

# **Konzeption eines Workflows zur Farbkalibrierung von Mehrfachprojektionen am Beispiel des Two70° Eventraums auf dem Kreuzfahrtschiff Ovation of the Seas**

## **Bachelor-Thesis**

zur Erlangung des akademischen Grades B.Sc.

**Tobias Konzok**

2130667



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
Fakultät Design, Medien und Information  
Department Medientechnik

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Roland Greule

Zweitprüfer: B.Sc. Sebastian Kirsch

Hamburg, 23.06.2016

# Eigenständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Bachelor-Thesis mit dem Titel: „Konzeption eines Workflows zur Farbkalibrierung von Mehrfachprojektionen am Beispiel des Two70° Eventraums auf dem Kreuzfahrtschiff Ovation of the Seas“ selbständig und nur mit den angegebenen Hilfsmitteln verfasst habe. Alle Passagen, die ich wörtlich aus der Literatur oder aus anderen Quellen wie z. B. Internetseiten übernommen habe, habe ich deutlich als Zitat mit Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

(Unterschrift)

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>2</b>
1.1	Motivation.....	2
1.2	Zielsetzung.....	3
1.3	Aufbau der Arbeit .....	3
<b>2</b>	<b>Ausgangssituation</b> .....	<b>4</b>
2.1	Ovation of the Seas.....	4
2.2	Two70°.....	4
2.3	Projektoren.....	5
2.4	DLP-Technologie .....	7
2.5	Optik .....	7
2.6	Lampen.....	9
2.7	Schwierigkeiten/Herausforderungen.....	10
<b>3</b>	<b>Grundlagen der Farbmatrik</b> .....	<b>11</b>
3.1	Farbsysteme .....	11
3.1.1	RGB-Farbraum.....	11
3.1.2	CIE-Farbraum .....	12
3.2	Farbdifferenzen .....	14
3.3	Farbtemperatur .....	17
3.4	Leuchtdichte.....	17
<b>4</b>	<b>Vorbereitungen</b> .....	<b>18</b>
4.1	Methodische Vorgehensweise.....	18
4.2	Verwendete Geräte und Software .....	18
4.2.1	Specbos 1211 .....	18
4.2.2	JETI LiVal.....	19
4.2.3	Geometry Manager Pro.....	20
4.3	Durchführung .....	23
4.3.1	Picture-Mode.....	23
4.3.2	Messposition .....	26
4.3.3	Messpunkt.....	28
4.3.4	9-Punkte-Messung .....	29
4.3.5	Brightness Control Gain .....	30

4.3.6	Sichtbare Farbdifferenzen .....	32
<b>5</b>	<b>Farbmessungen.....</b>	<b>36</b>
5.1	Aufnahme der Messwerte.....	36
5.2	Messergebnisse Leuchtdichte .....	39
5.3	Messergebnisse Farbwerte .....	40
5.4	Wahl des Korrekturverfahrens.....	43
<b>6</b>	<b>Farbkalibrierung.....</b>	<b>44</b>
6.1	Erste Korrektur .....	44
6.1.1	Vorüberlegungen/Durchführung .....	44
6.1.2	Ergebnis.....	47
6.2	Zweite Korrektur .....	49
6.2.1	Vorüberlegungen/Durchführung .....	49
6.2.2	Ergebnis.....	49
6.3	Helligkeitsanpassung und finale Farbkorrektur .....	52
6.3.1	Vorüberlegungen/Durchführung .....	52
6.3.2	Ergebnis.....	53
6.4	Farbdifferenzmessung.....	57
<b>7</b>	<b>Konzeption eines zukünftigen Workflows .....</b>	<b>61</b>
<b>8</b>	<b>Fazit.....</b>	<b>63</b>
<b>9</b>	<b>Ausblick .....</b>	<b>64</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>A</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>D</b>
	<b>Quellenverzeichnis.....</b>	<b>E</b>

## **Abstract**

This paper deals with the color calibration of the multi-projection in the Two70° event room on Royal Caribbean's cruise ship Ovation of the Seas. It explains physical basics of colorimetry and technical basics of projectors to lead to several kinds of measurements made for color calibration. It concludes in a concept of a workflow for color calibration in general, without attaching great importance to international standards. Instead it aims to match all projectors to the worst and to make the overlapping areas invisible.

## **Zusammenfassung**

Diese Ausarbeitung befasst sich mit der Farbkalibrierung der Mehrfachprojektion im Eventraum Two70° auf dem Kreuzfahrtschiff Ovation of the Seas mit Hilfe eines Spektroradiometers. Es werden die dafür nötigen physikalischen Grundlagen der Farbmeterik und der Licht- und Messtechnik, wie auch technische Grundlagen der Projektionstechnik erläutert, verschiedene Schritte zur Farbkalibrierung nacheinander beschrieben und die Ergebnisse anschaulich dargestellt. Abgeleitet aus dem vergleichsweise komplexen Versuch wird dann ein Workflow beschrieben, der für die Kalibrierung von Mehrfachprojektionen allgemein angewendet werden kann. Dabei soll das Ergebnis keiner bestimmten Norm entsprechen. Ziel ist lediglich, die verwendeten Projektoren untereinander an den vermeintlich Schwächsten anzugleichen, ein homogenes Bild zu erzeugen und ein für den Kunden zufriedenstellendes Ergebnis zu erzielen.

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Die Ovation of the Seas der US-amerikanischen Reederei Royal Caribbean International (RCI) bietet, wie ihre baugleichen Schwesterschiffe Quantum of the Seas und Anthem of the Seas, mit dem Two70° einen besonders innovativ und flexibel gestalteten Raum im Heck des Schiffes. Während die sechs Meter hohen Fenster tagsüber einen 270°-Panoramablick über das Meer bieten, können in der Nacht die speziell dafür entwickelten „Vistarama“-Sonnenblenden heruntergefahren werden und die Rückwand wird auf einer Breite von 36 Metern die Kulisse für beinahe jeden erdenklichen Ort (Abbildung 1.1). Für die Gesamtauflösung von 12.480 x 2.280 Pixeln sind insgesamt 18 Projektoren nötig. Die starke Krümmung und Neigung der Projektionsfläche sowie die unebene Oberfläche erfordern ein hohes Maß an Genauigkeit in allen Bereichen, um aus den Einzelbildern der 18 Projektoren ein homogenes Gesamtbild zu erzeugen. Dazu gehören neben dem positionsgetreuen Übergang zwischen den Einzelbildern auch möglichst geringe Abweichungen bezüglich der Intensitäten und Farben, da sich die Entfernungen und die Winkel zur Projektionsfläche, wie auch die Eigenschaften der verbauten Lampen, von Projektor zu Projektor unterscheiden.

Verantwortlich für die Integration der Entertainmenttechnik auf der Ovation of the Seas war, wie schon zuvor auf den Schwesterschiffen, das Hamburger Systemhaus Amptown System Company GmbH im Frühjahr 2016. Während das Ausrichten der Projektoren, das Warping zur geometrischen Korrektur und der Softedge-Prozess, der nebeneinanderliegende Projektionsflächen überblendet, bei Amptown mittlerweile einer gewissen Routine folgten, gab es keine Dokumentationen über die Farbkalibrierung von Mehrfachprojektionen vergangener Projekte.



Abbildung 1.1: 18-fach Projektion im Two70°

## **1.2 Zielsetzung**

Eine Farbkalibrierung kann auf unterschiedlichste Arten und mit unterschiedlichen Zielsetzungen durchgeführt werden. Während andere Umgebungen wie Kinos oder Messestände ein hohes Maß an korrekter Farbwiedergabe und normgetreuer Einstellung erfordern, liegt der Fokus bei einem Eventraum wie diesem eher auf der gelungenen Illusion für den Zuschauer. Dieser verlangt nicht nach der Einhaltung von Normen. Wichtig ist daher eher, diese durch aufwändig produzierten Videocontent geschaffene Illusion nicht durch sichtbare Übergänge zwischen einzelnen Projektionen zu zerstören.

Mit messtechnischer Unterstützung sollten farbliche Differenzen identifiziert und minimiert werden, indem der Farbraum der Projektoren gezielt an den vermeintlich Schwächsten angepasst wird. Ziel dieser Arbeit war letztendlich, im Hinblick auf kommende Projekte, einen reproduzierbaren Workflow zur messtechnischen Farbkalibrierung von Mehrfachprojektionen zu entwickeln und zu dokumentieren.

## **1.3 Aufbau der Arbeit**

Zu Beginn der Ausarbeitung wird die Ausgangssituation skizziert, um dem Leser ein Gefühl für die Umgebung zu geben. Dabei wird sowohl auf das Two70° an sich, als auch auf die dort verbaute Technik und die zu erwartenden Schwierigkeiten eingegangen. Im Anschluss werden einige farbmétrische und lichttechnische Grundlagen erläutert, die im Verlauf der Kalibrierung von Bedeutung waren. Das folgende Kapitel befasst sich mit den Vorbereitungen. Es beschreibt die verwendeten Geräte und welche Fragen vor dem eigentlichen Prozess geklärt werden mussten. Daraufhin folgen die Beschreibung der Farbmessungen und die Diskussion der Ergebnisse, welche auf die Wahl des Korrekturverfahrens hinleiten. Das anschließende Kapitel stellt auf anschauliche Weise die einzelnen Schritte der Farbkalibrierung dar, vergleicht das Ergebnis mit den Werten der Ausgangsmessungen und mündet in die Konzeption eines zukünftigen Workflows, dem Ziel dieser Ausarbeitung.

## **2 Ausgangssituation**

### **2.1 Ovation of the Seas**

Das Kreuzfahrtschiff Ovation of the Seas gehört mit einer Länge von 348 m bei einer Breite von 41 m und einer maximalen Kapazität von 4180 Passagieren als Teil der Quantum-Klasse zu den größten Kreuzfahrtschiffen der Welt.<sup>1</sup> Es wurde im April 2016 von der Meyer Werft fertiggestellt und an die Reederei Royal Caribbean International übergeben. Es bietet Unterhaltungsstätten wie ein Theater, die „Music Hall“ sowie das „SeaPlex“ für Aktivitäten wie Auto-scooter oder Ballspiele und soll überwiegend im asiatisch-australischen Raum eingesetzt werden. Als aufwändig und innovativ gestalteter Multifunktionsraum im Heck des Schiffes gehört auch das Two70° zu den Attraktionen des Schiffes.

### **2.2 Two70°**

Der Two70° Eventraum ist gleichzeitig ein Ort der Unterhaltung, ein Ort zum Zusammenkommen und auch zum Zurückziehen. Während der Raum tagsüber allen Gästen offen steht und mit seinem 270° Panoramablick über das Meer oder den Hafen lockt, verwandelt sich der Raum am Abend wahlweise in ein Theater, einen Konzertsaal oder eine Kabarettbühne. Diverse technische Highlights wie die durch Roboterarme beweglichen LED-Displays oder die 18-fach Projektion auf die gesamte Rückwand ermöglichen beinahe grenzenlose Kreativität was die Showgestaltung angeht. Ergänzt werden diese durch in den Boden verfahrbare Bühnenpodeste, die ein schnelles Auf- und Umbauen ermöglichen.

Am Tage stehen selbst im Bühnenbereich Sofas, Sessel und Tische, die zum Entspannen genutzt werden können (Abbildung 2.1). Das angrenzende Café versorgt die Gäste mit Snacks und lädt morgens zum Frühstück ein. Am Abend öffnet die Bar, die Vistarama-Sonnenblenden werden heruntergefahren und auf die Rückwand werden unterschiedliche „Standalone“ Contents wie Wasserfälle oder Sonnenuntergänge projiziert. Später laufen dann ein oder zwei 60- bis 90-minütige Shows aus Tanz und Gesang, unterstützt durch die LED-Displays und die Projektion (Abbildung 2.2). Manchmal spielt auch nur eine virtuelle Band, die auf die Vistarama-Rückwand projiziert wird und genau den Reiz ausmacht, den das Two70° bieten soll.

---

<sup>1</sup> Vgl. Royal Caribbean – Ovation of the Seas





Abbildung 2.1: Two70° am Tag



Abbildung 2.2: „Spectra's Cabaret“ im Two70°

### 2.3 Projektoren

Im Two70° wurden 3-Chip DLP Projektoren des Modells PT-DZ21K2 (Abbildung 2.3) von Panasonic verbaut, welche mit einer Auflösung von 1920 x 1200 im Bildseitenverhältnis von 16:10 projizieren. Panasonic gibt eine maximale Helligkeit von 20.000 ANSI-Lumen bei einem Kontrastverhältnis von 10.000:1 an. Damit gehört das Modell zu den höherklassigen Projektoren,

welche für eine Projektionsfläche von ca. 10 m<sup>2</sup> ab einem Lichtstrom von etwa 5.000 ANSI-Lumen und einem Kontrastverhältnis von 10.000:1 beginnen.<sup>2 3</sup>

Die 18 Projektoren die die Vistarama-Rückwand bespielen, unterteilen sich in jeweils neun Projektoren für die obere bzw. untere Hälfte der Gesamtprojektion und erzeugen eine Gesamtauflösung von 12.480 x 2.280 Pixeln. Zur genaueren Identifizierung werden die Projektoren in dieser Arbeit von 1 bis 18 durchnummeriert (Abbildung 2.4). Der Projektor rechts unten wird dabei als „Projektor 1“ bezeichnet, der Projektor links oben als „Projektor 18“.



Abbildung 2.3: Panasonic PT-DZ21K2 Projektor



Abbildung 2.4: Überblick über die Lage aller Projektionen

<sup>2</sup> Vgl. HD Beamer Guide – Beamer Kontrast

<sup>3</sup> Vgl. HD Beamer Guide – Beamer Helligkeit

## 2.4 DLP-Technologie

Der im Two70° verbaute Projektor verwendet die 3 Chip DLP-Technologie (Abbildung 2.5) zur Erzeugung des Bildes. Digital Light Processing, kurz DLP, ist neben der LCD-Technologie das am häufigsten verwendete Verfahren zur Bilderzeugung in Projektoren. Dabei gibt es für jeden Bildpunkt einen wenige  $\mu\text{m}$  kleinen Spiegel, der durch elektromagnetische Felder bewegt werden kann und den Lichtstrahl entweder durch die Optik zur Leinwand oder auf einen seitlich platzierten Absorber lenkt.<sup>4</sup> Die Dauer der Projektionsstellung des Spiegels beeinflusst dabei den Helligkeitseindruck. Bei der hier verwendeten 3 Chip DLP-Technologie wird der Lichtstrahl durch einen Strahlteilerprisma in die drei Primärfarben Rot, Grün und Blau zerlegt und dann auf den jeweiligen DMD-Chip geleitet. Die Verwendung von drei Chips steigert dabei die Bildqualität.<sup>5</sup>

Im Vergleich zu LCD-Projektoren bieten DLP-Projektoren einen deutlich größeren Kontrastumfang, da das Licht bei schwarzem Bild beinahe gänzlich abgelenkt werden kann, während bei einer LCD-Projektion immer eine gewisse Resthelligkeit bleibt.<sup>6</sup>

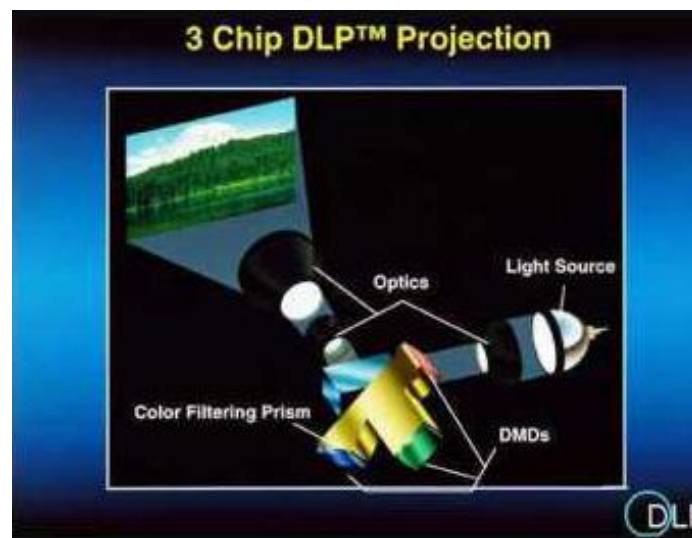


Abbildung 2.5: 3 Chip DLP-Technologie

## 2.5 Optik

Die Projektoren sind mit dem ET-D75LE6E Zoom-Objektiv ausgestattet, welches mit einem Projektionsfaktor von 0,9-1,1:1 ein Bild im Bildseitenverhältnis von 16:10 erzeugt. Der vergleichsweise niedrige Projektionsfaktor ist nötig, da die Projektoren unter der Decke relativ nah zur Projektionsfläche hängen und vor allem die Geräte, die die obere Bildhälfte bespielen, in einem weiten Winkel projizieren müssen (Abbildung 2.6).

<sup>4</sup> Vgl. Smyrek/Kruse/Hascher (2010), S. 335 ff.

<sup>5</sup> Vgl. Beamer Discount – Beamer DLP

<sup>6</sup> Vgl. Heimkinopartner Bremen - DLP

In Kombination mit diesem Objektiv bietet der Projektor zudem eine Lens-Shift-Funktion (Abbildung 2.8), eine optische Achsenverschiebung ohne die Auflösung zu beeinflussen.<sup>7</sup> Während sich die Achse in der Horizontalen um  $\pm 15\%$  verschieben lässt, ist in der Vertikalen ein Lens-Shift von  $\pm 44\%$  möglich.<sup>8</sup> Letztere ist besonders hilfreich, da die Projektoren aufgrund des Platzmangels kaum Spielraum zum manuellen Ausrichten haben (Abbildung 2.7). Gerade die Projektoren für die untere Bildhälfte konnten vertikal nicht ausreichend geneigt werden, um mit dem unteren Bildrand den Boden zu erreichen. Bei der Installation stellte sich heraus, dass bei einigen Projektoren in der Vertikalen der maximale Lens-Shift von  $-44\%$  nötig war, um die Projektionsfläche komplett abzudecken.



Abbildung 2.6: Position der Projektoren im Two70°

<sup>7</sup> Vgl. Greule (2015), S. 172

<sup>8</sup> Vgl. Panasonic PT-DZ21KE Manual, S. 56



Abbildung 2.7: Spielraum der Projektoren unter der Decke

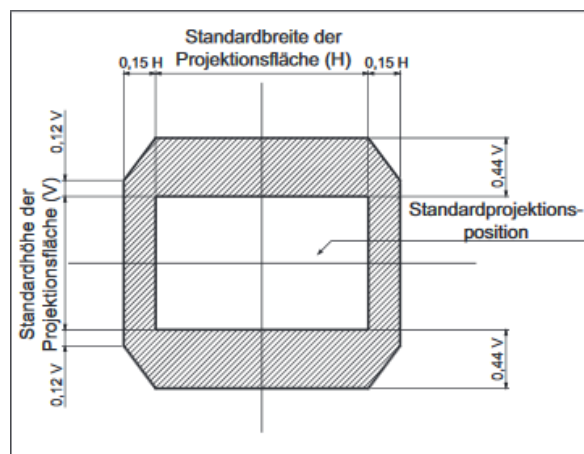


Abbildung 2.8: Lens Shift Korrekturmöglichkeiten

## 2.6 Lampen

Im PT-DZ21K2-Projektor sind vier 465W UHM-Quecksilberdampf-Hochdrucklampen des Modells ET-LAD520 von Panasonic verbaut. UHM ist dabei die von Panasonic verwendete Bezeichnung für „Ultra High Pressure“ (UHP) Lampen, die in Projektoren vieler Hersteller unter unterschiedlichen Bezeichnungen verbaut sind.<sup>9</sup> UHP-Lampen sind äußerst effizient und bieten ein relativ ausgeglichenes Farbspektrum. Die durchschnittliche Lebensdauer wird mit

<sup>9</sup> Vgl. ITWissen – UHP-Lampe

2.000 Stunden angegeben. Der eingebaute Lampen-Relais-Modus bietet die Möglichkeit, nur ein bis drei der vier Lampen gleichzeitig zu betreiben und durch abwechselndes Einsetzen die Lebensdauer der Lampen und die Ausfallsicherheit zu erhöhen. Im Two70° werden drei Lampen gleichzeitig benutzt, was einem maximalen Lichtstrom von 15.000 ANSI-Lumen entspricht.<sup>10</sup> Es werden dabei automatisch die drei Lampen mit der geringsten Laufzeit verwendet.

## **2.7 Schwierigkeiten/Herausforderungen**

Aufgrund der sehr speziellen Architektur des Raumes, zeigte sich die Verteilung der Intensitäten als äußerst ungleich. Jeder einzelne Projektor hatte einen unterschiedlichen Einfallswinkel und eine unterschiedliche Entfernung zur Projektionsfläche. Durch den insgesamt sehr steilen Winkel entstand bei allen Projektoren, speziell bei denen der unteren Reihe, ein sichtbarer Helligkeitsverlauf. Der obere Rand war heller als die Unterkante. Zudem gab es einige Projektoren, die aufgrund des steileren horizontalen Einfallswinkels einen sichtbaren Verlauf von der äußeren zur inneren Kante hatten. Manche andere Projektoren ließen sich aufgrund baulicher Maßnahmen lediglich grob in die richtige Richtung ausrichten und mussten bis zum Anschlag über die Lens-Shift-Funktion in die richtige Position gebracht werden. Das projizieren durch den Rand der Optik erzeugte allerdings teilweise Farbverläufe sowie Helligkeitsverluste an den Ecken. Des Weiteren waren deutliche Farbdifferenzen zwischen den einzelnen Projektionen zu erkennen. Um eine homogene Fläche zu erzeugen, musste die Helligkeit aller Projektoren auf den niedrigsten Wert angeglichen und ein Farbraum, der von allen 18 Projektoren erreicht werden konnte, definiert werden.

---

<sup>10</sup> Vgl. Panasonic – Multi-Lamp-Technologie

### 3 Grundlagen der Farbmeterik

Farbe lässt sich am ehesten als physiologisches Phänomen bezeichnen, da Farbe an sich keine physikalisch messbare Größe ist. Elektromagnetische Wellen im sichtbaren Wellenlängenbereich zwischen 380 – 780 nm lösen lediglich Farbreize im Auge aus, die durch die auf der Netzhaut befindlichen Zapfen als Farbe interpretiert werden.<sup>11</sup> Dabei sorgen drei unterschiedliche Arten von Zapfen mit unterschiedlichen Empfindlichkeiten (kurzwelliges Licht für Blau, mittelwelliges Licht für Grün, langwelliges Licht für Rot) für die Farbwahrnehmung.

#### 3.1 Farbsysteme

Um einen Überblick über die wahrnehmbaren Farben zu gewinnen und die subjektiv empfundenen Farben in einem mathematischen Kontext einordnen zu können, existieren verschiedene Farbmodelle. Für diese Arbeit relevant sind zum einen der RGB-Farbraum und zum anderen der CIE-Farbraum.

##### 3.1.1 RGB-Farbraum

Auf Basis der additiven Farbmischung der Primärfarben Rot, Grün und Blau lässt sich der RGB-Farbraum in der Form eines dreidimensionalen Würfels (Abbildung 3.1) darstellen. Addiert man Rot und Grün, entsteht Gelb. Mischt man noch Blau dazu, entsteht Weiß. Auf dieser Grundlage funktioniert auch die Farbmischung in Videoprojektoren (vgl. Kapitel 2.4). Dabei liegen alle darstellbaren Farben innerhalb des Würfels. Dieses Farbmodell ist am ehesten an die Physiologie des menschlichen Auges angelehnt.

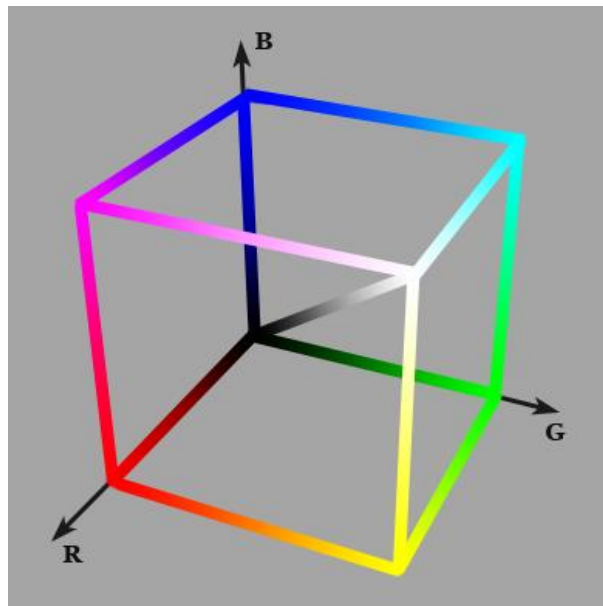


Abbildung 3.1: RGB-Würfel

---

<sup>11</sup> Vgl. ScanDig - Farbmodelle

### 3.1.2 CIE-Farbraum

Untersuchungen Anfang des 20. Jahrhunderts ergaben, dass eine RGB-Mischung aus drei Primärfarben nicht alle in der Natur vorkommenden Farben repräsentieren kann.<sup>12</sup> Aufgrund dessen entwickelte die CIE (Commission Internationale de l'éclairage) 1931 den nach DIN 5033<sup>13</sup> genormten CIE-Farbraum.<sup>14</sup> Aus den RGB-Werten werden durch Transformation die Normvalenzen XYZ gewonnen, die gemeinsam beschreiben, welche Farbempfindung im Auge ausgelöst wird. Für XYZ legte die CIE 1931 die Wellenlängen  $X = 700 \text{ nm}$  (Rot),  $Y = 546,1 \text{ nm}$  (Grün) und  $Z = 435,8 \text{ nm}$  (Blauviolett) fest.<sup>15</sup> Die Normvalenzen bieten die Grundlage, um einen Punkt im Farbraum als Farbkoordinate mathematisch zu definieren. Dabei liegen X, Y und Z alle außerhalb der darstellbaren Farben und garantieren so, dass alle Spektralfarben innerhalb des durch XYZ aufgespannten Dreiecks liegen und über positive Farbkoordinaten beschrieben werden können. Die Umrechnungsmatrize lautet:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,490 & 0,310 & 0,200 \\ 0,177 & 0,812 & 0,011 \\ 0,000 & 0,010 & 0,990 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

#### 3.1.2.1 CIE-xy-Diagramm

Zur vereinfachten Darstellung der Farbkoordinaten werden die Normvalenzen zu x, y und z normiert, sodass stets  $x+y+z=1$  gilt und auf das redundante z verzichtet werden kann. Daraus folgt eine zweidimensionale Darstellung der Farbkoordinaten x und y, CIE-xy-Diagramm genannt (Abbildung 3.2). Hierbei gibt die Darstellung keine Aussage über die Helligkeit der jeweiligen Farbe. Durch die Kombination von x- und y-Werten entstehen Farbkoordinaten, die wiederum den Farbton beschreiben.

