um mögliche Fehlerquellen zu minimieren, findet der gesamte Test innerhalb der Software statt – es wurden also keine separaten Grafik-Dateien zur Analyse erzeugt.

Zur Analyse der Keyingqualitäten wurden auf einer virtuellen Leinwand Farbfelder und Farbverläufe auf verschiedenfarbigen Hintergrundflächen erstellt. Die Auswahl der Farbfelder erfolgte in Abstimmung mit den zur Verfügung stehen Farbfeldern aus Experiment 2 und in Absprache mit dem Erstbetreuer dieser Arbeit, siehe Abschnitt 5.5. Untersucht wurden die Primärfarben Rot, Grün und Blau, die Sekundärfarben Cyan, Magenta und Gelb, drei Hauttöne und drei Haarfarben. Die RGB-Werte für Haut- und Haarfarben wurden den Videoaufnahmen von Experiment 2 entnommen. Für eine flexible Ausgangsposition zur späteren Analyse wurde für jede dieser Farben auf der Leinwand eine Zeile angelegt mit je:

- einem Verlauf der jeweiligen Farbe von 0% bis 100% Transparenz über eine Breite von 100 Pixel vom linken Bildschirmrand ausgehend. Dies bedeutet, um festzustellen, welche Mischfarbe bei einem Transparenzwert von beispielsweise „50“ entsteht, kann so einfach der Farbwert abgelesen werden, der sich 50 Pixel vom linken Bildschirmrand entfernt befindet.
- einem 50x50 Pixel-großen Quadrat in dem jeweils zu 100% gesättigten Farbton. Dieses Quadrat verfügt zusätzlich über einen weichen Rand, womit auch hier das Mischverhalten zur Hintergrundfarbe der Leinwand analysiert werden kann.
- Sieben weiteren, gleichwertigen Quadraten, die jeweils die betreffende Farbe in

## 4 Experimente

den Sättigungsstufen 75%, 50%, 25% und 10% und den Helligkeitsabstufungen 75%, 50%, 25% und 10% repräsentieren.

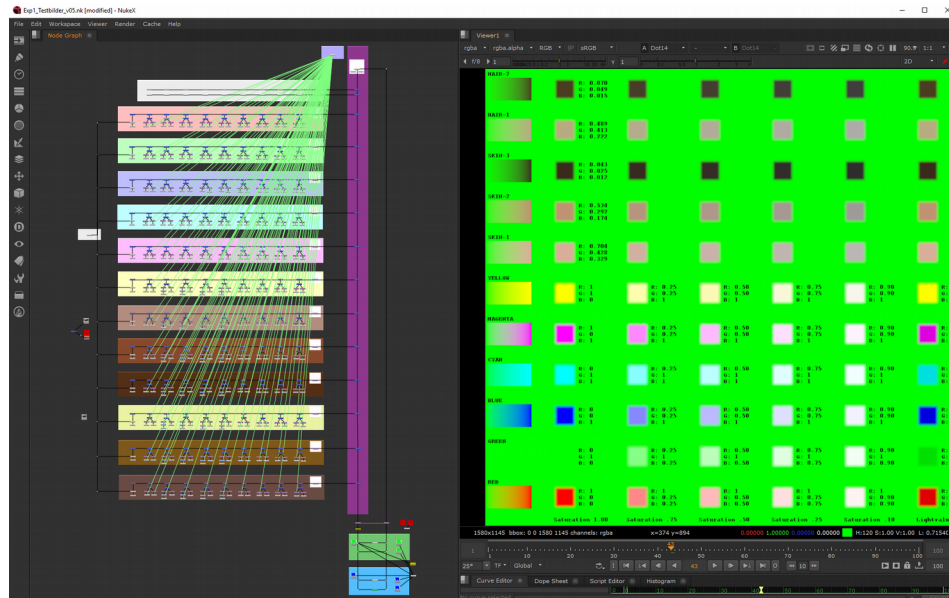


Abbildung 28: Screenshot des hinter Experiment 1 (Idealisiertes Setting) liegenden Nuke-Scripts.

Es wurde entschieden, den Fokus auf die Analyse der zwei weit verbreiteten Backing-Farben Grün und Blau zu richten und somit zwei Referenzbilder erstellt: Einmal wurden die eben erwähnten Farbfelder mit einem rein-grünen Hintergrund ( $R=0$ ,  $G=1$ ,  $B=0$ ) hinterlegt und einmal mit reinem Blau ( $R=0$ ,  $G=0$ ,  $B=1$ ). Die dazugehörigen Composites entstanden, indem, wie bereits im Abschnitt 4.1 erwähnt, als ersten Schritt diese Referenzbilder jeweils mit den beiden Keyern Ultimatte und Keylight unter Verwendung der Backing-Farben Grün und Blau gekeyt wurden. Im zweiten Schritt wurden diese Keyingergebnisse jeweils wieder über eine rein-grüne bzw. eine rein-blaue Fläche gelegt. In der Theorie sollten diese Composites den Referenzbildern gleichen bzw. sehr ähnlich sein. Wie sehr sich die Bilder gleichen, wird durch Ermittlung der Delta-E-Werte sichtbar (siehe Kapitel 4.2 Messung der Matte-Qualität).

### 4.3.2 Testergebnisse und Analyse

Als zu analysierende Bereiche wurde definiert, jeweils komplett opake Teile der Farbflächen zu betrachten (die Mitte der 50x50 Pixel-großen Quadrate) und eine Durchschnittsfläche der Übergänge von den Farbflächen zu den Hintergründen.

|            |                                                                                   |                                                       |                                                                                   |                                                       |                                                                                     |                                                       |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| Hautfarben |  | R: <b>0.704</b><br>G: <b>0.428</b><br>B: <b>0.329</b> |  | R: <b>0.534</b><br>G: <b>0.292</b><br>B: <b>0.174</b> |  | R: <b>0.043</b><br>G: <b>0.025</b><br>B: <b>0.012</b> |
| Haarfarben |  | R: <b>0.489</b><br>G: <b>0.413</b><br>B: <b>0.222</b> |  | R: <b>0.070</b><br>G: <b>0.049</b><br>B: <b>0.015</b> |  | R: <b>0.014</b><br>G: <b>0.010</b><br>B: <b>0.009</b> |
| RGB        |  | R: <b>1</b><br>G: <b>0</b><br>B: <b>0</b>             |  | R: <b>0</b><br>G: <b>1</b><br>B: <b>0</b>             |  | R: <b>0</b><br>G: <b>0</b><br>B: <b>1</b>             |
| CMY        |  | R: <b>0</b><br>G: <b>1</b><br>B: <b>1</b>             |  | R: <b>1</b><br>G: <b>0</b><br>B: <b>1</b>             |  | R: <b>1</b><br>G: <b>1</b><br>B: <b>0</b>             |

Abbildung 29: Experiment 1: Übersicht der Testfarben vor Grau.

Die Ergebnisse der Farbunterschied-Berechnungen sind auf folgenden Seiten tabellarisch dargestellt. Jeder zu analysierenden Farbe ist ein Buchstabe zugeordnet. Die genaue Position der Farbmessstellen wird jeweils eingangs in den folgenden Unterkapiteln dargestellt. Die dort sichtbaren weißen Rahmen rund um die Buchstaben symbolisieren dabei den Bereich, dessen Durchschnitts-Farbwert gemessen wurde (siehe Abbildung 30).

Jede Zeile der Tabelle ist einer bestimmten, zu analysierenden Farbe gewidmet. Es finden sich jeweils Delta-E-Wertepaare nebeneinander, die durch den Vergleich der Referenzbilder mit den Composites entstanden sind – jeweils für die Hintergrundfarben Grün und Blau und jeweils unter Einsatz des Ultimatte-Keyers und durch Keylight. Jedem Wertepaar wird zur späteren, einfacheren Referenzierung im Analysetext eine eindeutige ID zugewiesen. Der niedrigere der beiden Werte wird fettgedruckt dargestellt und deutet auf eine nähere Übereinstimmung mit dem Referenzbild, sprich ein *besseres* Ergebnis, hin. In jeder Zeile wird außerdem, über beide Hintergrundfarben hinweg, das beste Ergebnis (= niedrigster Wert) jeweils grün und das Schlechteste (= höchster Wert) rot

## 4 Experimente

dargestellt. Diese Formatierungsrichtlinien werden auch auf mehrere Zellen einer Zeile angewandt, sollten sich die Ergebniswerte gleichen. Beziehungsweise entfallen sie, wenn alle Werte einer Zeile gleich hoch sind. In den Zeilen ganz rechts finden sich die errechneten Durchschnitts-Delta-E-Werte der jeweiligen Keyer bei einer Farbe für beide Backinghintergründe. Genauso befinden sich unterhalb der Keyer-Spalten Durchschnittsergebnisse aller Farben pro Hintergrund und Keyer.

### 4.3.2.1 Hautfarben vor Grün und Blau

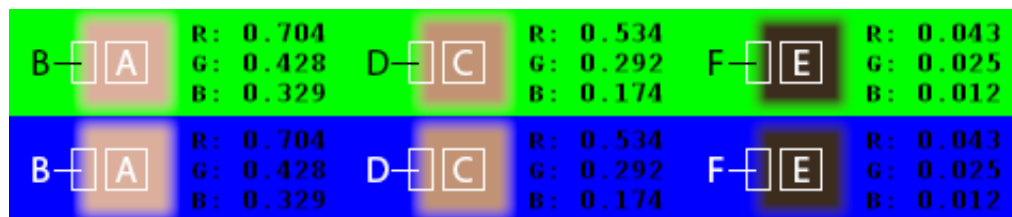


Abbildung 30: Experiment 1: Messstellen der Hautfarben vor Grün und Blau.

| HAUT-Farben  |                     | BG "Grün" |          |          | BG "Blau" |          |          |            |            |
|--------------|---------------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|------------|------------|
| Analysepunkt |                     | ID        | ΔE Ulti. | ΔE Keyl. | ID        | ΔE Ulti. | ΔE Keyl. | Ø ΔE Ulti. | Ø ΔE Keyl. |
| A            | Haut1 - Opak        | 1         | 0,00     | 0,00     | 2         | 0,00     | 0,00     | A          | 0,00       |
| B            | Haut1 - Transparent | 3         | 2,34     | 0,00     | 4         | 2,40     | 0,00     | B          | 2,37       |
| C            | Haut2 - Opak        | 5         | 0,00     | 0,00     | 6         | 0,00     | 0,00     | C          | 0,00       |
| D            | Haut2 - Transparent | 7         | 1,12     | 0,00     | 8         | 2,30     | 0,00     | D          | 1,71       |
| E            | Haut3 - Opak        | 9         | 0,00     | 0,00     | 10        | 0,00     | 0,00     | E          | 0,00       |
| F            | Haut3 - Transparent | 11        | 11,00    | 0,00     | 12        | 4,33     | 0,00     | F          | 7,67       |
| Ø ΔE         |                     |           | 2,41     | 0,00     |           | 1,51     | 0,00     |            | 1,96       |

Tabelle 2: Experiment 1-Testergebnisse: Hautfarben vor den Backing-Farben Grün und Blau.

Folgende Erkenntnisse gehen aus den Daten hervor:

- Keylights Ergebnisse mit den Default-Einstellungen entsprechen exakt den Referenzbildern – sowohl mit grünem, als auch mit blauem Hintergrund.
- Beide Keyer können die Vollton-Farben perfekt reproduzieren. Die Keying-



## 4 Experimente

und Despilling-Algorithmen funktionieren bei diesen Farbtönen also sehr gut und führen zu keinen Farbtonverschiebungen.

- Ultimatte kann die Farbverläufe von Vordergrund zu Hintergrund nicht korrekt nachbilden. Die Verläufe erreichen bereits nach der Hälfte der eigentlichen Breite die Hintergrundfarbe. Der Greenscreen generiert dabei den höchsten Unterschied zum Original bei der dunkelsten Hautfarbe.

### 4.3.2.2 Haarfarben vor Grün und Blau

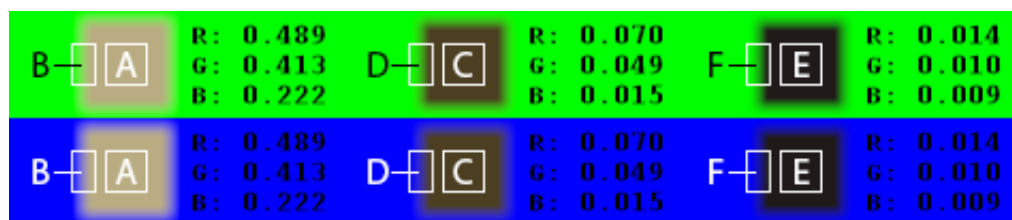


Abbildung 31: Experiment 1: Messstellen der Haarfarben vor Grün und Blau.

| HAAR-Farben  |                       | BG "Grün" |          |          | BG "Blau" |          |          |            |            |
|--------------|-----------------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|------------|------------|
| Analysepunkt |                       | ID        | ΔE Ulti. | ΔE Keyl. | ID        | ΔE Ulti. | ΔE Keyl. | Ø ΔE Ulti. | Ø ΔE Keyl. |
| A            | Blond - Opak          | 13        | 7,11     | 0,00     | 14        | 0,00     | 0,00     | A          | 3,55       |
| B            | Blond - Transparent   | 15        | 0,85     | 0,00     | 16        | 3,21     | 0,00     | B          | 2,03       |
| C            | Braun - Opak          | 17        | 0,96     | 0,00     | 18        | 0,00     | 0,00     | C          | 0,48       |
| D            | Braun - Transparent   | 19        | 10,38    | 0,00     | 20        | 4,22     | 0,00     | D          | 7,30       |
| E            | Schwarz - Opak        | 21        | 0,00     | 0,00     | 22        | 0,00     | 0,00     | E          | 0,00       |
| F            | Schwarz - Transparent | 23        | 11,71    | 0,00     | 24        | 4,63     | 0,00     | F          | 8,17       |
| Ø ΔE         |                       |           | 5,17     | 0,00     |           | 2,01     | 0,00     |            | 3,59       |

Tabelle 3: Exp1-Testergebnisse: Haarfarben vor den Backing-Farben Grün und Blau.

Folgende Erkenntnisse gehen aus den Daten hervor:

- Keylights Ergebnisse mit den Default-Einstellungen entsprechen exakt den Referenzbildern – sowohl mit grünem, als auch mit blauem Hintergrund.
- Ultimatte kann die Farbverläufe von Vordergrund zu Hintergrund nicht korrekt nachbilden. Die Verläufe erreichen bereits nach der Hälfte der

eigentlichen Breite die Hintergrundfarbe.

- Ultimatte liefert bei diesem Test mit der Backing-Farbe Grün deutlich schlechtere Resultate, als mit Blau. Einzige Ausnahme ist der Übergang von Blond zum Hintergrund.
- Ultimatte schneidet bei den dunkleren, opaken Haarfarben mit  $\Delta E$ -Werte nahe Null sehr gut ab – der blonde, opake Farbton erhält jedoch beim Greenscreen einen merklichen Rot-Stich.
- Je dunkler die Haarfarbe, desto schlechter die Ergebnisse.

### 4.3.2.3 Weitere Farben vor Grün und Blau

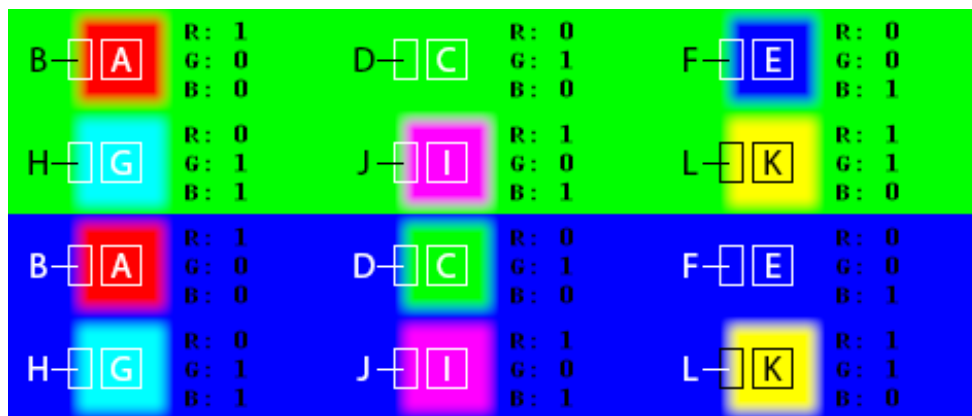


Abbildung 32: Experiment 1: Messstellen der Farben RGB und CMY vor Grün und Blau.

## 4 Experimente

| Weitere Farben   |                       |           |                  |                  |           |                  |                  |                        |                        |
|------------------|-----------------------|-----------|------------------|------------------|-----------|------------------|------------------|------------------------|------------------------|
|                  |                       | BG "Grün" |                  |                  | BG "Blau" |                  |                  |                        |                        |
|                  | Analysepunkt          | ID        | $\Delta E$ Ulti. | $\Delta E$ Keyl. | ID        | $\Delta E$ Ulti. | $\Delta E$ Keyl. | $\bar{\Delta E}$ Ulti. | $\bar{\Delta E}$ Keyl. |
| A                | Rot - Opak            | 25        | 0,00             | 0,00             | 26        | 0,00             | 0,00             | A                      | 0,00                   |
| B                | Rot - Transparent     | 27        | 1,44             | 0,00             | 28        | 0,73             | 0,00             | B                      | 1,08                   |
| C                | Grün - Opak           | 29        | 0,00             | 0,00             | 30        | 0,00             | 0,00             | C                      | 0,00                   |
| D                | Grün - Transparent    | 31        | 0,00             | 0,00             | 32        | 1,09             | 0,00             | D                      | 0,55                   |
| E                | Blau - Opak           | 33        | 0,00             | 0,00             | 34        | 0,00             | 0,00             | E                      | 0,00                   |
| F                | Blau - Transparent    | 35        | 1,40             | 0,00             | 36        | 0,00             | 0,00             | F                      | 0,70                   |
| G                | Cyan - Opak           | 37        | 42,53            | 44,05            | 38        | 26,73            | 27,36            | G                      | 34,63                  |
| H                | Cyan - Transparent    | 39        | 22,27            | 18,64            | 40        | 15,14            | 11,66            | H                      | 18,70                  |
| I                | Magenta - Opak        | 41        | 0,00             | 0,00             | 42        | 19,06            | 20,07            | I                      | 9,53                   |
| J                | Magenta - Transparent | 43        | 5,17             | 0,00             | 44        | 10,60            | 9,06             | J                      | 7,88                   |
| K                | Gelb - Opak           | 45        | 40,75            | 42,52            | 46        | 0,00             | 0,00             | K                      | 20,38                  |
| L                | Gelb - Transparent    | 47        | 19,19            | 16,20            | 48        | 4,77             | 0,00             | L                      | 11,98                  |
| $\bar{\Delta E}$ |                       |           | 11,06            | 10,12            |           | 6,51             | 5,68             |                        | 8,79                   |

*Tabelle 4: Exp1-Testergebnisse: Die Farben RGBCMY vor den Backing-Farben Grün und Blau.*

Folgende Erkenntnisse gehen aus den Daten hervor:

- Die Primärfarben RGB, opak und als Verlauf zum Hintergrund, führen bei beiden Keyern zu sehr guten Resultaten. Keylight kann diese perfekt, Ultimatte nahezu-perfekt abbilden.
- Beide Keyer liefern bei den analysierten Farben recht ähnliche Ergebnisse. Ultimatte kann jedoch erneut, im Gegensatz zu Keylight, die Farbverläufe von Vordergrund zu Hintergrund nicht korrekt nachbilden. Die Übergänge erscheinen zu hart und zu dunkel. Bereits nach der Hälfte der eigentlichen Breite ist die Hintergrundfarbe erreicht. Für die Primärfarben RGB gelingt dies bei diesem Test besser, als bei den Haut- und Haarfarben. Jedoch um einiges schlechter bei den Sekundärfarben CMY.
- Beim Greenscreen liefern beide Keyer besonders schlechte Ergebnisse bei den Farben Cyan und Gelb, was auf den hohen Grünanteil in diesen Farben zurückzuführen ist. Bei Cyan resultiert das fehlende Grün in einer starken Farbtonverschiebung nach Blau. Gelb wird durch die Verschiebung Richtung Rot zu Orange.

- Beim Bluescreen liefern beide Keyer besonders schlechte Ergebnisse bei den Farben Cyan und Magenta, was auf den hohen Blauanteil in diesen Farben zurückzuführen ist. Bei Cyan resultiert das fehlende Blau in einer starken Farbtonverschiebung nach Grün. Magenta erfährt eine Verschiebung Richtung Rot.
- Die starken Farbtonverschiebungen beim Greenscreen-Keying in den Bereichen Gelb und Cyan und beim Bluescreen-Keying in den Bereichen Cyan und Magenta waren vorhersehbar. Der gleich hohe Grün- und Blauanteil in Cyan müßte diesen Farbton für beide Keyingszenarien gleichermaßen wenig geeignet erscheinen lassen; jedoch treten beim Greenscreen durchschnittlich 57,5% höhere Farbtonverschiebungen auf als beim Bluescreen.

### 4.4 Experiment 2: Realistisches Setting

Dieser Teil des Experiments und dessen Auswertung bildet den Kern dieser Arbeit, weshalb diesem besonders umfangreiche Recherchen und Testaufnahmen voraus gingen. In folgenden Sub-Kapiteln finden sich Forschungsergebnisse und Arbeitsschritte dokumentiert, die maßgeblich zur Beantwortung der Forschungsfragen beitrugen.

Ein Grundproblem bei der praktischen Durchführung von Keying-Vorgängen liegt in der Natur der Sache selbst begründet: Es lässt sich defakto nicht sagen, wie gut bzw. realistisch eine fertige Komposition tatsächlich ist, da für die jeweilige Szene keine Referenzaufnahme aus der Realität zum Vergleich existiert. Wäre es beispielsweise ohne erheblichen Aufwand möglich eine Szene zu filmen, in welcher eine Person vor dem Grand Canyon steht, so wäre es wohl die beste Option diese Aufnahme auch real – sprich *on location* – durchzuführen. Filmt man die Person aber vor einem Greenscreen und platziert diese nachträglich mithilfe beschriebener Keying-Techniken in eine Grand Canyon-Szene, so lässt sich mit ausreichendem

Know-how und Geschick zwar eine glaubwürdige Illusion erstellen – mit 100%iger Gewissheit kann jedoch nicht behauptet werden, dass das fertige Ergebnis realistisch aussieht, da ja keine Referenz existiert und es sich nur um eine Annäherung an die *vermutete Realität* handelt.

Natürlich ist dies in realen Anwendungsfällen auch gar nicht notwendig – es reicht ein Ergebnis zu erzielen, dass einen richtigen und realistisch-anmutenden Eindruck hinterlässt. Es geht also letztlich um eine subjektive Bewertung des Gezeigten.

Im Zuge dieses Tests musste jedoch ein Weg gefunden werden, wie sich dennoch in genau solch einer Situation die Qualität von Keying- und Compositingvorgängen, basierend auf real-gefilmten Aufnahmen, messen lässt.

Als **Rahmenbedingung** für die Durchführung dieses Experiment wurde eine **kostengünstige, einfach zu reproduzierende Vorgehensweise** definiert, die **von einer einzelnen Person durchgeführt** werden können soll. Es galt daher nach effizienten Lösungen zu suchen, um Zeit- und finanzielle Aufwände im Rahmen zu halten.

### 4.4.1 Überlegungen zum Experimentablauf

Wie bereits im Eingangskapitel 4.1 Ausgangssituation und Herangehensweise kurz beschrieben, wurde nach einigen Überlegungen ein Ablauf gefunden, der es ermöglichte, die Keyingergebnisse mit „Referenzaufnahmen“ vergleichen zu können. Im folgenden wird der Ablauf des zweiten Experiments prototypisch beschrieben. Eine detaillierte Beschreibung des effektiven Ablaufs befindet sich im Abschnitt 4.4.9 Ablaufdokumentation: Finale Aufnahmen.