---

<sup>12</sup> Vgl. Greule (2015), S. 77

<sup>13</sup> Vgl. DIN 5033-1

<sup>14</sup> Vgl. Smyrek/Kruse/Hascher (2010), S. 186

<sup>15</sup> Vgl. Greule (2015), S. 78



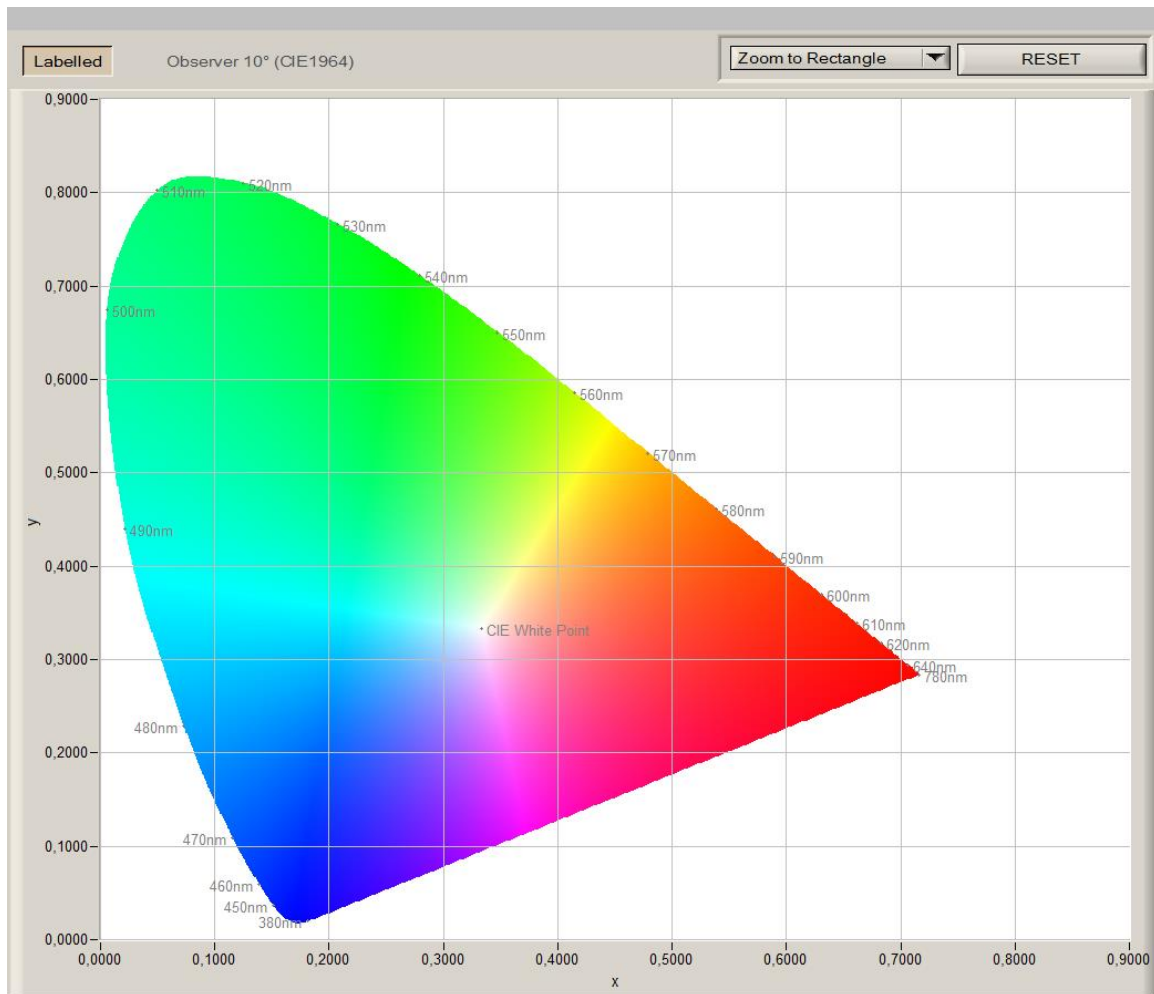


Abbildung 3.2: CIE-xy-Diagramm

### 3.1.2.2 CIE-u'v'-Diagramm

Zur besseren Darstellung empfindungsgemäßer Farbunterschiede veröffentlichte die CIE 1960 die UCS-Farbtafel (Abbildung 3.3). MacAdam hatte bereits 1940 nachgewiesen, dass die CIE-Farbtafel die Abstände nicht empfindungsgemäß darstellt.<sup>16</sup> Durch Umrechnen der xy-Werte in u'v'-Werte schaffte die CIE so eine Darstellungsform, die besser auf die Psychologie des Farbensehens zugeschnitten ist. Wenngleich auch beim u'v'-Diagramm die Abstände nicht eins zu eins den wahrgenommenen Farbunterschieden entsprechen, veranschaulicht es diese dennoch besser als das xy-Diagramm.

$$u' = \frac{4x}{-2x + 12y + 3} \quad (3.2)$$

$$v' = \frac{9y}{-2x + 12y + 3} \quad (3.3)$$

<sup>16</sup> Vgl. Greule (2015), S. 80

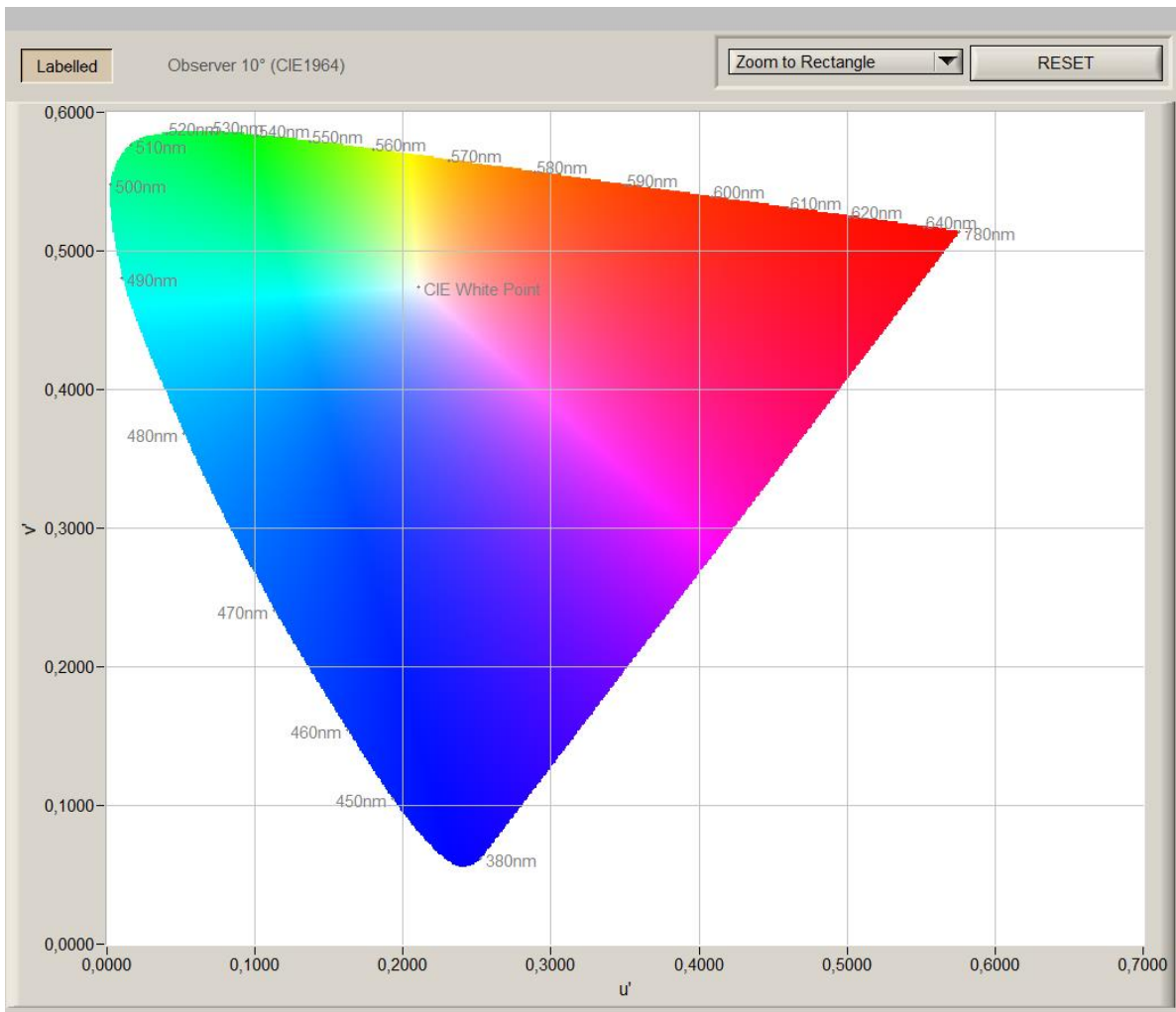


Abbildung 3.3: CIE-u'v'-Diagramm

### 3.2 Farbdifferenzen

Die Angabe von Farbdifferenzen als  $\Delta E$  mit Hilfe des gleichabständigen Lab-Systems kann nur für Körperfarben und nicht für Selbststrahler, z.B. Projektoren, verwendet werden. Stattdessen werden die Farbabstände durch den Euklidischen Abstand  $\Delta c$  der  $u'$  und  $v'$  Koordinaten angegeben (Formel 3.4).

Aufgrund der nicht gegebenen Gleichabständigkeit der CIE-Normfarbtafel entwickelte David L. MacAdam mit den MacAdam-Ellipsen (Abbildung 3.4) eine Darstellungsform der je nach Farbe unterschiedlichen Schwellen sichtbarer Farbunterschiede und bewies damit die nicht vorhandene Gleichabständigkeit dieser Darstellungsform. Eine MacAdam-Ellipse ist dabei so definiert, dass in ihrem Umfang die Farbunterschiede als gleichabständig wahrgenommen werden.<sup>17</sup> Je größer die Ellipse, desto größer ist die Toleranz von sichtbaren Farbunterschieden in der entsprechenden Farbe. Unter Berücksichtigung der „Just Noticeable Colour Diffe-

<sup>17</sup> Vgl. Wikipedia – MacAdam-Ellipse

rence“ (JND), die als die Farbdifferenz definiert ist bei der 50% der Betrachter eine Farbdifferenz erkennen würden, gilt ein  $\Delta c$  von 0,001 als Schwellenwert einer sichtbaren Farbdifferenz. Dies entspricht dem 2-fachen Radius der MacAdam-Ellipsen.

Eine Gleichabständigkeit der Farbdifferenzen wäre aber nur gegeben, wenn die MacAdam-Ellipsen über den gesamten Farbraum zu Kreisen gleicher Größe werden würden. Die Empfindung von Farbunterschieden verteilt sich allerdings auch im  $u'v'$ -Farbraum ungleichmäßig und ist nur für die Black-Body-Kurve des Planck'schen Strahlers (Abbildung 3.5, Abbildung 3.6) annähernd gleichabständig durch Kreise statt Ellipsen darstellbar.<sup>18</sup> Laut entsprechender DIN-Norm bieten die Euklidischen Abstände  $\Delta c$  der UCS-Farbtabelle lediglich eine angenäherte "relative empfindungsgemäße Größe von etwa gleich großen Farbabständen zwischen Farb-reizen".<sup>19</sup>

$$\Delta c = \sqrt{\Delta u'^2 + \Delta v'^2} \quad (3.4)$$

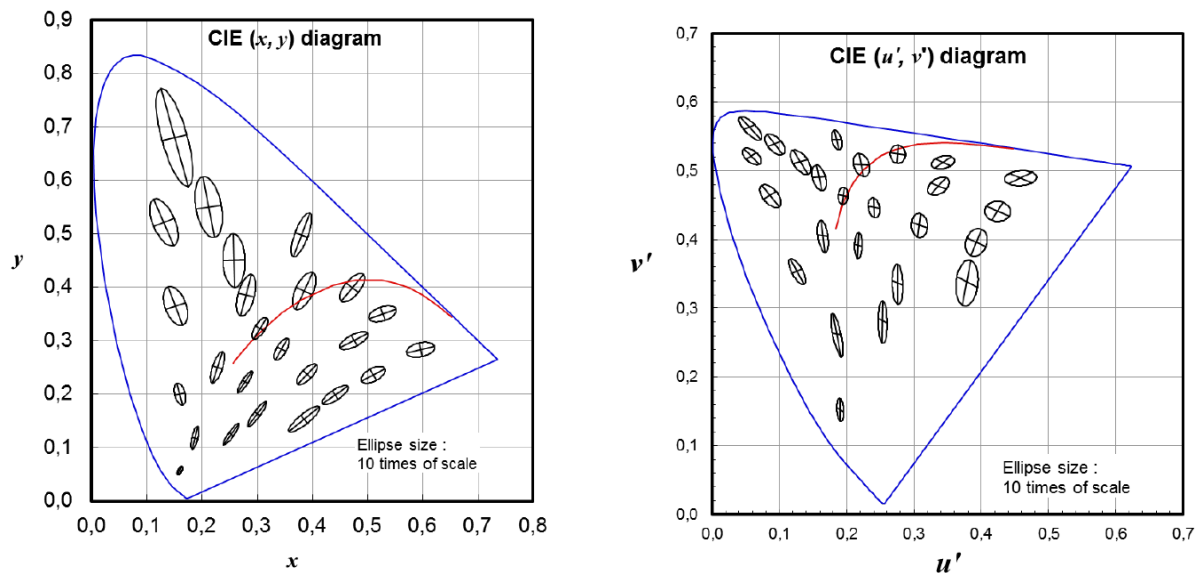


Abbildung 3.4: Um den Faktor 10 vergrößerte MacAdam-Ellipsen im  $xy$ - und  $u'v'$ -Diagramm

<sup>18</sup> Vgl. CIE Technical Note – Chromaticity Difference Specification for Light Sources

<sup>19</sup> Vgl. DIN EN ISO 11664-5:2011-07

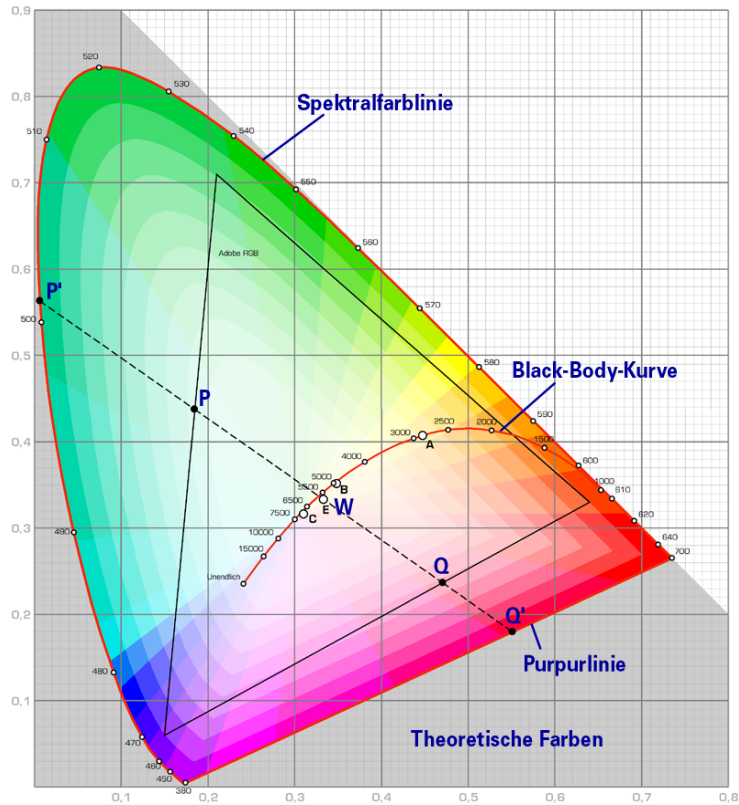


Abbildung 3.5: Black-Body-Kurve

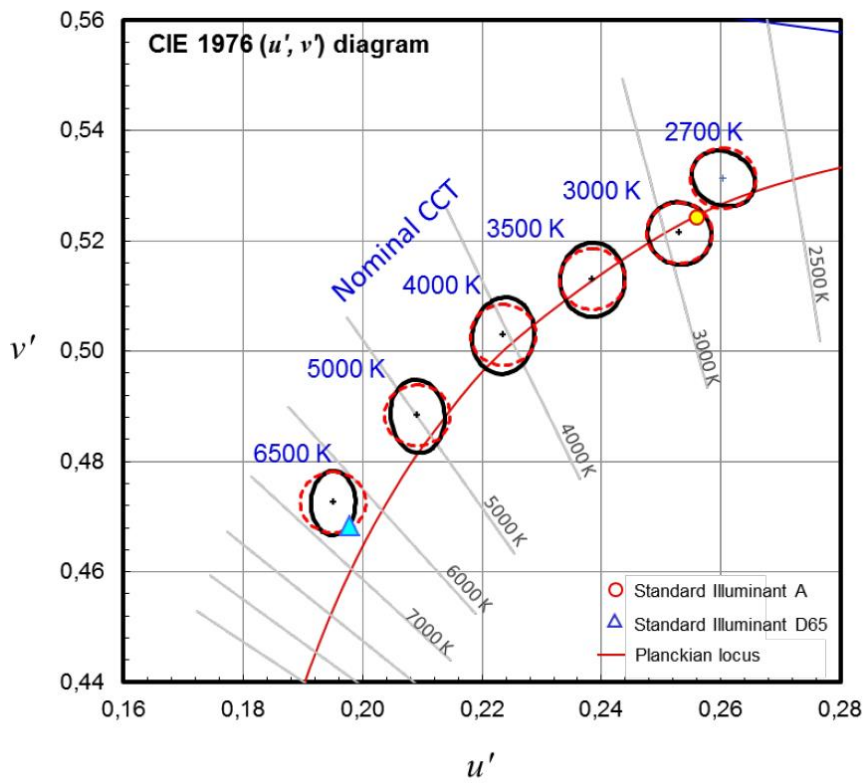


Abbildung 3.6: MacAdam-Kreise an Black-Body-Kurve

### 3.3 Farbtemperatur

Die Farbtemperatur, angegeben in der Einheit Kelvin, beschreibt mit Hilfe eines Zahlenwertes ein bestimmtes Lichtverhältnis einer alltäglichen Lichtsituation. Eine Farbtemperatur zwischen 5500 – 5800 K ist bspw. vergleichbar mit den Lichtverhältnissen bei Mittagssonne, die Lichtsituation der Spätabendsonne bei Dämmerung entspricht dagegen einer Farbtemperatur von nur 3500 K.<sup>20</sup> Eine wärmer empfundene, rötlich-orange Lichtsituation wird also entgegen der Empfindung von Temperaturen durch eine geringere Farbtemperatur dargestellt. Eine kalte, ins bläuliche gehende Lichtsituation wie bspw. bei bedecktem Himmel oder Nebel wird dagegen mit einer Farbtemperatur von 6500 – 10000 K angegeben.

Physikalisch wird die Farbtemperatur durch das abgegebene Strahlungsspektrum eines idealen Schwarzen Körpers bei der jeweiligen Temperatur beschrieben. Je höher die Temperatur, desto weiter verschiebt sich das Maximum des Strahlungsspektrums hin zu den geringen Wellenlängen, die vom menschlichen Auge als blau oder violett empfunden werden. Als dem natürlichen Tageslicht am ähnlichsten wird eine Farbtemperatur von 6504 K angegeben.<sup>21</sup>

In der Praxis wird die Farbtemperatur u.a. für den Weißabgleich verwendet. Sollen mehrere Wiedergabegeräte, z. B. bei Mehrfachprojektionen, einen einheitlichen Gesamteindruck schaffen, so müssen sie in ihrer Farbtemperatur angeglichen werden. Aufgrund der chromatischen Adaption des Auges, dem automatischen Ausgleichen von Farbstichen, kann auch eine einheitliche warm- oder kaltweiße Farbtemperatur für den Betrachter als neutrales Weiß erscheinen. Gibt es allerdings zu große Unterschiede in der Farbtemperatur, sodass das Auge sich nicht mehr auf eine Farbtemperatur adaptieren kann, fallen diese Unterschiede auf.

### 3.4 Leuchtdichte

Die Leuchtdichte  $L$  ist eine lichttechnische Einheit, um die von einer bestimmten Fläche abgestrahlte Lichtstärke zu beschreiben. Sie lässt sich als Quotient aus der Lichtstärke  $I$  einer Lichtquelle und der abstrahlenden Fläche  $A$  bilden und wird in der Einheit  $\text{cd}/\text{m}^2$  angegeben. Die Leuchtdichte wird herangezogen, um den empfundenen Helligkeitseindruck wiederzugeben, da eine Lichtquelle trotz selber Lichtstärke bei einer kleineren Abstrahlfläche einen helleren Eindruck hinterlässt.<sup>22</sup> Sie ist damit die einzige lichttechnische Grundgröße, die der Mensch wahrnehmen kann.<sup>23</sup>

$$L = \frac{I}{A} \quad (3.5)$$

$L$  = Leuchtdichte in  $\text{cd}/\text{m}^2$

$I$  = Lichtstärke in  $\text{cd}$

$A$  = Abstrahlende Fläche in  $\text{m}^2$

---

<sup>20</sup> Vgl. ScanDig - Farbtemperatur

<sup>21</sup> Vgl. Greule (2015), S. 30

<sup>22</sup> Vgl. ScanDig - Fotometrie

<sup>23</sup> Vgl. Greule (2015), S. 43

## 4 Vorbereitungen

### 4.1 Methodische Vorgehensweise

Aufgrund der Komplexität der Aufgabe war es sinnvoll zuerst einige vorbereitende Messungen durchzuführen, die wiederum Aufschluss über eine sinnvolle Vorgehensweise für die Farbkalibrierung geben sollten. Als erstes war die Frage zu beantworten, welcher Bildmodus im Projektor als Ausgangseinstellung gewählt werden sollte. Dafür sollten ausgewählte Bildmodi miteinander messtechnisch verglichen und anhand der Ergebnisse eine Entscheidung gefällt werden. Des Weiteren galt es die Abhängigkeit der Messergebnisse von der Entfernung und dem Messwinkel des Messgeräts zu erfassen, um mögliche Fehlerquellen zu umgehen. Anschließend sollten die geeigneten Messpunkte im Bild festgelegt werden, um die Messungen verschiedener Korrekturstadien miteinander vergleichbar zu machen. Eine 9-Punkte-Messung (s. Kapitel 4.3.4) innerhalb einiger Projektionen sollte außerdem Aufschluss über die Helligkeitsverteilung innerhalb eines Bildes geben. Um am Ende der Farbkalibrierung die Helligkeiten aneinander anpassen zu können, sollte ebenfalls die Linearität der softwareseitigen Helligkeitskorrektur getestet werden.

### 4.2 Verwendete Geräte und Software

#### 4.2.1 Specbos 1211

Zur Durchführung der Messungen wurde ein Spektroradiometer des Typs Specbos 1211 (Abbildung 4.1) der Firma JETI Technische Instrumente GmbH verwendet. Das Messgerät ist in der Lage, lichttechnische sowie farbmtrische Messgrößen im sichtbaren Wellenlängenbereich zu erfassen. Die relevanten Messgrößen für die Farbkalibrierung sind in diesem Fall die Leuchtdichte zur Bestimmung der Helligkeitsunterschiede, die Farbkoordinaten  $x$  und  $y$  zur Bestimmung der Farbdifferenzen und die Farbtemperatur, um im Vergleich zu anderen Wiedergabegeräten im Raum einen ähnlichen Weißwert zu erreichen.

Dem Datenblatt des Herstellers sind folgende technische Daten und Messtoleranzen zu entnehmen:

- |                              |  |
|------------------------------|--|
| - Spektralbereich            | 350 nm ... 1000 nm                     |
| - Optische Auflösung         | 4,5 nm (FWHM)                          |
| - Spektrale Genauigkeit      | $\pm 0,5$ nm                           |
| - Messwinkel                 | 1,8°                                   |
| - Leuchtdichtegenauigkeit    | $\pm 2\%$ (bei 100 cd/m <sup>2</sup> ) |
| - Genauigkeit Farbwerte      | $\pm 0,001$ $x, y$                     |
| - Genauigkeit Farbtemperatur | $\pm 20$ K (bei 2856 K)                |



Abbildung 4.1: Specbos 1211

#### 4.2.2 JETI LiVal

Die mit dem Specbos 1211 mitgelieferte Software „JETI LiVal V6.2.0“ (Abbildung 4.2) dient zum Einstellen des Messverfahrens, zum Auslösen der Messungen, zur Veranschaulichung der Messergebnisse und zum individuellen Export der Messwerte in Form von Tabellen oder Graphen. Gerade zur Auswertung der Messergebnisse bietet sie eine breite Palette an Darstellungsmöglichkeiten, zum Beispiel von Spektren, xy-Diagrammen oder  $u'v'$ -Diagrammen. In Form einer Tabelle können Größen wie die Leuchtdichte, die Farbtemperatur oder die Farbkoordinaten  $x$ ,  $y$  exportiert werden. Darüber hinaus können je nach Wunsch auch RGB-Werte oder selbst einzelne Werte für jede Wellenlänge des Spektrums ausgegeben werden.

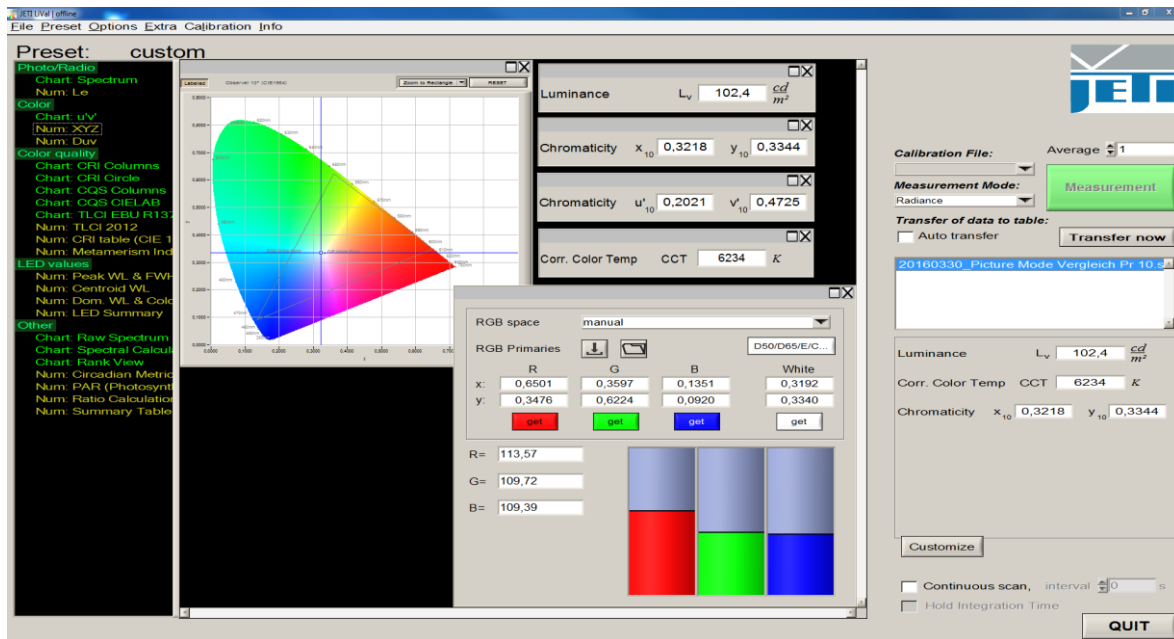


Abbildung 4.2: JETI LiVal V6.2.0

### 4.2.3 Geometry Manager Pro

Zur Bearbeitung der Projektor-Einstellungen gibt es den „Geometry Manager Pro“ (Abbildung 4.4), eine Software von Panasonic, um mit dem Laptop auf die Menüoptionen des Projektors zugreifen zu können. Der für die Farbkorrektur interessante Bereich nennt sich „Color Matching“ und bietet gleich drei verschiedene Verfahren an: Den „3 Colors Mode“ zum einfachen Einstellen von RGB-Werten, den „7 Colors Mode“, der zusätzlich die Möglichkeit bietet Cyan, Magenta, Gelb und Weiß zu justieren und den „Measurement Mode“, der anhand von Messwerten der Leuchtdichte und der Farbkoordinaten  $x$  und  $y$  die Farben in den zu bestimmenden Zielwert verschiebt. Dieser kann entweder dem Rec. 709-Farbraum (Abbildung 4.3) entsprechen („709 Mode“) oder manuell bestimmt werden („Target Data“).

Der Rec. 709-Farbraum ist Teil des Standards *ITU-R BT.709*, der für HDTV entwickelt wurde. Durch definierte Eckpunkte von Rot, Grün und Blau wird hierbei ein Farbgamut innerhalb des CIE-Farbraums spezifiziert.<sup>24</sup>

<sup>24</sup> Vgl. ITWissen – BT.709



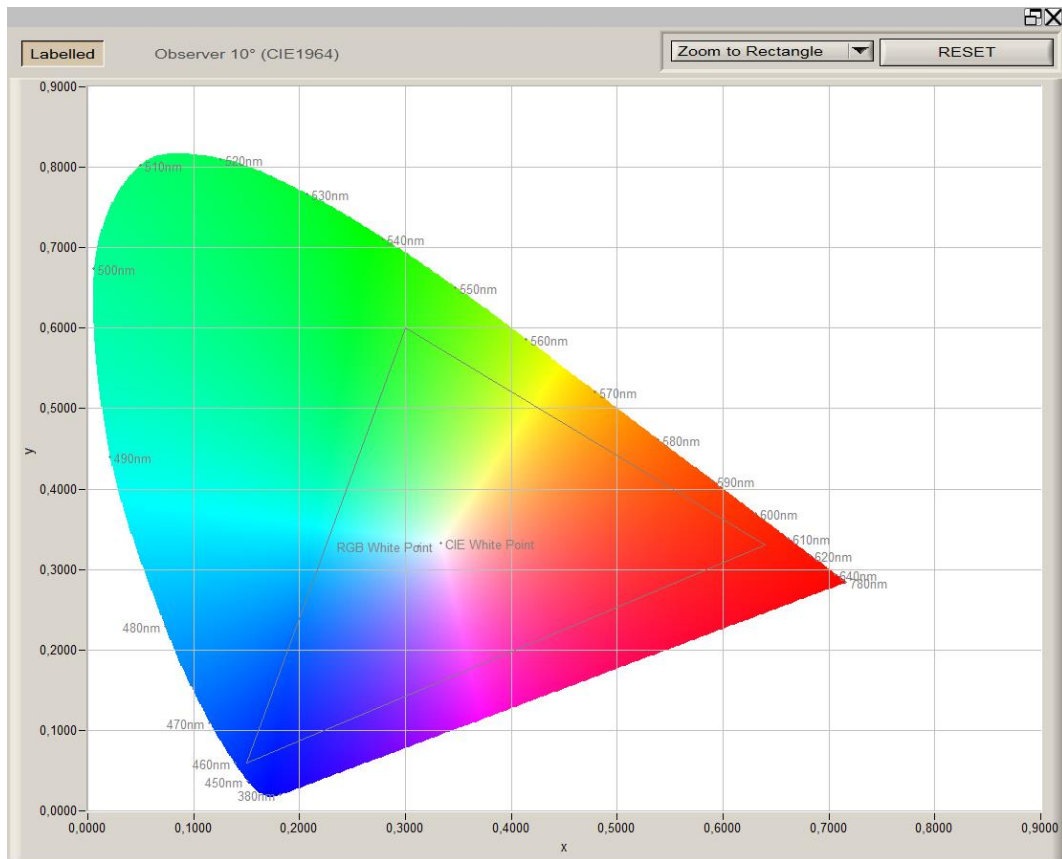


Abbildung 4.3: Rec. 709-Farbraum

#### 4.2.3.1 3 Colors Mode

Die einfachste und sicherlich schnellste Methode Farben zu korrigieren ist der „3 Colors Mode“. Der Projektor bietet in dem Fall an, die RGB-Zusammensetzung der Farben Rot, Grün und Blau anzupassen. Die jeweiligen Anteile bewegen sich dabei zwischen 0 und 2048.

#### 4.2.3.2 7 Colors Mode

Der „7 Colors Mode“ stellt eine sinnvolle Erweiterung zum „3 Colors Mode“ dar. Zusätzlich zu den Primärfarben können hier auch die Sekundärfarben Cyan, Magenta und Gelb in ihrer Zusammensetzung editiert werden. Zur Anpassung der Farbtemperatur und der Helligkeit kann außerdem der RGB-Wert für Weiß korrigiert werden. Auch hier bewegen sich alle Werte zwischen 0 und 2048. Die Korrektur funktioniert dabei durch eine individuelle Entsättigung der einzelnen Farben.

#### 4.2.3.3 Measurement Mode

Im Vergleich zu den RGB-basierten Korrekturverfahren, bietet Panasonic auch an, die Farben über die Eingabe von Messwerten und Zielwerten zu korrigieren. Als Messwerte können dabei die Leuchtdichte (Y) in einem Bereich zwischen 0 und 65536 und die Farbkoordinaten (x, y) in einem Bereich von 0 - 1 eingegeben werden. Dies ist neben Rot, Grün und Blau noch für Schwarz und Weiß möglich. Messwerte für Cyan, Magenta und Gelb können nicht eingegeben

werden. Als „Target Data“ können Leuchtdichte und Farbkoordinaten für die Primär- und Sekundärfarben sowie Weiß angegeben werden. Alternativ kann der Rec. 709-Farbraum als voreingestellter Zielwert ausgewählt werden.

Dabei verschiebt der Projektor seinen Farbraum in der Theorie so, dass die Koordinaten nach der Korrektur genau dem gewünschten Ziel-Gamut entsprechen. Fraglich scheint dabei, was passiert, wenn der Ziel-Farbraum außerhalb des gemessenen Gamut liegt. Schließlich ist davon auszugehen, dass der Ausgangswert bereits dem Maximum der darzustellenden Farben entspricht. Außerdem stellt sich die Frage, ob die Korrektur ohne Eingabe von Messwerten für die Sekundärfarben überhaupt zuverlässig funktionieren kann.

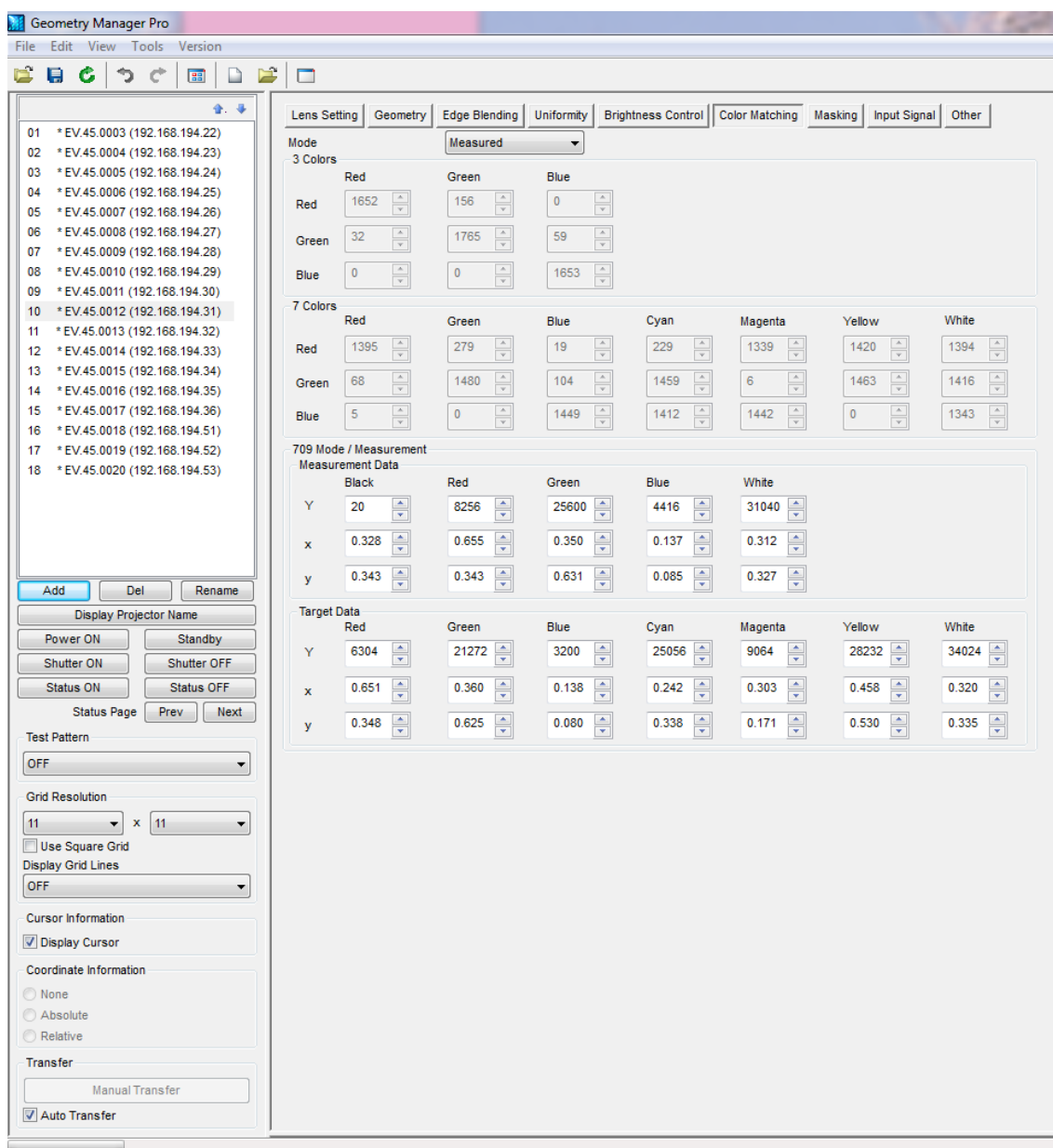


Abbildung 4.4: Geometry Manager Pro

## 4.3 Durchführung

### 4.3.1 Picture-Mode

Panasonic bietet im Projektor-Menü verschiedene Presets (Picture-Mode) an, um das Bild an die gewählte Inputquelle und das jeweilige Umfeld anzupassen. Zur Auswahl stehen die sieben folgenden Modi:

STANDARD	Für allgemein bewegliches Bild
CINEMA	Speziell für Filmquellen
NATURAL	sRGB-konform
DICOM SIM.	An den DICOM Part14 Grayscale Standard angepasst
DYNAMIC	Maximale Helligkeit für hohe Umgebungshelligkeiten
GRAPHIC	Besonders geeignet für Signale vom PC
USER	Individuelle Einstellungsmöglichkeiten

Der jeweilige Picture-Mode setzt unter anderem voreingestellte Werte für Kontrast, Helligkeit, Farbton (Tint), Farbtemperatur und Gamma. DICOM steht in dem Fall für „Digital Imaging and Communication in Medicine“ und beschreibt einen "Standard für medizinische Bildgebungsgeräte".<sup>25</sup>

Zur genaueren Betrachtung wurden die drei vermutlich relevantesten Modi verglichen. Das Augenmerk lag dabei darauf, wie die unterschiedlichen Modi den Farbraum und die Farbtemperatur beeinflussen. Ziel war es, mit der Auswahl des Bildmodus eine möglichst neutrale Ausgangsposition zu schaffen, die für eine große Bandbreite von Videoinhalten ausgelegt ist und dabei genügend Spielraum für die anschließende Kalibrierung schafft. Zur Auswahl für einen näheren Vergleich standen der Graphic-Modus aufgrund der Zuspiegelung über die Pandoras-Box Medienserver, der Standard-Modus für allgemein bewegliches Bild und der Natural-Modus, um ein sRGB-konformes Bild zu erzielen.

Anhand der im CIE-Diagramm visualisierten Messwerte der drei Bildmodi am Beispiel des Projektors 10 (Abbildung 4.5) ließ sich gut erkennen, dass der Picture Mode die Eckpunkte des Farbraums nicht beeinflusst. Die Koordinaten der Primärvalenzen Rot, Grün und Blau bleiben bei allen Modi die gleichen. Es verschieben sich aber die Koordinaten der Sekundärvalenzen Cyan, Magenta und Gelb sowie der Weißpunkt und damit die Farbtemperatur. Am Beispiel des Projektors 10 lag die gemessene Farbtemperatur für Weiß im Modus Standard bei 5909K, für Graphic bei 6846K und für Natural bei 6234K (Tabelle 1). Dies war auch in der Spektral-

---

<sup>25</sup> Vgl. Panasonic PT-DZ21KE Manual, S. 67

analyse des Projektors 10 zu erkennen (Abbildung 4.6, Abbildung 4.7, Abbildung 4.8). Standard- und Natural-Mode wiesen im Vergleich zum Graphic-Mode einen erhöhten Rot-Anteil auf. Der Graphic-Mode zeigte hingegen einen höheren Blauwert.

Entscheidend war in dem Zusammenhang außerdem, dass die Helligkeit durch die unterschiedlichen Modi nicht beeinflusst wird. Die Abweichungen lagen in etwa im Rahmen der vom Hersteller angegebenen Messgenauigkeit von 2%.

Die Entscheidung für einen Bildmodus fiel auf den Graphic-Modus, da dieser in seiner Farbtemperatur dem Tageslicht (6500-6700 K) am nächsten kam und auch die LED-Displays im Raum auf 6500 K kalibriert wurden.

Tabelle 1: Gemessene Farbtemperaturen bei verschiedenen Bildmodi - Projektor 10

<b>Picture-Mode</b>	<b>Farbtemperatur in K</b>
Graphic	6846
Standard	5909
Natural	6234

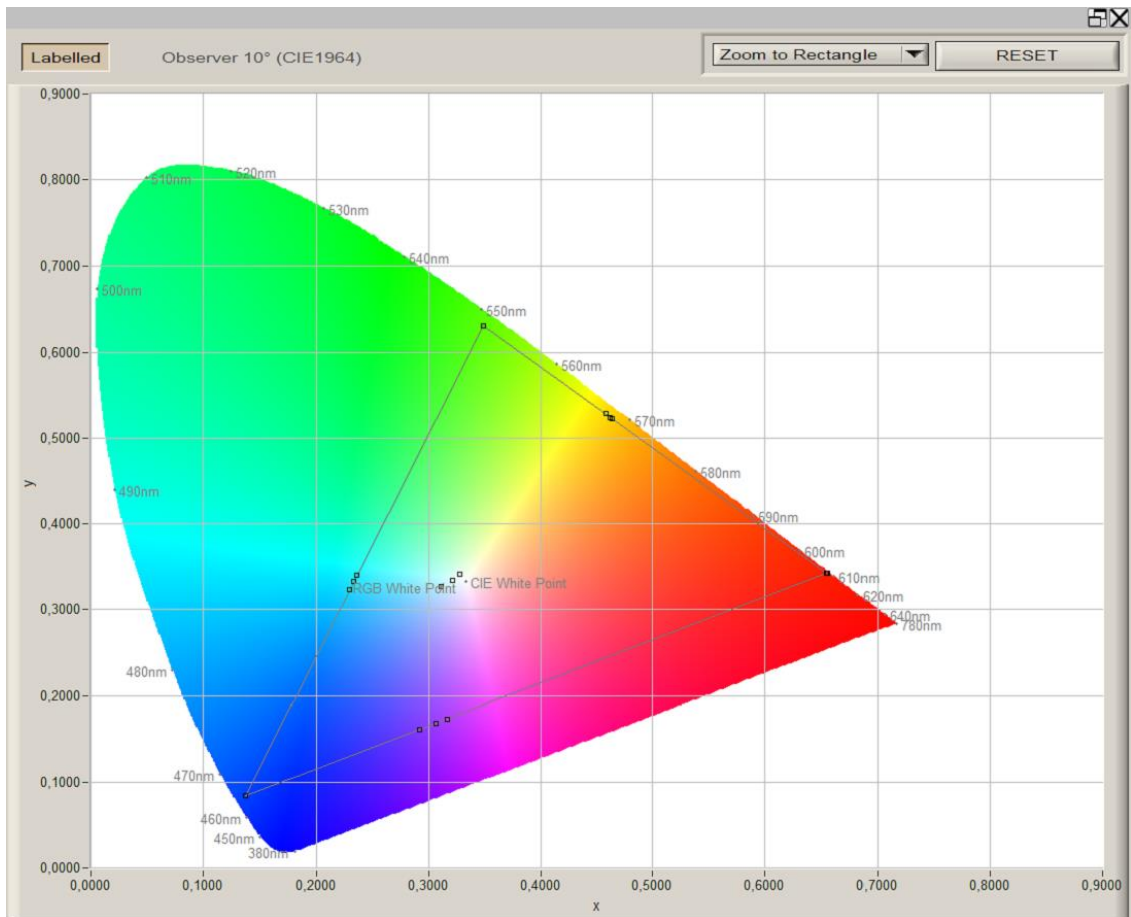


Abbildung 4.5: Picture-Mode Vergleich Projektor 10 - Messwerte in CIE-Diagramm

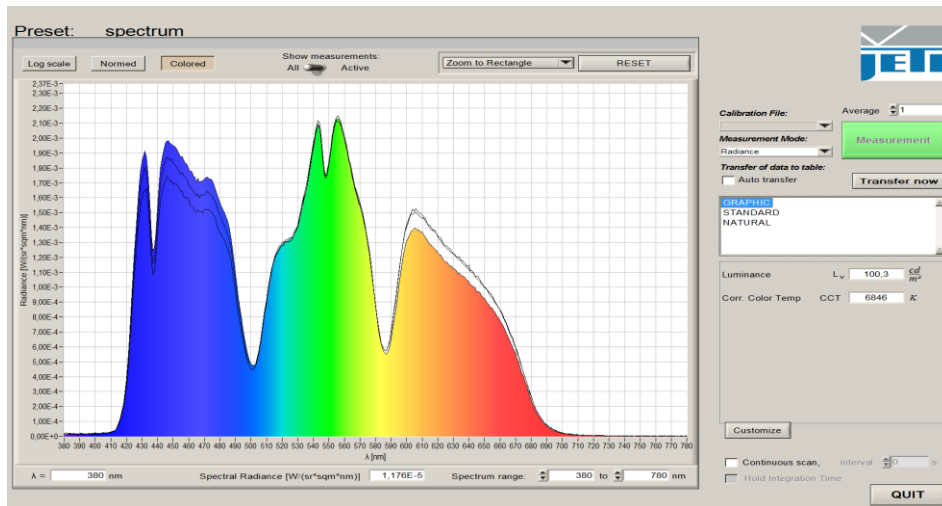


Abbildung 4.6: Spektrum Graphic-Mode – Projektor 10

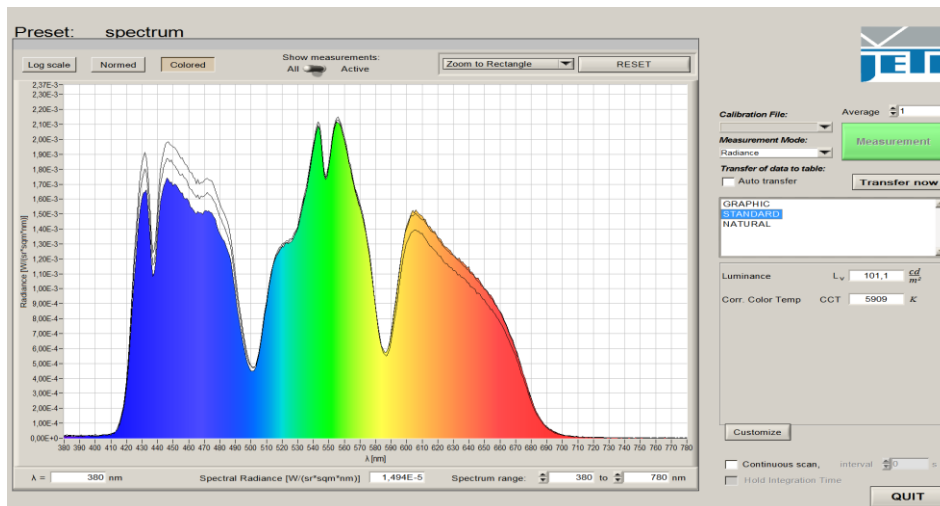


Abbildung 4.7: Spektrum Standard-Mode – Projektor 10

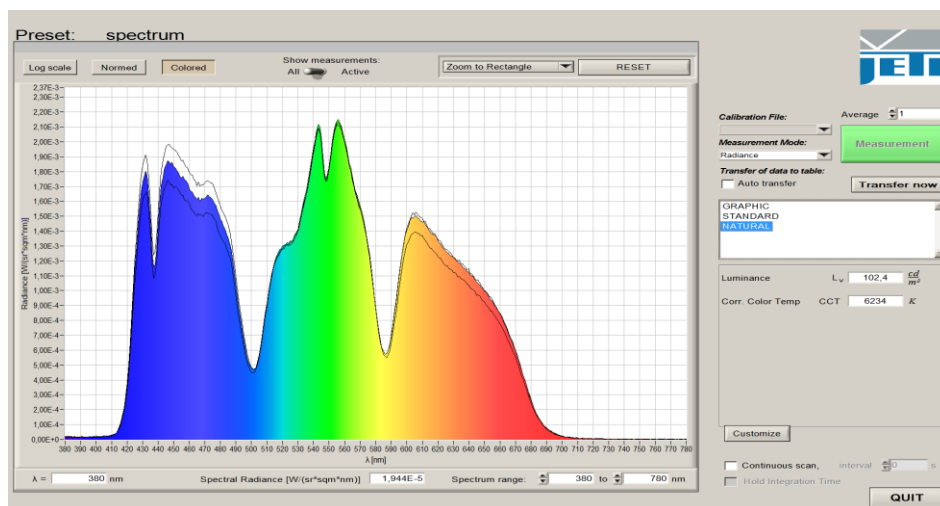


Abbildung 4.8: Spektrum Natural-Mode – Projektor 10

### 4.3.2 Messposition

Die Wahl einer einheitlichen und möglichst vergleichbaren Messposition war entscheidend für die Relevanz der späteren Messergebnisse, wie auch für die Effizienz der anschließenden Farbkorrektur. Zumindest bei der Korrektur der Helligkeit würden kleine Abweichungen in der Messposition schon entscheidende Differenzen hervorrufen. Die Farbkoordinaten dagegen, müssten über die gesamte Fläche konstant bleiben.