**01.** Das zu-keyende Objekt (Vordergrundobjekt, VG) wird vor einer Backing-Fläche (Hintergrund, HG) aufgestellt. Vordergrund und Hintergrund werden jeweils korrekt belichtet, während gleichzeitig das ideale Ausleucht-Verhältnis zwischen ihnen hergestellt wird (siehe Kapitel 4.4.4. Belichtung Vordergrund / Hintergrund). Eine frontal zu Vordergrund und Hintergrund ausgerichtete Kamera fokussiert auf den VG, stellt dabei sicher, dass dieser in seiner Tiefe komplett scharf abgebildet wird,

## 4 Experimente

und lässt den HG in leichter Unschärfe.



Abbildung 33: Prototypischer Ablauf Experiment 2: Schritt 1

**02.** Im nächsten Schritt entstehen die Keying-Aufnahmen – also die Aufnahmen vor den gängigen Backing-Farben wie Grün und Blau bzw. zu Testzwecken auch vor Rot, Weiß, Schwarz und Mittelgrau. Die HG-Flächen werden dabei jeweils ausgetauscht und deren Beleuchtung adjustiert. Dieser Schritt ist notwendig, da die Farbflächen unterschiedliche Luminanzwerte generieren und für einen optimierten Keyingvorgang immer das bereits erwähnte Beleuchtungsverhältnis zw. VG und HG vorherrschen soll. An der Szene selbst wird sonst nichts verändert. Vor allem ist ab diesem Schritt wichtig, die Position des VG-Objekts nicht mehr zu verändern. Die exakte Position des Hintergrunds ist nicht relevant solange dieser, durch die Kamera betrachtet, das VG-Objekt vollständig abdeckt.



Abbildung 34: Prototypischer Ablauf Experiment 2: Schritt 2

## 4 Experimente

**03.** Im folgenden Schritt entsteht die „Referenzaufnahme“. Die einfärbigen Hintergrundflächen werden gegen ein Fotomotiv ausgetauscht. Die Ergebnisse der Keying-Vorgänge können letztlich mit dieser Aufnahme verglichen und bewertet werden.



*Abbildung 35: Prototypischer Ablauf Experiment 2: Schritt 3*

**04.** Im finalen Schritt wird das Foto-Motiv separat aufgenommen, sprich das VG-Objekt wird einfach aus dem Bild entfernt. Diese Aufnahme kann später hinter die gekeyte Aufnahme des VG-Objekts platziert werden.



*Abbildung 36: Prototypischer Ablauf Experiment 2: Schritt 4*

Diese Schritte werden schließlich für **alle** in Frage kommenden **Vordergrundobjekte** wiederholt.

### 4.4.2 Auswahl der Vordergrundobjekte

Nachforschungen zur Auswahl passender Vordergrundobjekte, mit dem Ziel ein möglichst breites Spektrum an realistischen Keyingszenarien abzudecken, offenbarten schnell, wie komplex und weitläufig die Aufnahmen ausfallen konnten.

Wichtig erschien zunächst eine Fokussierung auf Aufnahmen mit Menschen und die vielen damit einhergehenden Merkmale: Hautfarbe, Haarfarbe, Haar-Typ, Kleidung, etc.

Da viele Keyingszenarien in der Praxis naturgemäß mit bewegten Motiven zu tun haben, wodurch der für Keyingalgorithmen besonders herausfordernde *Motion-Blur-Effekt* entsteht, mußten die Aufnahmen jeweils *statisch*, als auch *bewegt* angedacht werden.

Transparente und reflektierende Oberflächen/Materialien sollten ebenfalls Beachtung finden. Trinkgläser, Ziergegenstände, o. Ä. würden hierfür beispielsweise in Frage kommen.

Zur Bewertung von Farbverschiebungen /-verunreinigungen, die durch Spill und/oder Glare entstehen würden, bietet sich der Einsatz von Farbreferenztafeln (u. a. auch Farbtafel, Farbkarte oder Farbchart genannt) an. Diese decken naturgemäß eine Vielzahl an Farben ab und können zusätzlich zur Farbkalibrierung der Aufnahmen verwendet werden.

Schließlich galt es eine Möglichkeit zu finden, verschiedene „allgemeine“ Farben vor den Hintergründen abzubilden - mit verschiedenen Sättigungs- und Transparenzstufen. Dies könnte durch den Einsatz von Farbkartons und eigens angefertigte, bedruckte, transparente Folien erfolgen.

#### **Einsatz von Farbfächern:**

Eine naheliegende Vorgehensweise verschiedene Farben und Materialien vor den Backing-Hintergründen abzubilden, ist der Einsatz von tatsächlichen Gegenständen wie etwa Kleidung und Accessoires jeglicher Art / jeglichen Materials. Zur



#### 4 Experimente

---

Abdeckung eines breiten Farbspektrums würde hierfür eine große Anzahl an Objekten notwendig sein, deren konkrete Farben sich ohne Einsatz besonderer Messinstrumente nicht näher bestimmen lassen würden.

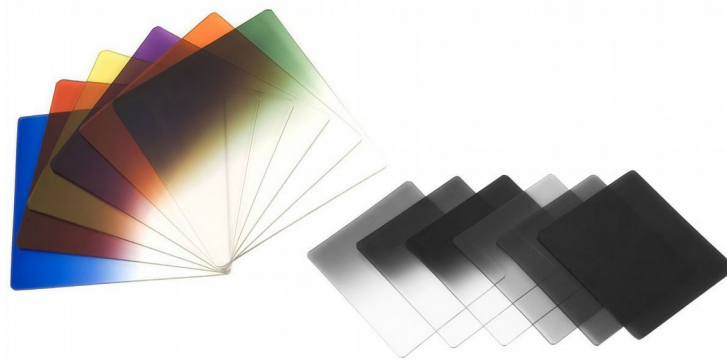
Eine simple und gleichzeitig effektive Lösung hierzu ist der Einsatz handelsüblicher Farbfächer. Diese werden zur Beurteilung von Farbkombinationen bzw. für Farbvergleiche eingesetzt und bieten naturgemäß eine große Auswahl an verbindlichen Farben. Sie sind preiswert in der Anschaffung und lassen sich sehr flexibel in der Zusammensetzung und platzsparend vor der Kamera montieren. Die Wahl fiel auf den Fächer „RAL K5“ der Firma RAL in der semi-matten Ausführung. Dieser setzt auf den normierten RAL-Farbstandard und enthält alle 213 Farbtöne der Farbsammlung „RAL Classic“:



*Abbildung 37: Farbfächer „RAL K5“ der Firma RAL  
(Amazon Europe Core S.à r.l., o.D.-a).*

Zur Beurteilung verschiedener Transparenz- und Sättigungsstufen von Farben wurde u.a. folgende Lösungen recherchiert:

- Transparente Folien, die mit eigens angefertigten Motiven wie Farbverläufen von vollständig opak nach transparent, etc. bedruckt sind.
- Verlaufsfilter in farbigen Ausführungen, wie sie bei Fotografien/Filmaufnahmen verwendet werden, um Bildteile abzdunkeln bzw. einzufärben:



*Abbildung 38: VerlaufsfILTER (Amazon Europe Core S.à r.l., o.D.-b).*

Diese Ansätze wurden jedoch zugunsten der Idee verworfen, vorhin erwähnte Farbfächer „in Unschärfe“ abzufilmen. Die dadurch entstehenden „weichen“ Kanten der Farbfächer-Blätter erzeugen - rein optisch - den Effekt eines Verlaufs von der Vollton-Farbe zu transparent bzw. dem jeweils aktuellen Hintergrund (Backing-Farbe, Foto-Motiv). Auch würden sich die einzelnen Blätter des Fächers relativ einfach, selbst in größerer Anzahl, vor der Kamera arrangieren und fixieren lassen.

Die Idee, gläserne Materialien in den Test miteinzubeziehen, wurde ebenfalls wieder verworfen, da nach näherer Betrachtung es sich hierbei optisch ebenfalls nur um eine Überlagerung eines bestimmten, transparenten Farbtons handelt und diese mithilfe der Analyse der besagten weichen Übergänge der Farbfächer-Blätter bereits abgedeckt würden. Auch wurde auf die Analyse reflektierender Oberflächen aufgrund der einfachen Möglichkeit Farbverschiebungen durch Spill oder Glare über die Farbfächer-Blätter selbst bzw. der Farbreferenztafel zu messen, verzichtet.

### **Zur Analyse von Hauttönen:**

Ursprüngliche Überlegungen zur Thematik Hauttöne und Haarfarben zu analysieren, beruhten naturgemäß auf dem Ansatz mit Menschen zu arbeiten. Partizipanten mit unterschiedlicher Haut- und Haarfarbe würden vor den verschiedenen einfärbigen Hintergründen und Fotomotiven platziert und gefilmt. Analog zur eingangs erwähnten Arbeit mit Farbfächern, wurde auch in diesem Fall eine praktikablere,

effizientere und vor allem reproduzierbare Alternative gefunden:

Der *PANTONE SkinTone Guide* ist ein Farbfächer, produziert vom Hersteller des international verbreiteten Farbsystems PMS (Pantone Matching System) und umfasst 110 menschliche Hautton-Schattierungen. Laut eigenen Angaben entstand dieser im Zuge tausender, wissenschaftlicher Messungen von echten Hautfarbtönen quer über das gesamte Spektrum der menschlichen Haut und hatte das Ziel, diesem so gut wie physikalisch möglich zu entsprechen („PANTONE SkinTone™ Guide“, o.D.).



*Abbildung 39: PANTONE SkinTone Guide.  
(„PANTONE SkinTone™ Guide“, o.D.).*

Zwar ist bedrucktes Papier effektiv nicht mit echter, menschlicher Haut zu vergleichen – Voraussetzung für Umsetzung des in Kapitel 4.2 beschriebenen Ablaufs zur Messung der Matte-Qualität ist jedoch eine pixelgenaue Übereinstimmung der Position der Vordergrundobjekte in den Keyingaufnahmen und den Referenzaufnahmen. Beim Dreh mit realen Menschen ist diese Bedingung, realistisch betrachtet, nicht einhaltbar. Selbst kleinste Abweichungen können die Messergebnisse stark verändern. Der Einsatz ausgewählter Farbfächer-Blätter des SkinTone Guides ist hingegen eine dankbare Lösung: Sie können mühelos vor der Kamera fixiert werden, und in Unschärfe abgefilmt lässt sich hier ebenso auf einfachem Weg Bewegung simulieren – ein Vorgang der mit realen Menschen

wiederum nicht auf reproduzierbare Weise umsetzbar wäre.

### **Zur Analyse von Haarfarben:**

Die Abbildung menschlicher Haare war in Anbetracht des geplanten „statischen Settings“, sprich mit dem Verzicht auf reale Personen und dem Einsatz von Farbfächern, schließlich wenig problematisch und sollte mit Perücken erfolgen: In Friseurkreisen ist es üblich dem Kunden zur Auswahl von Haarfarben Mappen vorzulegen, in denen alle verfügbaren Schattierungen demonstriert werden. Dabei wird echtes Haar in kleinen Büscheln in allen möglichen Farben eingesetzt:



*Abbildung 40: Haarfarbkarten.*

Da es im Zuge dieses Experiments hauptsächlich darum geht, aufzuzeigen, wie detailgetreu einzelne Haarsträhnen den Keyingvorgang überstehen und ob und wie stark es dabei zu Farbverschiebungen kommt, erschien der Einsatz solcher vorgefertigter Haarbüschel ideal.

### **4.4.3 Auswahl der Hintergründe**

Erste Überlegungen zur Hintergrundgestaltung gingen in Richtung der Nutzung eines Greenscreen-Studios. Es musste über die Möglichkeit verfügen, die Hintergrundflächen beliebig tauschen zu können. Für das Experiment relevant sind, neben den klassischen Backing-Farben Grün und Blau, auch Rot, Weiß und

Schwarz. Die für die Referenzaufnahmen notwendigen Foto-Hintergründe müssten gesondert angefertigt und, abhängig von der Größe der letztlich verwendeten Vordergrundobjekte, in ausreichender Größe gedruckt werden.

Die Suche nach weiteren Ansätzen ergab die weitaus effizientere und praktikablere Lösung einen großflächigen TV-Bildschirm als generelle Hintergrundfläche einzusetzen. Die dadurch entstehenden Vorteile waren offensichtlich: Die Anzeige lässt sich äußerst flexibel mit beliebigem Material bespielen. Über einen, mit dem TV verbundenen Computer, könnte das nötige Bildmaterial sogar live angepasst und optimiert werden. Zudem lassen sich an den TV-Geräten selbst die Farbwiedergabe, der Kontrastumfang, etc. anpassen. Durch die vorhandene Hintergrundbeleuchtung des Screens entfällt weiters auch die Notwendigkeit der separaten Ausleuchtung des Hintergrunds; wobei sich die Stärke der Hintergrundbeleuchtung meist sehr gut justieren lässt. Auf eine mögliche ungleiche Helligkeitsverteilung würde man zwar wenig Einfluss nehmen können, jedoch lässt sich diese mit besonderen Monitoringtools messen, wodurch man gezielt die ausreichend gleichmäßig beleuchteten Bereiche der TV-Oberfläche ausmachen und letztlich nutzen kann (siehe Kapitel „4.4.4. Belichtung Vordergrund / Hintergrund“).

In der Praxis finden TV-Bildschirme als Keyinghintergrund, mitunter aufgrund der vergleichsweise geringen Dimensionen, selten Verwendung. Gänzlich abwegig bzw. neuartig ist die Idee jedoch nicht: So setzte z.B. Yung-Yu Chuang in seiner Arbeit „New Models and Methods for Matting and Compositing“ Computer-Bildschirm als Bluescreen ein (2004, S. 25ff). TV-Bildschirme erfüllen die Basisanforderungen von Keyinghintergründen: eine möglichst gleichmäßig ausgeleuchtete Fläche, mit möglichst intensiven / reinen Backing-Farben (Okun & Zwerman, 2010, S. 98). Sie stellen somit eine geeignete Lösung im Rahmen des angedachten Experiments dar.

### **4.4.4 Belichtung Vordergrund / Hintergrund**

Zur Art und Weise wie Vordergrund und Hintergrund in Keyingszenarien ausgeleuchtet werden sollen, wurden aufschlussreiche, wenn auch unterschiedliche Angaben von verschiedenen Experten herangezogen.

VFX-Veteran Steve Wright gibt in seinem Artikel „Screaming at the Greenscreen“ als Richtwert an, den Hintergrund eine Belichtungsstufe niedriger auszuleuchten, als für das Hauptlicht verwendet wird (Wright, 2011, S. 2). Im Kapitel 2.3 seines Video-Kurses „VFX-Keying: Master Course“, spricht er davon, ein Bluescreen solle einen Helligkeitswert zwischen 0.6 und 0.8 aufweisen (also gleichzusetzen mit 60 - 80 IRE) (Wright, 2016).

Fu Man-Man kommt bei der Auswertung seines chrominanz-basierenden Keying-Tests zum Ergebnis, dass zwischen Vordergrund und Hintergrund ein möglichst hoher Kontrast vorliegen soll (Fu, 2008, S. 80).

Mario Zeller, Experte im Bereich der Video-Postproduktion, weist im Gespräch mit dem Autor dieser Arbeit in diesem Zusammenhang grundsätzlich auf die Wichtigkeit der Maximierung der Pegelunterschiede zwischen den einzelnen Farbkanälen hin. Für eine grünen Hintergrund gilt es demnach den Grün-Pegel möglichst Richtung 100 IRE zu trimmen, bzw. 90 um ein Clippen zu vermeiden, während die beiden anderen Farbkanäle, Rot und Blau, möglichst niedrig ausfallen sollen.

Das American Cinematographer Manual widmet dieser Thematik ein eigenes Kapitel. Demnach richtet sich die optimale Beleuchtung des Hintergrunds nach der gewählten Blende der Kamera (Goi, 2013, S. 595). Der Hintergrund soll voll- aber nicht überbelichtet werden. Am Beispiel eines Greenscreens, soll der Grün-Kanal des Hintergrunds dem Grünanteil einer richtig-belichteten, weißen Fläche des Vordergrunds entsprechen, d.h einer Fläche, die 90 IRE in der Waveform erzeugt und somit noch über Details aufweist / nicht clippt (Goi, 2013, S. 598). Ist man in der Situation, Vordergrund und Hintergrund mit der selben Lichtquelle ausleuchten zu müssen, so wird es nicht möglich sein, Grün im Hintergrund auf einen Wert von 90 IRE zu bringen, ohne dass dabei der Vordergrund überbelichtet wird. In diesem Fall gilt es jedenfalls die richtige Belichtung des Vordergrunds einzuhalten und Kompromisse in der Hintergrundausleuchtung hinzunehmen. Eine leichte Unterbelichtung sei hier gegenüber einer Überbelichtung zu bevorzugen. Je niedriger der Luminanz-Wert des Hintergrunds jedoch wird, desto kleiner werden natürlich die Pegeldifferenzen zwischen den einzelnen Farbkanälen, was zu einer

Verschlechterung des Alpha-Matte führt (Goi, 2013, S. 603).

Im Zuge der Durchführung dieses Experiments wurde schließlich folgende Vorgehensweise definiert: Festlegen der gewünschten Blende, Ausleuchtung einer Weißfläche im Vordergrund auf 90 IRE und anschließende Ausleuchtung des betreffenden Farbkanals des Hintergrunds auf ebenfalls möglichst 90 IRE, während dabei stets auch der Vordergrund im Auge behalten wird, um eine Überbelichtung zu vermeiden.

### **4.4.5 RAW-Aufzeichnung**

Wie bereits zu Beginn des Überkapitels erwähnt, zielt das zweite Experiment u. a. darauf ab, einen technisch möglichst hohen Qualitätsstandard zu erreichen. Je einwandfreier die Aufnahmen, d.h. wenig Komprimierungsartefakte, hohe Bittiefe, geringes Rauschen, etc., desto bessere Keyingresultate lassen sich erzielen.

Im Falle des zur Verfügung stehenden Equipments, impliziert dies die Aufnahme von RAW-Bildern – also Rohdaten von Kamerasensoren, welche direkt nach der Digitalisierung weitgehend ohne Bearbeitung auf Speichermedien geschrieben werden, ohne dass dabei bereits zu diesem Zeitpunkt Bildinformationen durch Kompression o. ä. verloren gehen oder Farbinformationen „eingebrennt“ werden (Reichmann, 2011).

Der ursprüngliche Plan RAW-Material zur Auswertung des zweiten Experiments heranzuziehen, schlug jedoch aus Gründen, die sich im Zuge der Testaufnahmen herausstellen, leider fehl (siehe Kapitel „4.4.8 Ablaufdokumentation Testaufnahmen“). Neben den RAW-Aufnahmen wurden die Szenen zusätzlich kameraintern mit dem XAVC-I Codec bei aktivem Rec.709-Profil aufgezeichnet, mit dem Ziel, eine Referenz zu schaffen, mit der sich die bearbeiteten RAW-Bilder schließlich vergleichen lassen würden. Dank der ebenfalls sehr hohen Aufnahmequalität in 10 Bit Farbtiefe bei 4:2:2 Subsampling, konnten diese Aufnahmen ebenfalls zur Auswertung herangezogen werden.

Im folgenden finden sich die vorab gesammelten Erkenntnisse über die RAW-

Aufzeichnungsmöglichkeiten mit der zur Verfügung stehenden Hardware dokumentiert.

Der Einsatz der Sony FS7 Kamera mit dem Zusatzmodul XDCA-FS7 ermöglicht in Kombination mit dem Monitor-Recorder Shogun von Atomos eine RAW-Bildaufzeichnung in Form von CinemaDNG-Sequenzen in 4K-DCI Auflösung bei einer Farbtiefe von 12 Bit pro Farbkanal und einem Subsampling von 4:4:4. Letzteres erweist sich im Zusammenhang mit Color Difference Keying als besonders vorteilhaft, da in diesem Fall keine Farbinformationen zum Zwecke der Datenreduktion verworfen werden (Schmidt, 2013, S. 118).

Die Aufzeichnung im RAW-Format führt zwar zur höchstmöglichen Bildqualität; allerdings hat dies auch seinen Preis: Im Vergleich zu kamerainternen Aufnahmen im XAVC-I-Codec bei aktivem Rec.709-Profil, die nur wenig Nachbearbeitung erfordern würden, um für die spätere Farbanalyse verwendet werden zu können, müssen RAW-Daten noch gezielt in der Postproduktion *entwickelt* werden. Es handelt sich um rohe, native Sensordaten, denen noch kein Farbraum und keine Gammakurve zugewiesen wurde (Sony Professional Solutions Europe, o.D., S. 5). Wie im Kapitel „4.2. Messung der Matte-Qualität“ erläutert, ist für die spätere Berechnung von Farbdifferenzen jedoch ein genormtes Ausgangsmaterial ausschlaggebend - in diesem Fall wird der Rec.709-Standard bzw. sRGB-Farbraum angestrebt. Für die Bearbeitung des RAW-Materials kommt die Software DaVinci Resolve von Blackmagic Design zum Einsatz. Dieses Tool wird im High-End-Bereich für Farbkorrektur und Grading verwendet und bietet umfangreiche Möglichkeiten Bildmaterial zu interpretieren und manipulieren.

Für eine RAW-Ausgabe muss der „Cine EI“-Modus der Kamera aktiviert werden. Dieser bewirkt eine veränderte Funktionsweise der Kamera. Sie ist dann im Verhalten mehr einer analogen Filmkamera nachempfunden, bei der die Bildentwicklung in der Nachbearbeitung stattfinden muss (Sony Professional Solutions Europe, 2015-a, S. 54). Unter anderem wird hierbei auch die Wahl der Farbprofile auf folgende drei eingeschränkt: S-Gamut / S-Log2, S-Gamut3 / S-Log3 und S-Gamut3.Cine / S-Log3. Zu Beginn war nicht klar, ob nun also, entgegen der



## 4 Experimente

---

Definition von RAW-Material, dem Signal bereits doch ein Farbraum und eine Gammakurve zugewiesen wird. Die Vorschau am Monitor der FS7 bzw. am Shogun-Recorder zeigte bei ersten Tests jedenfalls die bei Log-Videomaterial üblichen, ausgewaschenen Farben und das niedrige Kontrastverhältnis. Auf der Produktwebsite des RAW-Erweiterungsmoduls XDCA-FS7 und in dessen Handbuch konnten hierzu keinen näheren Informationen gefunden werden. Das Output-Format wird mit „4KRAW“ bzw. „12 Bit RAW“ beschrieben (Sony Professional Solutions Europe, 2015-b). Ein Online-Video des Camera Tech Specialist Ian McCausland konnte schließlich die Vermutung einer Log-basierenden Vorschau bestätigen. Die dort verwendete Hardware unterscheidet sich zur hiesigen einzig durch den verwendeten Recorder (*Odyssey7Q* von Convergent Design). McCausland spricht von der Notwendigkeit für eine RAW-Ausgabe die Kamera im Cine EI-Modus betreiben zu müssen, im Farbmodus S-Gamut3.Cine / S-Log3. Und er erwähnt, dass das RAW-Bild am Monitor standardmäßig im gewählten Log-Modus dargestellt wird und dass diese Darstellung durch den Einsatz von LUTs umgestaltet werden könne (AbelCine, 2015).