Die architektonische Situation im Two70° stellte eine große Herausforderung an die Prämisse, durch möglichst einheitliche Messpositionen vergleichbare Ergebnisse zu erzielen. Breite Säulen wenige Meter vor der Projektionsfläche und unterschiedlich hohe Hubpodien im Bereich der potentiellen Messorte machten es erforderlich, für einheitliche Voraussetzungen einen großen Aufwand zu betreiben. Um die Wahl der Messpositionen zu vereinfachen und somit den gesamten Prozess zu beschleunigen, sollten Probemessungen aus verschiedenen Winkeln

und Entfernungen die Notwendigkeit für einheitliche Positionen zeigen. Sollten sich die Abhängigkeiten von Winkel oder Entfernung als gering genug herausstellen, könnte die Messposition besser dem Umfeld angepasst werden. Als Grenzwerte können in dem Fall die Genauigkeiten aus dem technischen Datenblatt gewählt werden.

#### 4.3.2.1 Abhängigkeit von der Entfernung

Zur Messung der Entfernungsabhängigkeit wurden zwei Messpositionen mit gleichem Messwinkel verglichen (Tabelle 2). Bei Messung 1 befand sich das Messgerät einige Meter vor der Projektionsfläche. Bei Messung 2 wurde der Abstand verdoppelt. Die Differenzen lagen alleamt unterhalb der vom Hersteller angegeben Messtoleranzen (s. Kapitel 4.2.1). Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass sich die Messfläche bei größer werdender Entfernung vergrößert, da das Messgerät mit einem konstanten Einfallswinkel von  $1,8^\circ$  misst.

Tabelle 2: Messwerte der Entfernungsabhängigkeit

	<b>Messung 1 (Nah)</b>	<b>Messung 2 (Fern)</b>	<b>Differenz</b>
<b>Leuchtdichte in cd/m<sup>2</sup></b>	113,92	115,56	<b>1,44%</b>
<b>Korrelierte Farbtemperatur in K</b>	6760	6754	<b>6</b>
<b>x</b>	0,3077	0,3078	<b>0,0003</b>
<b>y</b>	0,3318	0,3318	<b>-0,0001</b>

#### 4.3.2.2 Messwinkelabhängigkeit

Um auch die Möglichkeit zu haben aus einem anderen Winkel als  $90^\circ$  zu messen, wurden die Messergebnisse einer senkrechten Messung mit einer Messung aus etwa  $45^\circ$  zur Projektionsfläche verglichen (Tabelle 3). Dabei lagen die Abweichungen der Ergebnisse unter den vom Hersteller angegebenen Messungenauigkeiten.

Tabelle 3: Messwerte der Winkelabhängigkeit

	<b>Messung 1 (90°)</b>	<b>Messung 2 (45°)</b>	<b>Differenz</b>
<b>Leuchtdichte in cd/m<sup>2</sup></b>	131,93	134,14	<b>1,68%</b>
<b>Korrelierte Farbtemperatur in K</b>	6737	6752	<b>15</b>
<b>x</b>	0,3079	0,3076	<b>-0,0009</b>
<b>y</b>	0,3330	0,3327	<b>-0,0008</b>

#### 4.3.2.3 Wahl der Messposition

Die Einhaltung der vorher gesetzten Grenzwerte sowohl in Abhängigkeit von der Entfernung als auch des Winkels, schafften für die folgenden Messungen den Spielraum, die gewählten Positionen des Messgeräts an die Umgebung anzupassen und so den Prozess deutlich zu beschleunigen.

### 4.3.3 Messpunkt

Noch wichtiger als die Position des Messgerätes, war der Punkt der Messung im Bild. Da alle Projektoren von oben herab projizierten und teilweise auch horizontal einen nicht senkrechten Projektionswinkel hatten, ergab sich ein, auch optisch sichtbarer, Helligkeitsverlauf innerhalb des Bildes, den es zu berücksichtigen galt. Jeden Projektor in der Mitte zu messen und somit einen Durchschnittswert zu bekommen, sollte zwar für die Farbwerte funktionieren, funktionierte aber nicht für die Leuchtdichte. Der obere Bildrand war deutlich näher an der Lichtquelle und dementsprechend heller als die untere Bildkante. Es sollte für alle Messungen Punkte festgelegt werden, die eine möglichst hohe Vergleichbarkeit garantierten. Die Herausforderung bestand auch darin, dass an jedes Bild drei weitere Bilder direkt anschlossen.

Von daher sollte bei allen Projektionen der Fokus auf den vertikalen Softedgebereichen, also den Übergängen zur oberen bzw. unteren Nachbarprojektion liegen. Das bedeutete, die oberen Projektionen am unteren Rand und die unteren Projektionen am oberen Rand zu messen (Abbildung 4.9). Nach der Korrektur sollte optimalerweise ein unsichtbarer Übergang zwischen der oberen und der unteren Projektion entstehen, sodass die gesamte Projektion nachher einen fließenden Verlauf der Helligkeit bekäme. Im Vergleich mit den horizontalen Nachbarprojektionen musste dagegen auf eine Messung im Softedgebereich verzichtet werden. Ausnahme bildeten die vier äußeren Projektoren, die nur noch zu einer Seite eine Nachbarprojektion hatten.

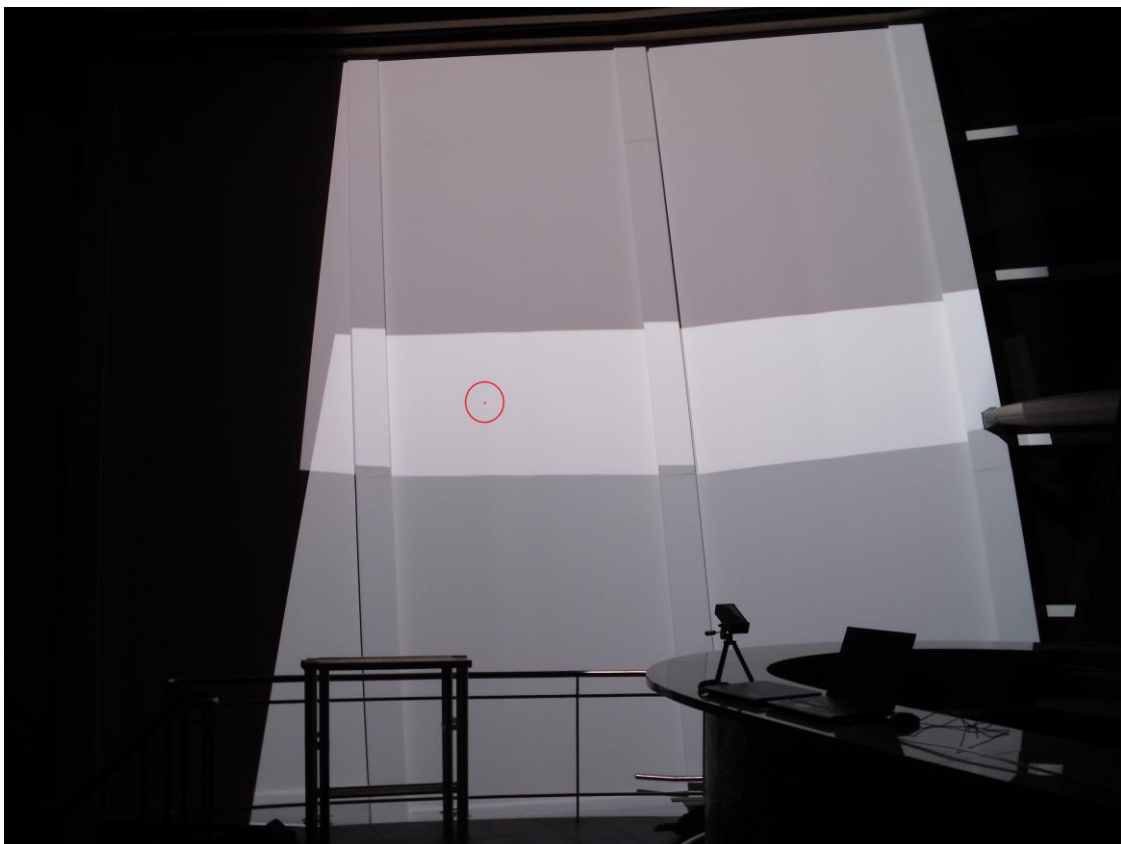


Abbildung 4.9: Messpunkt im Überlappungsbereich



#### 4.3.4 9-Punkte-Messung

Um zu zeigen, wie stark die Leuchtdichte innerhalb einer Projektion abfiel, wurde anhand zweier Beispiele je eine 9-Punkte-Messung (Abbildung 4.10) durchgeführt. Dabei wurde die Projektionsfläche in 3 x 3 etwa gleichgroße Flächen eingeteilt und in den neun Bereichen jeweils die Leuchtdichte gemessen. Projektor 14 galt dabei als Beispiel für einen Projektor, der in beiden Dimensionen in einem besonders flachen Winkel projiziert. Projektor 10 soll als Vergleich dazu die Projektoren repräsentieren, die relativ senkrecht auf die Leinwand projizierten.

Das Ergebnis zeigte einen starken Helligkeitsabfall von oben nach unten, sowie bei Projektor 14 auch von links nach rechts (Abbildung 4.11). Im Vergleich zum hellsten Punkt lag der dunkelste Punkt bei Projektor 14 bei nur 68,8% bzw. bei Projektor 10 bei 64,5% (Tabelle 4). Das unterstrich noch einmal, dass eine homogene Leuchtdichte über die gesamte Projektionsfläche nicht erreichbar war. Lediglich eine Konzentration auf die Übergänge konnte einen gewissen Homogenitätseindruck erzeugen.

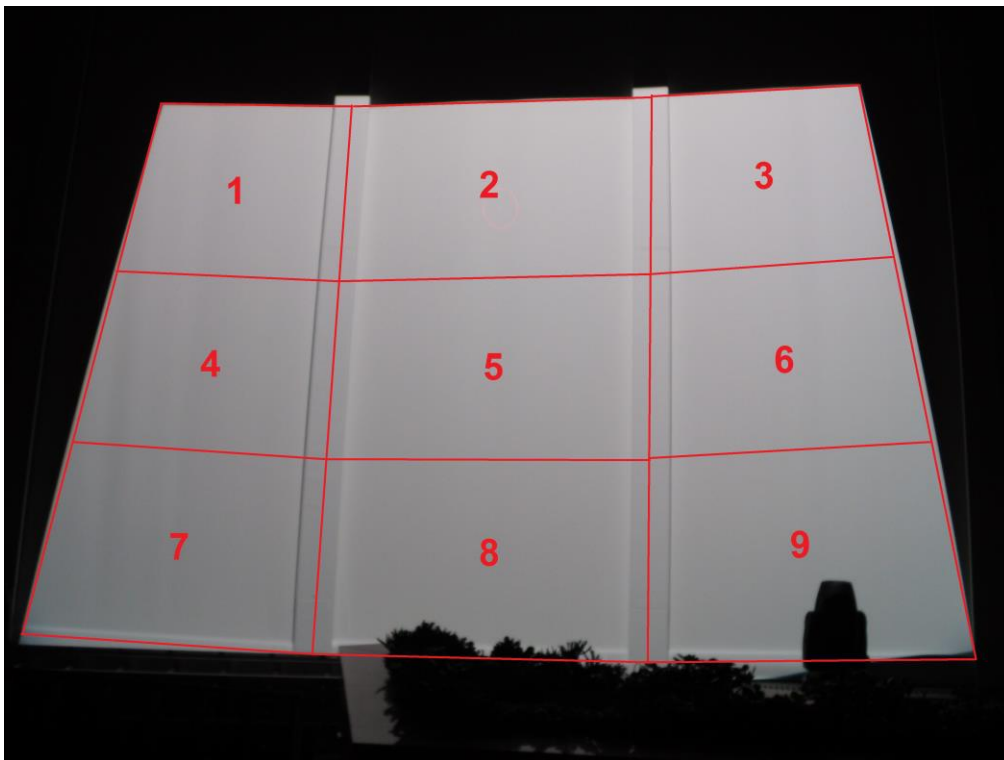


Abbildung 4.10: Skizze 9-Punkte-Messung



Abbildung 4.11: Foto Helligkeitsverlauf Projektion 14

Tabelle 4: Relative Leuchtdichte zum Maximalwert – Projektor 14 und 10

**Projektor 14**

**Leuchtdichte in cd/m<sup>2</sup>**

128,1	119,1	104,9
124,3	116,2	100,5
106,3	99,3	88,1

**Rel. Leuchtdichte zum Maximum in %**

100,0%	93,0%	81,9%
97,0%	90,7%	78,5%
83,0%	77,5%	68,8%

**Projektor 10**

**Leuchtdichte in cd/m<sup>2</sup>**

129,8	130,7	129,5
111,7	112,9	113,7
86,7	86,0	84,3

**Rel. Leuchtdichte zum Maximum in %**

99,3%	100,0%	99,1%
85,5%	86,4%	87,0%
66,3%	65,8%	64,5%

**4.3.5 Brightness Control Gain**

Um sicher zu gehen, dass eine Reduzierung der Helligkeit um einen Faktor x auch die tatsächliche Leuchtdichte um diesen Faktor x reduziert, wurde die Leuchtdichte eines weißen Bildes bei 100% Helligkeit gemessen, die Helligkeit über „Brightness Control Gain“ anschließend in 10%-Schritten reduziert und jeweils erneut gemessen. Dabei lag die Abweichung zwischen Erwartungswert und Messwert bei maximal 0,6% (Abbildung 4.12). Im für die Kalibrierung entscheidenden Bereich zwischen 60-100% Helligkeit lag die Abweichung sogar bei maximal 0,2%.

Diese Messungen wurden für die Primärfarben Rot, Grün und Blau wiederholt und auch dort lediglich Abweichungen von maximal 0,5% (Rot), 0,6% (Grün) und 0,4% (Blau) gemessen (Abbildung 4.13, Abbildung 4.14, Abbildung 4.15).

Damit war die Linearität der Helligkeitskontrolle bewiesen und ein Angleichen der Helligkeit hierüber möglich. Zu beachten war lediglich, dass dabei ausschließlich die gesamte Helligkeit angepasst wird. Von daher sollte ein individuelles Angleichen der Farben untereinander vorher geschehen und die Helligkeitskorrektur erst am Ende verwendet werden, sobald die Farbwerte untereinander stimmen.

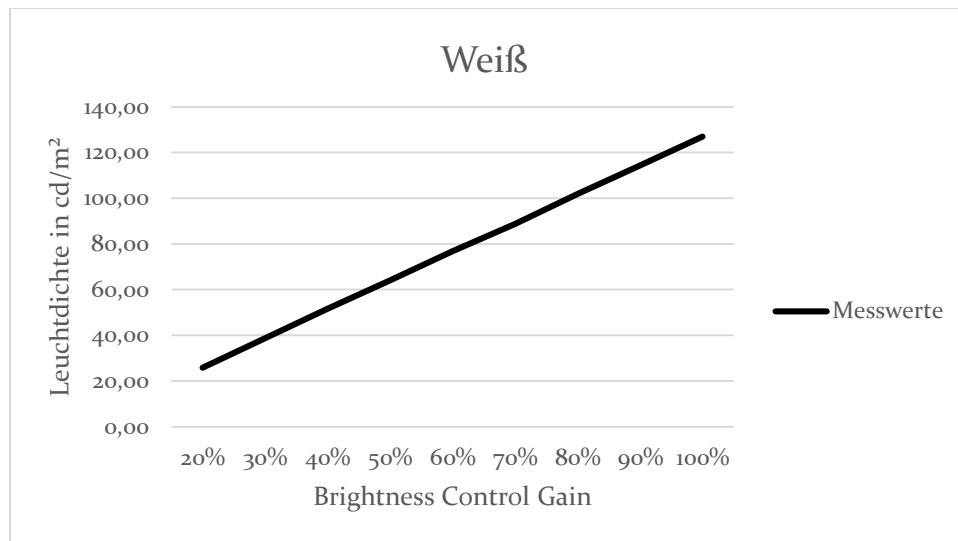


Abbildung 4.12: Linearität der Brightness Control Gain - Weiß

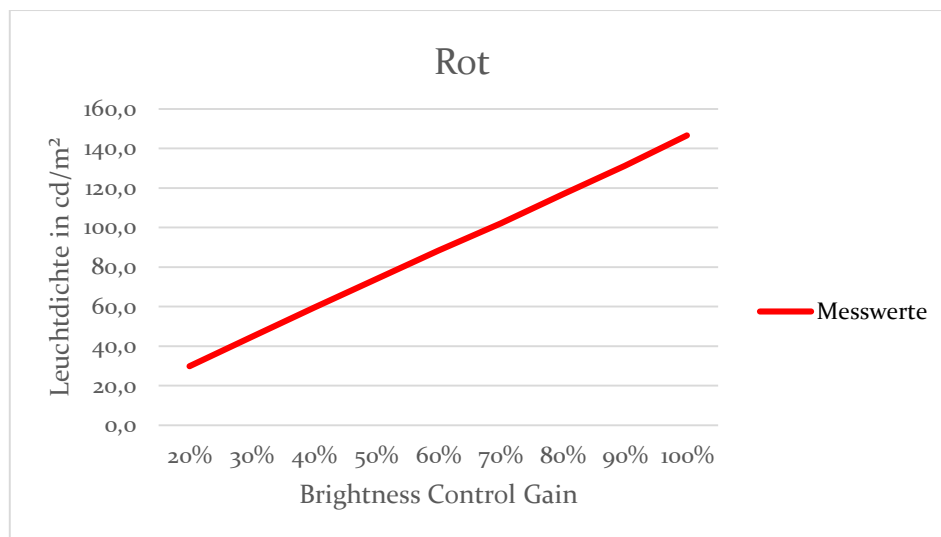


Abbildung 4.13: Linearität der Brightness Control Gain - Rot

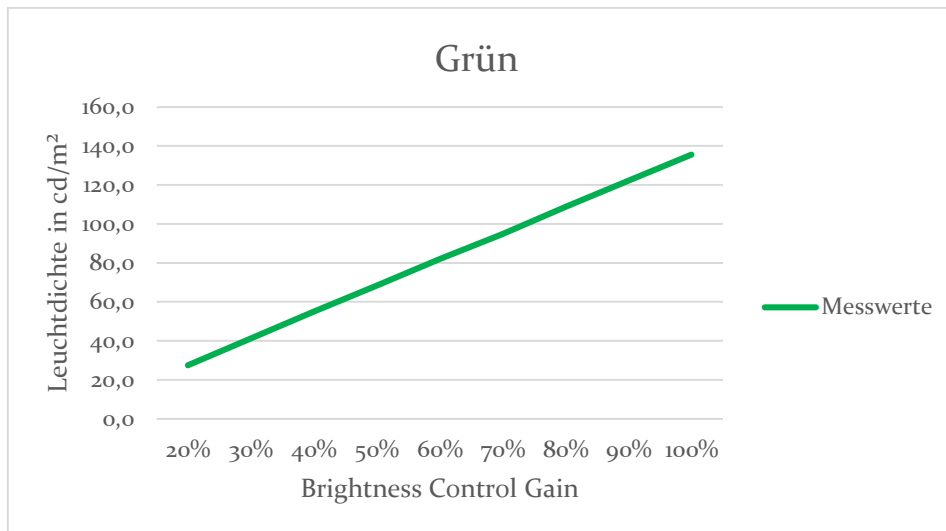


Abbildung 4.14: Linearität der Brightness Control Gain - Grün

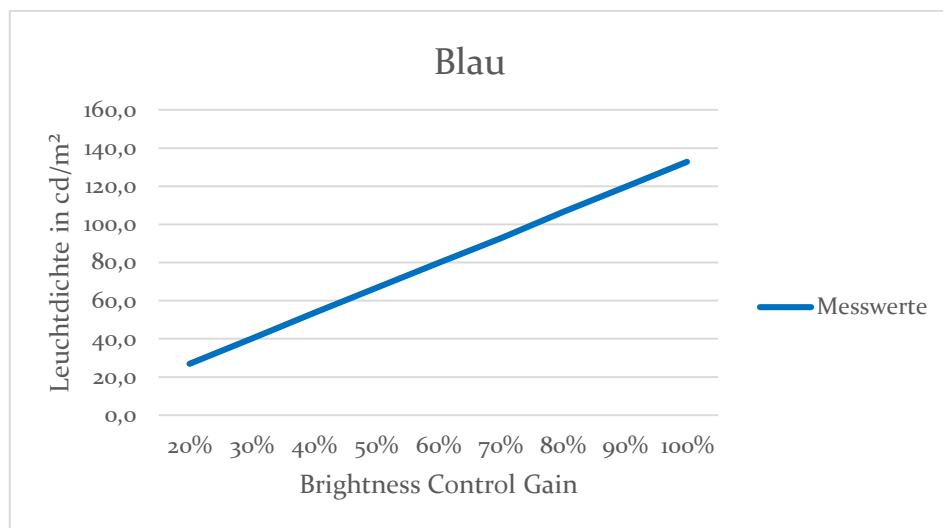


Abbildung 4.15: Linearität der Brightness Control Gain - Blau

#### 4.3.6 Sichtbare Farbdifferenzen

Es war nicht davon auszugehen, dass 18 Projektoren sowohl in der Leuchtdichte als auch den Farbkoordinaten auf die letzte Nachkommastelle identisch zu kalibrieren sein würden. Außerdem wurde bereits in Kapitel 3.2 beschrieben, dass sich die Sichtbarkeitsschwellen der Farbdifferenzen je nach Farbe unterscheiden. Um besser einschätzen zu können, ab welchem Ergebnis von „zufriedenstellend“ zu sprechen sein könnte, sollten für jede Farbe Messwerte für gerade sichtbare Farbdifferenzen erhoben werden.

Dafür wurden zwei nebeneinanderliegende Projektoren mit einer nicht sichtbaren Farbdifferenz ausgewählt und deren Messwerte für Leuchtdichte,  $x$ ,  $y$ ,  $u'$  und  $v'$  aufgenommen. Die Farbkoordinaten lagen in dem Fall sehr nah beieinander bzw. im exakt gleichen Punkt. Anschließend wurden die Farbkoordinaten eines Projektors so lange kontinuierlich verändert, bis eine gerade sichtbare Farbdifferenz zwischen den beiden Projektionen entstanden ist. Dieser

Versuch wurde für alle sechs Farben Rot, Grün, Blau, Cyan, Magenta, Gelb und ebenso für Weiß durchgeführt. Dabei variierten die gewählten Projektoren, da je nach Farbe andere Projektoren nicht sichtbare Differenzen aufwiesen.

Aus den dabei entstandenen Differenzen zwischen nicht sichtbarem Übergang und sichtbarer Differenz ließen sich Abstände  $\Delta_{xy}$  (Tabelle 5) und  $\Delta_c$  (Tabelle 6) berechnen, die für jede Farbe gesondert die gerade sichtbare Farbdifferenz bezogen auf die Farbkoordinaten angeben. Dabei war zu beobachten, dass es besonders im Rot, Gelb und Grün eine große Toleranz gibt, während im Weiß und Cyan bereits ab einer Differenz von 0,004 im xy-Diagramm eine Farbdifferenz sichtbar wird (Abbildung 4.16).

Auch in Bezug auf das  $u'v'$ -Diagramm (Abbildung 4.17) und die Farbdifferenzen  $\Delta_c$  (Abbildung 4.18) fiel auf, dass die visuellen Farbabstände im Diagramm den wahrgenommenen Differenzen zwar ähnlich waren, Änderungen im Weiß und Cyan aber trotzdem deutlich empfindlicher wahrgenommen wurden, als gleichabständige  $u'v'$ -Differenzen im Rot oder Blau.

Rückblickend sollte aber auch erwähnt werden, dass diese Schwelle zwischen nicht sichtbarem und sichtbarem Unterschied rein subjektiv nach eigener Meinung ermittelt wurde und je nach Betrachter eine andere Verteilung der Toleranzgrenzen möglich ist. Dass der Bereich von Rot bis Grün weniger empfindlich bezüglich Farbdifferenzen ist, erscheint nachvollziehbar. Eine drei- bis viermal höhere Schwelle erscheint allerdings ziemlich deutlich im Vergleich zu den anderen Ergebnissen und würde sich bei einer größeren Versuchsgruppe eventuell noch etwas in Richtung der anderen Werte korrigieren.

Tabelle 5: Sichtbare Farbdifferenzen in xy

	Weiß	Rot	Grün	Blau	Cyan	Magenta	Gelb
$\Delta x$	0,004	0,010	0,013	0,000	0,002	0,006	0,006
$\Delta y$	0,001	0,002	0,012	0,006	0,004	0,003	0,007
$\Delta_{xy}$	<b>0,004</b>	<b>0,010</b>	<b>0,017</b>	<b>0,006</b>	<b>0,004</b>	<b>0,007</b>	<b>0,009</b>

Tabelle 6: Sichtbare Farbdifferenzen in  $u'v'$

	Weiß	Rot	Grün	Blau	Cyan	Magenta	Gelb
$\Delta u'$	0,003	0,010	0,008	0,003	0,000	0,005	0,006
$\Delta v'$	0,001	0,001	0,001	0,011	0,002	0,004	0,001
$\Delta c$	<b>0,003</b>	<b>0,010</b>	<b>0,008</b>	<b>0,011</b>	<b>0,002</b>	<b>0,006</b>	<b>0,006</b>

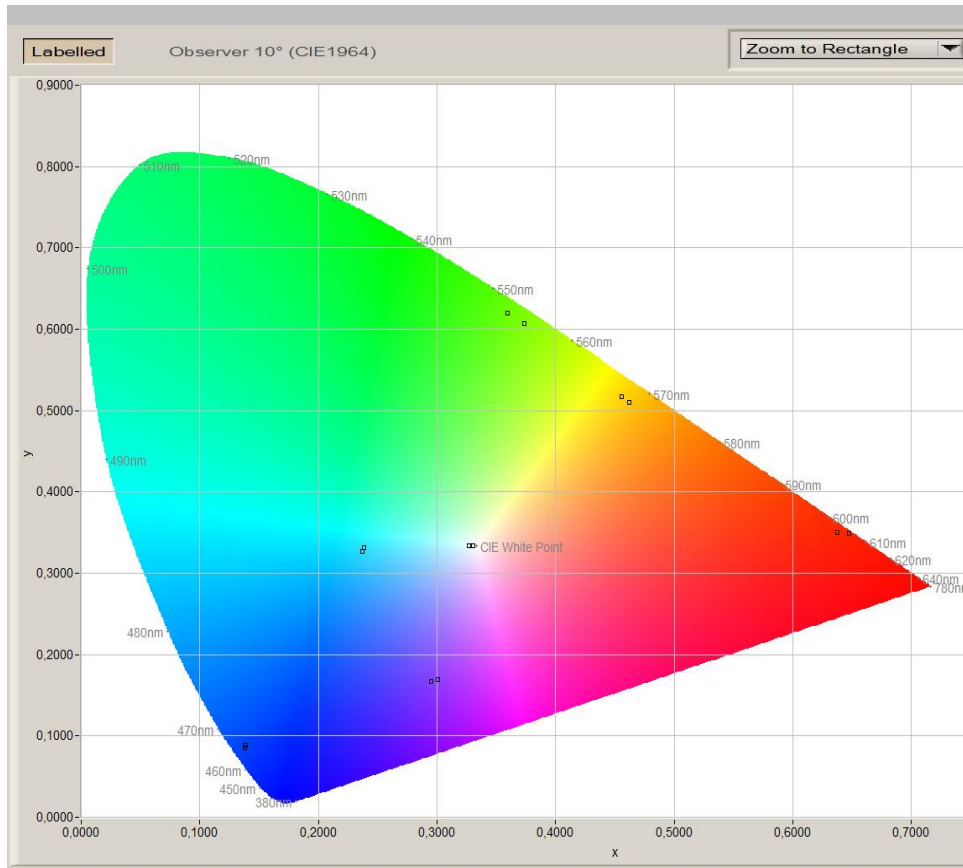


Abbildung 4.16: xy-Diagramm – Gerade sichtbare Farbdifferenzen

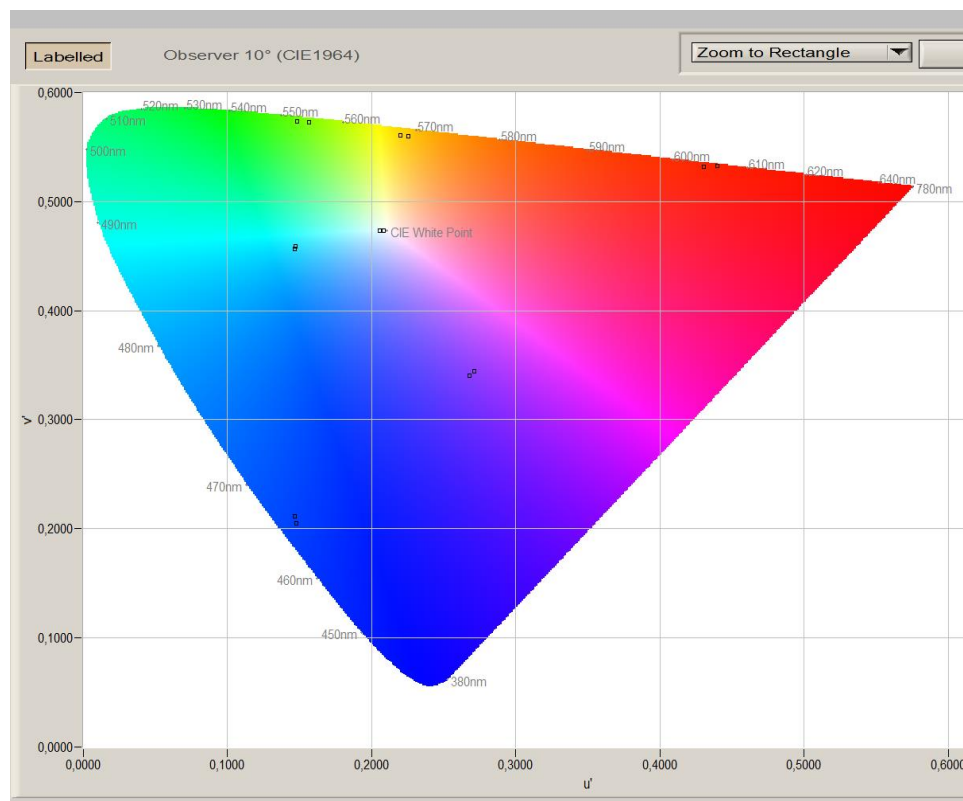


Abbildung 4.17: u'v'-Diagramm – Gerade sichtbare Farbdifferenzen

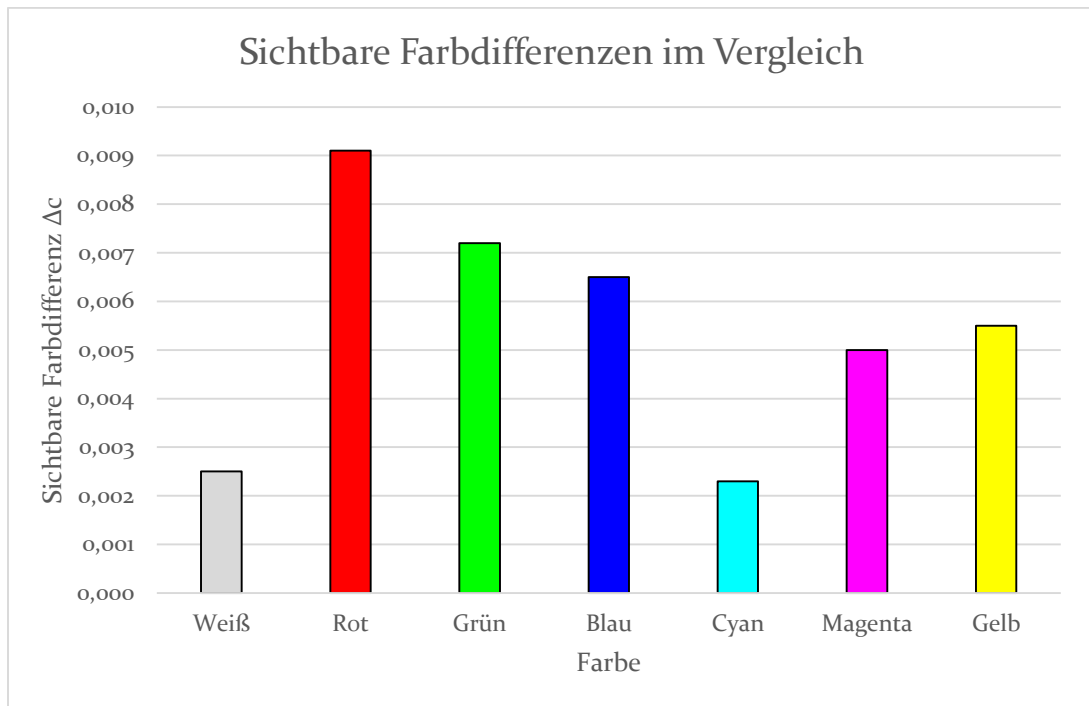


Abbildung 4.18: Von einer Versuchsperson ermittelte gerade sichtbare Farbdifferenzen  $\Delta c$

## 5 Farbmessungen

### 5.1 Aufnahme der Messwerte

Für die Messungen wurde das Specbos 1211 auf einem 20 cm hohen Stativ befestigt und in einer Entfernung von 5 m in einem Winkel von  $45^\circ$  auf die Projektion ausgerichtet (Abbildung 5.1). Aufgrund der Unabhängigkeit der Messergebnisse von der Entfernung (s. Kapitel 4.3.2.1), konnte die Position des Messgerätes im Raum etwas freier gewählt werden (Abbildung 5.2). Bei den meisten Projektionen bot sich lediglich die Positionierung des Messgerätes auf dem Boden an, am Beispiel der Projektoren 1 und 2 war dagegen auch die Positionierung auf dem Tresen der Bar möglich (Abbildung 5.3).

Die späteren Korrekturverfahren basierten auf der Basis von Messwerten der Primärfarben Rot, Grün und Blau, die Sekundärfarben Cyan, Magenta und Gelb sowie Weiß. Dementsprechend waren je Projektor sieben Messungen nötig. Über die „Geometry Manager Pro“ Software ließen sich die Testbilder nacheinander durchschalten. Dabei fiel die Wahl auf sieben Vollbilder in den jeweiligen Farben, da ein Testbild mit Farbbalken eine Abweichung vom gewählten Messpunkt zur Folge gehabt hätte. Für jede Farbe und jeden Projektor wurden Leuchtdichte, die Farbkoordinaten  $x$  und  $y$  und die Farbtemperatur aufgezeichnet. Ziel dabei war es, die Spanne zwischen dem hellsten und dem dunkelsten Projektor zu ermitteln und einen Überblick über die jeweiligen Farbräume zu gewinnen. Anhand dieser Ergebnisse sollte dann das weitere Vorgehen festgemacht werden.



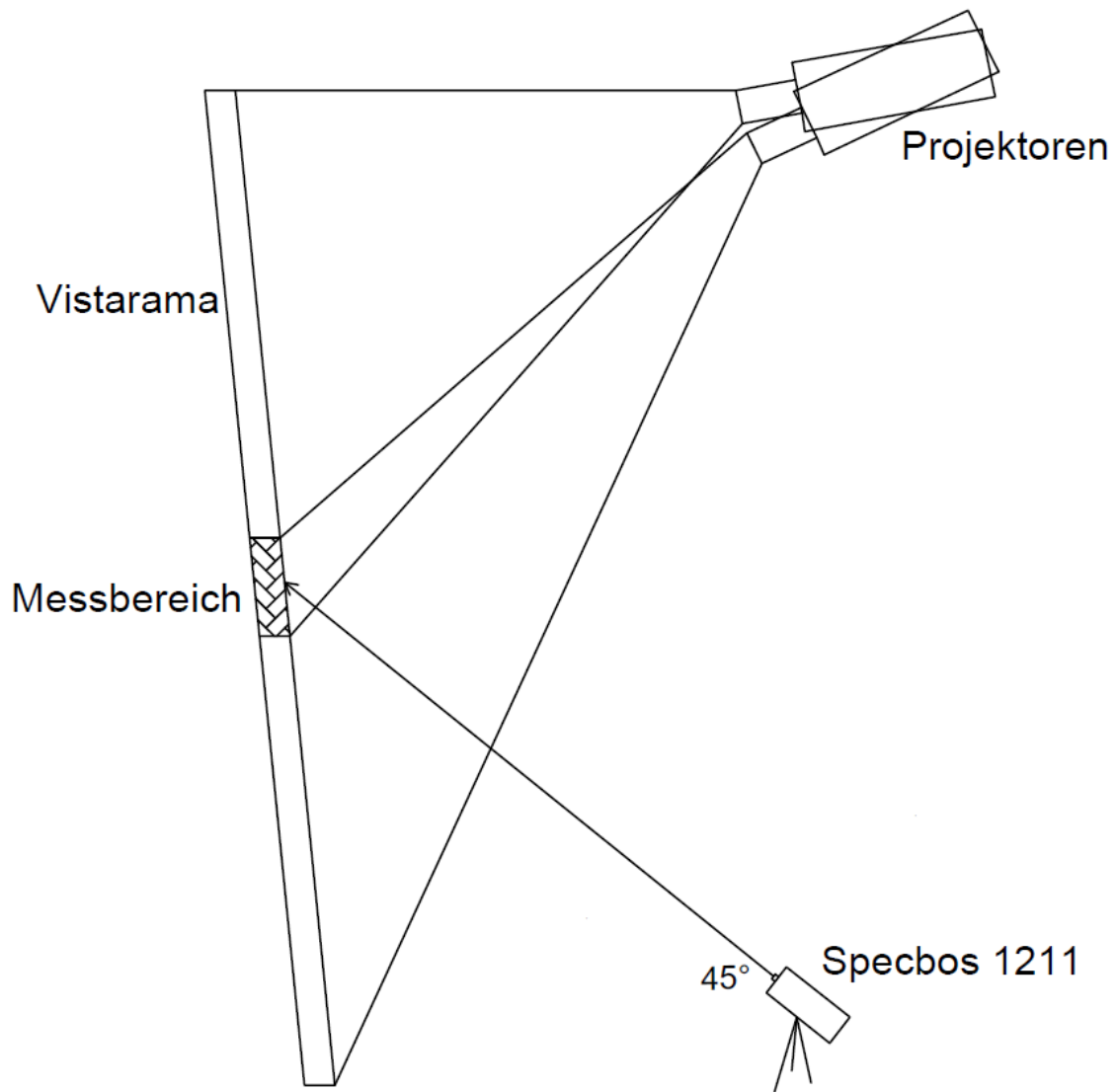


Abbildung 5.1: Skizze des Messaufbaus

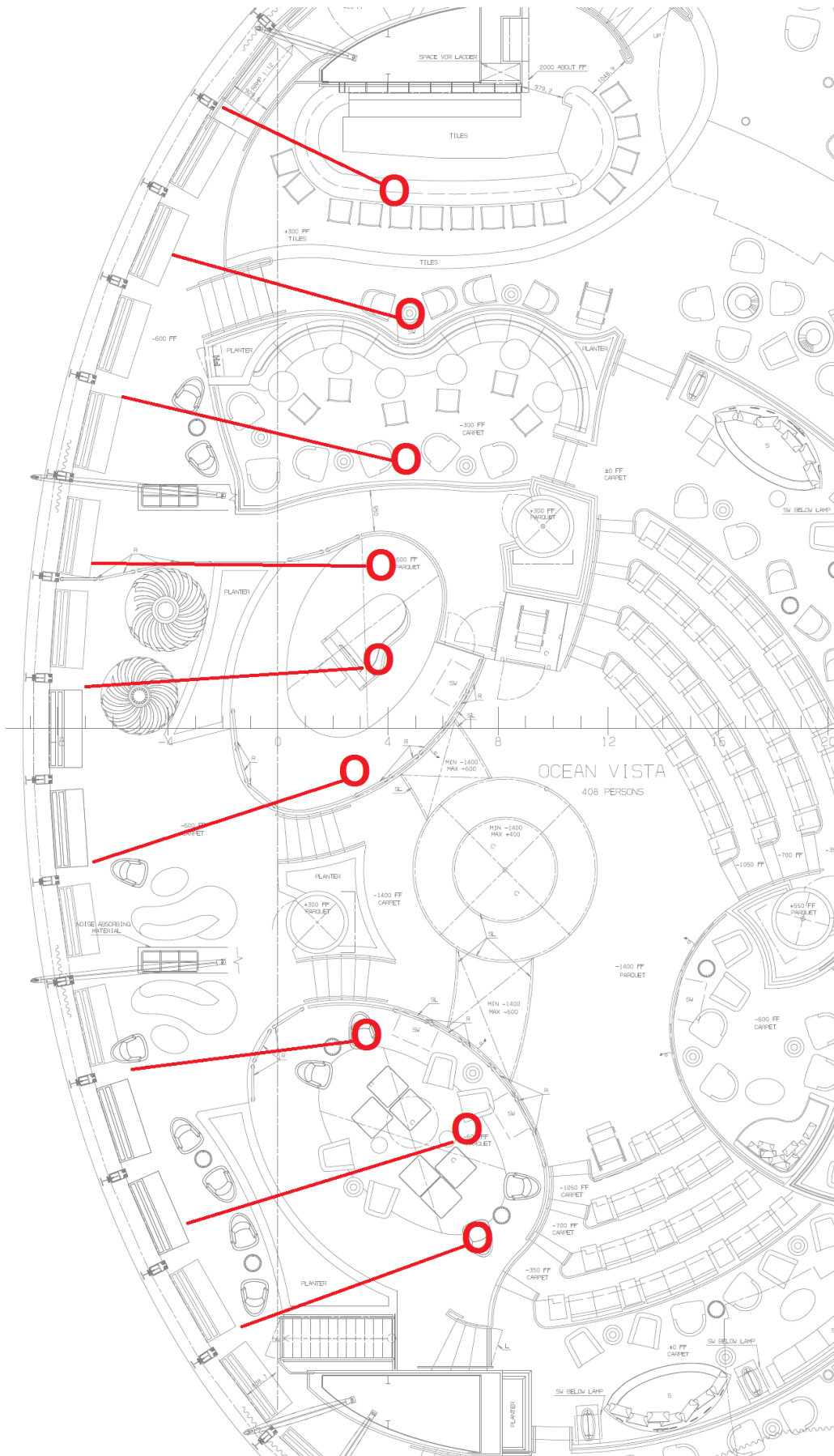


Abbildung 5.2: Messpositionen im Two70° Grundriss

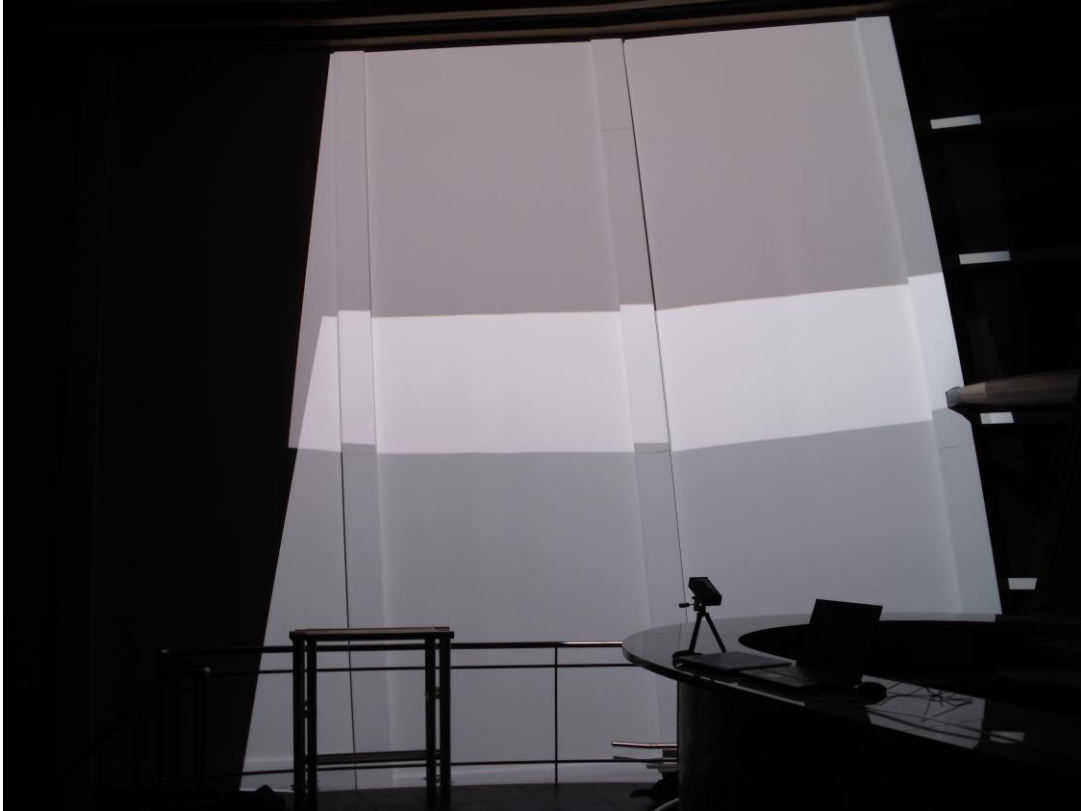


Abbildung 5.3: Foto des Messaufbaus – Projektoren 1 und 2

## 5.2 Messergebnisse Leuchtdichte

Die Ergebnisse der Leuchtdichtemessung (Abbildung 5.4) zeigten die großen Unterschiede zwischen den 18 Projektoren auf. Es fiel auf, dass die mittleren und äußeren Projektionen deutlich heller waren, als die Projektoren in den Zwischenräumen. Das deckte sich mit dem subjektiven Eindruck und den Vermutungen, die Architektur würde die Helligkeiten stark beeinflussen. Setzt man die Ergebnisse ins Verhältnis mit der jeweiligen Entfernung der Projektoren zur Projektionsfläche, ist eine gewisse Abhängigkeit von einander zu erkennen. Dass es dabei zu keinen belegbaren Unterschieden zwischen der eigentlich näheren oberen Reihe und der weiter entfernten unteren Reihe kam, erklärte sich aufgrund der gewählten Messpunkte im Übergangsbereich. Auffällig waren allerdings die starken Abweichungen einzelner Projektoren vom Erwartungswert. Für den außen positionierten Projektor 18 wäre beispielsweise ein Wert in ähnlichen Regionen wie die Projektoren 16 oder 17 zu erwarten gewesen. Stattdessen stellte sich dieser sogar als der insgesamt dunkelste Projektor dar.

Das weiße Bild als Referenz genommen, ergab sich eine Differenz zwischen hellstem Weiß ( $132,6 \text{ cd/m}^2$ , Projektor 10) und dunkelstem Weiß ( $97,0 \text{ cd/m}^2$ , Projektor 18) von  $35,6 \text{ cd/m}^2$ . Das entsprach einer Abweichung von 26,85%.

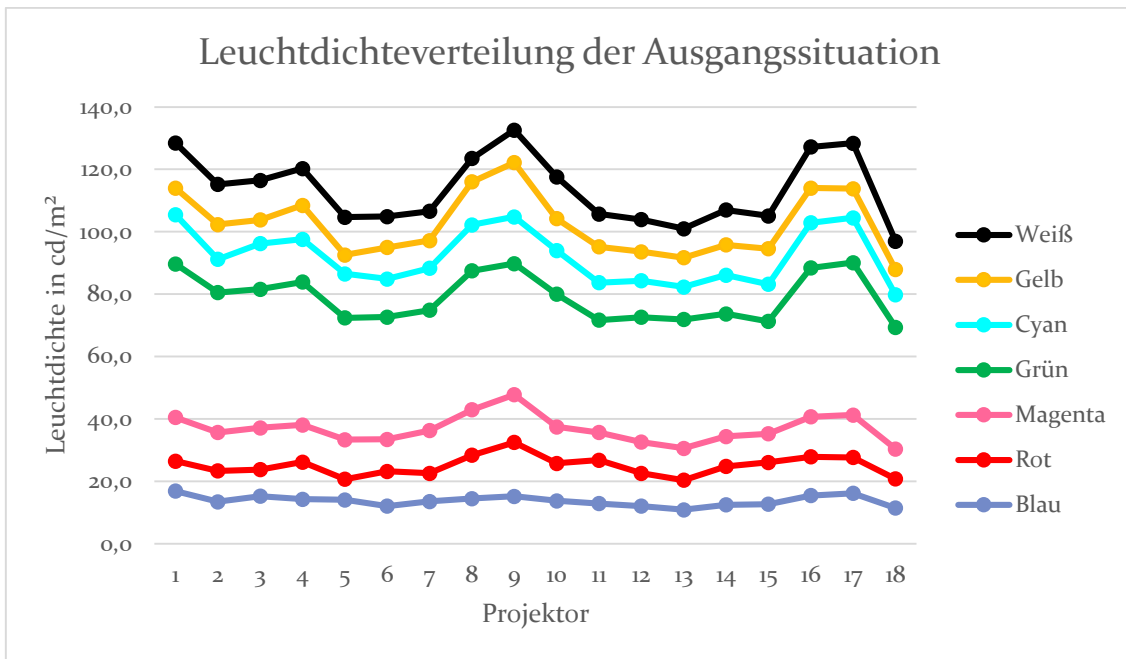


Abbildung 5.4: Leuchtdichteverteilung Ausgangssituation

### 5.3 Messergebnisse Farbwerte

Die unterschiedlichen Farbräume der einzelnen Projektoren waren im CIE-xy-Diagramm (Abbildung 5.5) klar zu erkennen. Zur Darstellung der wahrgenommenen Farbdifferenzen eignete sich besser das  $u'v'$ -Diagramm (Abbildung 5.6). Die Farben Grün, Gelb und Cyan sowie Weiß lagen bereits recht eng beieinander. Auch wenn die Unterschiede noch deutlich sichtbar waren, sollte eine Anpassung der Farben hier kein großes Problem darstellen. Besonders große Abweichungen gab es im Blau und Magenta. Hier lagen die xy-Koordinaten zwar recht eng zusammen, im  $u'v'$ -Diagramm entstand aber eine große Streuung. Hier musste besonders präzise korrigiert werden.