Für die Experimentaufnahmen bedeutet dies konkret, dass obwohl das RAW-Material letztlich in DaVinci Resolve direkt nach Rec.709 debayered werden würde, bei der Aufnahme selbst das Material S-Log3-gammacodiert dargestellt wird und für eine korrekte Belichtung der Szene deshalb besondere Richtlinien eingehalten werden müssen. Sony's Empfehlung im Falle von S-Log3 geht dahin, 90%-Weiß mit 61 IRE auszuleuchten:

| Input reflection | 0% Black (IRE0%) |    | 18% Grey (IRE20%) |     | 90% White (IRE100%) |     |
|------------------|------------------|----|-------------------|-----|---------------------|-----|
| Output           | IRE              | CV | IRE               | CV  | IRE                 | CV  |
| S-Log3           | 3.5%             | 95 | 41%               | 420 | 61%                 | 598 |
| S-Log2           | 3.0%             | 90 | 32%               | 347 | 59%                 | 582 |
| S-Log            | 3.0%             | 90 | 38%               | 394 | 65%                 | 636 |

*Tabelle 5: Belichtungsempfehlungswerte von Sony für S-Log-Aufnahmen  
(Sony Professional Solutions Europe, o.D., S. 6).*

Weitere Recherchen zum Thema RAW-Videoaufzeichnung offenbarten die

Komplexität und Schwierigkeiten der Thematik. Aufnahme und Entwicklung von RAW-Material folgen grundsätzlich keinem einheitlichen Standard; Kamerahersteller definieren allesamt ihre eigenen RAW-Formate deren Spezifikationen nicht öffentlich zugänglich sind (Rohdatenformat, 2018). Verschiedene Tools interpretieren deshalb die Metadaten und Sensordaten unterschiedlich, was naturgemäß zu unterschiedlichen Ergebnissen führt (Atomos Video, 2017). Dies kommt natürlich der Anforderung dieser Untersuchung, einem vorgegebenen Farbstandard zu entsprechen, nicht gerade zu Gute. Ein Vergleich zwischen der Verarbeitung von (RAW-)CinemaDNG-Sequenzen in der Software Adobe Camera RAW und DaVinci Resolve zeigt beispielsweise, dass die Adobe-Lösung bei Default-Settings zu einem schärferen Bild mit geringeren Debayering-Artefakten führt. Erkaufen würde man sich diesen Vorteil allerdings durch einen langsameren und weniger komfortablen Bearbeitungs-Workflow (Atomos Video, 2017).

Wie bereits eingangs erwähnt, wurde dennoch die Entscheidung gefällt, DaVinci Resolve für die Entwicklung des RAW-Materials einzusetzen. Die höheren Bearbeitungsvielfalt, die *Color Match*-Funktion mit ihrer Möglichkeit anhand der Analyse von Farbcharts automatisch Farbkorrekturen vorzunehmen zu können um dem Rec.709-Standard zu entsprechen, und allen voran die Option, RAW-Material beim anfänglichen Debayering-Vorgang direkt in den gewünschten Rec.709-Standard transformieren zu können, machen die Software insgesamt zu einem geeigneten Kandidaten für die Behandlung des RAW-Materials in diesem Szenario.

Zur Vereinfachung der Schreibweise und besseren Lesefluß wird an dieser Stelle für die folgenden Kapitel folgende Nomenklatur aufgestellt:

- Mit „**Rec.709-Aufnahmen**“ ist eine Aufzeichnung im XAVC-Intra-Codec auf die Speicherkarten der Kamera gemeint, im Gegensatz zu einer RAW-Aufzeichnung über den extern angeschlossenen Monitor-Recorder Shogun. In der Kamera wird dabei das „STD5-R709“-Gammaprofil aktiviert – Sony’s Voreinstellung für Rec.709-konforme Aufnahmen. Der Shogun-Recorder kommt hierbei sehr wohl auch zum Einsatz; jedoch nur als Vorschau-Monitor und seiner Monitoringtools wegen. Er ist standardmäßig für die Darstellung

von Rec.709-Material konfiguriert.

- Ist die Rede von „**RAW-Aufnahmen**“, so sind damit Aufzeichnungen über den extern angeschlossenen Monitor-Recorder Shogun gemeint; im Gegensatz zu kamera-internen XAVC-I-Aufnahmen. Die Kamera ist dabei auf den CineEI-Modus konfiguriert und liefert ein RAW-Signal im Farbraum S-Gamut3.Cine mit einer S-Log3-Gammakurve, welches am Shogun als CinemaDNG-Bildsequenz aufgezeichnet wird.

### 4.4.6 Testumgebung und genutzte Hardware

Für die Durchführung des praktischen Experiments war einiges an Equipment und ein abdunkelbarer Raum notwendig. Dem Autor dieser Arbeit bot sich die Möglichkeit professionelle Hardware der Firma *Media Productions* zu nutzen. Das Experiment wurde auf Basis dieser vorhandenen Ausstattung geplant:

#### **Raum: Privates Heimkino**

Für die Dreharbeiten wurde ein privater Heimkinoraum genutzt, der alle notwendigen Vorraussetzungen erfüllte: Ausreichende Größe, vorinstallierter, großflächiger Fernseher und die Möglichkeit der vollständigen Abdunkelung.



Abbildung 41: Heimkino als Set für die Dreharbeiten zu Experiment 2.

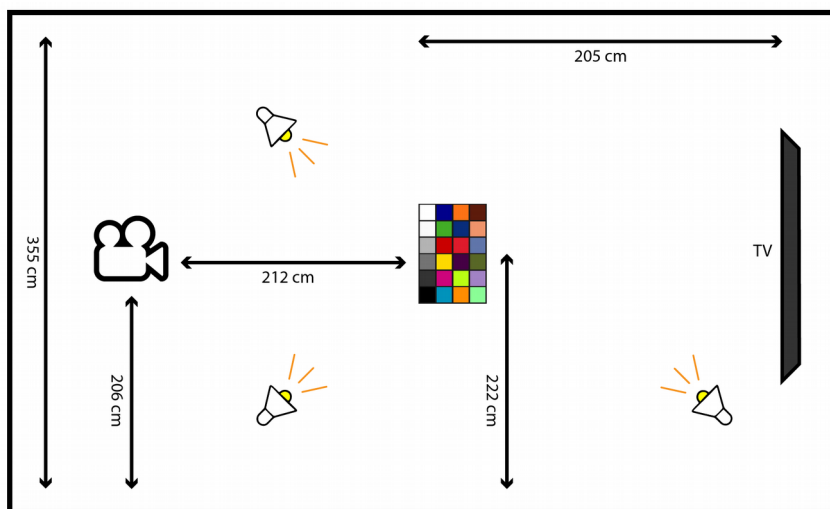


Abbildung 42: Grundriss-Skizze des Sets für die Dreharbeiten zu Experiment 2.

### **Kamera: Sony PXW-FS7 mit Erweiterungsmodul XDCA-FS7**

Sony's Solid-State Memory Camcorder bietet die Möglichkeit auf den internen XQD-Speicherkarten in 4K UHD (= 3.840 x 2.160 Pixel), 10 Bit, 4:2:2 Subsampling, im XAVC-Intra-Codec aufzuzeichnen. Erst durch Einsatz des vorhandenen Erweiterungsmoduls XDCA-FS7 ist es möglich ein RAW-Signal in 4K DCI (= 4.096 x 2.160 Pixel), 12 Bit bei 4:4:4 Subsampling auszugeben. Wie sich bei genauerer Betrachtung herausstellte, sind die Monitoring-Tools der Kamera für die Durchführung dieses Experiments leider suboptimal: Neben einer Zebra-Einstellung stehen Waveform-, Histogramm und eine Vectorscope-Ansicht zur Verfügung – die zur Bewertung der Pegel der einzelnen Farbkanäle wichtige *RGB-Parade* fehlt jedoch.

### **Objektiv: Sony FE PZ 28-135mm f/4 G OSS**

Diese Kit-Objektiv ist durch seinen großen Brennweiten-Umfang und seiner konstanten Blende von 4.0 sehr gut für die Durchführung dieser Testaufnahmen geeignet. Einzig eine komplett stufenlose Steuermöglichkeit der Blendenöffnung wäre wünschenswert gewesen, um gewünschte Belichtungssituationen noch präziser herstellen zu können. Die Rasterung der Blendensteuerung ist jedoch ausreichend klein, sodaß dies kein Hindernis für den Einsatz der Optik darstellte.

### **Kamera-Remotesteuerung: Manfrotto Fernbedienung LANC MVR901EPLA**

Dieser Stativgriff wurde zur Fernsteuerung der Kamera eingesetzt, um Verwackelungen bei den Aufnahmen zu vermeiden. Er wird über ein Klinkenkabel mit der Kamera verbunden und kann u. a. Aufnahmestart und -stopp-Signale weiterleiten.

### **Vorschau-Monitor / Recorder: Atomos Shogun**

Dieses Gerät wurde zum einen aufgrund seiner Fähigkeit die RAW-Aufnahmen der Sony FS7 aufzeichnen zu können eingesetzt und zum anderen wegen seiner umfangreichen Monitoring-Tools (inkl. RGB-Parade), die in diesem Fall zur möglichst exakten Bestimmung der Pegel-Werte notwendig sind. Die Firmware des Gerätes musste aktualisiert werden, denn erst seit Version 6.4 besteht die Möglichkeit RAW-Aufnahmen in Form von CinemaDNG-Sequenzen in 4K DCI, 12bit

bei 4:4:4 Subsampling aufzuzeichnen.

**Licht: dedolight DLED2.1-BI**

Zur Beleuchtung der Vordergrundobjekte wurde ein 3er-Set dedolight-Scheinwerfer verwendet. Sie bieten die Möglichkeit Lichtstärke und Farbtemperatur fein zu justieren und sind deshalb für diesen Einsatzzweck gut geeignet. Durch den möglichen Betrieb über das Stromnetz, anstatt Akkus, konnte auch eine konstant gleichmäßige Ausleuchtung garantiert werden. Einziges Manko war die fehlende Option 6.500 K als Farbtemperatur zu wählen; der verfügbare Bereich reicht von 2.800 K bis 6.000 K. Der Rec.709- bzw. sRGB-Standard definiert seinen Weißpunkt mit dem *CIE Standard Illuminant D65* - entspricht also einer Farbtemperatur von 6500 K (Schmidt, 2013, S. 50). Wie jedoch bereits in Kapitel „4.2 Messung der Matte-Qualität“ erläutert, kann der Test auch mit einer Ausleuchtung von 5.500 K erfolgen, wenn dies später bei den Farbauswertungen miteinberechnet wird.

**TV-Gerät: Sony KD-75XD9405**

Diese Gerät verfügt über ein 74.5“ (= 189,3 cm) großes, in 4K-auflösendes LC-Display mit direkter LED-Hintergrundbeleuchtung. Displaygröße, hervorragende Bildqualität und die Möglichkeit Farbwiedergabe und Bildhelligkeit fein justieren zu können, machen diesen Fernseher zu einem geeigneten Kandidaten für das Experiment.

**TV-Bespielung: Apple MacBook Air**

Der Fernseher wurde über ein, mit einem HDMI-Kabel verbundenes, Notebook bespielt. Die darzustellenden Bilder wurden in der Software *NukeX9.0v4* der Firma *Foundry* erstellt bzw. geladen.

**Farbchart: DataColor SpyderCheckr 24**

Zum Einsatz kam die 48 Felder-große Variante des DataColor Farbcharts. Es verfügt über Felder mit vollständiger Sättigung, mittlerer Sättigung, Fast Weiß- und Fast Schwarz-Töne, einige Hauttöne, Rein-Schwarz und -Weiß und dazwischenliegende Graufelder in 10%-Helligkeitsabstufungen. Laut Handbuch

## 4 Experimente

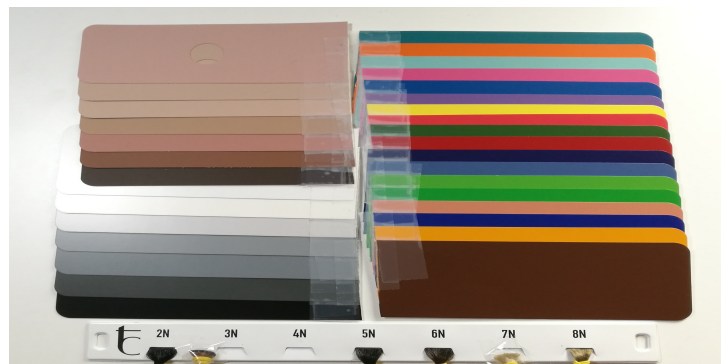
---

befinden sich diese Felder *nahe am* oder *innerhalb* des sRGB-Farbbereichs (Datacolor, o.D.). Der Verwendungsempfehlung, man solle das Chart aus einem Winkel von 45 Grad mit einer Lichtquelle ohne Reflektor oder Diffusor aus großer Entfernung ausleuchten, wurde so gut als möglich entsprochen (Datacolor, o.D.). Näheres zum Aufbau im Kapitel 4.4.9. Ablaufdokumentation: Finale Aufnahmen.

Die Verwendung des Charts erfüllte mehrere Zwecke:

- Die Belichtung der Szene konnte über die vorhandenen Weiß-/Grau-/Schwarz-Felder genau eingestellt werden. Speziell das 90%-Weiß-Feld war hierbei hilfreich (siehe Kapitel 4.4.4 Belichtung Vordergrund / Hintergrund).
- Ein möglicher entstehender Spill bzw. Glare ist über die Farbfelder gut messbar. Es zeigt sich, welche Farben anfälliger für Farbverschiebungen sind und welche weniger.
- Farbcharts eignen sich hervorragend zur Farbkalibrierung verschiedenster Geräte und ermöglichen die Einhaltung von Farbstandards. Im Falle dieses Experiments kann später z.B. über die Software DaVinci Resolve eine Farbkalibrierung in Richtung des ITU-R Standards BT.709 erfolgen.

**Vordergrundobjekt: Farbfächer RAL K5 und PANTONE SkinTone Guide**



*Abbildung 43: Auswahl der Farben aus dem RAL K5- und Pantone Farbfächer zur Verwendung im Experiment 2.*

Die Verwendung der genannten Farbfächern ermöglichte die Aufnahmen in einem

Rutsch zu filmen, anstatt die Aufnahme-Prozedur, bei Verwendung mehrerer Vordergrundobjekte, für jedes separat zu wiederholen. Durch diesen Ansatz konnten Fehler minimiert und gleichzeitig eine große Farbvariation erzielt werden. Bei der konkreten Auswahl der zu testenden Farben diente das SpyderCheckr-Farbchart als Vorbild. Zum Aufnahmezeitpunkt war noch nicht klar, welche bzw. wieviele der Farbfelder letztlich effektiv ausgewertet würden – für die Aufnahme selbst wurde deshalb der verfügbare Platz einfach bestmöglich ausgenutzt, um für die spätere Analyse eine größtmögliche Auswahl zu haben.

### Vordergrundobjekt: Haarproben



*Abbildung 44: Auswahl der Haarproben zur Verwendung im Experiment 2.*

Wie bereits erwähnt, kamen zur Analyse von Haaren kleinere Büschel aus Haarfarben-Mappen zum Einsatz. Dabei wurde eine Auswahl aus verschiedenen Braun-Tönen, Schwarz, Blond und einem rötlichen Farbton getroffen.

### 4.4.7 Darstellung der Hintergrundbilder

Für die Bespielung des TVs war ursprünglich angedacht, einzelne Grafiken zu erstellen, diese vollflächig anzuzeigen und bei der Aufnahme händisch durchzuschalten. Im Gespräch mit dem Erstbetreuer dieser Arbeit wurde jedoch eine effizientere Methode gefunden: Die Hintergrundflächen wurden jeweils in Nuke aufbereitet und nacheinander animiert *als Film* abgespielt. Diese Vorgehensweise beschleunigte letztlich den gesamten Vorgang und machte ihn gleichzeitig weniger fehleranfällig. Die Hauptfarben R, G und B, sowie Mittelgrau und Weiß wurden über



## 4 Experimente

---

Constant-Nodes erstellt und 10 weitere, fotografische Motive, die ein möglichst großes Farbspektrum abdecken sollten, wurden eingelesen.



*Abbildung 45: Übersicht der verwendeten, fotografischen Hintergrundmotive.*

Die Bilder standen kostenlos im Internet zur Verfügung und stammen von folgenden Websites:

[http://www.wallpaperup.com/1089375/food\\_fruits\\_red\\_strawberries.html](http://www.wallpaperup.com/1089375/food_fruits_red_strawberries.html)

[http://www.wallpaperup.com/1090516/dirt\\_road\\_forest\\_landscape\\_leaves\\_path\\_path\\_highway\\_quiet\\_road\\_roadway\\_trail\\_trail\\_roads\\_tree\\_trunks\\_trees\\_way\\_woods\\_royalty\\_free\\_images.html](http://www.wallpaperup.com/1090516/dirt_road_forest_landscape_leaves_path_path_highway_quiet_road_roadway_trail_trail_roads_tree_trunks_trees_way_woods_royalty_free_images.html)

[http://www.wallpaperup.com/992274/Autumn\\_Foliage\\_Maple\\_Branches\\_Nature.html](http://www.wallpaperup.com/992274/Autumn_Foliage_Maple_Branches_Nature.html)

[http://www.wallpaperup.com/1095731/clouds\\_landscape\\_light\\_nature\\_red\\_sky\\_sunrise\\_sunset\\_Wales\\_weather.html](http://www.wallpaperup.com/1095731/clouds_landscape_light_nature_red_sky_sunrise_sunset_Wales_weather.html)

[http://www.wallpaperup.com/1089332/berries\\_food\\_fresh\\_fruits\\_healthy\\_raspberries\\_red.html](http://www.wallpaperup.com/1089332/berries_food_fresh_fruits_healthy_raspberries_red.html)

[http://www.wallpaperup.com/20271/Water\\_nature\\_waves.html](http://www.wallpaperup.com/20271/Water_nature_waves.html)

<http://icloudpicture.com/4k-wallpaper/purple-4k-wallpaper/>

[http://www.wallpaperup.com/247341/usa\\_san\\_francisco\\_bay\\_bridge\\_california\\_usa\\_city.html](http://www.wallpaperup.com/247341/usa_san_francisco_bay_bridge_california_usa_city.html)

<http://www.chandrani.ch/privatstunden>

<http://www.chandrani.ch/wp-content/uploads/2017/01/orchidee.jpg>

[http://www.wallpaperup.com/wallpaper/download\\_custom/1090487](http://www.wallpaperup.com/wallpaper/download_custom/1090487)

[http://www.wallpaperup.com/1098691/colorful\\_colourful\\_cords\\_creative\\_fibers\\_rolled\\_stacked\\_threads\\_wool\\_yarn.html](http://www.wallpaperup.com/1098691/colorful_colourful_cords_creative_fibers_rolled_stacked_threads_wool_yarn.html)

[http://www.wallpaperup.com/1098666/blur\\_close-up\\_colorful\\_colourful\\_paper\\_clips.html](http://www.wallpaperup.com/1098666/blur_close-up_colorful_colourful_paper_clips.html)

Die Bildinhalte wurden über einen animierten Switch-Node jeweils 25 Frames-lang angezeigt. Als visuelles Hilfsmittel wurde ein Framecounter im Bild eingeblendet. Weiters wurden für jeden Bildinhalt Grade-Nodes vorbereitet, mit welchen letztlich während der Experimentaufnahmen die Helligkeiten der Inhalte über den Gain-Parameter angepasst werden konnten. Die Animation wurde schließlich gecached (= vorgerendert und im RAM abgespeichert) und über den Flipbook-Viewer abgespielt. Auf diese Weise konnte die Anzahl der Aufnahmevorgänge niedrig gehalten werden, da viele notwendige Bildsequenzen in einem Rutsch aufgezeichnet werden konnten.

### **4.4.8 Ablaufdokumentation: Testaufnahmen**

Vor der Durchführung der finalen Experimentaufnahmen, welche im Zuge dieser Untersuchung schließlich zur Auswertung verwendet wurden, fanden insgesamt vier Testaufnahmen statt. Diese brachten jeweils neue Erkenntnisse und ermöglichten und optimierten letztlich die finale Vorgehensweise.

Ziel war es, am Ende Videomaterial in bestmöglicher, technischer Qualität zu erhalten, welches dem sRGB-Standard entspricht und sich dadurch für den Einsatz der Farbmess- und -analyse-Werkzeuge qualifizierte. Im konkreten Fall bedeutet dies bei der zur Verfügung stehenden Hardware, die Nutzung des RAW-Aufnahmemodus der Kamera und anschließender korrekter Wandlung des Materials in den Rec.709 bzw. sRGB-Standard.

### 4.4.8.1 Testaufnahmen 1 – Abfilmen des TV-Bildschirms

Ein erster Test bestand darin den TV-Bildschirm abzufilmen und Erfahrungswerte zu sammeln. Ziel war es festzustellen, ob der TV-Screen ein ausreichend gleichmäßiges Hintergrundbild liefern konnte, und zwar im Hinblick auf Helligkeitsverteilung und farbliche Homogenität.

Zum Einsatz kam dabei bereits die final verwendete Hardware: die Sony PWX-FS7-Kamera, der Atomos Shogun Recorder und das Sony KD-75XD9405-Fernsehgerät. Die Schärfe der Kamera wurde direkt auf den TV-Bildschirm gelegt – in Anbetracht des Umstands später, neben den einfärbigen Backing-Colour-Hintergründen, detailreiche Fotomotive darstellen zu wollen, erschien dies als offensichtlicher Schritt.

Über das angeschlossene Notebook wurde der TV-Screen mit einer rein-grünen Fläche bespielt. Es wurden kamera-interne Aufnahmen im XACV-I Codec im Rec.709-Farbprofil und RAW-Aufnahmen über den Shogun-Recorder gemacht. Um die Auswirkungen der TV-Bildeinstellungen zu testen, wurden Aufnahmen mit der Standard-Sättigungseinstellung von „60“ und mit dem maximal Wert „100“ durchgeführt.

Die spätere Begutachtung des Materials brachte wichtige Erkenntnisse:

Eine Veränderung der Sättigungseinstellung am TV-Gerät hat tatsächlich relevante Auswirkungen auf die dargestellten Farbtöne. Für die Qualität des Colour-Difference-Keying-Prozesses ist die Reinheit des verwendeten Hintergrund-Farbtons entscheidend: Ziel ist, eine möglichst große Differenz zwischen den einzelnen Farbkomponenten des jeweiligen Farbtons. Um die Sättigungsveränderung zu beurteilen, wurde beispielhaft die Videoaufnahme eines Screens gefüllt mit einem reinen Grün-Ton analysiert: Ein Pixel im Zentrum des Bildes ergab bei einer Sättigungseinstellung am TV von „60“ die Farbwerte: R:0, G: 0,6079, B: 0,2993. Zwischen grünem und blauem Kanal liegt also eine Differenz von 0,3086. Der gleiche Pixel liefert bei voller Sättigungseinstellung am TV die Farbwerte R:0, G: 0,6606, B: 0,3312 – zwischen Grün- und Blau-Kanal besteht also eine

Pegeldifferenz von 0,3312 – ein um 7,3% höherer Wert, als bei der Aufnahme mit geringerer Sättigung. Es sei erwähnt, dass in diesem Fall Farbveränderungen bedingt durch Kamerarauschen oder anderen Einflüssen, *nicht* mit berücksichtigt wurden – es reichte in diesem Fall aus in Erfahrung zu bringen, dass eine Änderung der Sättigungseinstellung sich offenbar positiv auf die Reinheit der Farben auswirkt. Es wurde somit festgelegt, bei den finalen Experimentaufnahmen den TV-Bildschirm jedenfalls mit maximaler Sättigung zu betreiben.

Die Scharfstellung der Kamera auf die Oberfläche des TV-Bildschirms führte zu einem starken *Moiré-Effekt* – ein optisches Phänomen, das als relativ grob erscheinendes Muster sichtbar wird und entsteht, wenn sich mehrere ähnlich feingerasterte Objekte überlagern und in einer gewissen Verdrehung zueinander angeordnet sind (Hüningen, 2013). In diesem Fall kommt dies durch das LC-Display des TV-Geräts und dem Sensor der Kamera zum Tragen:



*Abbildung 46: Vergrößerter, farbkorrigierter  
Bildausschnitt zur besseren Veranschaulichung des  
„Moiré-Effekts“.*

Durch die verkleinerte Darstellung und Betrachtung an den Vorschaumonitoren waren die Artefakte während der Aufnahme nicht sichtbar bzw. bei weitem nicht so offensichtlich, wie bei der späteren Betrachtung am Computerbildschirm.