Die Farbkoordinaten für Magenta lagen zwischen  $x = 0,2834$ ;  $y = 0,1586$  und  $x = 0,3095$ ;  $y = 0,1710$ . Die Differenz zwischen niedrigstem und höchstem Wert lag also für  $x$  bei  $0,0261$  und für  $y$  bei  $0,0124$ . Im Vergleich dazu lagen die Extrempunkte bei Weiß bei  $x = 0,3097$ ;  $y = 0,3253$  und  $x = 0,3198$ ;  $y = 0,3344$ . Das entsprach einer Differenz von nur  $0,0101$  für  $x$  und  $0,0091$  für  $y$ .

Betrachtete man ein vollweißes Bild auf allen Projektoren, ließen sich sehr deutliche farbliche Unterschiede erkennen (Abbildung 5.8), welche aber gleichzeitig auch auf die erheblichen Helligkeitsunterschiede zurückzuführen waren. Vor allem die Projektoren 7 und 11 zentral in der unteren Reihe (vgl. Abbildung 2.4) und der Projektor 18 außen in der oberen Reihe fielen durch ein sichtbar dunkleres Bild auf. Farblich lagen die Projektoren 3 und 15 besonders weit auseinander (Abbildung 5.7).

Im Vergleich dazu ließ sich beim Beispielbild (Abbildung 5.9) erkennen, dass vor allem bei blauem Content, dem Himmel und dem Meer, die farblichen Differenzen auffielen. Bei besonders hellen Stellen im Bild, wie den Häusern in der Mitte, fielen stattdessen die Helligkeitsunterschiede stark ins Gewicht.

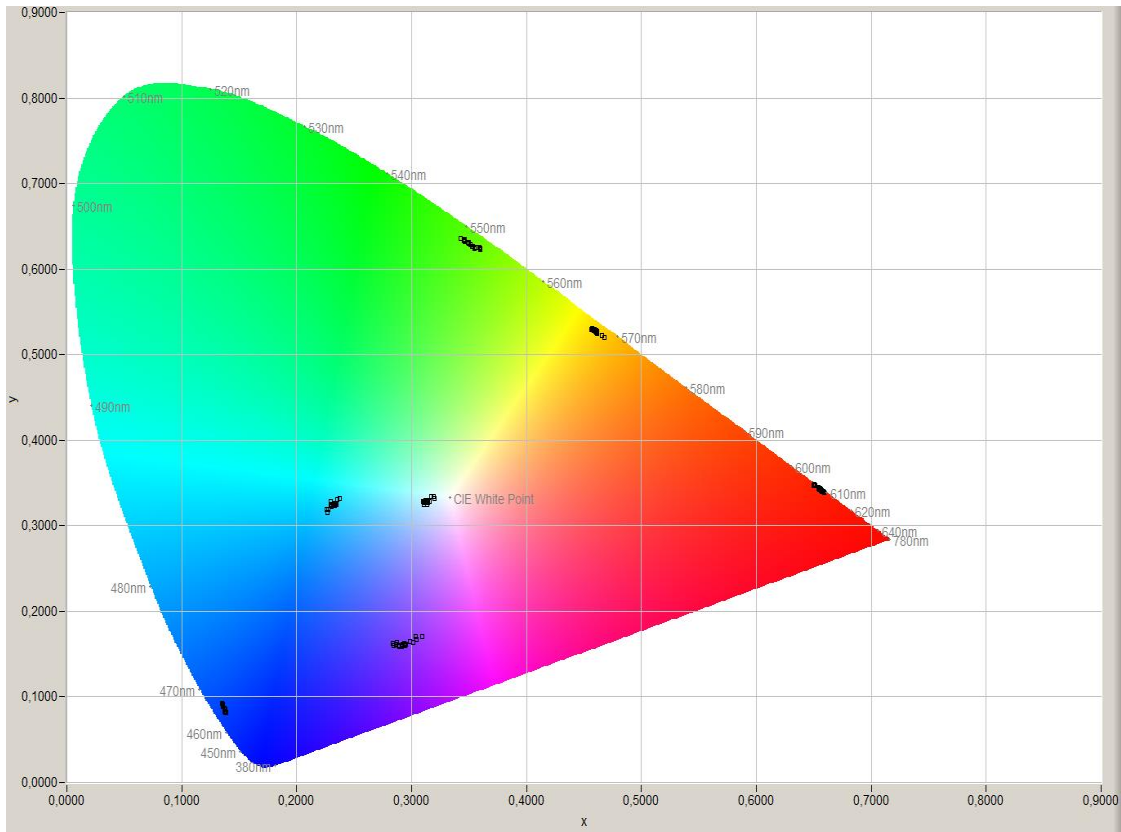


Abbildung 5.5: CIE-xy-Diagramm aller 18 Projektoren - Ausgangssituation

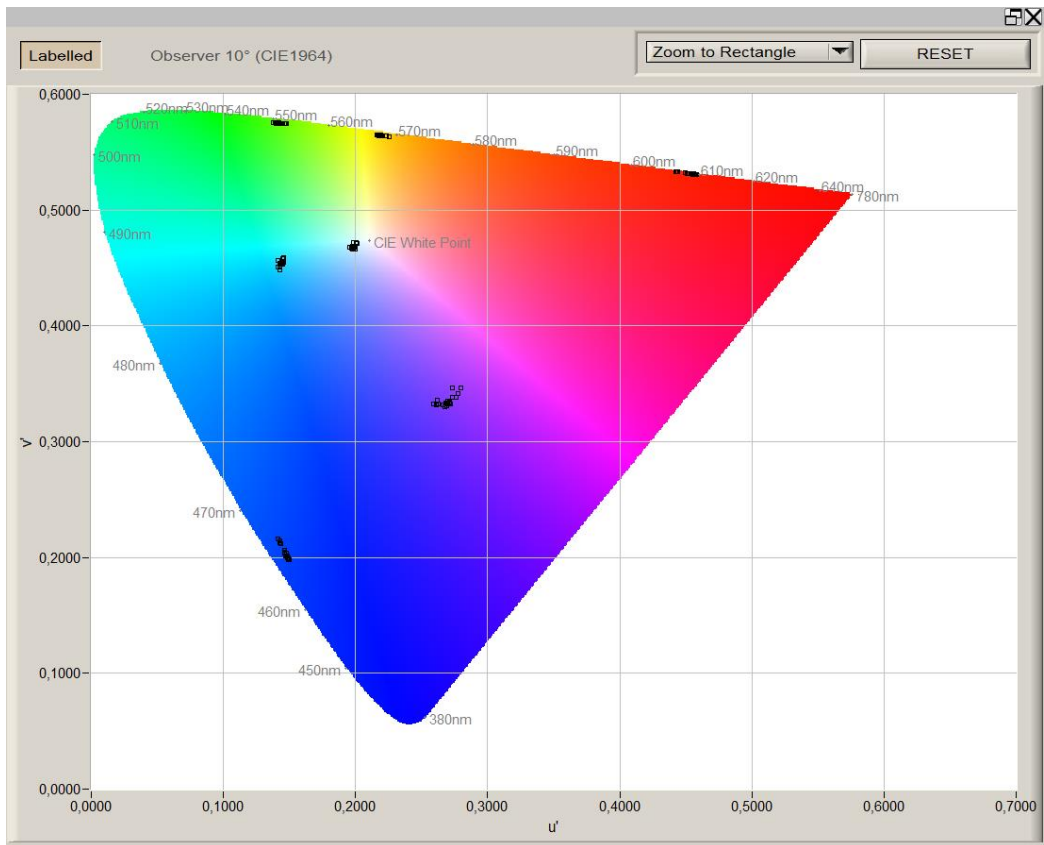


Abbildung 5.6: CIE-u'v'-Diagramm aller 18 Projektoren – Ausgangssituation

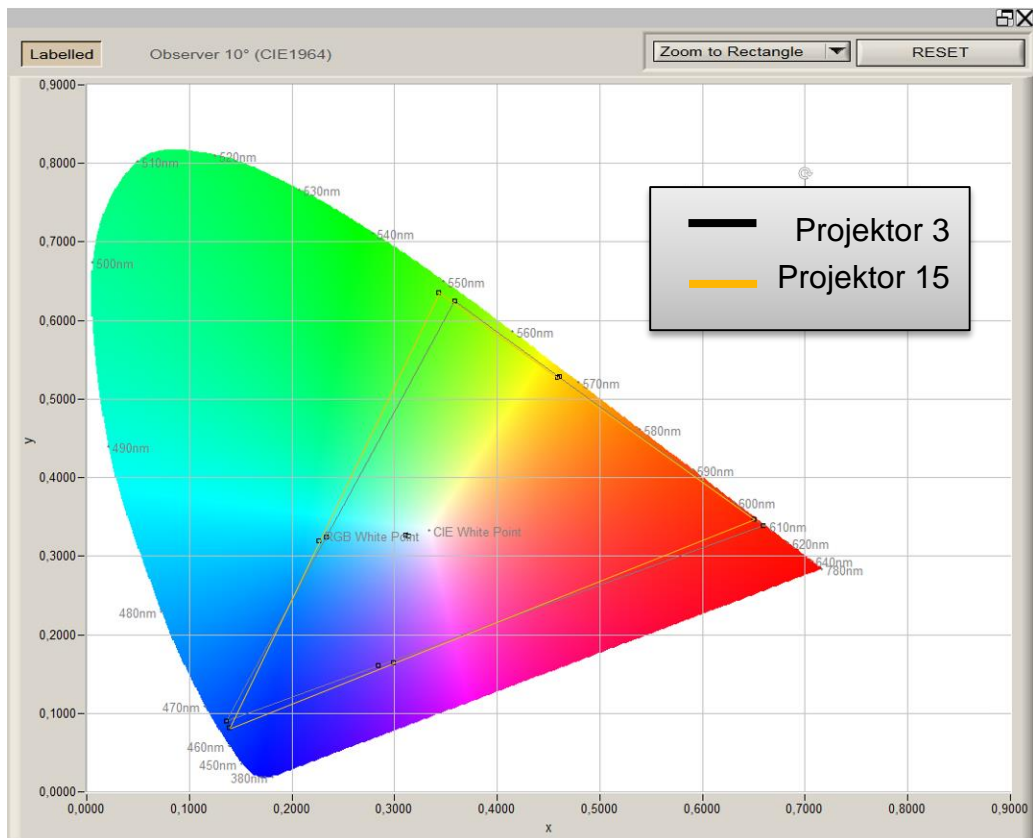


Abbildung 5.7: Farbgamut Projektoren 3 und 15



*Abbildung 5.8: Weißer Content - Ausgangssituation*



*Abbildung 5.9: Beispielbild - Ausgangssituation*

#### **5.4 Wahl des Korrekturverfahrens**

Spätestens nach der Auswertung der Ausgangsmessungen war klar, dass eine einfache Korrektur der Farben über RGB-Werte nicht zum Erfolg führen würde. Diese würde nur die Eckpunkte des Gamut korrigieren. Die größten Abweichungen lagen in den Sekundärfarben. Vor daher wäre der 7 Colors Mode naheliegender gewesen. Wo die Messwerte allerdings schon Ergebnisse für Leuchtdichte und Farbkoordinaten angaben, bot sich der Measurement Mode noch eher an, der genau diese Werte verarbeitet. In wie weit dieser auch hält was er verspricht, musste sich noch zeigen. Zur genaueren Analyse wurde der Measurement Mode für die Farbkorrektur gewählt.

## 6 Farbkalibrierung

### 6.1 Erste Korrektur

#### 6.1.1 Vorüberlegungen/Durchführung

Ziel dieses Korrekturverfahrens sollte sein, einen einheitlichen Farbraum mit einheitlichen Helligkeiten für alle 18 Projektoren zu erreichen. Dafür mussten Zielwerte definiert werden, die von allen Projektoren auch erreichbar waren.

Im Falle der unterschiedlichen Leuchtdichten galt es, alle Werte auf die Leuchtdichte des schwächsten Projektors abzusenken. Dabei war zu beachten, dass die Messwerte in einem Bereich zwischen 10,9 cd/m<sup>2</sup> (Blau) und 132,6 cd/m<sup>2</sup> (Weiß) lagen, in den Projektoren aber ausschließlich einheitslose, relative Werte von 0 bis 65536 eingetragen werden konnten. Die Messwerte mussten also auf diesen Bereich umgerechnet werden.

Um sowohl sehr dunkle als auch sehr helle Messwerte verarbeiten und zum selben Zielwert verschieben zu können, wurde der Zielwert der Leuchtdichte für Weiß auf etwa  $Y = 32000$  (50%) festgelegt. So könnte selbst für einen um 100% zu hellen Projektor die gemessene Leuchtdichte in einem Bereich von 0 bis 65536 angegeben werden. Wichtiger aber war, dass am Ende die Verhältnisse untereinander stimmten.

Die letztendlichen Zielwerte berechneten sich aus der Multiplikation der jeweils geringsten gemessenen Leuchtdichte mit dem Faktor 320 (Tabelle 7). Der Faktor wurde so gewählt, dass die Leuchtdichte eines weißen Bildes von 100 cd/m<sup>2</sup> den Richtwert von  $Y = 32000$  erzielen würde. Damit wäre sowohl genügend Spielraum für eine Korrektur nach oben wie nach unten. Beispielsweise betrug der niedrigste Messwert bei Weiß 97,0 cd/m<sup>2</sup> (Projektor 18). Damit errechnete sich ein Zielwert von  $Y = 31040$ , der für alle Projektoren zum Zielwert wurde. Davon ausgehend errechneten sich folgende Zielwerte für die Leuchtdichtekorrektur aus den jeweils niedrigsten Messwerten der anderen Farben:

Tabelle 7: Zielwerte der Leuchtdichtekorrektur

	min. Y in cd/m <sup>2</sup>	Zielwert
<b>Weiß</b>	97,0	31040
<b>Rot</b>	20,4	6528
<b>Grün</b>	69,4	22208
<b>Blau</b>	10,9	3488
<b>Cyan</b>	79,8	25536
<b>Magenta</b>	30,4	9728
<b>Gelb</b>	87,9	28128



Zur Bestimmung der Farbkoordinaten galt es, zunächst den „schwächsten Wert“ zu definieren. Jeder Farbwert ist ein Punkt in einem zweidimensionalen Raum. Die Farbwerte galt es so zu verschieben, dass alle Werte optimalerweise im selben Punkt liegen. Dabei musste der Zielwert so gewählt werden, dass sich alle gemessenen Farbwerte auch in dessen Richtung verschieben ließen. Es war davon auszugehen, dass die aktuellen Farbwerte bereits der vollausgesteuerten Sättigung entsprachen, sich also maximal möglich vom Weißpunkt entfernt befanden. Jegliche Korrekturen konnten also ausschließlich durch Entsättigung in Richtung des Weißpunkts passieren. Die Zielkoordinaten von Rot, Grün und Blau bildeten dann den neuen Farbgamut (Abbildung 6.1). Mit Hilfe des CIE-Diagramms kann dieser veranschaulicht werden. Es bildet sich ein Dreieck aus den Messwerten, die dem Weißpunkt am nächsten liegen.

Die Software JETI LiVal bietet, neben diversen Wegen zur Visualisierung, auch die Möglichkeit, direkt im CIE-xy-Diagramm den passenden Punkt auszuwählen. Klickt man in das Diagramm, springt das Fadenkreuz anschließend auf den nächstgelegenen Messwert. Klickt man beispielsweise in den Bereich zwischen Weiß und Grün, springt das Fadenkreuz auf den Messwert für Grün, der dem Weißpunkt am nächsten liegt. Auf diese Weise war es möglich, aus der großen Anzahl von Messwerten die jeweiligen schwächsten Werte als Zielkoordinaten für Rot, Grün und Blau zu ermitteln.

Bei den Farbwerten der Sekundärfarben konnte ähnlich vorgegangen werden, auch wenn eine Entsättigung allein hier nicht viel bewegen würde. Vielmehr bewegte sich die Streuung der Messwerte auf dem Rand des Gamut zwischen den zwei jeweiligen Mischfarben und musste durch eine Korrektur in Richtung einer der beiden Mischfarben aneinander angeglichen werden. Hierzu wurde ein Messwert als Zielwert festgelegt, an den sich dann alle anderen anpassen sollten. In diesem Fall entsprachen die gewählten Zielkoordinaten für Cyan, Magenta und Gelb ebenfalls den jeweils dem Weißpunkt am nächsten liegenden Messwerten.

Zur Bestimmung des Weißpunktes konnte sich auf eine Farbtemperatur festgelegt oder ein Messwert als Referenz genommen und zum Zielwert gemacht werden. In diesem Fall wurde der Messwert mit der geringsten Abweichung zum „CIE White Point“ mit der gewünschten Farbtemperatur von 6500 K als Zielwert ausgewählt. Dieser entsprach den Koordinaten  $x = 0,320$  und  $y = 0,332$  und einer Farbtemperatur von 6338 K. Folgende Zielwerte ergaben sich für die Farbkoordinaten  $x$  und  $y$ :

Tabelle 8: Zielwerte der Farbkoordinaten

	x	y
<b>Weiß</b>	0,32	0,332
<b>Rot</b>	0,65	0,348
<b>Grün</b>	0,36	0,622
<b>Blau</b>	0,135	0,092
<b>Cyan</b>	0,237	0,333
<b>Magenta</b>	0,304	0,171
<b>Gelb</b>	0,457	0,53

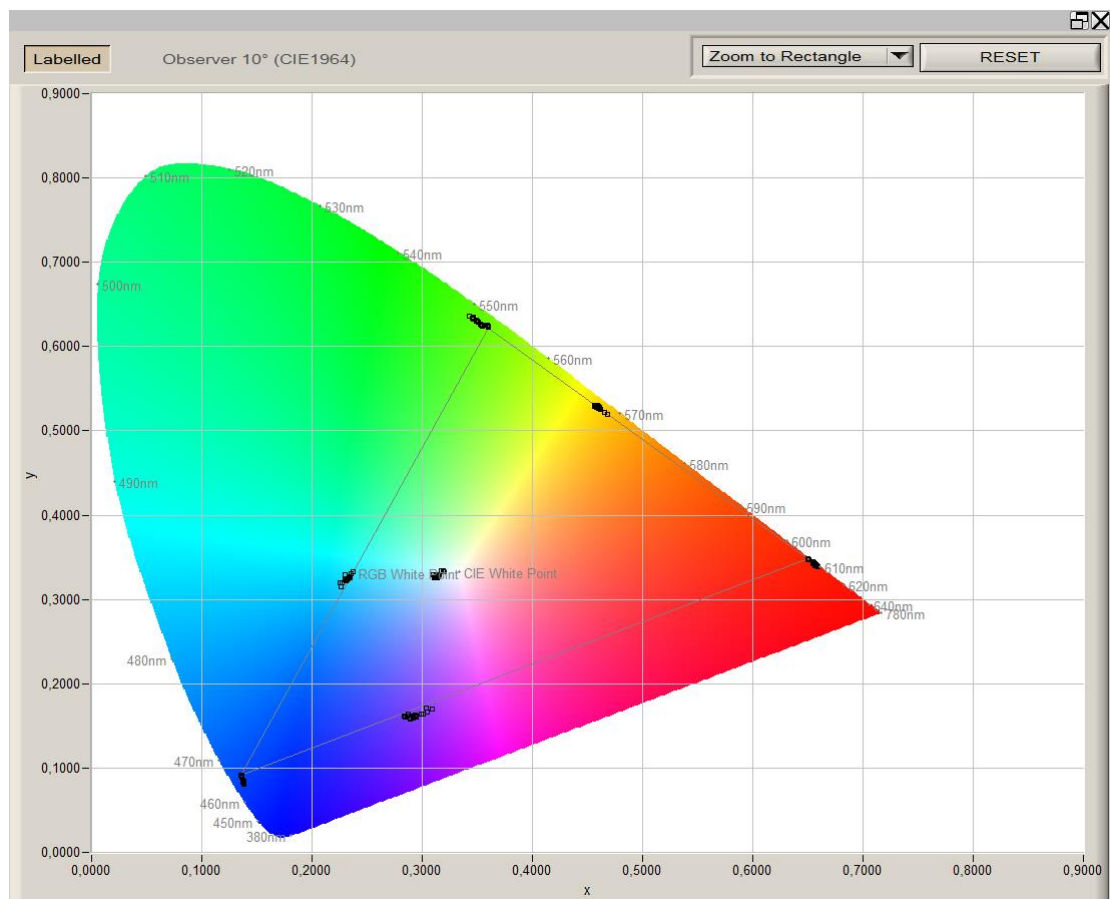


Abbildung 6.1: CIE-xy-Diagramm mit Ziel-Farbgamut

## 6.1.2 Ergebnis

Das erhoffte Ergebnis einer gleichmäßigen Leuchtdichteverteilung und eines einheitlichen Farbraums wurde durch die Korrektur nicht erreicht. Es ließ sich an vielen Werten eine Korrektur in Richtung der Zielwerte erkennen, jedoch gab es in der Leuchtdichte starke Ausreißer nach oben und nach unten (Abbildung 6.2). Die Leuchtdichte bei weißem Bild pendelte sich zwar rund um den Zielwert von  $97 \text{ cd/m}^2$  ein, Projektor 10 z. B. zeigte aber weiterhin eine erhöhte Leuchtdichte von  $113,3 \text{ cd/m}^2$ , während sich die Leuchtdichte von Projektor 7 mit  $75,9 \text{ cd/m}^2$  auf einen viel zu niedrigen Wert reduziert hatte. Es war dabei zu beobachten, dass die Abweichungen innerhalb eines Projektors über alle Farben gleich waren. So ragten bei Projektor 10 die Leuchtdichten aller Farben über den Zielwert hinaus, bei Projektor 7 unterschritten sie diesen allesamt.

Gleichzeitig war aber auch zu beobachten, dass 13 der 18 Projektoren einen Wert zwischen  $91,0 \text{ cd/m}^2$  (Projektor 17) und  $100,4 \text{ cd/m}^2$  (Projektor 9) erreichten und damit im Bereich des Zielwertes lagen.

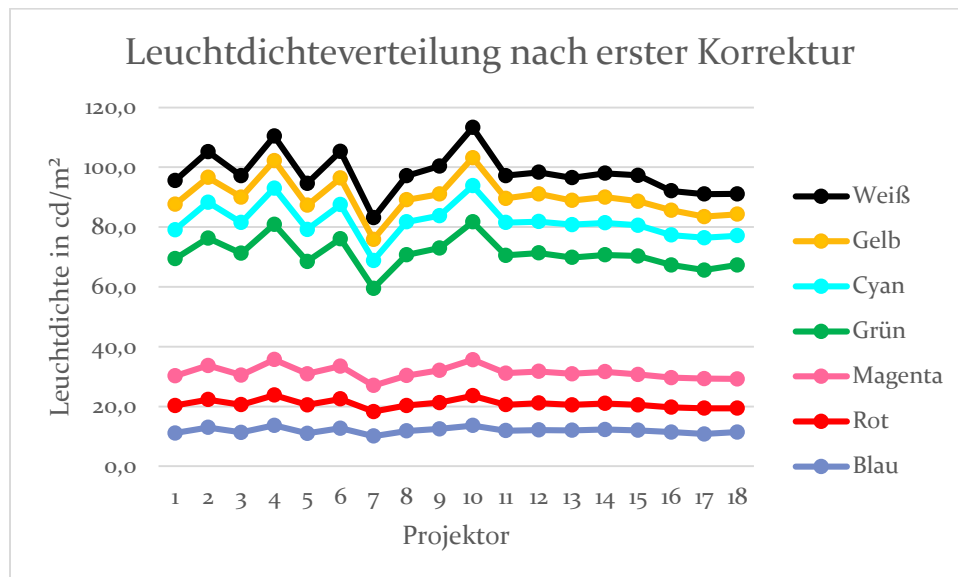


Abbildung 6.2: Leuchtdichteverteilung nach erster Korrektur

Bezüglich der Farbkorrektur ließ sich anhand des xy-Diagramms (Abbildung 6.3) ein positiver Effekt feststellen. Es war eine deutlich geringere Streuung zu erkennen. Stattdessen konzentrierten sich die Farbkoordinaten tatsächlich auf die gewünschten Eckpunkte des Ziel-Farbgamuts.

Einzig im Blau, Cyan und Magenta waren weiterhin Streuungen zu erkennen. Noch deutlicher wurde dies bei Betrachtung des  $u'v'$ -Diagramms (Abbildung 6.4). Die ohnehin schon geringen Abweichungen im Rot, Gelb und Grün würden vom Betrachter noch weniger wahrgenommen. Dafür fielen die Unterschiede im Magenta und vor allem im Blau noch deutlich auf. Auch bei Betrachtung des größtenteils blauen Beispielbildes (Abbildung 6.12) waren die Farbdifferenzen weiterhin deutlich wahrnehmbar.