In weiterer Folge wurde also nach Möglichkeiten geforscht, diese Art der

## 4 Experimente

---

Bildartefakte zu vermeiden, denn in diesem Zustand war der Einsatz eines TV-Geräts als Hintergrund für Keying-Vorgänge wenig geeignet. Folgende Möglichkeiten wurden dabei u. a. in Betracht gezogen:

- Testen verschiedener Bildauflösungen bei der Aufnahme
- Verändern der softwaremäßigen Detail-/Schärfe-Einstellungen der Kamera
- Auswirkung der gewählten Shutter-Einstellung bei der Aufnahme auf den Effekt

Neben dem Hinweis verschiedene Kamera-Auflösungen zu testen, gab Peter iNova auf seiner Website <http://www.digitalsecrets.net/secrets/TV.html> den Tipp, das Material mit einer Kombination aus Weichzeichnungs-, Staub- und Kratzer-Entfernungs Techniken zu behandeln. Die Anwendung besagter Tools auf ein Standbild der Moiré-behafteten Aufnahmen in der Software Adobe Camera RAW brachte Besserung: Speziell das Setting „Dunst entfernen“ machte aus dem einfärbigen Hintergrund eine sehr gleichmäßige Fläche. Jedoch ging das Resultat mit einer starken Entsättigung der Farben und dem Hinzufügen einer Art *Glow*-Effekt einher. Für das Experiment 2 (realistisches Setting) war diese Lösung also ungeeignet.

Weitere Recherchen offenbarten speziell angefertigte, optische Filter der Firma Mosaic Engineering, die die Artefakte direkt bei der Aufnahme reduzieren bzw. verhindern sollten. Die Resultate erschienen recht überzeugend – jedoch stand zum Zeitpunkt der Nachforschung, im September 2017, kein passender Filter für die im Experiment zum Einsatz kommende Kamera zu Verfügung (Mosaic Engineering, 2012).

Der generelle Tenor im Internet schien zu sein, dem Problem des Moiré-Effekts mit der Aufnahme der betreffenden Oberfläche in leichter Unschärfe entgegen zu treten. Für die Durchführung des Experiments war diese Vorgehensweise kein Hindernis; deshalb erschien diese Lösung als die einfachste und geeignetste.

### 4.4.8.2 Testaufnahmen 2 – Kameraeinstellungen und Materialanalyse

Der zweite durchgeführte Test verfolgte das Ziel, die Moiré-Problematik des TV-Bildschirms näher zu ergründen und erste Erfahrungen mit ausgeleuchteten Vordergrundobjekten zu sammeln. Insgesamt wurden 18 kurze Clips aufgezeichnet, mit jeweils verschiedenen Schärfepunkten (Schärfe auf Vordergrund, Schärfe auf TV, etc.) und Zoom-Einstellungen der Kamera, versch. Lichtpositionen, Kameraeinstellungen, dargestellten Hintergrundmotiven am TV, etc. Verwendet wurde dabei die selbe Hardware, wie sie auch schon bei den ersten Testaufnahmen zum Einsatz kam. Die Clips wurden in der Software Nuke analysiert. Auch wurde eine Workflow entwickelt, wie innerhalb der Software Durchschnittsfarbwerte bestimmter Pixelbereiche im Bild gemessen werden konnten – und das an exakt gleichen Positionen über beliebig viele Clips hinweg.

Folgende Erkenntnisse ergaben sich aus der Analyse der Probeaufnahmen:

- Eine Aufnahme des TV-Bildschirms in (jedweder) Unschärfe führte tatsächlich zum erhofften Verschwinden des Moiré-Effekts.
- Die Schärfe/Detail-Einstellung der Kamera lässt sich nicht verändern, wenn diese für die Ausgabe von RAW-Bildern konfiguriert ist. Selbiges gilt auch für XAVC-I-Aufnahmen im S-Log3-Modus.
- Im RAW-Modus lässt die Kamera lediglich eine Ausgabe in 4K DCI-Auflösung zu. Zum Zeitpunkt dieser Untersuchung wurde davon ausgegangen, *jedenfalls* RAW-Footage zur späteren Analyse einzusetzen – weshalb die Möglichkeit, dem Moiré-Effekt über die Anpassung der Auflösung entgegen zu wirken, keine Option darstellte.
- Eine Veränderung der Belichtungszeit (Shutter) hatte erwartungsgemäß *keinen* Einfluss auf das optische Phänomen. Dies bewirkte nur eine Veränderung der Belichtung der Szene.
- Im Zuge der näheren Betrachtung der CinemaDNG-Dateien innerhalb der Software Nuke konnte festgestellt werden, dass die Möglichkeiten diese zu interpretieren und damit ihre Darstellung zu ändern, groß sind – hier wären

also weitere Recherchen nötig, um die passenden Einstellungen für die Aufnahmen zu eruieren.

- Gestartet wurden die Aufnahmen entweder über die direkte Bedienung der Kamera oder über den an der Kamera montierten Shogun-Recorder. Die Interaktion mit den Geräten führte jeweils zu minimalen Veränderungen des Bildausschnitts. Für die finalen Aufnahmen ist es also wichtig, auf eine Fernauslösung zu setzen bzw. die physische Interaktion mit der Hardware auf ein Minimum zu reduzieren, da diese im Anschluss auf einer Pixel-Ebene analysiert und miteinander verglichen werden würden.

Um ein erstes Gespür für die Qualität und Gleichmäßigkeit der Greenscreen-Aufnahme zu erhalten, wurden neun Pixelbereiche eines Clips analysiert. Es wurde wohl bemerkt hierbei noch nicht jeder Arbeitsschritt auf seine 100%ige Validität überprüft – Ziel war es, eine grobe Idee zu erhalten.

Über einen Zeitraum von zehn Frames wurden jeweils die Durchschnitts-RGB-Werte von zwei der neun Bereiche notiert. In Nuke lässt sich hierfür durch Markieren eines Bereichs sehr einfach dessen Durchschnittsfarbwert ablesen. In diesem Fall wurden testweise 5x5 Pixel-große Flächen gewählt.





Um die Abweichung in den einzelnen Farbkanälen aufgrund des Kamera-Noise einschätzen zu können, wurde die Differenzen der Farbwerte jeweils von einem Frame zum nächsten errechnet. Bei der beispielhaften Begutachtung der Bereiche #1 und #2 ergaben sich dabei Abweichungen von minimal 0,00272% und maximal 0,05095% – also sehr gute Werte, die auf ein sehr niedriges Rauschverhalten der Kamera im RAW-Modus hindeuteten.

Um die Gleichmäßigkeit des Grüntons beurteilen zu können, wurden  $\Delta E$ -Werte zwischen verschiedenen Bereichen eines Frames berechnet (für eine nähere Beschreibung dieser Vorgehensweise sei auf das Kapitel „4.2. Messung der Matte-Qualität“ verwiesen). Diese ergaben zwischen Bereich #1 und #5 einen Wert von **1,601808**, zw. Bereich #1 und #9 **1,935862** und zwischen Bereich #5 und #9 **0,354083**. Auch diese Ergebnisse deuteten also auf eine, für dieses Experiment, jedenfalls ausreichende, technische Aufnahmequalität hin.

### 4.4.8.3 Testaufnahmen 3 – RAW-Aufnahme und -Postproduktion

Die dritten Testaufnahmen hatten zum Gegenstand eine technische korrekte RAW-Aufnahme durchzuführen und einen Postproduktions-Workflow zu erarbeiten, der gewährleistet, dass die RAW-Aufnahmen nach deren Entwicklung dem Rec.709-Standard entsprechen würden (siehe Kapitel 4.4.5. RAW-Aufzeichnung). Dies sollte durch einen Vergleich mit einer gültigen „Referenzaufnahme“ und der darauffolgenden Erstellung einer spezifischen LUT, die etwaige notwendige Farbanpassungen beinhaltet, erfolgen. Als Referenzaufnahme ist in diesem Fall eine Aufzeichnung des Farbcharts zu verstehen, bei welcher die Kamera eben nicht im RAW-Modus betrieben wird, sondern im kamerainternen XACV-I-Codec bei aktivem „STD5-R709“-Gammaprofil aufzeichnet – das von Sony empfohlene Profil für dem Rec.709-Standard-entsprechende Aufnahmen.

Um bezüglich des Weißabgleichs einen gemeinsamen Nenner für die XAVC-I und die Raw-S-Log-Aufnahmen zu erreichen, wurde eine Farbtemperatur von 5.500 K angestrebt. Für RAW-Aufnahmen muss die Kamera im CineEI-Modus betrieben werden, welcher u. a. mit der Einschränkung verbunden ist, keinen manuellen

Weißabgleich durchführen zu können. Zur Wahl stehen lediglich die 3 Voreinstellungen 3.200 K, 4.300 K and 5.500 K. Für die finalen Aufnahmen ist dies aber nicht hinderlich, da zum einen bei den angestrebten Analyse-Tools von Bruce Lindbloom der Weißpunkt gesondert angegeben werden kann (siehe Kapitel „4.2 Messung der Matte-Qualität“) und zum anderen sich bei RAW-Aufnahmen der Weißpunkt ohnehin im Nachhinein verlustfrei verändern lässt.

Als erstes wurde die Rec.709-Referenzaufnahme gemacht. Bei der Durchführung des Weißabgleichs passierte hier ein Fehler, der als wertvolle Erkenntnis für die folgenden Aufnahmen zu werten war: Die Kamera wurde manuell auf einen Weißpunkt von 5.500 K gestellt und danach die Farbtemperaturen der Lampen lediglich nach Gefühl angepasst. Diese verfügen über keine genaue Anzeige der aktuellen Temperatur – sie lassen sich nur über nicht näher beschriftete Drehregler festlegen. Dies resultierte letztlich in einem zu warmen Bild mit einem zusätzlich pinken Farbstich. Passiert ist dieser Fehler wahrscheinlich, weil bei der gesamten Aufnahme zu sehr auf die richtige Belichtung der jeweiligen Situationen Acht gegeben wurde.

Entsprechend gebräuchlicher Belichtungsrichtlinien wurde die Szene mithilfe der Zebra-Funktion der Kamera derart belichtet, dass das 90%-Weiß-Feld des Farbcharts einen IRE-Wert von 90% generierte. Erreicht wurde dieser bei einer Blende von 5.6.

Als nächstes erfolgte die RAW-Aufnahme. Die Kamera wurde in den CineEI-Modus versetzt und der Farbraum S-Gamut3.Cine gepaart mit der S-Log3-Gammakurve wurde aktiviert. Nachdem die Szene zuvor bereits „korrekt“ ausgeleuchtet wurde, sollte man nun grundsätzlich davon ausgehen können, dass im S-Log-Modus nun ebenfalls bereits korrekte, dem Sensor entsprechende Belichtungswerte zu sehen sein müssten. Laut Angaben von Sony sollte bei besagten Kamerasettings eine 90%-Weißfläche einen IRE-Wert von 61% aufweisen (Sony Europe Ltd., 2016, S. 6). Direkt nach Umstellen der Kamera und *keiner* Änderung der Beleuchtung lag 90%-Weiß jedoch am Shogun-Monitor bei einem Wert von 76%.

Für eine korrekt-belichtete RAW-Aufnahme war also eine Anpassung notwendig.

## 4 Experimente

---

Durch Schließen der Blende auf 8.0 konnte der gewünschte Wert von 61% IRE erreicht werden.

Zu diesem Zeitpunkt war nicht klar war, wodurch es zu dieser Abweichung in den IRE-Werten gekommen ist und ob auf die Anzeige des Shogun-Monitors verlass war. Darum wurde auch eine weitere „Sicherheits-RAW-Aufnahme“ durchgeführt, bei der alle möglichen Belichtungsstufen aufgezeichnet wurden. So sollte sich im Nachhinein, also im Zuge der späteren Analyse des Materials, jedenfalls ein Frame mit korrekten Belichtungswerten finden lassen. Umgesetzt wurde dies, indem ein Video aufgezeichnet wurde, bei welchem die Blende der Kamera langsam von ganz geschlossen bis ganz geöffnet gedreht wurde.

Trotz der misslungenen Rec.709-Aufnahme konnten durch diesen Test wieder neue Erkenntnissen gewonnen werden und es taten sich neue Recherefelder auf. Auszugsweise erwähnt seien hier:

- Das Setzen der Kamera-Whitebalance auf die hier erfolgte Weise führt jedenfalls zu inkorrekten Ergebnissen. Eine funktionierender Ansatz findet sich im Kapitel 4.4.9 Ablaufdokumentation: Finale Aufnahmen beschrieben.
- Bei der Anzeige des RAW-Materials in verschiedener Software fällt auf, dass die effektive Helligkeit um einiges dunkler ist, als bei der Aufnahme definiert / beobachtet wurde. Bei der ersten Aufnahme sollte laut Shogun-Anzeige 90%-Weiß bei gut 76% IRE liegen. In DaVinci Resolve konnte jedoch (noch vor jeglichen Anpassungen bzw. Anwendung von LUTs) nur ein Wert von bei 370 (= ca. 36% IRE) gemessen werden. Bei der zweiten, belichtungs-korrigierten Aufnahme sollte 90%-Weiß bei 61% IRE liegen – Resolve zeigt jedoch einen Wert von 265 (= ca. 26% IRE) an. Es galt heraus zu finden, ob dies alleine durch eine unpassende Darstellung am Vorschaumonitor herrührte, oder andere Ursachen der Grund dafür waren.
- Da die Helligkeit des RAW-Materials angepasst werden musste, stellte sich die Frage, auf welchem Weg bzw. mit welchen Werkzeugen diese Anpassung durchgeführt werden sollte. Exposure- und Gain-Regler

innerhalb DaVinci Resolve führten beispielsweise zu verschiedenen Endergebnissen, d.h. die einzelnen Farbkanäle wurden unterschiedlich stark verändert.

- Innerhalb der Software DaVinci Resolve gibt es eine Vielzahl an Möglichkeiten das RAW-Material zu behandeln. Es wurde anfänglich einiges an Zeit investiert einen Vergleichsaufbau innerhalb der Software zu schaffen, welcher es ermöglichte sollte, einzelne Felder von 2 Farbchart-Aufnahmen zeilen- bzw. spalten-weise miteinander vergleichen zu können. Danach wurden viele Software-Funktionen getestet, mit dem Ziel eine verbindliche Rec.709-Darstellung des RAW-Materials zu schaffen, doch dies stellte sich komplizierter heraus, als vermutet. Letztlich konnte mit Stand der Informationen zu diesem Zeitpunkt und den verfügbaren Aufnahmen noch kein zufriedenstellender Workflow gefunden werden.

#### 4.4.8.4 Testaufnahmen 4 – Abgleich der Vorschau monitore

Diese Probeaufnahmen standen ganz im Zeichen der Umsetzung neuer Erkenntnisse und Empfehlungen aus dem Artikel „Ultimate Guide for Cine EI on the Sony PXW-FS7“ (Chapman, 2016) und der YouTube-Videoreihe „PXW-FS7 Tutorial Video“ auf Sony’s eigenem Kanal „Sony | Camera Channel“ (Chapman, 2015), – beides jeweils erstellt und durchgeführt von Alister Chapman. Diese bewerben unter anderem die Wichtigkeit des Einsatzes von Preview-LUTs im Zusammenhang mit S-Log-Aufnahmen und klären auf, welche zentrale, jedoch leicht mißzuverstehende Rolle die *Exposure Index (EI)*-Einstellung der Kamera im CineEI-Modus bei der Belichtung von Szenen spielt.

Ziel war es, eine Übereinstimmung der Darstellung eines Rec.709-Bildes sowohl am Vorschau monitor der FS7 als auch am Monitor des Shogun-Rekorders zu erlangen, bzw. zu gewährleisten, dass die Monitoringtools beider Geräte die selben Messergebnisse lieferten. Nur unter diesen Bedingungen würde der Shogun-Recorder letztlich zum Einsatz kommen können. Weiters sollte ein neuer Versuch gestartet werden zu ergründen, weshalb die RAW-Aufnahmen in Sachen Helligkeit

## 4 Experimente

---

nicht dem Zustand der Aufnahme entsprachen, wenn diese später am Computer betrachtet wurden.

Gelingen sollte dies vor allem durch:

- den Einsatz von LUTs sowohl am Vorschaumonitor der FS7 als auch am Shogun-Recorder.
- RAW-Aufnahmen und entsprechender Belichtung mit den von Alister Chapman empfohlenen Kamera-Einstellungen, nämlich mit einem Exposure Index-Wert von 2.000, anstatt wie bisher 800 und der Aktivierung der 709(800)-LUT für den Vorschaumonitor der FS7.

Zu Beginn wurde die Kamera wieder für eine interne „Standard-Rec.709“-Aufzeichnung konfiguriert.

Auf dem Shogun wurden drei LUTs installiert:

- Ein von Sony zur Verfügung gestellter LUT namens „SLog3SGamut3.CineToLC-709.cube“, welcher eine Rec.709-Vorschau eines S-Log3/S-Gamut3.Cine-Bildes ermöglichen sollte. Zur Verfügung gestellt von dieser Website: [http://pro.sony.com.au/pro/support/software/SW\\_260216\\_PSG/1](http://pro.sony.com.au/pro/support/software/SW_260216_PSG/1)
- Ein 1D-LUT aus den Presets der Software DaVinci Resolve namens ‚SLog3SGamut3.CineToLC-709.cube‘.
- Eine selbsterstellte LUT aus Resolve, die auf den Open FX-Effect „Color Space Transform“ setzt, um eine Transformation von S-Gamut3.Cine/S-Log3 zu Rec.709 in 6500K durchzuführen (zum Zeitpunkt der Probeaufnahmen war es leider nicht möglich on the fly eine neue LUT mit der konkreten Farbtemperatur der Szene zu erstellen).

Bei diesen Aufnahmen wurde weiters erstmals versucht, die Gleichmäßigkeit der Ausleuchtung des Farbcharts zu verbessern. Der Einsatz von zwei Lampen, anstatt einer, brachte merklich bessere Resultate: Durch vorsichtiges Anpassen der Lampen-Positionen und Leuchtstärken war es möglich, ein weißes A4-Blatt im

Querformat auf der Waveform-Ansicht am Shogun als gänzlich gerade Linie erscheinen zu lassen – eine ideale Testvoraussetzung.

Der Weißabgleich wurde testweise auf zwei verschiedene Weißflächen durchgeführt. Die zwei Lampen wurden mit ihrer maximalen Farbtemperatureinstellung von 6.000 K betrieben. Eine Messung auf das bereits zuvor verwendete, weiße Blatt Druckerpapier ergab eine Temperatur von 5.600 K. Der zweite Weißabgleich auf eine professionelle Weißkarte, die auch später für das Experiment zum Einsatz kommen sollte, ergab einen Wert von 5.700 K. Anhand dieser Messung wurde auch erstmals deutlich, dass die vom Lampenhersteller Dedolight beworbene maximale Temperatur von 6.000 K in der Praxis nicht erreicht wurde.

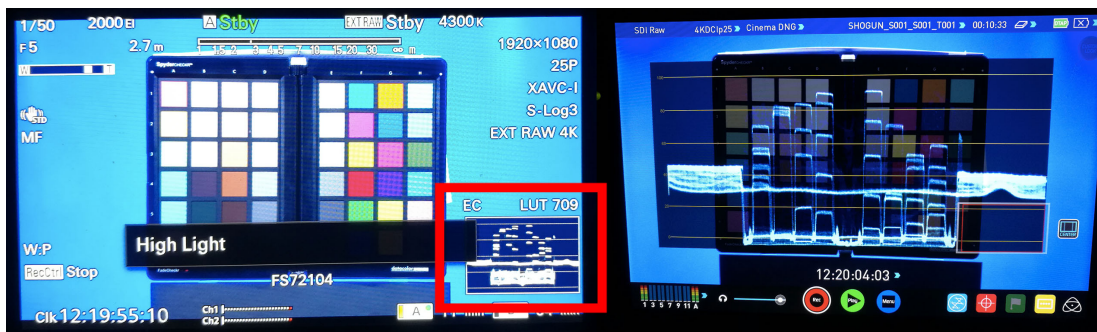
Dann wurde die Kamera für die RAW-Ausgabe konfiguriert, sprich in den CineEI-Modus mit S-Gamut3.Cine/S-Log3-Setting gestellt. Gemäß Empfehlung von Alister Chapman wurde nun auf der Kamera die LUT „709(800)“ für den Vorschaumonitor der Kamera aktiviert. Dieser Schritt soll effektiv die Belichtung von S-Log-Szenen erleichtern, da sich dadurch die Vorschau wie ein übliches Rec.709-Bild verhält und man so Szenen wieder nach den gebräuchlichen Richtlinien (*..90%-Weiß auf 90 IRE*) belichten kann.

Weiters war sich der Autor dieser Arbeit bis zum Zeitpunkt *vor* diesen Aufnahmen über folgende Umstände noch nicht bewusst: Im Cine EI-Modus arbeitet die Kamera intern *jedenfalls* mit ihrem nativen ISO-Wert von 2.000. Über die EI-Einstellung, welche vom Autor der Arbeit ursprünglich als kamera-übliche „ISO-Einstellung“ verstanden wurde, wird jedoch **nicht** die effektive Sensitivität des Sensors verändert, sondern lediglich die Helligkeit des aktiven LUTs am Vorschaumonitor. Mit diesem „Trick“ versucht Sony den maximal-möglichen Dynamikbereich der Kamera in möglichst vielen Belichtungssituation zu gewährleisten. Jede Abweichung des EI-Settings von 2.000 führt also zu einer veränderten Darstellung der Helligkeit des Vorschaubildes und zwingt den Anwender dadurch die Belichtung der Szene anzupassen (mehr/weniger Licht, Blende weiter auf/zugewandert) – insgeheim wird dadurch der Dynamikbereich des Sensors möglichst wenig eingeschränkt und nur nach

## 4 Experimente

„oben“ bzw. „unten“ verschoben.

Die Kamera wurde also zu Beginn mit einem EI-Wert von 2.000 betrieben, für eine möglichst „unverfälschte“ Vorschau bzw. Belichtung. Vor einem blauen Hintergrund ergab sich zwischen dem Vorschaumonitor der FS7 und dem Shogun-Monitor eine rechte ähnliche, wenn auch nicht identische, Waveform-Ansicht. Dabei wurden am Shogun wohl bemerkt alle drei installierten LUTs durchprobiert:



*Abbildung 49: Probeaufnahme mit 2.000 EI vor blauem Hintergrund.*

*Links: Vorschaumonitor der FS7, Rechts: Shogun Recorder.*

Wichtig bei der Interpretation beider Waveform-Ansichten zu beachten, da dieser Umstand leicht übersehen werden kann: Beide Geräte setzen auf eine unterschiedliche Aufteilung der Skala auf der Y-Achse: Die Sony FS7-Kamera unterteilt die Ansicht mit fünf Linien, demzufolge entsprechen diese den Pegelwerten 0%, 25%, 50%, 75% und 100%. Der Shogun-Recorder hingegen verwendet sechs; entsprechend den Pegelwerten: 0%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%.

Vor Grün konnte speziell bei Betrachtung der Hintergrundfläche auf der Waveform-Ansicht beobachtet werden, dass diese am Vorschaumonitor der FS7 einen IRE-Wert von gut 90 generierte, während sie am Shogun bereits überbelichtet, mit über 100 dargestellt wurde:

## 4 Experimente

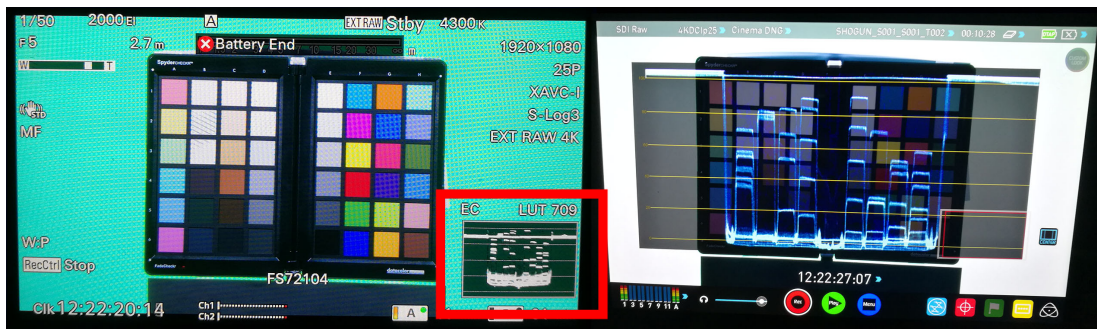


Abbildung 50: Probeaufnahme mit 2.000 EI vor grünem Hintergrund.

Links: Vorschaumonitor der FS7, Rechts: Shogun Recorder.

Anschließend wurden die selben Testaufnahmen mit einem EI-Wert von 800 durchgeführt. Nach Anpassung der Blende, konnte auch hier keine Übereinstimmung der Waveformansichten beobachtet werden – im Gegenteil; die Unterschiede fielen hier sogar noch etwas größer aus.