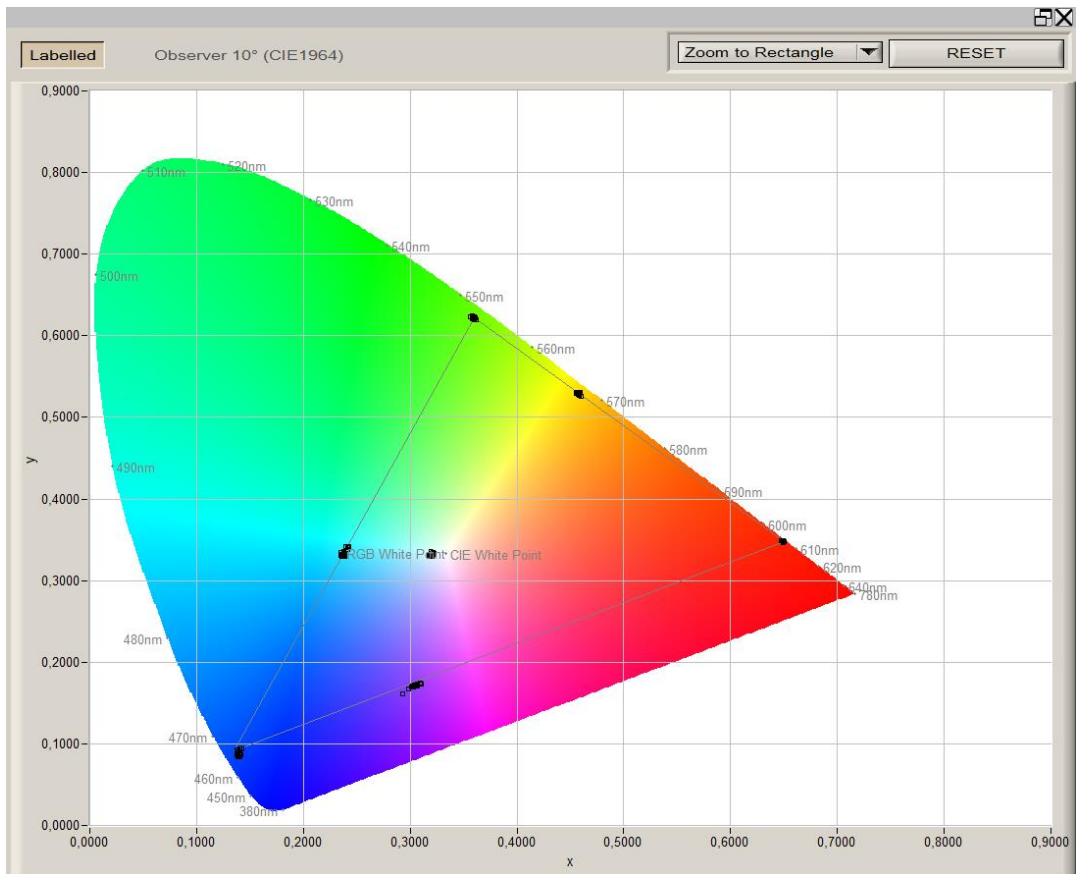


Abbildung 6.3: CIE-xy-Diagramm aller 18 Projektoren nach erster Korrektur

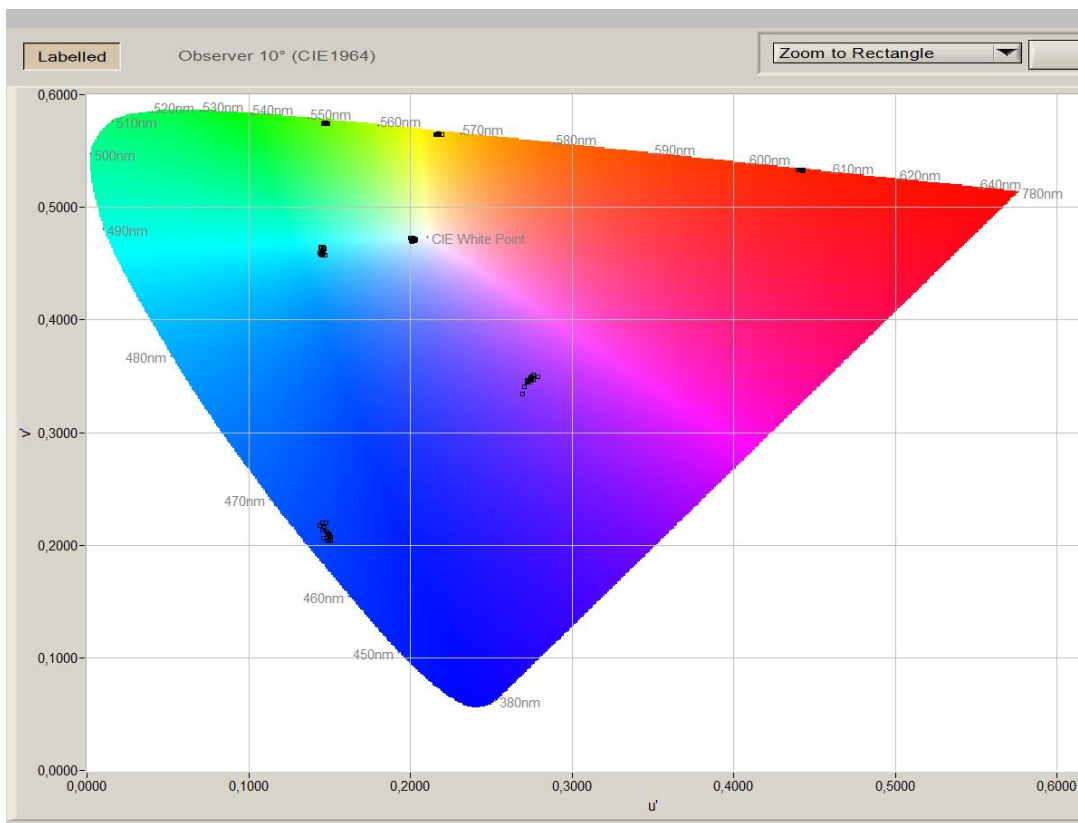


Abbildung 6.4: CIE-u'v'-Diagramm aller 18 Projektoren nach erster Korrektur

## 6.2 Zweite Korrektur

### 6.2.1 Vorüberlegungen/Durchführung

Eine erneute Eingabe von Messwerten und Zielwerten zur Farbkorrektur wäre wünschenswert gewesen, war aber nicht möglich. Die neuen Messwerte, die auf der ersten Korrektur basierten, hätten bei der Eingabe in die Farbkorrektur die alten Werte überschrieben anstatt auf denen aufzubauen. Um die Farbkorrektur dennoch durch weitere Schritte zu optimieren, mussten die Zielwerte jedes einzelnen Projektors individuell verändert werden. Es schien so, dass die Angabe von einheitlichen Zielwerten die Projektoren trotzdem in unterschiedliche Farbräume verschoben hatte. Eine Gegenüberstellung der vorgesehenen Korrektur mit der tatsächlichen Korrektur zeigte, mit welcher Effizienz die Korrektur arbeitete und wie der Zielwert korrigiert werden musste.

Im Beispiel des Projektors 17 ergab die Messung nach der Korrektur eine Leuchtdichte von 91 cd/m<sup>2</sup>, die Korrektur war zu stark. Um die Ziel-Leuchtdichte von 97 cd/m<sup>2</sup> zu erreichen, sollte der Zielwert auf 102 cd/m<sup>2</sup> angehoben werden (Tabelle 9). Die Koordinaten x und y dagegen, wurden vom Projektor nicht weit genug korrigiert. Der Zielwert wurde um die fehlende Differenz angehoben, wodurch das eigentliche Ziel erreicht werden sollte.

Tabelle 9: Beispielrechnung für neuen Zielwert - Projektor 17

	Y in cd/m <sup>2</sup>	Y * 320	x	y
<b>Ausgangswert</b>	128,4	41088	0,313	0,329
<b>Zielwert</b>	97,0	31040	0,320	0,332
<b>Messung nach 1. Korrektur</b>	91,0	29120	0,318	0,331
<b>Neuer Zielwert</b>	102,0	32652	0,322	0,333

### 6.2.2 Ergebnis

Bezüglich der Leuchtdichteverteilung ließen sich sichtbare Veränderungen, jedoch kaum Verbesserungen feststellen (Abbildung 6.5). Weiterhin gab es starke Ausreißer nach oben wie unten. Auffällig war dabei, dass auch Projektoren mit deutlich veränderten Messwerten dabei waren, deren Zielwerte gar nicht großartig verändert wurden. Projektor 14 fiel dabei besonders stark auf. Dessen Leuchtdichte bei weißem Bild lag nach der ersten Korrektur bei 98 cd/m<sup>2</sup> und damit weniger als 1% über dem angepeilten Zielwert. Dementsprechend wurden die Zielwerte nur geringfügig korrigiert, resultierten nun aber in Werten, die mit bspw. 115,5 cd/m<sup>2</sup> noch größer als die Ausgangswerte waren.

Ein möglicher Grund für die große Abweichung könnten unterschiedlich starke Lampen gewesen sein. Die Messungen nach der zweiten Korrektur fanden in der darauffolgenden Nacht statt. Da die Projektoren tagsüber ausgeschaltet waren, wurde bei Wiedereinschalten am

Abend eine andere Kombination von Lampen verwendet (vgl. Lamp-Relais-Modus). Eine andere mögliche Ursache könnten Ungenauigkeiten bezüglich des Messpunktes im Bild gewesen sein. Der Projektor 14 war einer der zwei Projektoren mit der größten baubedingten Differenz von hellstem zu dunkelstem Punkt innerhalb des Bildes. Eine geringe Abweichung des Messpunktes, würde hier bereits in spürbaren Unterschieden resultieren. Eventuell reagierte der Projektor aber auch empfindlicher auf die Korrekturen, als er sollte.

Etwas besser verlief die Korrektur der Farben. Im CIE-xy-Diagramm (Abbildung 6.6) war zu erkennen, dass die Farbkoordinaten größtenteils im selben Punkt lagen. Beim Blick auf das CIE-u'v'-Diagramm (Abbildung 6.7) fiel auf, dass es weiterhin eine Streuung im Blau und im Magenta gab. Im Vergleich zur ersten Korrektur hatte sich da nicht viel getan. Ähnliches war auch bei Betrachtung des Beispielbildes zu erkennen (Abbildung 6.13). Besonders deutlich fielen die zentralen Projektoren auf, die ursprünglich zu hell waren und nun viel zu dunkel erschienen. Der Eindruck wurde durch den Vergleich mit den Messwerten bestätigt.

Eine mögliche Ursache könnte gewesen sein, dass manche Werte bereits an ihrem Limit waren und in eine bestimmte Richtung physikalisch einfach nicht weiter zu verschieben waren. Jeder Projektor hat bezüglich seiner darstellbaren Farben leicht unterschiedliche Grenzen. Ein anderer Grund könnte aber auch gewesen sein, dass die Korrektur zu zaghaft durchgeführt wurde und deshalb kaum Änderungen hervorrief.

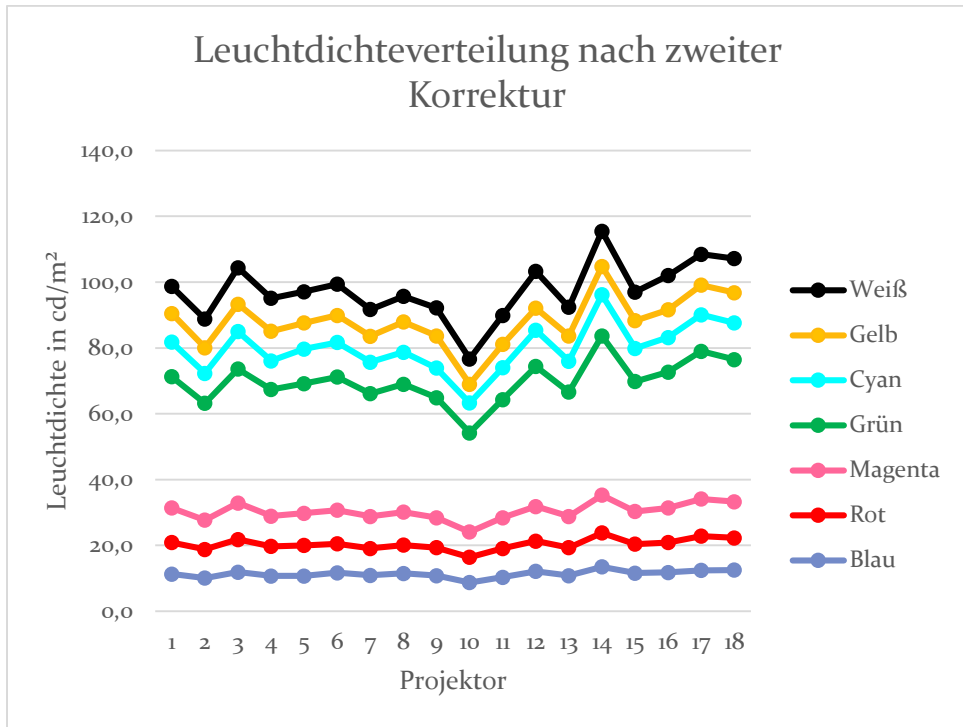


Abbildung 6.5: Leuchtdichteverteilung nach zweiter Korrektur

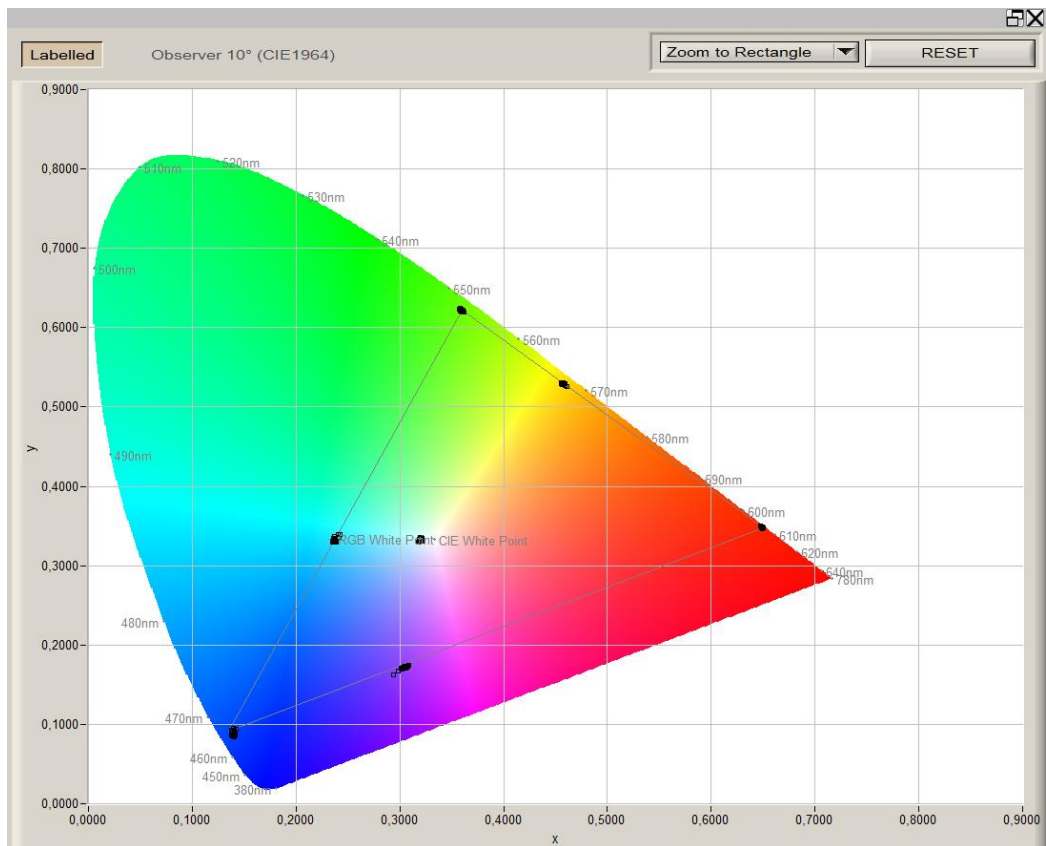


Abbildung 6.6: CIE-xy-Diagramm aller 18 Projektoren nach zweiter Korrektur

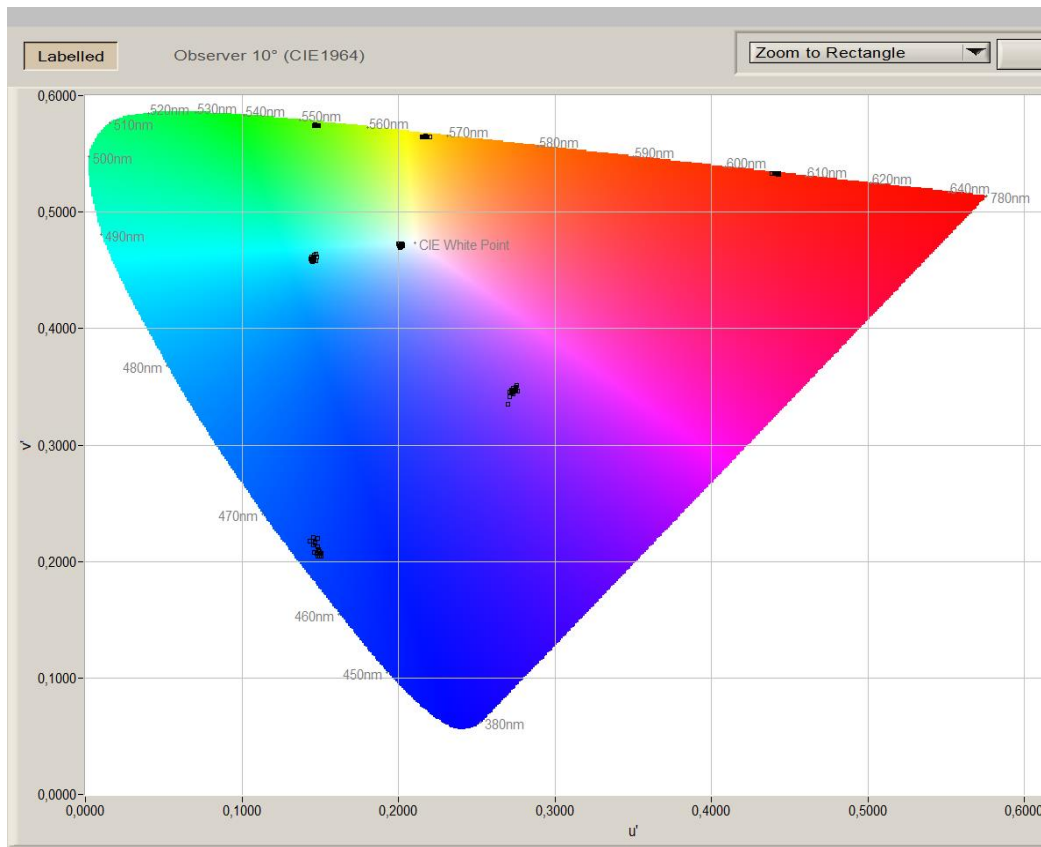


Abbildung 6.7: CIE- $u'v'$ -Diagramm aller 18 Projektoren nach zweiter Korrektur

## 6.3 Helligkeitsanpassung und finale Farbkorrektur

### 6.3.1 Vorüberlegungen/Durchführung

Um trotz der Schwierigkeiten des Korrekturverfahrens zu einem zufriedenstellenden Ergebnis zu kommen, galt es nun, losgelöst von den zu Beginn festgelegten Zielwerten, die Abweichungen zu minimieren. Zu niedrige Leuchtdichtewerte wurden so weit angehoben, dass als letzter Schritt die zu hellen Werte über die Helligkeitskorrektur „Brightness Control Gain“ (s. Kapitel 4.3.5) abgesenkt werden konnten. Die „Brightness Control“ hatte sich in den vorbereitenden Messungen als sehr präzise herausgestellt.

Zur finalen Farbkorrektur konnte sich der „Continuous Scan“ des Specbos 1211 zunutze gemacht werden, da vor allem in den Bereichen Magenta und Blau die letzte Korrektur kaum etwas bewirkt hatte. Bei diesem Verfahren misst das Messgerät kontinuierlich in einem selbst gewählten Intervall. In diesem Fall wurde ein Intervall von einer Sekunde gewählt. Nach jeder Messung aktualisierte die Software JETI LiVal die Farbkoordinaten  $x$  und  $y$  sowohl numerisch, als auch im CIE-Diagramm. Ziel war es nun, durch Ausprobieren und manuelles Korrigieren der Zielwerte direkt im Projektor die Farben bestmöglich an die Zielwerte anzunähern. Dieses Verfahren wurde nur bei ausgewählten Projektoren mit den größten Abweichungen angewandt, da es sehr zeitaufwändig war und lediglich der Feinjustierung diente.



### 6.3.2 Ergebnis

Dabei war die Beobachtung zu machen, dass manche Projektoren tatsächlich am Rande ihres nativen Farbraums waren und selbst durch starkes Übertreiben bei der Korrektur nicht weiter in Richtung des Zielwertes verschoben werden konnten. Dennoch konnten auf diese Weise die meisten Abweichungen korrigiert und die Streuung der Farborte minimiert werden (Abbildung 6.9, Abbildung 6.10).

Die Helligkeitskorrektur über die Brightness Control verlief ebenfalls erfolgreich. Die finalen Messwerte der Leuchtdichte (Abbildung 6.8) zeigten einen sehr homogenen Verlauf über die gesamte Projektion. Auch das Beispielbild machte einen sehr gleichmäßigen Eindruck und ließ auf den ersten Blick keine Übergänge erkennen (Abbildung 6.14).