### Erkenntnisse aus der späteren Materialanalyse:

- Es konnte auf der Kamera keine Option gefunden werden, das aktive LUT des Vorschaumonitors auf der FS7 auch über die SDI-Verbindung an den Recorder weiterzuleiten. Auf diesem Weg wäre die Suche nach einer LUT, die zu einer übereinstimmenden Ansicht führt, hinfällig gewesen.
- Die RAW-Files beider Aufnahmesituationen (EI 800 und 2.000) sehen in DaVinci Resolve nach direktem Debayering nach Rec.709 noch immer sehr dunkel aus, bzw. nicht dem Moment der Aufnahme entsprechend (bei der EI 2.000 Aufnahme liegt 90%-Weiß beispielsweise bei nur ca. 28% anstatt der angestrebten 90%).
- Die EI 800-Aufnahme rauscht in den dunklen Bereichen des Bildes erwartungsgemäß weniger stark, als die 2.000er-Aufnahmen. Dies ist der weiter geöffneten Blende, d.h. der stärkeren Belichtung der Szene, geschuldet.
- Öffnet man die RAW-Dateien in verschiedenen Programmen, beispielsweise in DaVinci Resolve und ACR (= Adobe Camera RAW), so unterscheiden sich diese. In ACR erscheinen die Files heller, als in Resolve – jedoch sind sie dort ebenfalls weit



von der "richtigen" Belichtung (..wie bei der Aufnahme sichtbar..) entfernt.

- Ein grober, erster Test der Software-Funktion „Color Match“ in DaVinci Resolve, welche in weiterer Folge auch für die finale Experimentaufnahmen zum Einsatz kommen sollte, offenbart, dass die internen Rec.709-Aufnahmen im XAVC-I-Codec tendenziell etwas bessere Resultate erzielen, als die RAW-Aufnahmen.

- Ein testweises Aktivieren einer als Backlight angedachten, dritten Lampe in der Szene, zog, wie erhofft, keine Veränderung der Belichtungseinstellungen nach sich. Die Drei-Punkt-Ausleuchtung ist eine gebräuchliche Beleuchtungstechnik und wird auch bei Greenscreen-Aufnahmen gerne dazu verwendet, die Vordergrundobjekte visuell noch besser vom Hintergrund zu separieren.

- Die „Zebra2“-Einstellung der Kamera wird zugunsten der Bequemlichkeit der standardmäßig aktiven Zebra1-Einstellung vorgezogen. Zebra1 arbeitet bei dieser Kamera immer mit einem gewissen Fensterbereich, innerhalb welcher die Anzeige schließlich aktiv wird. Bei einem Zebra1-Wert von 90 werden beispielsweise standardmäßig Pegelwerte zw. 85 und 95 im Bild gehighlighted. Die Größe des Fensterbereichs lässt sich zwar verändern – jedoch erscheint die Zebra2-Funktion, welche nur mit *einem* Wert arbeitet, und aktiv wird, sobald dieser erreicht wird, einfacher in der Handhabung.

- Keiner der drei zu Beginn erwähnten LUTs führte bei der RAW-Aufzeichnung in allen Situationen zu einer Übereinstimmung der 709(800)-LUT-Anzeige am Vorschaumonitor der FS7 und LUT-Anzeigen am Shogun. Zu dieser Thematik wurde daraufhin um Hilfe aus einschlägigen Foren angesucht. Eine Registrierung im Forum von Alister Chapman's Website <http://www.xdcam-user.com> schlug leider fehl. Über das Forum der Website [www.slashcam.de](http://www.slashcam.de) wurde der Autor dieser Arbeit jedoch auf das Online-Tool „LUTCalc“ aufmerksam: <https://cameramanben.github.io/LUTCalc/LUTCalc/index.html>. Mit seinen umfangreichen Möglichkeiten LUTs für verschiedenste Anforderungen zu generieren, erschien dieses als eine vielversprechende Option eine Lösung für dieses Problem zu finden.

Status Quo nach der Durchführung und Evaluierung der vierten Testaufnahmen war

folgender:

Essentiell für die Durchführung des Experiments ist die Möglichkeit, Pegelwerte der einzelnen Farbkanäle Rot, Grün und Blau messen zu können, da dies u. a. für die Gewährleistung eines idealen Ausleuchtverhältnisses zwischen Vordergrund und Hintergrund notwendig ist. Diese Messung lässt sich mit dem Monitoringtool „RGB-Parade“ bewerkstelligen. Am Shogun Recorder steht dieses zur Verfügung – nicht jedoch auf der Sony FS7. Daraus lässt sich schließen, dass für die Umsetzung der Experiment-Aufnahmen *jedenfalls* der Atomos Shogun-Recorder als Messwerkzeug zum Einsatz kommen musste. Mit dem Wissensstand zum damaligen Zeitpunkt, Oktober 2017, ist jedoch ein zuverlässiges und vorhersehbares Zusammenspiel von Kamera und Shogun nur möglich, wenn beide Geräte für eine Rec.709-Aufnahme konfiguriert werden; sprich auf RAW-Qualität verzichtet und kamera-intern im XAVC-I-Codec bei 4:2:2 Subsampling und 10-Bit Farbtiefe aufgezeichnet wird.

### **4.4.9 Ablaufdokumentation: Finale Aufnahmen**

Dank der ausführlichen Planung und vorangegangener Testaufnahmen, konnte schließlich technisch hochwertiges Videomaterial für die spätere Analyse erstellt werden. Wie dem Kapitel zu den vierten Testaufnahmen zu entnehmen ist, war bis zum Zeitpunkt dieser Aufnahmen, Oktober 2017, noch kein vollständig zuverlässiger RAW-Workflow gefunden – deshalb wurde der Fokus auf die Fallback-Variante, nämlich der kamerainternen Aufzeichnung im XAVC-I-Codec bei aktivem Rec.709-Profil, gelenkt. Nach Abschluss dieser Aufnahmen sollte ein letzter Versuch gestartet werden, den im folgenden beschriebenen Ablauf ebenfalls in RAW aufzuzeichnen.

Die Durchführungszeit der Rec.709-Aufnahmen betrug ca. sechs Stunden. Equipment-Setup und -Aufbau entspricht der im Kapitel „4.4.6. Testumgebung und genutzte Hardware“ angegebenen Ausführung. Folgende Schritte wurden unternommen:

#### **1. Konfiguration der Kamera, Aufbau des Farbcharts und der Lampen**

Die Kamera wurde zu Beginn für interne Rec709-Aufnahmen in 4K-DCI-Auflösung

## 4 Experimente

bei 25 Bildern/Sekunde konfiguriert. Aufgenommen wurde im XAVC-I-Codec mit der Gammakurve „STD5“ (= Rec.709). Die Brennweite des Objektivs betrug 100mm und die Blende wurde mit 6.3 derart festgelegt, dass bei einer Fokussierung auf die Vorderelemente der TV-Bildschirm im Hintergrund in leichter Unschärfe dargestellt wurde. Zur präzisen Belichtungsbeurteilung wurde die Zebra2-Einstellung aktiviert und auf einen Wert von 90 gestellt.

Zur Fernsteuerung der Kamera, um mögliche Verwackelungen bei Aufnahmestart- und stopp zu verhindern, wurde der LANC-Control-Stativgriff von Manfrotto angeschlossen.

Das präparierte Farbchart wurde auf einem Stativ derart vor der Kamera positioniert, dass es möglichst großflächig im Bild zu sehen war, aber dennoch genügend Hintergrundfläche (= TV-Bildschirm) rundherum zu sehen war:



*Abbildung 51: Finaler Bildausschnitt der Rec.709-Aufnahmen:  
Präpariertes Farbchart vor TV-Bildschirm.*

Für den folgenden Weißabgleich wurden die drei Lampen zunächst grob im Raum ausgerichtet.

### 2. Weißabgleich

Die Farbtemperatur der Dedolights kann nur über unbeschriftete Drehregler an den

## 4 Experimente

---

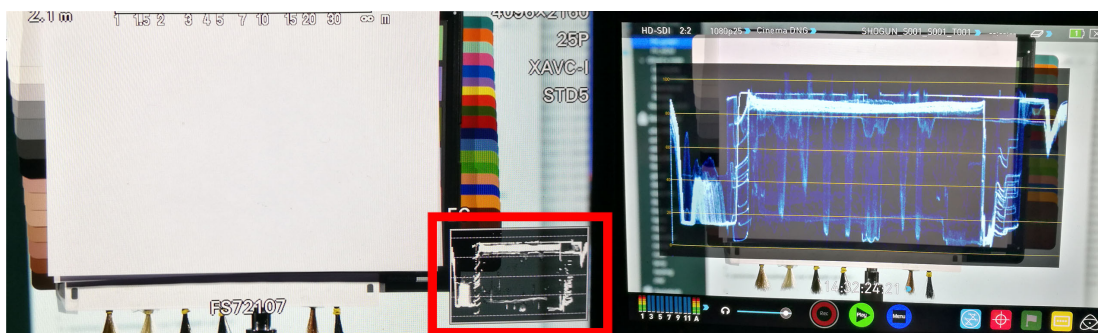
Geräten selbst verändert werden. Um eine Temperatur von 5.500 K zu erreichen, wurde eine Graukarte temporär vor das Farbchart platziert und die Weißabgleich-Funktion der Kamera darauf angewandt. Die Drehregler der beiden vorderen Dedolights wurden angepasst und der Weißabgleich erneut durchgeführt. Dieser Vorgang wurde solange wiederholt, bis der gewünschte Weißwert erreicht war.

### 3. Atomos Shogun

Über eine Magic Arm-Vorrichtung wurde der Monitor-Recorder an der Kamera befestigt. Da er im Falle der Rec.709-Aufnahmen ausschließlich wegen seiner RGB-Parade-Funktion zum Einsatz kam und er standardmäßig für die Darstellung von Rec.709-Signale ausgelegt ist, war keine weitere Konfiguration notwendig.

### 4. Gewährleistung einer gleichmäßigen Ausleuchtung

Die korrekte Anwendung von Farbcharts schreibt eine möglichst gleichmäßige Ausleuchtung der gesamten Fläche vor. Um dies zu erreichen, wurde zunächst ein weißes Blatt A4-Papier querformatig über das Farbchart gehängt. In der Waveform-Ansicht erscheint dieses als lange Linie. Dann wurden die Positionen, Einfallswinkel, Streuungen und Intensitäten der zwei vorderen Keylights so lange angepasst, bis das Blatt Papier in der Waveform-Ansicht als gerade Linie bei ungefähr 90 IRE erschien. Außerdem wurde an dieser Stelle nochmals der Weißpunkt mit 5.500 K verifiziert.



*Abbildung 52: Gleichmäßige Ausleuchtung der Vordergrundfläche.*

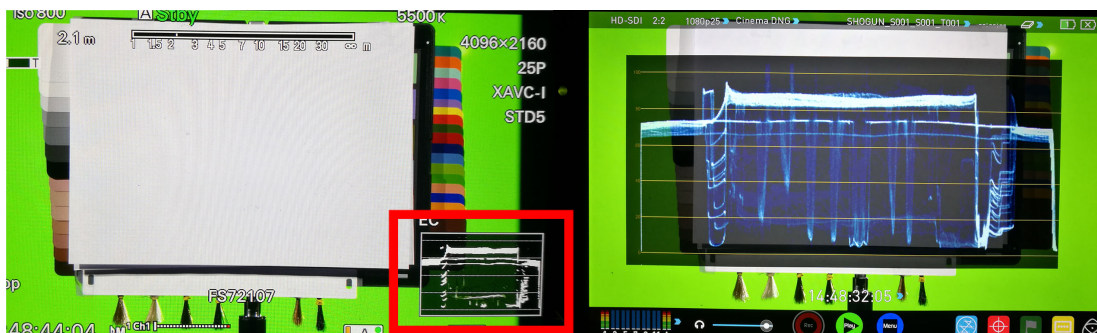
*Links: Vorschaumonitor der FS7, Rechts: Shogun Recorder.*

### 5. Farbkonfigurierung des TV-Geräts

Farbsättigung und Helligkeit des Fernsehers wurden jeweils auf das Maximum gestellt.

### 6. Test der Übereinstimmung der Anzeigen von FS7 Vorschaumonitor und Shogun Recorder

Das Notebook wurde über ein HDMI-Kabel mit dem Fernseher verbunden und über die Software Nuke wurde der TV-Screen vollflächig mit reinem Rot, Blau und Grün gefüllt. Anhand der Waveform-Darstellungen auf der Kamera und dem Shogun lies sich eindeutig festmachen, dass beide Messwerkzeuge die selben Resultate lieferten. Der Shogun-Recorder kann also, wie gewünscht, zum Monitoring des Rec.709-Bildsignales der FS7 verwendet werden.



*Abbildung 53: Übereinstimmung der Waveform-Anzeigen der FS7-Kamera und des Shogun-Rekorders am Beispiel eines rein-grünen Hintergrunds.*

*Links: Vorschaumonitor der FS7, Rechts: Shogun Recorder.*

### 7. Weißwert-Optimierung des TV-Geräts

Für eine möglichst neutrale Ausgangsbasis was die Farbdarstellung des Fernsehgeräts betrifft, wurde sein Weißwert optimiert. Über Nuke wurde der Bildschirm zuerst vollflächig mit Weiß bespielt. Die Fernseher erlaubt eine Anpassung der Intensität der einzelnen Farbkomponenten Rot, Grün und Blau. Mithilfe des RGB-Parade-Analysewerkzeugs am Shogun konnten so die Kanäle gezielt angepasst werden. Die Settings Rot-Gain: Max, Grün-Gain -22 und Blau-

Gain -26 führten schließlich zu einem sehr guten Weißwert:

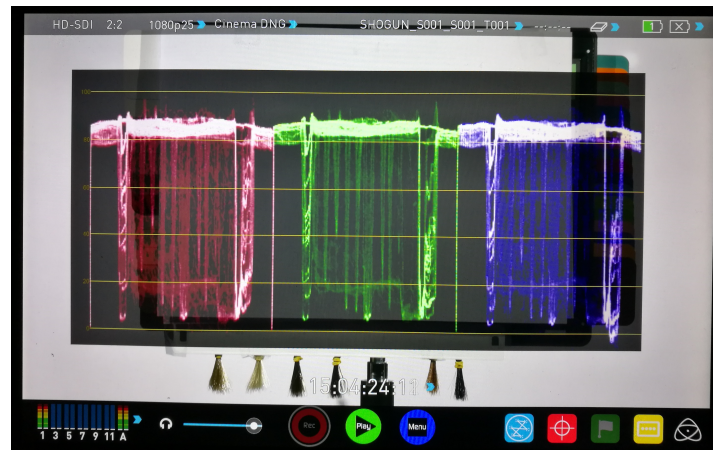


Abbildung 54: Weißwert-Optimierung des TV-Geräts.

### 8. Kontrolle der Schärfe/Unschärfe von Vordergrund und Hintergrund-Motiven

In einem nächsten Schritt wurde der Grad der Unschärfe der Vordergrund- und Hintergrund-Motive nochmals überprüft. Dabei wurden erstmals die, später zum Einsatz kommenden, Fotomotive am Fernseher dargestellt. Diese sollten in einer gewissen, aber eben nicht *zu stark* ausgeprägten Unschärfe dargestellt werden.

### 9. Sicherstellen der korrekten Belichtung der Szene

Ziel war, das 90%-Weiß-Feld des Farbcharts mit 90 IRE auszuleuchten. Dafür wurde das Zebra2-Tool der Kamera eingesetzt. Eine Anpassung der Blende auf 4.5 sorgte für die gewünschte, optimale Belichtung der Szene.





*Abbildung 55: Zebra2-Anzeige weist auf korrekte Belichtung von 90 IRE des 90%-Weiß-Feldes hin.*

### 10. Gleichmäßigkeit der TV-Bildschirm-Ausleuchtung

Die Gleichmäßigkeit der Ausleuchtung des Fernsehbildschirms wurde mit der False Color-Ansicht des Shogun Rekorders analysiert. Grobe Unterschiede in der Ausleuchtung würden sich negativ auf den Keying-Vorgang auswirken, wobei auf diesen Umstand leider ohnehin kein weiterer Einfluss genommen werden könnte, außer einen anderen, kleineren Bereich des Fernsehers zu definieren, in welchem die Helligkeit gleichmäßiger verteilt war, und zu versuchen, die Vordergrundobjekte exakt innerhalb dieses Bereichs zu platzieren. Glücklicherweise ergab der Test ein zufriedenstellendes Ergebnis: Die gesamte nähere Umgebung des Farbcharts wurde in der gleichen, grünen Farbe dargestellt, was laut Auskunft der Support-Website von Atomos, auf einen gleichmäßigen Belichtungswert im Bereich von 43 bis 47 IRE hindeutet (Trent, 2018).



Abbildung 56: False Color-Ansicht der Szene  
am Shogun Recorder.

|  |      |  |                |
|--|------|--|----------------|
|  | 110% |  | 100 to 109 IRE |
|  | 100% |  | 93 to 100 IRE  |
|  | 90%  |  | 84 to 93 IRE   |
|  | 80%  |  | 77 to 84 IRE   |
|  | 70%  |  | 58 to 77 IRE   |
|  | 60%  |  | 54 to 58 IRE   |
|  | 50%  |  | 47 to 54 IRE   |
|  | 40%  |  | 43 to 47 IRE   |
|  | 30%  |  | 24 to 43 IRE   |
|  | 20%  |  | 15 to 24 IRE   |
|  | 10%  |  | 8 to 15 IRE    |
|  | 0%   |  | 2 to 8 IRE     |
|  | -10% |  | -7 to 2 IRE    |

Abbildung 57: Legende der False Color-  
Ansicht des Shogun Recorders (Trent, 2018).

### 11. Optimieren der Helligkeits-Verhältnisse zwischen Vordergrund und Hintergrund

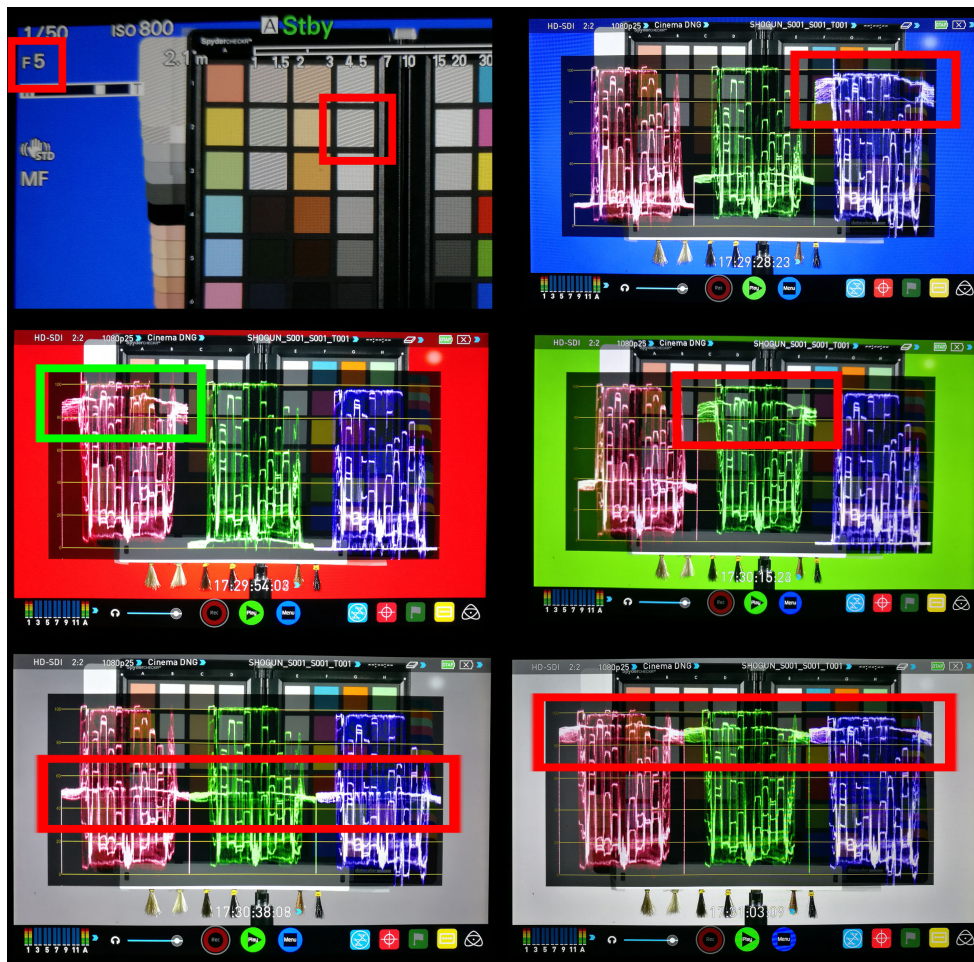
Wie im Kapitel „4.4.4. Belichtung Vordergrund / Hintergrund“ beschrieben, wurde nun versucht, die Pegelwerte der Keyingfarben am TV möglichst Richtung 90 IRE zu trimmen. Genauer gesagt die Pegelwerte des jeweils betreffenden Farbkanals.



Für die Szene mit grünem Hintergrund wurde beispielsweise mithilfe der RGB-Parade am Shogun der Grün-Kanal analysiert. Analog dazu für die Bluescreen-Szene der Blau-Kanal und für die Redscreen-Szene der Rot-Kanal. Für den weißen und den 50%-Grau-Hintergrund wurden die drei Farbkanäle R, G und B jeweils gleichmäßig auf 90 bzw. 50 IRE ausgerichtet. Für den Blackscreen wurde der Fernseher einfach ohne jegliche Farbe abgefilmt.

Zur Umsetzung dieses Vorgangs kam das im Kapitel „4.4.7. Darstellung der Hintergrundbilder“ beschriebene Nuke-Script zum Einsatz. Main-Viewer und Flipbook-Viewer wurden in den Rec.709-Modus versetzt. Die Hintergrundbilder/-flächen wurden großflächig im Viewer der Software dargestellt und die Helligkeit des betreffenden Farbkanals jeweils über den Gain-Regler der Grade-Nodes angepasst. Das Resultat der Veränderung konnte live am Shogun Recorder mit aktivierter RGB-Parade beobachtet werden. Zuletzt wurde das Script gespeichert und für die spätere Wiedergabe vorbereitet.

Die Blende der Kamera mußte im Laufe dieser Einstellungen zwei mal nachjustiert werden, da die Belichtung des Vordergrundes nicht mehr ganz korrekt war. Eine Änderung der Hintergrund-Helligkeit lässt grundsätzlich die Annahme zu, habe ebenfalls Auswirkungen auf die Gesamtbelichtung der Szene – jedoch war dies nicht der Fall. Es kam aus nicht nachvollziehbaren Gründen zu Änderungen der Belichtung des Vordergrunds. Letztlich wurde eine Blende von 5.0 verwendet.



*Abbildung 58: Korrekte Belichtungswerte der verschiedenen Backing-Hintergründe. V.I.o.n.r.u.: Korrekte Belichtung 90%-Weiß bei Blende 5.0, ca. 90 IRE bei blauem, roten und grünem Hintergrund, 50 IRE bei Mittel-Grau, 90 IRE bei Weiß.*

### 12. Aufnahme 1: Referenzaufnahmen „Haare“

Mit all den beschriebenen Vorbereitungen konnten nun die ersten Aufnahmen erfolgen. Im Fokus lagen hierbei die unten am Farbchart befestigten Haarbüschel. Nachdem der Schärfepunkt auf diese gelegt wurde, wurde die vorbereitete Animation in Nuke abgespielt und der Vorgang aufgezeichnet (Nähere Informa-

tionen zum Ablauf siehe Kapitel „4.4.1. Überlegungen zum Experimentablauf“ und Kapitel „4.4.7. Darstellung der Hintergrundbilder“).

### **13. Aufnahme 2: Cleanplates „Haare“**

Im nächsten Schritt entstanden die Cleanplates zur vorherigen Aufnahme. Die Haarbüschel wurden aus dem Bild entfernt, sprich das Stativ eingefahren, die Animation erneut abgespielt und der Vorgang aufgezeichnet.

Das Farbchart, samt daran befestigter Haarbüschel, wurde anschließend wieder in Position gebracht. Für die spätere Analyse und weiter folgenden Aufnahmen war es nicht notwendig, das Farbchart wieder an die *exakt* gleiche Position zu bringen.

### **14. Aufnahme 3: Referenzaufnahmen „Farbfächer“**

Der Ablauf dieser Aufnahmen entspricht grundsätzlich dem der ersten, außer, dass es diesmal darum ging, die seitlich an dem Farbchart befestigten Farbfächer-Blätter in leichter Unschärfe abzufilmen.

### **15. Aufnahme 4: Cleanplates „Farbfächer“**

Diese Aufnahmen entsprechen vom Ablauf her den zweiten Aufnahmen. Das Farbchart wurde abermals aus dem Bild entfernt, die Animation am TV-Gerät abgespielt und der gesamte Vorgang aufgezeichnet.

### **16. Set-Fotografien und Raumvermessung**

Zu guter Letzt wurde das Set noch abfotografiert und der Raum und die Positionen aller beteiligten Objekte vermessen.

### **17. Versuch RAW-Aufzeichnung**

Zu diesem Zeitpunkt waren die Rec.709-Aufnahmen erfolgreich abgeschlossen. Im Anschluss darauf wurde ein Versuch gestartet, die beschriebenen Aufnahmen im RAW-Modus durchzuführen. Der Ablauf verlief grundsätzlich identisch zu den vorangegangenen Rec.709-Aufnahmen mit Ausnahme der veränderten Kamera-Settings und dem Einsatz von LUTs wie in Kapitel „4.4.8.4. Testaufnahmen 4“ beschrieben. Bis Dato war noch keine Übereinstimmung der Kamera- und der Shogun-Anzeige gelungen. Für diesen neuen Versuch der RAW-Aufzeichnung

sollten nun LUTs, erstellt mit dem Online-Tool „LUTCalc“, zum Einsatz kommen (<https://cameramanben.github.io/LUTCalc/LUTCalc/index.html>). Entsprechend der gegebenen Aufnahmesituation, wurde eine LUT mit folgenden Settings erstellt:

- Rec-Gamma: „Sony/S-Log3“ und Rec-Gamut: „Sony/S-Gamut3.cine“
- Custom > White Balance: „5500 K“
- Out-Gamma: „Sony/Rec709 (800%)“, Out-Gamut: „Rec709/Rec709“
- Ziel: MLUT (OutputRange 100%)

Die konkrete Funktion bzw. Auswirkungen der Optionen „Input-Range“ und „Output-Range“ und „Grading LUT“ und „Monitor LUT“ des Tools war unklar, weshalb zu Testzwecken drei weitere LUT-Varianten exportiert wurden:

Folgende Settings waren bei allen vier LUTs identisch:

- Rec-Gamma: „Sony/S-Log3“ und Rec-Gamut: „Sony/S-Gamut3.cine“
- Custom > White Balance auf „5500K“

Spezifische Settings für LUT-1:

- Out-Gamma: „Sony/Rec709 (800%)“, Out-Gamut: „Rec709/Rec709“
- Ziel: MLUT (OutputRange 100%)

Spezifische Settings für LUT-2:

- Ident mit LUT-1 bis auf „Out-Gamut“: „Sony/S-Gamut3.cine“

Spezifische Settings für LUT-3:

- Ident mit LUT-1 bis auf „Ziel“: „Grading-LUT (OutputRange 109%)“

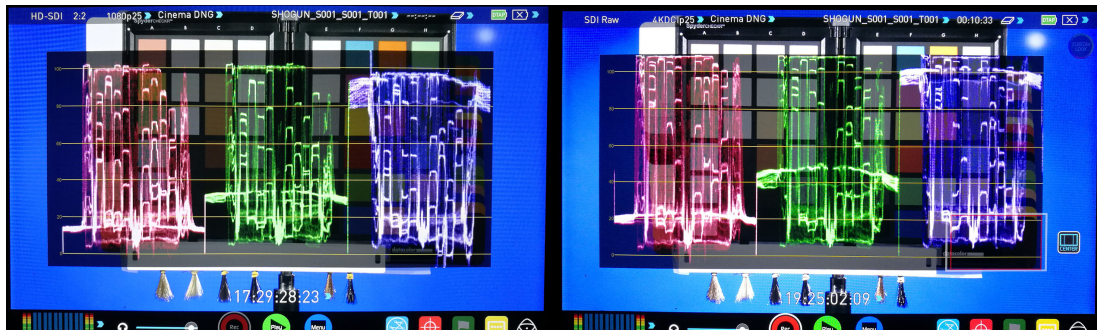
Spezifische Settings für LUT-4:

- Ident mit LUT-2 bis auf „Ziel“: „Grading-LUT (OutputRange 109%)“

Diese vier LUTs wurden also am Shogun installiert. Die Szene selbst und deren Beleuchtung sind inzwischen unverändert geblieben. Getestet wurde eine mögliche Übereinstimmung mit dem blauen Hintergrund. Ein Durchschalten der vier LUTs offenbarte leider abermals keine Übereinstimmung mit dem Rec709-Bild. Der Blaue-

## 4 Experimente

Farbkanal clippte bei LUTs eins bis drei mit über 100 IRE. Am nächsten zur Rec.709-Vorlage kam LUT-4 – jedoch erreichte auch hier der Blau-Kanal 100 IRE und Rot und Grün wichen ebenfalls um bis zu 10 IRE von der Rec.709-Ansicht ab:



*Abbildung 59: Abweichungen der RGB-Parade zwischen Rec.709- und RAW-Aufnahmen bei blauem Hintergrund. Links: Shogun Recorder mit Rec.709-Settings, Rechts: Shogun-Recorder bei RAW-Settings mit aktivem LUT-4.*

Für weiterführende Versuche die Monitor-Anzeigen der Sony FS7 und des Shogun-Recorders bei RAW-Aufnahmen abzugleichen, empfiehlt es sich, die Möglichkeiten des Tools LUTCalc weiter zu evaluieren.

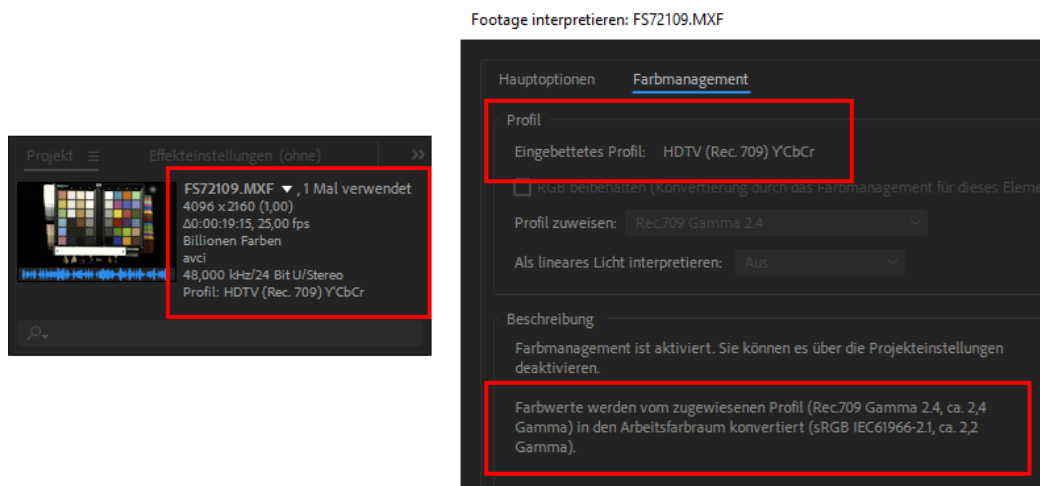
Für den weiteren Experiment-Verlauf wurde an dieser Stelle entschieden, die Analyse auf Basis der Rec.709-Aufnahmen durchzuführen. Für eine mögliche, spätere Analyse bzw. Vergleichsmöglichkeit, wurde die RAW-Variante unter Verwendung des LUT-4 dennoch aufgezeichnet. An der Szene bzw. der Belichtung wurde nichts verändert – der gesamte Ablauf wurde ident zu den vorherigen vier Rec.709-Aufnahmen abgewickelt.

### 4.4.10 Materialaufbereitung zur Auswertung

Vor der effektiven Farbanalyse des Rec.709-Videomaterials war es notwendig, diese in den sRGB-Standard zu transformieren, um es für die Verwendung mit dem Analyse-Tool *CIE Color Calculator* zu qualifizieren. Die Applikation bietet keine Option „Rec.709“ als RGB Model zu wählen; jedoch arbeiten die beiden Standards sRGB und Rec.709 mit einem identischen RGB Model. Diesbezüglich ist also keine

## 4 Experimente

Wandlung notwendig. Ein Unterschied besteht aber in einer veränderten Transferfunktion (Gamma-Kurve): Rec.709 wird mit einem Gamma von 2.4 (EBU, 2017, S.11) und sRGB mit einem Gamma von 2.2 codiert (Poynton, 2012, S. 321). Diese Umwandlung erfolgte im Zuge des Exports des XAVC-I-Videomaterials in 16-Bit-TIFF-Bildsequenzen: Die Software Adobe After Effects erkennt das Material als Rec.709-codiertes Video und führt beim Export eine Konvertierung in den als sRGB definierten Arbeitsfarbraum durch:



*Abbildung 60: Demonstration des eingebetteten Rec. 709-Profiles im Videomaterial und der Gamma-Konvertierung durch Adobe After Effects.*

Erwähnenswert sei an dieser Stelle, dass diese Wandlung anfänglich in Nuke stattfinden sollte, da weitere Schritte ebenfalls in diesem Tool durchgeführt würden. Die XAVC-I-Videodateien in MXF-Containern konnten von Nuke 10.v1 jedoch leider nicht eingelesen werden.

Die Filmaufnahmen erfolgten, wie bereits erwähnt, in der vom sRGB-Standard abweichenden Farbtemperatur von 5.500 K. Eine Wandlung war in diesem Fall nicht notwendig, da das Color Calculator Tool im Bereich „Ref. White“ die Wahl zwischen verschiedenen Temperatur-Standards erlaubt. Die Option für die Normlichtart „D55“ wurde gewählt.

Um die minimalen Veränderungen der Farbwerte über die Zeit aufgrund des Kamerarauschens in den Test miteinzubeziehen, wurden, wie in Abschnitt „4.2. Messung der Matte-Qualität“ erläutert, Framesequenzen „gemittelt“. Die daraus resultierenden Bilder waren schließlich geeignet für den Einsatz mit dem CIE Color Calculator.

### 4.4.11 Testergebnisse und Analyse

Insgesamt wurden 32 Farbkarten und sechs verschiedenfarbige Haarbüschel vor sechs verschiedenen Keyingfarben und zehn verschiedenen Hintergrundmotiven aufgezeichnet.

Der Umstand, dass für jede Farbe sowohl der vollständig opake Bereich, zwecks Analyse von Farbverunreinigungen durch beispielsweise Spill, als auch der mit Transparenzen versehene Übergangsbereich zwischen Farbe und Hintergrund relevant ist, und auch dass die Untersuchung mit zwei Keyern durchgeführt würde, ergibt **9.120 mögliche Analysepunkte**, zu denen jeweils ein Delta-E-Wert berechnet werden könnte:

$(32 \text{ Farbfelder} + 6 \text{ Haarbüschel} = 38 \text{ Farben}) * 6 \text{ Keyingfarben} * 10 \text{ Hintergrundbilder} = 2.280 \text{ mögliche Analysepunkte.}$

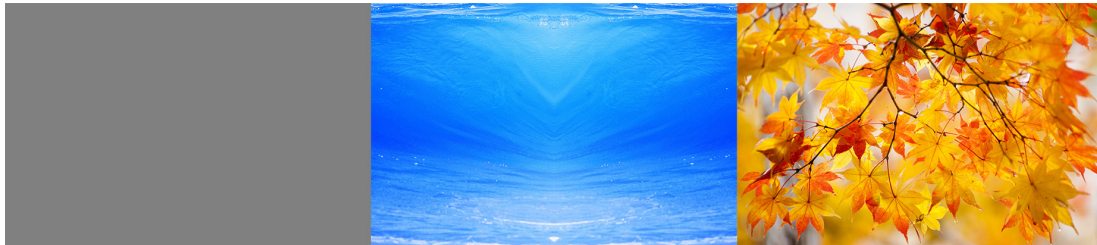
$2.280 * 2 \text{ (>> opaker Farbbereich und transparenter Farbbereich)} = 4.560 \text{ Analysepunkte.}$

$4.560 * 2 \text{ (>> Keying mit Ultimatte und Keylight)} = \mathbf{9.120 \text{ mögliche Analysepunkte}}$  bzw. Delta-E-Berechnungen.

Eine Auswertung aller Punkte ist im Rahmen dieser Arbeit nicht umsetzbar. Darum wurde sie in Abstimmung mit dem Erstbetreuer dieser Arbeit eingeschränkt und die Auswahl der Farben, so gut als möglich, denen von Experiment 1 angeglichen. Analysiert wurden jeweils 3 Hautfarben, 3 Haarfarben, Rot, Grün, Blau, Gelb und anstelle von Cyan ein „Mint“-Farbton und anstelle von Magenta ein lilafarbener Ton. Als Backing-Farben kamen wieder Grün und Blau zum Einsatz. Als Referenzbilder dienten die 3 Motive „Mittelgrau“, „Wasser“ und „Herbst“. Grau als neutrale Basis,



Wasser um die Überblendung mit „kühlen“ Farbtönen abzubilden und „Herbst“ für das wärmere Farbspektrum:



*Abbildung 61: Experiment 2: Auswahl der Hintergrundmotive.*

*V.l.n.r.: „Grau“, „Wasser“, „Herbst“.*

Analog zu Experiment 1 sind die Ergebnisse der Messungen auf folgenden Seiten tabellarisch dargestellt. Jeder zu analysierenden Farbe ist ein Buchstabe zugeordnet. Die genaue Position der Farbmessstellen wird jeweils eingangs in den folgenden Unterkapiteln dargestellt. Die dort sichtbaren, weißen Rahmen rund um die Buchstaben symbolisieren dabei den Bereich, dessen Durchschnitts-Farbwert gemessen wurde (siehe z.B. Abbildung 63).

Jede Zeile ist einer bestimmten, zu analysierenden Farbe unter Verwendung einer bestimmten Keyingfarbe gewidmet. Es finden sich jeweils Delta-E-Wertepaare nebeneinander, die mithilfe der drei erwähnten Hintergrundmotive ermittelt wurden; einerseits unter Einsatz des Ultimatte-Keys und andererseits durch Keylight. Jedem Wertepaar wird zur späteren, einfacheren Referenzierung im Analysetext eine eindeutige ID zugewiesen. Der niedrigere der beiden Werte wird fettgedruckt dargestellt und deutet auf eine nähere Übereinstimmung mit dem Referenzbild, sprich ein besseres Ergebnis, hin. In jeder Zeile wird außerdem, über alle 3 Motive hinweg, das beste Ergebnis (= niedrigster Wert) jeweils grün und das Schlechteste (= höchster Wert) rot dargestellt. Diese Formatierungsrichtlinien werden auch auf mehrere Zellen einer Zeile angewandt, sollten sich die Ergebniswerte gleichen. Beziehungsweise entfallen sie, wenn alle Werte einer Zeile gleich hoch sind. In den Zeilen ganz rechts finden sich die errechneten Durchschnitts-Delta-E-Werte der jeweiligen Keyer bei einer Farbe über alle Hintergründe hinweg. Genauso befinden



## 4 Experimente

sich unterhalb der Keyer-Spalten Durchschnittsergebnisse aller Farben pro Hintergrund und Keyer.

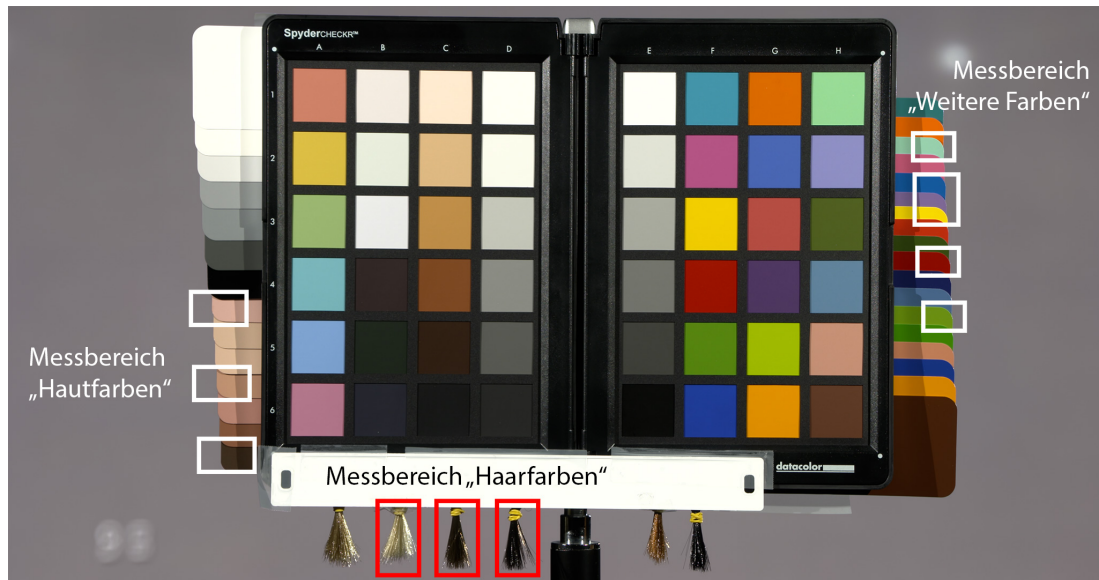


Abbildung 62: Experiment 2: Übersicht der Messbereiche vor Grau.

### 4.4.11.1 Hautfarben vor Grün und Blau

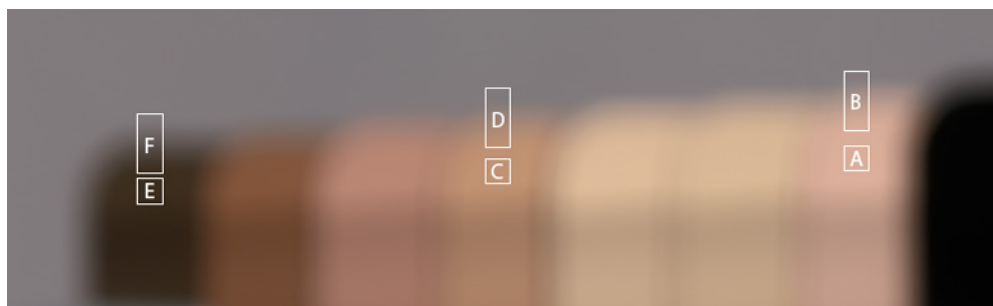


Abbildung 63: Experiment 2: Messstellen der Hautfarben vor Grau.

## 4 Experimente

| HAUT-Farben: Key mit GRÜN |    |           |          |      |             |          |      |             |          |            |            |      |  |  |  |
|---------------------------|----|-----------|----------|------|-------------|----------|------|-------------|----------|------------|------------|------|--|--|--|
| Analysepunkt              | ID | BG "Grau" |          | ID   | BG "Wasser" |          | ID   | BG "Herbst" |          | Ø ΔE Ulti. | Ø ΔE Keyl. |      |  |  |  |
|                           |    | ΔE Ulti.  | ΔE Keyl. |      | ΔE Ulti.    | ΔE Keyl. |      | ΔE Ulti.    | ΔE Keyl. |            |            |      |  |  |  |
| A Haut1 - Opak            | 1  | 0,39      | 0,39     | 2    | 0,48        | 0,48     | 3    | 0,32        | 0,32     | A          | 0,40       | 0,40 |  |  |  |
| B Haut1 - Transparent     | 4  | 6,60      | 5,78     | 5    | 3,70        | 2,26     | 6    | 5,36        | 3,14     | B          | 5,22       | 3,73 |  |  |  |
| C Haut2 - Opak            | 7  | 0,98      | 0,98     | 8    | 1,04        | 1,04     | 9    | 0,75        | 0,75     | C          | 0,92       | 0,92 |  |  |  |
| D Haut2 - Transparent     | 10 | 7,50      | 4,56     | 11   | 1,55        | 0,41     | 12   | 3,06        | 1,39     | D          | 4,04       | 2,12 |  |  |  |
| E Haut3 - Opak            | 13 | 0,54      | 0,40     | 14   | 0,60        | 0,43     | 15   | 0,65        | 0,45     | E          | 0,60       | 0,43 |  |  |  |
| F Haut3 - Transparent     | 16 | 2,05      | 0,37     | 17   | 3,89        | 0,54     | 18   | 6,06        | 0,68     | F          | 4,00       | 0,53 |  |  |  |
| Ø ΔE                      |    | 3,01      | 2,08     | 1,88 |             | 0,86     | 2,70 |             | 1,12     | 2,53       |            | 1,35 |  |  |  |
| HAUT-Farben: Key mit BLAU |    |           |          |      |             |          |      |             |          |            |            |      |  |  |  |
| Analysepunkt              | ID | BG "Grau" |          | ID   | BG "Wasser" |          | ID   | BG "Herbst" |          | Ø ΔE Ulti. | Ø ΔE Keyl. |      |  |  |  |
|                           |    | ΔE Ulti.  | ΔE Keyl. |      | ΔE Ulti.    | ΔE Keyl. |      | ΔE Ulti.    | ΔE Keyl. |            |            |      |  |  |  |
| A Haut1 - Opak            | 19 | 0,18      | 0,18     | 20   | 0,13        | 0,13     | 21   | 0,38        | 0,38     | A          | 0,23       | 0,23 |  |  |  |
| B Haut1 - Transparent     | 22 | 7,32      | 7,08     | 23   | 2,95        | 0,54     | 24   | 7,78        | 8,05     | B          | 6,02       | 5,22 |  |  |  |
| C Haut2 - Opak            | 25 | 0,11      | 0,11     | 26   | 0,05        | 0,05     | 27   | 0,44        | 0,44     | C          | 0,20       | 0,20 |  |  |  |
| D Haut2 - Transparent     | 28 | 7,48      | 7,48     | 29   | 2,31        | 0,49     | 30   | 5,69        | 7,09     | D          | 5,16       | 5,02 |  |  |  |
| E Haut3 - Opak            | 31 | 0,31      | 0,31     | 32   | 0,21        | 0,21     | 33   | 0,36        | 0,36     | E          | 0,29       | 0,29 |  |  |  |
| F Haut3 - Transparent     | 34 | 2,39      | 1,98     | 35   | 3,20        | 0,42     | 36   | 4,03        | 1,24     | F          | 3,21       | 1,21 |  |  |  |
| Ø ΔE                      |    | 2,96      | 2,86     | 1,47 |             | 0,31     | 3,11 |             | 2,93     | 2,52       |            | 2,03 |  |  |  |

Tabelle 6: Experiment 2-Testergebnisse: Hautfarben.

Folgende Erkenntnisse gehen aus den Daten hervor:

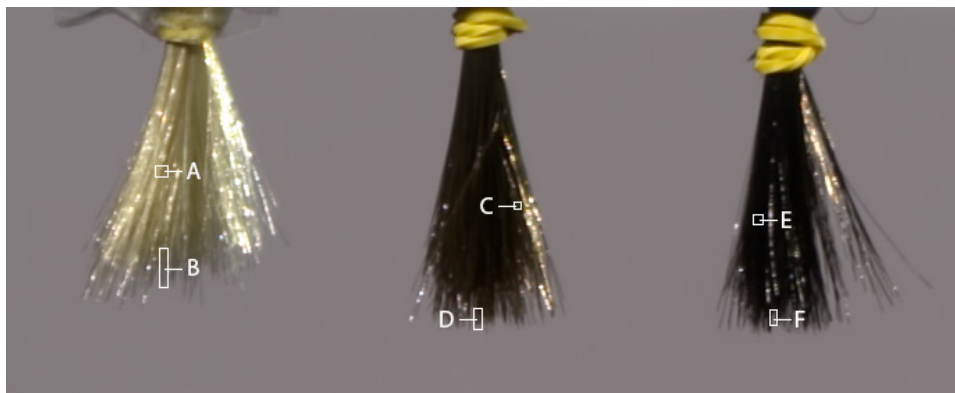
- Beide Keyer können die opaken Varianten der Hautfarben in allen Keying-Szenarien gut reproduzieren. Die Keying- und Despilling-Algorithmen funktionieren also, wie bereits bei Experiment 1 festgestellt, bei diesen Farbtönen sehr gut und führen nur zu niedrigen Farbtonverschiebungen. Den Höchstwert von 1,04 bildet die Hautfarbe 2 im Greenscreen-Setting vor der kühlen Hintergrundszene „Wasser“.
- Die visuelle Analyse zeigt in allen Szenarien bei den Übergängen zwischen den Vordergrundbereichen und den Hintergründen durchschnittlich deutliche Verunreinigungen durch die Backing-Farbe. Dies ist selbst bei niedrigen ΔE-Werten, wie beispielsweise 0,3, erkennbar. Die Stärke der Wirkung der Verunreinigung wirkt dabei jeweils gegengleich zur Backing-Farbe und Hintergrund: Ein Resultat gekeyed mit Grün profitiert vom Composite mit dem warmen Herbst-Hintergrund, während ein Key mit Blau sich besser mit den kühlen Wasserfarben vermischt.
- Bezüglich der Backing-Farbe ist kein eindeutiger Favorit erkennbar. Mit beiden Hintergrundfarben lassen sich ähnlich gute Resultate erzielen.

## 4 Experimente

---

- Ultimatte erzeugt im Durchschnitt härtere Übergänge zwischen Vordergründen und Hintergründen.
- Ultimattes Übergänge von Vordergrund zu Hintergrund sind durchschnittlich visuell stärker mit der Backing-Farbe verunreinigt, als dies bei Keylight der Fall ist. Sie erscheinen zu dunkel.
- Als Tendenzen sind erkennbar, dass zum einen dunklere Hautfarben und zum anderen Hautfarben vor dem kühlen Wasserhintergrund bessere Resultate erzielen, als vor dem warmen.

### 4.4.11.2 Haarfarben vor Grün und Blau



*Abbildung 64: Experiment 2: Messstellen der Haarfarben vor Grau*

## 4 Experimente

| HAAR-Farben: Key mit GRÜN |           |          |          |             |          |          |             |          |          |            |            |
|---------------------------|-----------|----------|----------|-------------|----------|----------|-------------|----------|----------|------------|------------|
| Analysepunkt              | BG "Grau" |          |          | BG "Wasser" |          |          | BG "Herbst" |          |          |            |            |
|                           | ID        | ΔE Ulti. | ΔE Keyl. | ID          | ΔE Ulti. | ΔE Keyl. | ID          | ΔE Ulti. | ΔE Keyl. | Ø ΔE Ulti. | Ø ΔE Keyl. |
| A Blond - Opak            | 37        | 3,54     | 6,92     | 38          | 4,02     | 5,75     | 39          | 3,27     | 8,25     | A 3,61     | 6,97       |
| B Blond - Transparent     | 40        | 2,90     | 2,16     | 41          | 5,83     | 0,68     | 42          | 5,55     | 1,93     | B 4,76     | 1,59       |
| C Braun - Opak            | 43        | 0,21     | 0,32     | 44          | 0,26     | 0,19     | 45          | 0,36     | 0,20     | C 0,28     | 0,24       |
| D Braun - Transparent     | 46        | 2,93     | 1,15     | 47          | 4,83     | 1,09     | 48          | 7,69     | 3,41     | D 5,15     | 1,88       |
| E Schwarz - Opak          | 49        | 0,18     | 0,03     | 50          | 0,10     | 0,04     | 51          | 0,14     | 0,04     | E 0,14     | 0,04       |
| F Schwarz - Transparent   | 52        | 2,42     | 1,36     | 53          | 4,22     | 1,64     | 54          | 6,75     | 1,78     | F 4,46     | 1,59       |
| Ø ΔE                      |           | 2,03     | 1,99     |             | 3,21     | 1,57     |             | 3,96     | 2,60     | 3,07       | 2,05       |
| HAAR-Farben: Key mit BLAU |           |          |          |             |          |          |             |          |          |            |            |
| Analysepunkt              | BG "Grau" |          |          | BG "Wasser" |          |          | BG "Herbst" |          |          |            |            |
|                           | ID        | ΔE Ulti. | ΔE Keyl. | ID          | ΔE Ulti. | ΔE Keyl. | ID          | ΔE Ulti. | ΔE Keyl. | Ø ΔE Ulti. | Ø ΔE Keyl. |
| A Blond - Opak            | 55        | 0,81     | 0,81     | 56          | 0,37     | 0,37     | 57          | 1,39     | 1,39     | A 0,85     | 0,85       |
| B Blond - Transparent     | 58        | 3,98     | 3,61     | 59          | 5,06     | 1,50     | 60          | 3,40     | 4,62     | B 4,14     | 3,24       |
| C Braun - Opak            | 61        | 0,78     | 0,78     | 62          | 0,91     | 0,91     | 63          | 1,29     | 1,29     | C 0,99     | 0,99       |
| D Braun - Transparent     | 64        | 2,98     | 2,11     | 65          | 4,36     | 1,35     | 66          | 6,90     | 3,86     | D 4,74     | 2,44       |
| E Schwarz - Opak          | 67        | 0,07     | 0,05     | 68          | 0,12     | 0,03     | 69          | 0,13     | 0,05     | E 0,11     | 0,04       |
| F Schwarz - Transparent   | 70        | 2,58     | 0,61     | 71          | 4,12     | 0,52     | 72          | 6,79     | 1,91     | F 4,49     | 1,01       |
| Ø ΔE                      |           | 1,87     | 1,33     |             | 2,49     | 0,78     |             | 3,31     | 2,19     | 2,56       | 1,43       |

*Tabelle 7: Experiment 2-Testergebnisse: Haarfarben*

Folgende Erkenntnisse gehen aus den Daten hervor:

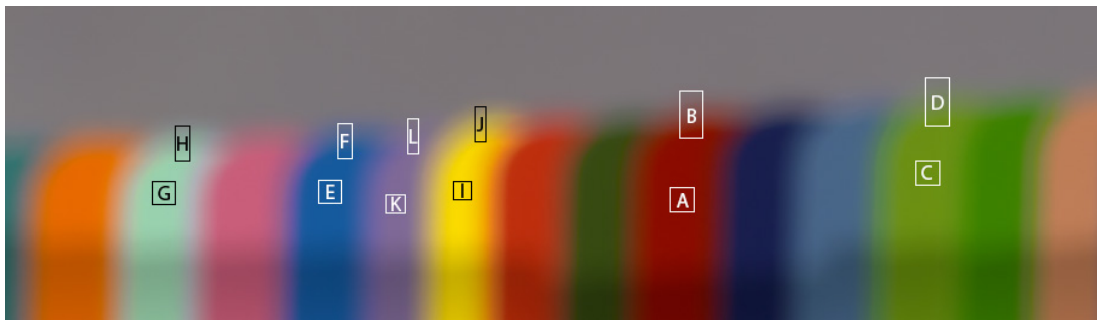
- Auffällig sind die hohen Abweichungen zur Referenz über alle Hintergrundszenarien hinweg beim Greenscreen-Keying und den opaken, blonden Haaren. Durch den erhöhten Grünanteil im Vergleich zu Blau kommt es sichtbaren Farbtonverschiebungen Richtung Rot. Ultimatte schneidet in diesem schwierigen Szenario durchschnittlich ca. doppelt so gut ab, wie Keylight. Beim Bluescreen erreichen alle Keyer hingegen durchgängig gute Ergebnisse.
- Die transparenten Bereichen der Haarfarben generieren allgemein schlechte Ergebnisse. Dies hat mit der starken Durchsichtigkeit der feinen Haarspitzen zu tun, die naturgemäß die Backing-Farbe stark durchscheinen lassen.
- Auffällig ist die schlechte Detailwiedergabe des Ultimatte-Keyers mit den Defaulteinstellungen in allen Szenarien. Im Test gingen der Großteil der feinen Haarspitzen verloren. Keylight hingegen schneidet hier weit besser ab. Besonders die Keyingvorgänge mit Grün überzeugen mit hoher Detailwiedergabe. Bluescreen-Ergebnisse wirken im Vergleich dazu leicht weichgezeichnet.

## 4 Experimente

---

- Durchschnittlich liefert Keylight dank sein besseren Detailwiedergabe eine deutlich bessere Performance als Ultimatte.
- Je dunkler die Haarfarbe, desto besser die sind tendenziell die Resultate. Dies gilt jedoch nicht für die stark-unterschiedlich transparenten Haardetail-Bereiche.

### 4.4.11.3 Weitere Farben vor Grün und Blau



*Abbildung 65: Experiment 2: Messstellen weiterer Farben vor Grau.*

## 4 Experimente

| Weitere Farben: Key mit GRÜN |                    |           |          |          |             |          |          |             |          |          |            |            |       |  |
|------------------------------|--------------------|-----------|----------|----------|-------------|----------|----------|-------------|----------|----------|------------|------------|-------|--|
|                              |                    | BG "Grau" |          |          | BG "Wasser" |          |          | BG "Herbst" |          |          |            |            |       |  |
| Analysepunkt                 |                    | ID        | ΔE Ulti. | ΔE Keyl. | ID          | ΔE Ulti. | ΔE Keyl. | ID          | ΔE Ulti. | ΔE Keyl. | Ø ΔE Ulti. | Ø ΔE Keyl. |       |  |
| A                            | Rot - Opak         | 73        | 0,03     | 0,03     | 74          | 0,16     | 0,16     | 75          | 0,05     | 0,05     | A          | 0,08       | 0,08  |  |
| B                            | Rot - Transparent  | 76        | 7,75     | 6,51     | 77          | 4,42     | 5,27     | 78          | 3,79     | 3,37     | B          | 5,32       | 5,05  |  |
| C                            | Grün - Opak        | 79        | 22,67    | 26,23    | 80          | 39,84    | 42,08    | 81          | 31,87    | 34,75    | C          | 31,46      | 34,35 |  |
| D                            | Grün - Transparent | 82        | 20,60    | 21,68    | 83          | 11,64    | 11,20    | 84          | 18,47    | 17,86    | D          | 16,90      | 16,91 |  |
| E                            | Blau - Opak        | 85        | 0,24     | 0,24     | 86          | 0,18     | 0,18     | 87          | 0,19     | 0,19     | E          | 0,20       | 0,20  |  |
| F                            | Blau - Transparent | 88        | 8,17     | 7,19     | 89          | 1,30     | 2,86     | 90          | 17,42    | 12,41    | F          | 8,96       | 7,49  |  |
| G                            | Mint - Opak        | 91        | 37,11    | 32,98    | 92          | 40,61    | 39,23    | 93          | 37,39    | 34,87    | G          | 38,37      | 35,69 |  |
| H                            | Mint - Transparent | 94        | 26,53    | 23,24    | 95          | 26,68    | 21,92    | 96          | 27,10    | 24,39    | H          | 26,77      | 23,19 |  |
| I                            | Gelb - Opak        | 97        | 18,98    | 17,72    | 98          | 19,02    | 18,13    | 99          | 18,78    | 18,46    | I          | 18,93      | 18,10 |  |
| J                            | Gelb - Transparent | 100       | 10,97    | 11,34    | 101         | 14,94    | 24,70    | 102         | 8,57     | 5,83     | J          | 11,50      | 13,96 |  |
| K                            | Lila - Opak        | 103       | 0,15     | 0,15     | 104         | 0,16     | 0,16     | 105         | 0,15     | 0,15     | K          | 0,16       | 0,16  |  |
| L                            | Lila - Transparent | 106       | 9,63     | 10,62    | 107         | 2,25     | 4,76     | 108         | 7,47     | 4,82     | L          | 6,45       | 6,73  |  |
| Ø ΔE                         |                    |           | 17,23    | 16,01    |             | 17,28    | 18,15    |             | 16,58    | 14,75    |            | 13,76      | 13,49 |  |
| Weitere Farben: Key mit BLAU |                    |           |          |          |             |          |          |             |          |          |            |            |       |  |
|                              |                    | BG "Grau" |          |          | BG "Wasser" |          |          | BG "Herbst" |          |          |            |            |       |  |
| Analysepunkt                 |                    | ID        | ΔE Ulti. | ΔE Keyl. | ID          | ΔE Ulti. | ΔE Keyl. | ID          | ΔE Ulti. | ΔE Keyl. | Ø ΔE Ulti. | Ø ΔE Keyl. |       |  |
| A                            | Rot - Opak         | 109       | 0,08     | 0,08     | 110         | 0,05     | 0,05     | 111         | 0,07     | 0,07     | A          | 0,07       | 0,07  |  |
| B                            | Rot - Transparent  | 112       | 6,40     | 6,04     | 113         | 2,66     | 0,20     | 114         | 4,92     | 5,56     | B          | 4,66       | 3,94  |  |
| C                            | Grün - Opak        | 115       | 0,10     | 0,10     | 116         | 0,04     | 0,04     | 117         | 0,12     | 0,12     | C          | 0,09       | 0,09  |  |
| D                            | Grün - Transparent | 118       | 5,17     | 4,99     | 119         | 5,66     | 2,50     | 120         | 4,23     | 7,29     | D          | 5,02       | 4,92  |  |
| E                            | Blau - Opak        | 121       | 24,41    | 27,98    | 122         | 6,10     | 9,09     | 123         | 37,42    | 38,12    | E          | 22,64      | 25,06 |  |
| F                            | Blau - Transparent | 124       | 17,96    | 22,79    | 125         | 2,56     | 3,52     | 126         | 32,43    | 28,08    | F          | 17,65      | 18,13 |  |
| G                            | Mint - Opak        | 127       | 0,52     | 0,52     | 128         | 0,06     | 0,06     | 129         | 0,23     | 0,23     | G          | 0,27       | 0,27  |  |
| H                            | Mint - Transparent | 130       | 5,81     | 1,47     | 131         | 6,25     | 1,43     | 132         | 7,21     | 2,63     | H          | 6,42       | 1,84  |  |
| I                            | Gelb - Opak        | 133       | 0,12     | 0,12     | 134         | 0,06     | 0,06     | 135         | 0,31     | 0,31     | I          | 0,16       | 0,16  |  |
| J                            | Gelb - Transparent | 136       | 9,91     | 9,18     | 137         | 10,21    | 7,03     | 138         | 15,71    | 16,57    | J          | 11,94      | 10,93 |  |
| K                            | Lila - Opak        | 139       | 12,70    | 12,65    | 140         | 4,69     | 3,57     | 141         | 20,49    | 21,74    | K          | 12,62      | 12,65 |  |
| L                            | Lila - Transparent | 142       | 9,89     | 8,81     | 143         | 2,21     | 1,32     | 144         | 13,08    | 9,21     | L          | 8,39       | 6,45  |  |
| Ø ΔE                         |                    |           | 6,49     | 5,46     |             | 3,91     | 2,25     |             | 9,51     | 8,45     |            | 7,50       | 7,04  |  |

Tabelle 8: Experiment 2-Testergebnisse: Weitere Farben.

Folgende Erkenntnisse gehen aus den Daten hervor:

- Die Primärfarben RGB eignen sich dank ihrer Reinheit sehr gut für das Color Difference-Verfahren – mit Ausnahme natürlich von Grün bei Greenscreen-Keying, respektive Blau bei Bluescreen-Keying.
- In jedem Keyingszenario liefern bei den getesteten Farbbereichen beide Keyer durchschnittlich sehr ähnliche Performance. Die Ausnahme bildet das Bluescreen-Szenario vor dem Wasser-Hintergrund. Hier generiert Keylight durchschnittlich 74% bessere Resultate.
- Beim Greenscreen-Keying führen die Farben Mint und Gelb aufgrund ihres hohen Grünanteils bei beiden Keyern zu starken Farbtonabweichungen.
- Beim Bluescreen-Keying führt die Farbe Lila aufgrund ihres hohen

Blauanteils bei beiden Keyern zu starken Farbtonabweichungen.

- Keylight geht mit dem transparenten, mintfarbenen Bereich beim Blue-screen-Keying, trotz des erhöhten Blauanteils, deutlich besser um, als Ultimatte.

### 4.5 Interpretation der Ergebnisse

Als dominantester Unterschied zwischen den Keyern ist im Zuge der Durchführung beider Experimente die schlechte Kantenwiedergabe des Ultimatte-Keyers bei Default-Einstellungen aufgefallen. Diese subjektive, auf visuelle Beobachtung beruhende Erkenntnis, findet sich jedoch nicht so stark ausgeprägt in den errechneten Delta-E-Werten wieder.

Auffällig war auch die sehr gute Performance von Keylight in der theoretischen Umgebung, welche mit Experiment 1 simuliert wurde. Lediglich bei den Farben Cyan, Magenta und Gelb kam es unter all den getesteten Farben zu Farbunterschieden zwischen den Referenz- und den Testbildern.

Allgemein lässt sich feststellen, dass beide Keyer bei vollständig opaken Bereichen durchschnittlich sehr gute Ergebnisse liefern. Dies lässt auf gute Despilling-Algorithmen innerhalb der Software schließen.

Die durchgeführten Tests bestätigten die Art der Funktion und möglichen Performance der Color Difference Keying-Methode. Die Verwendung möglichst purer, gleichmäßiger Hintergründe führt zu durchschnittlich besseren Ergebnissen (siehe Resultate der idealisierten Testumgebung). Gleichsam konnte aufgezeigt werden, dass die Ergebnisse um so besser ausfallen, je komplementärer die Vordergrundfarbe zur Backing-Farbe ist und je weniger farbig diese ist.

Klar von Vorteil ist es weiters, die Wahl der Backing-Farbe auf die Hintergründe abzustimmen, vor denen die freigestellten Objekte letztlich platziert werden sollen. Unabhängig von den eigentlichen Farben der Vordergrundobjekte, liefert der Einsatz

eines Bluescreens im Vergleich zum Greenscreen deutlich bessere Ergebnisse, wenn diese später vor kühlen Farben platziert werden. Mögliche verbleibende Farbverunreinigungen durch den Keyingvorgang an den Objekträndern werden durch diese Vorgehensweise kaschiert.

Zusammenfassend lässt sich zu den getesteten Keyingszenarios festhalten:

Die hier getesteten Hautfarben werden im opaken Bereich von beiden Keyern gleichermaßen gut abgebildet. Auch bezüglich der Backing-Farbe, Grün oder Blau, ist kein eindeutiger Favorit festzustellen. Tendenziell ist erkennbar, dass in realistischen Szenarios dunklere Hauttöne besser reproduziert werden können, als helle und sich diese vor kühlen Hintergründen besser integrieren lassen, als vor warmen.

Der Haarfarben-Test hat gezeigt, dass, bezogen auf die errechneten Delta-E-Werte, beide Keyer bei den opaken Bereichen gute und gleichwertige Ergebnisse liefern. Die Übergänge zum Hintergrund (sprich Haarspitzen) generieren hingegen sehr unterschiedliche Resultate, wodurch keine klare Empfehlung ausgesprochen werden kann. Eine Sonderstellung bildet der helle Blond-Farbtön. Dieser führt durchschnittlich zu den größten Farbabständen. Auffallend sind hierbei die deutlich besseren Resultate im opaken Bereich unter Verwendung eines Bluescreens. Abseits der Messwerte muss die schlechte Performance von Ultimatte in allen Testszenarios bei den Haarspitzen hervorgehoben werden. Unter Verwendung der Standardsettings geht ein Großteil der Details verloren. Keylight hingegen überzeugt durch eine sehr gute Detailwiedergabe; besonders beim Keyingvorgang mit Grün. Die Bluescreen-Ergebnisse wirken im Vergleich dazu leicht weichgezeichnet.

Die Analyse der Farben RGB, CMY, Mint und Lila ergab keine unerwarteten Ergebnisse. Je höher der Grünanteil der Vordergrundfarbe beim Keyen mit Grün, desto schlechter die durchschnittliche Performance und gleiches gilt für Farben mit hohem Blauanteil beim Bluescreen-Keying. Beide Keyer liefern in den getesteten Szenarios durchschnittlich sehr ähnliche Ergebnisse. Eine Ausnahme bildet der Bluescreen-Keyingvorgang bei anschließendem Compositing mit dem Wasser-Hintergrund: Hier generiert Keylight durchschnittlich 74% bessere Resultate, als



Ultimatte. Für Keyingvorgänge unvorteilhaft sind Cyan-ähnliche Farbtöne. Ihr hoher Anteil an Grün und Blau führt zu hohen Farbverschiebungen. Wenn, dann sollte die Farbe vor Blau gekeyed werden. Im Gegensatz zu Grün, kommt es hier zu einer durchschnittlich 57,5% geringeren Farbtonverschiebung.

## 5 Fazit und Ausblick

Um auf die Problemstellungen der Arbeit einzugehen, die Erörterung der theoretischen Funktion und Bestimmung der praktischen Performance der beiden Software-Keyer Ultimatte und Keylight, wurden ein Literaturstudium und praktische Experimente durchgeführt.

Zu Beginn wurden mittels Fachliteratur die Grundlagen hinter der Keying-Technik und den verschiedenen, gängigen Verfahren erarbeitet. Besonderes Augenmerk galt dem Farbdifferenzverfahren, dem Kernthema dieser Arbeit, und den beiden populären Vertretern dieser Methode, Ultimatte und Keylight.

Obwohl die Funktionsweise beider Keyer auf dem selben Grundprinzips beruht, das geschickte Nutzen von Pegeldifferenzen zur Generierung von Mattes, gibt es dennoch Unterschiede. Ultimatte nimmt eine Vorreiterrolle ein, dessen Wurzeln bis in die analoge Filmwelt zurückreichen. Der große, gesammelte Erfahrungsschatz der Entwickler, besonders im Bereich der Bluescreen-Technik, wurde in Patenten verankert und führte zu Oscar-gekrönten Leistungen auf dem Gebiet. Im Gegensatz zu Keylight, existiert die Ultimatte-Technologie auch als Hardware-Produkt, welches im Bereich des Live-Keyings, das u. a. für Studio-Situationen relevant ist, einen sehr guten Ruf genießt. Ultimatte weist im Vergleich zu Keylight auch einen höheren Funktionsumfang auf und unterstützt beispielsweise die gezielte Behandlung von Schattenbereichen. Keylight muss sich dennoch in Sachen Performance, zumindest im Bezug auf Keying mit Defaulteinstellungen, nicht hinter Ultimatte verstecken, wie der praktische Teil der Arbeit aufzeigt. Auch diese Software wurde bereits mit einem Technical Academy Award ausgezeichnet und ist ein beliebtes Tool in aktuellen VFX-Produktionen. Gemein haben beide Keyer, dass sie nicht mehr separat,

sondern nur mehr als mitgeliefertes Plug-in diversen Compositing-Softwarepaketen erhältlich sind.

Das durchgeführte Experiment 2, mit seinem realistischen Setting, eignete sich gut, um Aussagen zu Unterschieden zwischen real aufgenommenen Bildern mit Vordergrund- und Hintergrund-Objekten und exakt nachgestellten, aber mithilfe der Keying-Technik zusammengeführten Szenen, treffen zu können, wenn dabei von den Standard-Einstellungen der Keyingsoftware ausgegangen wird. Das Experiment wurde derart geplant und umgesetzt, um ein möglichst breites Spektrum an Keyingszenarien abzudecken. Dies ist grundsätzlich auch gelungen – der zeitliche Auswertungsaufwand wurde jedoch stark unterschätzt, wodurch letztlich die Analyse auf die Backing-Farben Grün und Blau vor insgesamt 3 verschiedenen Hintergründen beschränkt werden musste.

Das Untersuchungsszenario in Form des idealisierten Experiment 1 war eine wertvolle Erweiterung zum Verständnis der Funktionalität und Aufzeigen der Performance der Farbdifferenz-Methode. Hier kann mit besonders reinen Farben gearbeitet werden, wodurch die Stärken und Schwächen des Keyingverfahrens gut sichtbar werden. Besonders in diesem Fall wäre es hilfreich, weitere Keyingszenarien mit zusätzlichen Hintergrundfarben aufzubereiten und zu analysieren.

Die Analyse der Ergebnisse der Experimente brachte keine großen Überraschungen mit sich. Beide Keyer liefern durchschnittlich sehr ähnlich Messwerte und entsprachen den zu erwartenden Ergebnissen, betrachtet man die Pegeldifferenzen zwischen den analysierten und den Backing-Farben. Hierbei kam auch der Nachteil der hier verwendeten Methode zur Messung der Matte-Qualität zum Vorschein: Die gemessenen, „guten“ Ergebnisse entsprachen oft nicht den visuell wahrgenommen Resultaten. Dies gilt besonders für Ultimatte: Im Großteil der Szenarien generierte dieser unter Anwendung der Standardeinstellungen deutlich härtere Übergänge zwischen Vorder- und Hintergrund, als diese in der Realität sichtbar waren und war Keylight deutlich unterlegen. Sehr deutlich war dies beim Test der transparenten Haarspitzen zu sehen. Keylight liefert hier sehr gute Ergebnisse und konnte die

feinen Details erhalten, während diese bei Ultimatte völlig verloren gingen. Aufgrund der Farbmittelung und der Größe der gewählten Messbereiche wirkt sich dieser Effekt auf das zahlenmäßige Ergebnis weniger stark aus, als visuell wahrnehmbar. Verbessern könnte man diese Situation, indem man beispielsweise kleinere und dafür mehrere Messstellen bei weichen Übergängen zwischen Vordergrund und Hintergrund einsetzt.

Erwähnenswert ist, dass beide Keyer bei vollständig opaken Bereichen sehr geringe Farbverschiebungen aufzeigen. Dies lässt auf gute Despilling-Algorithmen innerhalb der Software schließen.

Auf Basis der Experiment-Analysen und auf die gegebenen Bedingungen bezogen, können folgende Handlungsanweisungen für die Anwendung der beiden Color Difference Keyer Ultimatte und Keyer gegeben werden:

- Je größer die Pegeldifferenz im Kanal der gewählten Backing-Farbe zwischen Vordergrund und Hintergrund, desto besser das Keyingergebnis.
- Je purer und gleichmäßiger die Backing-Farbe, desto besser das Keyingergebnis.
- Für Hautfarben gilt: Je heller der Hauttyp, desto weniger relevant ist die Wahl zwischen Grün und Blau. Je dunkler der Hauttyp, desto vorteilhafter wird der Bluescreen.
- Für Haare sind weniger deutliche Empfehlungen möglich. Tendenziell gilt jedoch: Je heller das Haar und je weniger transparente Bereiche (Haarsträhnen) vorhanden sind, desto bessere Ergebnisse liefert der Bluescreen. Feine Haardetails werden durch den Greenscreen besser abgebildet.

Weitere, mögliche Forschungsfelder im Zusammenhang mit dieser Arbeit wären:

- Eine gezielte Auseinandersetzung mit den Konfigurationsmöglichkeiten der Keying-Software. Besonders das Potential von Ultimatte konnte unter den gegebenen Rahmenbedingungen nicht evaluiert werden.

- Eine Ausweitung der Keyingszenarien, um mehr Bereiche des Farbspektrums abzubilden. Besonders im Hinblick auf die idealisierten Testumgebung von Experiment 1, würde eine größere Auswahl an Hintergrundfarben aufschlussreich sein. Aufgrund des erhöhten, zeitlichen Aufwandes des aktuellen Messverfahrens, empfiehlt es sich, hierbei Automatisierungsmechanismen zu entwickeln und einzusetzen.
- Interessant wären die Auswirkungen auf die Keyingergebnisse, setzt man auf RAW-Footage anstelle des 10-Bit 4:2:2 XAVC-I-Materials.
- Ein Performance-Vergleich mit anderen Keying-Verfahren.

## 6 Anhang

### 6.1 Literaturverzeichnis

**AbelCine.** (23. Jänner 2015). *At the Bench: Recording Raw with the Sony XDCA-FS7 [Video Datei]*. Abgerufen von <https://www.youtube.com/watch?v=bd2vI5HWwyk>

**Adobe Systems Incorporated.** (29 Juni, 2017). *Alpha channels, masks, and mattes*. Abgerufen von <https://helpx.adobe.com/after-effects/using/alpha-channels-masks-mattes.html>

**Amazon Europe Core S.à r.l.** (o.D.-a). *RAL K5 Fächer seidenmatt*. Abgerufen 15. Mai, 2018, von <https://www.amazon.de/Ral-K5-RAL-F%C3%A4cher-seidenmatt/dp/B002LFVOZC>

**Amazon Europe Core S.à r.l.** (o.D.-b). *Elfenstall 12-teilige ND Farbfilter + 9 Adapterringe + 2 Halter + 2 Gegenlichtblenden für Cokin*. Abgerufen 15. Mai, 2018, von <https://www.amazon.de/Elfenstall-12-teilige-Farbfilter-Adapterringe-Gegenlichtblenden/dp/B00P45PDXK>

**Animataurus.** (13. Februar, 2017). *Kubo and the Two strings is a fantastical adventure set in ancient Japan*. Abgerufen von <http://animataurus.com/kubo-and-the-two-strings>

**Atomos Video.** (23. März, 2017). *Atomos CDNG update for Shogun, Shogun Flame and Shogun Inferno [Video Datei]*. Abgerufen von <https://vimeo.com/209744822>

**Blackmagic Design Pty. Ltd.** (o.D.). *Introducing Ultimatte 12*. Abgerufen 15. Mai, 2018, von <https://www.blackmagicdesign.com/products/ultimatte>

**Blackmagic Design Pty. Ltd.** (9. September, 2016). *Blackmagic Design Announces the Acquisition of Ultimatte*. Abgerufen von <https://www.blackmagicdesign.com/uk/media/release/20160909-01>

**Brinkmann, R.** (2008). *The Art and Science of Digital Compositing (2. Aufl.)*. Burlington: Morgan Kaufmann Publishers.

**Chapman, A.** (2015). *PXW-FS7 Tutorial Video [Videodatei]*. Abgerufen von [https://www.youtube.com/playlist?list=PLL06nPE7\\_IzNP6coYTPft-ZVfUu47PnhW](https://www.youtube.com/playlist?list=PLL06nPE7_IzNP6coYTPft-ZVfUu47PnhW)

**Chapman, A.** (2016). *Ultimate Guide to CineEI on the PXW-FS7 [Web Log Eintrag]*. Abgerufen von <http://www.xdcam-user.com/2014/12/ultimate-guide-for-cine-ei-on-the-sony-pxw-fs7>

**Chuang, Y.** (2004). *New Models and Methods for Matting and Compositing (Dissertation)*. University of Washington, USA.

**Chuang, Y., Curless, B., Salesin, D. H., & Szeliski, R.** (2001). *A bayesian approach to digital matting*. In Jacobs, A., & Baldwin, T. (Hrsg.). *Proceedings of IEEE CVPR 2001*. (2. Aufl.) (S.264-271). Los Alamitos: IEEE Computer Society.

**Chuang, Y., Agarwala, A., Curless, B., Salesin, D. H., & Szeliski, R.** (2002). *Video Matting of Complex Scenes*. *ACM Transactions on Graphics*, 21 (3), 243–248.

**CIE.** (o.D.). *Colorimetry-Part 6: CIEDE2000 Colour-Difference Formula*. Abgerufen von: <http://www.cie.co.at/publications/colorimetry-part-6-ciede2000-colour-difference-formula>

**cmyktastic.** (o.D.). *Farbmetrik*. Abgerufen von <http://cmyktastic.ch/lithografie/farbmetrik/index.html>

**Datacolor.** (o.D.). *SpyderCHECKR / SpyderCHECKR 24 User's Guide (German)*. Abgerufen von [http://www.datacolor.com/wp-content/uploads/2017/05/SpyderCheckr\\_24\\_UserGuide\\_DE\\_v1.pdf](http://www.datacolor.com/wp-content/uploads/2017/05/SpyderCheckr_24_UserGuide_DE_v1.pdf)

**Delta E.** (14. Januar, 2018). *[Wikipedia]*. Abgerufen 15. Mai, 2018, von [https://de.wikipedia.org/wiki/Delta\\_E](https://de.wikipedia.org/wiki/Delta_E)

**EBU.** (2017). *TECH 3320: User Requirements for Video Monitors in Television Production*. Abgerufen von <https://tech.ebu.ch/docs/tech/tech3320.pdf>

**Erofeev, M., Gitman, Y., Vatolin, D., Fedorov, A., & Wang, J.** (2015). *Perceptually Motivated Benchmark for Video Matting*. In Xie, X., Jones, M. W., & Tam, G. K. L. (Hrsg.). *Proceedings of the British Machine Vision Conference (BMVC)* (S.99.1-99.12). Durham: BMVA Press.

**Fraser, B., Murphy, C. & Bunting, F.** (2005). *Real World Color Management, Second Edition*. CA, Berkeley: Peachpit Press.

**Fu, M.** (2008). *Evaluation der Keying-Techniken für das Augmented Studio (Offline) (Bachelorarbeit)*. Bauhaus-Universität Weimar, Deutschland.

**Goi, M. (Hrsg.).** (2013). *American Cinematographer Manual (10. Aufl.)*. Hollywood: The ASC Press.



**Graphics & Media Lab, Lomonosov Moscow State University.** (o.D.). *Overview.*

Abgerufen von <http://videomattng.com>

**Hasche, E., & Ingwer, P.** (2016). *Game of Colors: Moderne Bewegtbildproduktion:*

*Theorie und Praxis für Film, Video und Fernsehen.* Berlin, Heidelberg:Springer

Vieweg.

**Hüningen, J. z.** (8. September, 2013). *Moiré-Effekt.* Abgerufen von

<http://filmlexikon.uni-kiel.de/index.php?action=lexikon&tag=det&id=8329>

**Lindbloom, B. J.** (12. Jänner, 2012-a). *How the CIE Color Calculator Works.*

Abgerufen von: <http://www.brucelindbloom.com/index.html?ColorCalcHelp.html>

**Lindbloom, B. J.** (13. Jänner, 2012-b). *CIE Color Calculator.* Abgerufen von:

<http://www.brucelindbloom.com/ColorCalculator.html>

**Lindbloom, B. J.** (13. Jänner, 2012-c). *Color Difference Calculator.* Abgerufen von:

<http://www.brucelindbloom.com/ColorDifferenceCalc.html>

**MathePrisma Universität Wuppertal.** (o.D.). *Pi.* Abgerufen von

<http://www.matheprisma.uni-wuppertal.de/Module/PI/Euklid.htm>

**Mosaic Engineering.** (2012). *Non-Blurring Solutions for Optical Anti-Aliasing.*

Abgerufen von [www.mosaicengineering.com/products/nbaa.html](http://www.mosaicengineering.com/products/nbaa.html)

**Okun, J. A., & Zwerman, S.** (Hrsg.). (2010). *The VES Handbook of Visual Effects:*

*Industry Standard VFX Practices and Procedures.* Burlington: Focal Press.

**Pantone LLC.** (o.D.). *PANTONE SkinTone™ Guide.* Abgerufen von:

<https://www.pantone.com/skintone-guide>

**Petro Vlahos.** (24. April, 2018). *[Wikipedia]*. Abgerufen 15. Mai, 2018, von [https://en.wikipedia.org/wiki/Petro\\_Vlahos](https://en.wikipedia.org/wiki/Petro_Vlahos)

**Porter, T., & Duff, T.** (1984). *Compositing Digital Images*. Computer Graphics, 18 (3), 253-259.

**Poynton, C.** (2012). *Digital Video and HD Algorithms and Interfaces*. Burlington:Morgan Kaufmann.

**Reichmann, M.** (2. März, 2011). *Understanding RAW Files Explained*. Abgerufen von: <https://luminous-landscape.com/understanding-raw-files-explained>

**Rohdatenformat.** (24. April, 2018). *[Wikipedia]*. Abgerufen 15. Mai, 2018, von <https://de.wikipedia.org/wiki/Rohdatenformat>

**Schmedes, U.** (2014). *Dynamisches Differenz-Keying in Chroma-Keying-Umgebungen (Dissertation)*. Technischen Universität Ilmenau, Deutschland

**Schmidt, U.** (2013). *Professionelle Videotechnik: Grundlagen, Filmtechnik, Fernsehtechnik, Geräte- und Studiotchnik in SD, HD, DI, 3D*. Berlin, Heidelberg:Springer Vieweg.

**Schultz, C.** (2006). *Digital Keying Methods: An Independent Study*. Abgerufen von [http://www.tzi.de/tzikeyer/keying\\_report.pdf](http://www.tzi.de/tzikeyer/keying_report.pdf)

**Sczepek, J.** (2011). *Visuelle Wahrnehmung: Eine Einführung in die Konzepte Bildentstehung, Helligkeit und Farbe, Raumtiefe, Größe, Kontrast und Schärfe*. Norderstedt:Books on Demand GmbH.

**Seymour, M.** (21. November, 2005). *Art of Keying*. fxguide LLC. Abgerufen von: [https://www.fxguide.com/featured/art\\_of\\_keying](https://www.fxguide.com/featured/art_of_keying)

**Seymour, M.** (10. Oktober, 2011). *The Art of Roto: 2011*. fxguide LLC. Abgerufen von: <https://www.fxguide.com/featured/the-art-of-roto-2011>

**Sharma, G., Wu, W., & Dalal, E. N.** (2004). *The CIEDE2000 color-difference formula: Implementation notes, supplementary test data, and mathematical observations*, Color Research and Application, 30 (1), 21-30.

**Smith, A.R., & Blinn, J.** (1996). Blue Screen Matting. In Blau, B., Dodsworth, C., Branagan, L., Ippolito, J., Musgrave, K., & Waggenspack, W. (Hrsg.), ACM SIGGRAPH 96 Visual Proceedings: The Art and Interdisciplinary Programs of SIGGRAPH '96 (S. 259-268). New Orleans: ACM.

**Sony Europe Ltd.** (2016). *Technical Summary for S-Gamut3.Cine/S-Log3 and S-Gamut3/S-Log3*. Abgerufen von [https://pro.sony/en\\_EU/support/software/1237494271390](https://pro.sony/en_EU/support/software/1237494271390)

**Sony Professional Solutions Europe.** (o.D.). *Technical Summary for S-Gamut3.Cine/S-Log3 and S-Gamut3/S-Log3*. Abgerufen von <https://pro.sony/s3/cms-static-content/uploadfile/06/1237494271406.pdf>

**Sony Professional Solutions Europe.** (5. Juni, 2015-a). *Operation Manuals: PXW-FS7 (DE)*. Abgerufen von [https://pro.sony/de\\_CH/support/manuals/1237493973249](https://pro.sony/de_CH/support/manuals/1237493973249)

**Sony Professional Solutions Europe.** (20. Jänner, 2015-b). *Operation Manuals: XDCA-FS7 (EN, FR, DE)*. Abgerufen von [https://pro.sony/de\\_AT/support/manuals/1237494189139](https://pro.sony/de_AT/support/manuals/1237494189139)

**The Foundry Visionmongers Ltd.** (o.D.). *Calling Channels*. Abgerufen von [https://learn.foundry.com/nuke/content/comp\\_environment/channels/calling\\_channels.html](https://learn.foundry.com/nuke/content/comp_environment/channels/calling_channels.html)

**The Foundry Visionmongers Ltd.** (2008). *Keylight User Guide*. Abgerufen von [http://thefoundry.s3.amazonaws.com/downloads/Keylight2.1v3\\_Nuke.pdf](http://thefoundry.s3.amazonaws.com/downloads/Keylight2.1v3_Nuke.pdf)

**Trent, T.** (2018). *What do the colors in the False Color scope represent? [Web Log Eintrag]*. Abgerufen von <https://support.atomos.com/hc/en-us/articles/226632307-What-do-the-colors-in-the-False-Color-scope-represent->

**Ultimatte Corporation.** (o.D.) *Frequently Asked Questions (FAQ) about the AdvantEdge and RT plugins*. Abgerufen von <http://www.ultimatte-software.com/faq.htm>

**Upton, S.** (12. März, 2015). *Delta E: The Color Difference*. Abgerufen 15. Mai, 2018, von: [http://www.colorwiki.com/wiki/Delta\\_E:\\_The\\_Color\\_Difference](http://www.colorwiki.com/wiki/Delta_E:_The_Color_Difference)

**Wang, J., & Cohen, M. F.** (2007). *Image and Video Matting: A Survey*. *Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision*, 3 (2), 97-180.

**Wright, S.** (2010). *Digital Compositing for Film and Video (3. Aufl.)*. Burlington: Focal Press.

**Wright, S.** (2011). *Screaming at the Greenscreen: How to shoot a good keyable greenscreen*. Abgerufen von [http://vfxio.com/PDFs/Screaming\\_at\\_the\\_Greenscreen.pdf](http://vfxio.com/PDFs/Screaming_at_the_Greenscreen.pdf)

**Wright, S.** (10. März, 2016). *VFX-Keying: Master Course [Video Datei]*. Geladen von <https://www.lynda.com/Nuke-tutorials/VFX-Keying-Master-Course/450278-2.html>

## 6.2 Abbildungsverzeichnis

|                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abb. 1: Trimap-Beispiel.....                                                  | 9  |
| Abb. 2: Keyingworkflow.....                                                   | 10 |
| Abb. 3: Rotoskopie.....                                                       | 12 |
| Abb. 4: Innere und äußere Schwellenwerte, Softness und Toleranz-Werte.....    | 14 |
| Abb. 5: Chrominance-Keying.....                                               | 15 |
| Abb. 6: 3D Keying / Distance Map Keying mit Primatte-Keyer.....               | 18 |
| Abb. 7: Spill an der Decke eines Greenscreen-Studios.....                     | 20 |
| Abb. 8: Spill entlang von Objektkanten.....                                   | 20 |
| Abb. 9: Despilling durch Farbkanal-Limitierungen.....                         | 22 |
| Abb. 10: Liste gebräuchlicher Überblendungsmodi.....                          | 24 |
| Abb. 11: Vordergrund A, Hintergrund B, Maske für Vordergrund A.....           | 24 |
| Abb. 12: Vormultiplizierter Vordergrund A.....                                | 25 |
| Abb. 13: Hintergrund B, Invertierte Maske M, B multipliziert mit Maske.....   | 26 |
| Abb. 14: Resultat O der Keymix-Operation.....                                 | 26 |
| Abb. 15: Farbkanal-Pegel-Bsp am Übergang zwischen Person und Greenscreen..    | 29 |
| Abb. 16: Beispiel einer raw matte.....                                        | 29 |
| Abb. 17: Matte Edge Penetration.....                                          | 30 |
| Abb. 18: Matte Edge Penetration am Beispiel eines neutral grauen Kreises..... | 31 |
| Abb. 19: Phasen der Matteerstellung im Color Difference Verfahren.....        | 32 |
| Abb. 20: Ultimatte 12 Hardware.....                                           | 35 |
| Abb. 21: Ultimatte Smart Remote 4.....                                        | 36 |
| Abb. 22: Screenshot Ultimatte-Node in NukeX 10.0v1.....                       | 37 |
| Abb. 23: Screenshot Keylight Plug-in in After Effects CC 2018.....            | 38 |
| Abb. 24: Behind the Scenes am Set des Films „Kubo and the Two Strings“.....   | 43 |
| Abb. 25: Formel zur Berechnung von Delta-E in der Version CIEDE2000.....      | 47 |
| Abb. 26: Color Difference Calculator.....                                     | 48 |
| Abb. 27: CIE Color Calculator.....                                            | 48 |

|                                                                                  |     |
|----------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Abb. 28: Screenshot Nuke-Skript hinter Experiment 1 (Idealisiertes Setting)..... | 52  |
| Abb. 29: Experiment 1: Übersicht der Testfarben vor Grau.....                    | 53  |
| Abb. 30: Experiment 1: Messstellen der Hautfarben vor Grün und Blau.....         | 54  |
| Abb. 31: Experiment 1: Messstellen der Haarfarben vor Grün und Blau.....         | 55  |
| Abb. 32: Experiment 1: Messstellen der Farben RGB und CMY vor Grün und Blau..... | 56  |
| Abb. 33: Prototypischer Ablauf Experiment 2: Schritt 1.....                      | 60  |
| Abb. 34: Prototypischer Ablauf Experiment 2: Schritt 2.....                      | 60  |
| Abb. 35: Prototypischer Ablauf Experiment 2: Schritt 3.....                      | 61  |
| Abb. 36: Prototypischer Ablauf Experiment 2: Schritt 4.....                      | 61  |
| Abb. 37: Farbfächer „RAL K5“ der Firma RAL.....                                  | 63  |
| Abb. 38: Verlaufsfilter.....                                                     | 64  |
| Abb. 39: PANTONE SkinTone Guide.....                                             | 65  |
| Abb. 40: Haarfarbkarten.....                                                     | 66  |
| Abb. 41: Heimkino als Set für die Dreharbeiten zu Experiment 2.....              | 74  |
| Abb. 42: Grundriss-Skizze des Sets für die Dreharbeiten zu Experiment 2.....     | 74  |
| Abb. 43: Farbenauwahl aus Farbfächer für Experiment 2.....                       | 77  |
| Abb. 44: Haarprobenauswahl zur Verwendung im Experiment 2.....                   | 78  |
| Abb. 45: Übersicht der verwendeten, fotografischen Hintergrundmotive.....        | 79  |
| Abb. 46: Moiré-Effekt.....                                                       | 82  |
| Abb. 47: Screenshot Nuke-Scripts zur Evaluierung der Testaufnahmen.....          | 86  |
| Abb. 48: Screenshot Nuke-Scripts: Analyse Sample-Bereich #9.....                 | 86  |
| Abb. 49: Probeaufnahme mit 2.000 EI vor blauem Hintergrund.....                  | 93  |
| Abb. 50: Probeaufnahme mit 2.000 EI vor grünem Hintergrund.....                  | 94  |
| Abb. 51: Rec.709-Aufnahmen: Präpariertes Farbchart vor TV-Bildschirm.....        | 97  |
| Abb. 52: Gleichmäßige Ausleuchtung der Vordergrundfläche.....                    | 98  |
| Abb. 53: Übereinstimmung Waveform FS7 und Shogun vor Grün.....                   | 99  |
| Abb. 54: Weißwert-Optimierung des TV-Geräts.....                                 | 100 |
| Abb. 55: Korrekte 90 IRE-Belichtung durch Zebra2-Anzeige.....                    | 101 |
| Abb. 56: False Color-Ansicht der Szene am Shogun Recorder.....                   | 102 |
| Abb. 57: Legende der False Color-Ansicht des Shogun Recorders.....               | 102 |
| Abb. 58: Korrekte Belichtung der verschiedenen Backing-Hintergründe.....         | 104 |

|                                                                              |     |
|------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Abb. 59: Abweichungen RGB-Parade zwischen Rec.709- und RAW vor Blau.....     | 107 |
| Abb. 60: Eingebettetes Rec. 709-Profil und Gamma-Konvertierung durch AE..... | 108 |
| Abb. 61: Experiment 2: Auswahl der Hintergrundmotive.....                    | 110 |
| Abb. 62: Experiment 2: Übersicht der Messbereiche vor Grau.....              | 111 |
| Abb. 63: Experiment 2: Messstellen der Hautfarben vor Grau.....              | 111 |
| Abb. 64: Experiment 2: Messstellen der Haarfarben vor Grau.....              | 113 |
| Abb. 65: Experiment 2: Messstellen weiterer Farben vor Grau.....             | 115 |

## 6.3 Tabellenverzeichnis

|                                                                                |     |
|--------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tab. 1: Interpretation von Farbabständen $\Delta E$ .....                      | 46  |
| Tab. 2: Exp.1-Testergebnisse: Hautfarben vor Backing-Farben Grün und Blau..... | 54  |
| Tab. 3: Exp.1-Testergebnisse: Haarfarben vor Backing-Farben Grün und Blau..... | 55  |
| Tab. 4: Exp.1-Testergebnisse: RGBCMY vor Backing-Farben Grün und Blau.....     | 57  |
| Tab. 5: Belichtungsempfehlungswerte von Sony für S-Log-Aufnahmen.....          | 71  |
| Tab. 6: Exp.2-Testergebnisse: Hautfarben.....                                  | 112 |
| Tab. 7: Exp.2-Testergebnisse: Haarfarben.....                                  | 114 |
| Tab. 8: Exp.2-Testergebnisse: Weitere Farben.....                              | 116 |