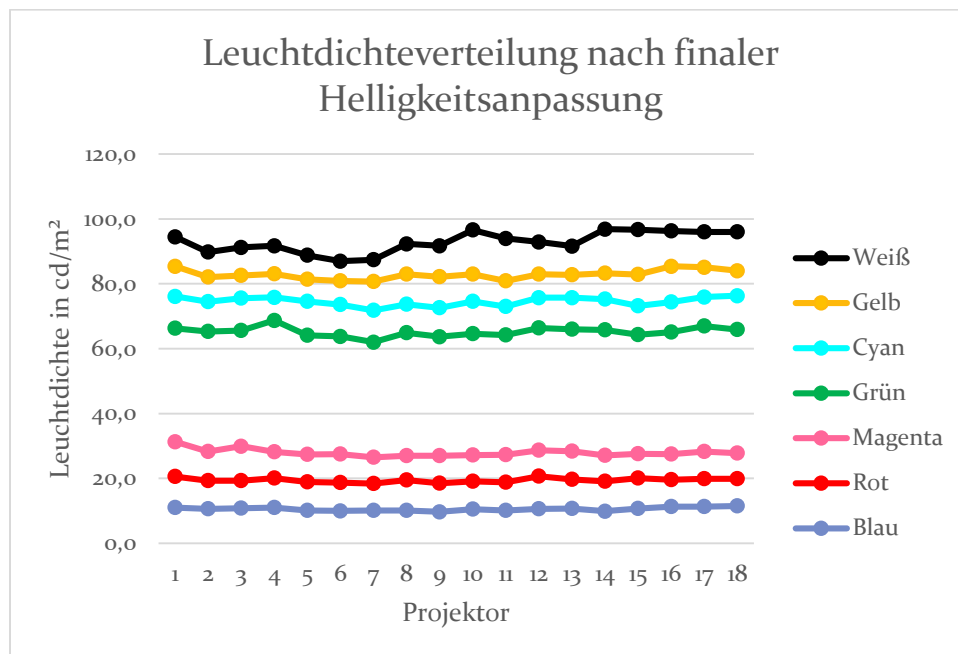


Abbildung 6.8: Leuchtdichteverteilung nach finaler Helligkeitsanpassung

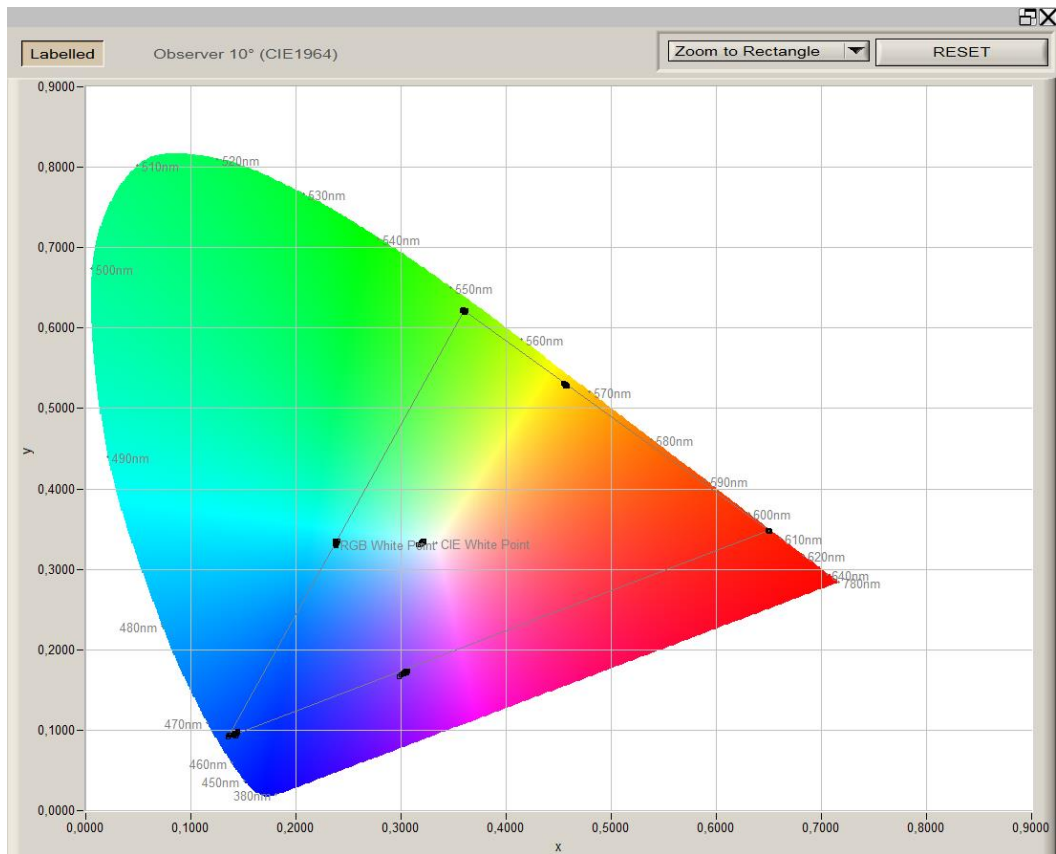


Abbildung 6.9: CIE-xy-Diagramm aller 18 Projektoren nach finaler Farbkorrektur

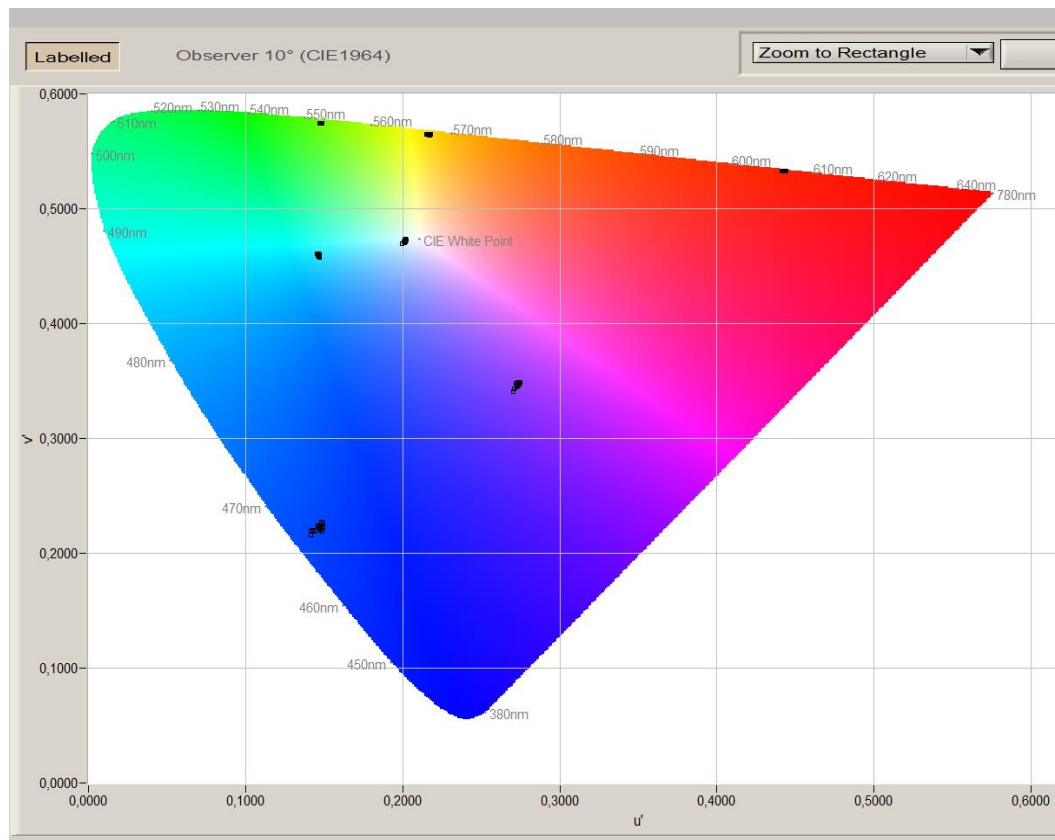


Abbildung 6.10: CIE-u'v'-Diagramm aller 18 Projektoren nach finaler Farbkorrektur



*Abbildung 6.11: Beispielbild - Ausgangssituation*



*Abbildung 6.12: Beispielbild nach erster Korrektur*



Abbildung 6.13: Beispielbild nach zweiter Korrektur



Abbildung 6.14: Beispielbild nach finaler Korrektur

## 6.4 Farbdifferenzmessung

Anhand der aufgenommenen Messwerte ließen sich für jeweils benachbarte Projektionen die Farbdifferenzen  $\Delta c$  berechnen. Um die Effektivität der gesamten Farbkalibrierung anschaulich darzustellen, ließen sich die mittleren Farbdifferenzen der Ausgangsmessungen und der abschließenden Messungen in einem Balkendiagramm (Abbildung 6.15) gegenüberstellen und mit den ermittelten Sichtbarkeitsgrenzen ins Verhältnis setzen. Das  $\Delta c$  für Magenta betrug vor der Korrektur im Schnitt 0,007, was im Vergleich zur Sichtbarkeitsschwelle 0,005 bei Magenta einer deutlich sichtbaren Farbdifferenz entsprach. Dagegen lagen die Werte für Grün bzw. Gelb im Durchschnitt bei lediglich 0,003 und damit bereits vorher unter der jeweiligen Sichtbarkeitsschwelle (vgl. Tabelle 6).

Nach der Korrektur wurden für die Farben Rot, Gelb und Grün die geringsten Farbdifferenzen gemessen. Der Wert für Grün lag beispielsweise mit  $\Delta c < 0,001$  klar im Bereich der nicht mehr sichtbaren Farbdifferenzen. Dagegen veränderte sich der Farbabstand für Blau und Cyan nur minimal und blieb damit im Falle von Cyan sogar im deutlich sichtbaren Bereich. Auch der Wert für Magenta reduzierte sich lediglich knapp unter die Sichtbarkeitsschwelle von  $\Delta c = 0,005$ .

Insgesamt muss allerdings berücksichtigt werden, dass selbst ein mittleres Ergebnis knapp unter der Sichtbarkeitsschwelle (Blau und Magenta) kein perfektes Ergebnis bedeutet. Während zwischen einigen Projektoren die Farbdifferenzen natürlich deutlich kleiner waren, gab es andere Projektoren mit dementsprechend höheren Abständen. Daraus ergaben sich im Gesamtergebnis zumindest einige sichtbare Übergänge, vor allem in den Farben, die im Mittel nah an der Sichtbarkeitsschwelle lagen. Im Boxplot-Diagramm (Abbildung 6.16) sind der Median, oberes und unteres Quartil und die Ausreißer dargestellt und zu den ermittelten Sichtbarkeitsschwellen in Bezug gesetzt. Bis auf Cyan lagen alle Farbdifferenzen der einzelnen Farben zu mindestens 50% unter der ermittelten Sichtbarkeitsschwelle. Bei Weiß, Blau und Magenta gab es allerdings Ausreißer, die diese Grenze teils deutlich überstiegen. Rot, Gelb und Grün blieben allesamt deutlich drunter. Insgesamt lagen 19,6% der gemessenen Übergänge direkt benachbarter Projektoren noch über der jeweiligen Sichtbarkeitsschwelle. Die Hälfte davon waren Farbdifferenzen der Farbe Cyan (Tabelle 10).

Tabelle 10: Verhältnis von  $\Delta c$  zu Sichtbarkeitsschwelle

	$\Delta c < \text{Sichtbarkeitsschwelle}$	$\Delta c > \text{Sichtbarkeitsschwelle}$
<b>Weiß</b>	14	2
<b>Rot</b>	16	0
<b>Grün</b>	16	0
<b>Blau</b>	12	4
<b>Cyan</b>	5	11
<b>Magenta</b>	11	5
<b>Gelb</b>	16	0
<b>Total</b>	<b>90</b>	<b>22</b>
<b>%</b>	<b>80,4%</b>	<b>19,6%</b>

Die Ergebnisse deckten sich mit den subjektiven Eindrücken und auch den festgestellten Farbstreuungen im Blau- und Cyanbereich. Die Korrektur hatte besonders im Blau, Cyan und Magenta seine Schwächen und stieß an seine physikalischen Grenzen. Dennoch waren teils deutliche Verbesserungen in allen Farben zu erkennen.

Besonders erfolgreich lief die Kalibrierung beispielsweise zwischen den Projektoren 2 und 4 (Abbildung 6.17), die ursprünglich überdurchschnittlich hohe Farbdifferenzen hatten. Nach der Korrektur der Farben betrug die Differenzen maximal  $\Delta c = 0,002$  und lagen damit allesamt bei weniger als der halben Sichtbarkeitsschwelle. Am Beispiel der Projektoren 16 und 18 (Abbildung 6.18) ist hingegen zu sehen, dass die Korrektur teilweise nicht erfolgreich war. Der Wert für Magenta verbesserte sich dort gar nicht, im Grün wurde die Farbdifferenz sogar größer.

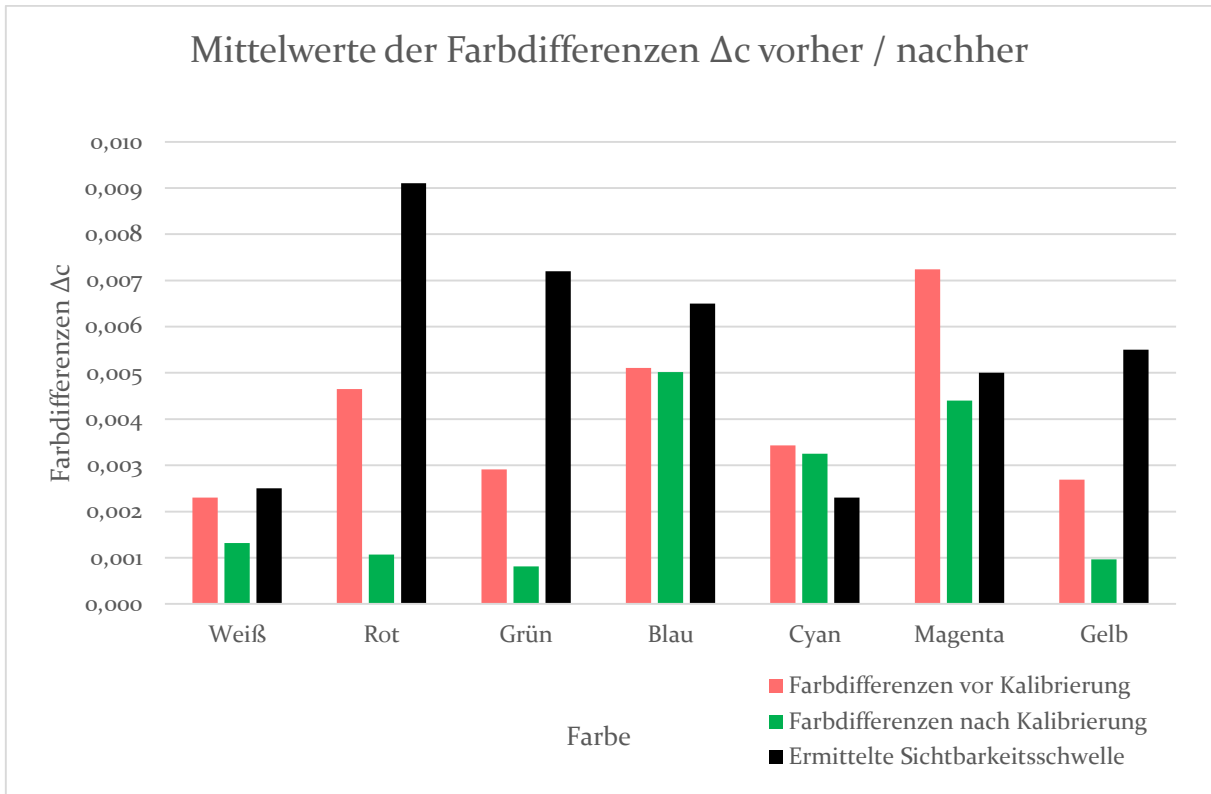


Abbildung 6.15: Mittelwerte der Farbdifferenzen  $\Delta c$  vorher / nachher

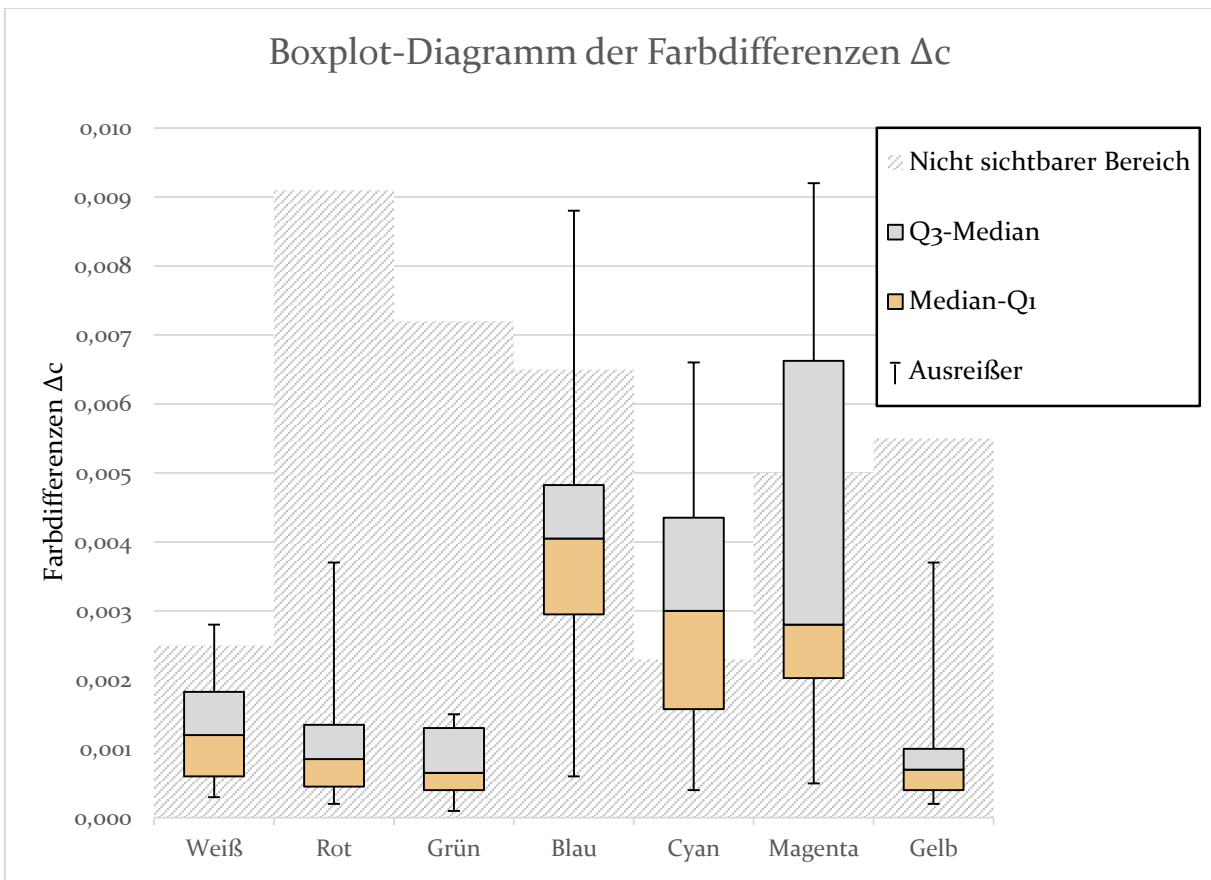


Abbildung 6.16: Boxplot-Diagramm der Farbdifferenzen  $\Delta c$

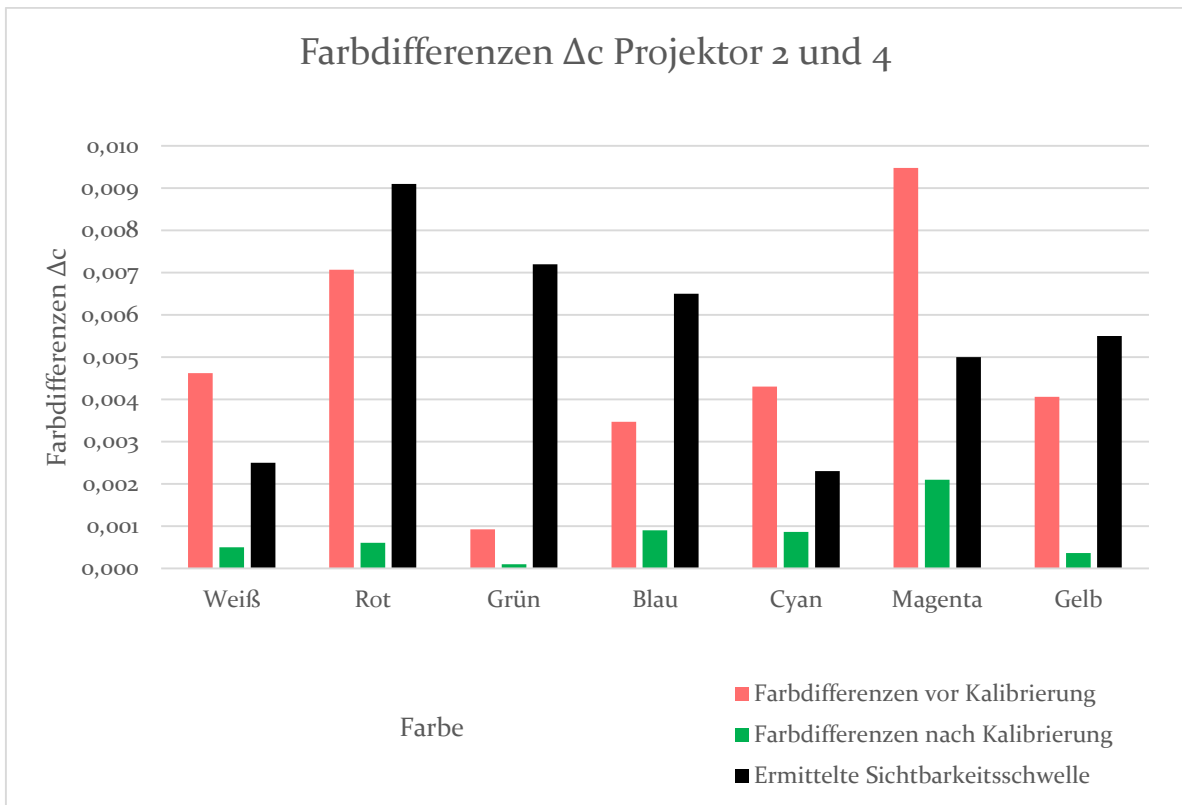


Abbildung 6.17: Farbdifferenzen  $\Delta c$  - Projektor 2 und 4

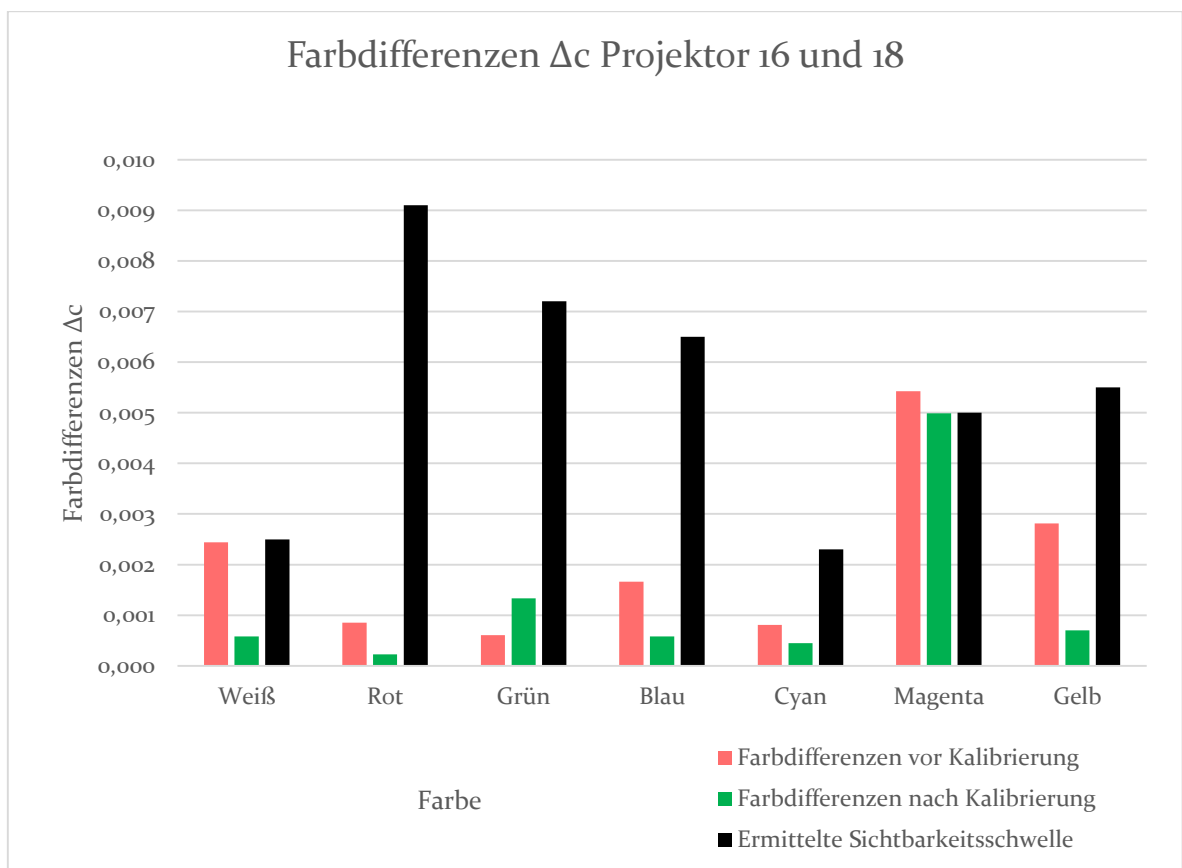


Abbildung 6.18: Farbdifferenzen  $\Delta c$  - Projektor 16 und 18



## 7 Konzeption eines zukünftigen Workflows

Anhand der gemachten Erfahrungen, liegen folgende fünf Schritte zur Farbkalibrierung von Mehrfachprojektionen nah:

### 1. Messpositionen festlegen

Bei der Kalibrierung von Mehrfachprojektionen können bereits Nuancen einen deutlich sichtbaren Unterschied ausmachen. Aus diesem Grunde ist es unabdingbar, für jeden Projektor eine feste Messposition festzulegen. Nur so kann garantiert werden, dass die Korrektur auch um die richtige Intensität durchgeführt wird. Die jeweiligen Messpunkte sollten in den Softedge-Bereichen liegen, um bei Projektoren mit Helligkeitsverläufen einen möglichst sauberen Übergang zu realisieren.

### 2. Messen der Ausgangswerte

Für jeden Projektor gilt es Messwerte für Leuchtdichte, sowie die Farbkoordinaten x, y aufzunehmen. Dabei müssen pro Projektor die Primärfarben Rot, Grün und Blau, die Sekundärfarben Cyan, Magenta und Gelb und ein vollweißes Bild durchgemessen werden. Auf die Verwendung eines Testbildes sollte verzichtet werden. Besser ist die Verwendung von sieben vollflächigen Farben.

### 3. Zielwerte bestimmen und Korrektur durchführen

Anhand der aufgenommenen Messwerte gilt es nun Zielwerte festzulegen, die von jedem Projektor erreicht werden sollen. Dabei sind für alle sieben Farben die jeweiligen Leuchtdichten untereinander zu vergleichen und der jeweils schwächste Wert als Zielwert für alle Projektoren zu bestimmen. Bei den Farbkoordinaten sollte sich an der Sättigung orientiert werden. Der dem Weißpunkt am nächsten liegende Wert wird zum Zielwert, da dieser für alle anderen Projektoren zu erreichen sein sollte. Beim Weißpunkt wiederum sollte sich an der gewünschten Farbtemperatur orientiert werden. Zur Farbkorrektur werden mit Hilfe der „Geometry Manager Pro“ Software von Panasonic für jeden Projektor Mess- und Zielwerte eingegeben. Die Projektoren sollten sich daraufhin automatisch in Richtung des Zielwertes kalibrieren.

### 4. Erneut messen und Zielwerte individuell anpassen

Inwieweit die Farbkorrektur erfolgreich war, muss durch eine erneute Aufnahme aller Messwerte geprüft werden. Eventuelle Abweichungen können durch individuelles Anpassen der Zielwerte ausgeglichen werden. Dabei dürfen die eingegebenen Messwerte nicht verändert werden. Die Projektoren sollten sich daraufhin weiter aneinander annähern.

## 5. Helligkeitsanpassung und finale Farbkorrektur

Ein drittes Mal müssen die Messwerte aller Projektoren aufgenommen werden. Eventuell zu niedrige Leuchtdichtewerte sollten durch erneutes Anheben der Zielleuchtdichte korrigiert werden. Zu helle Projektoren sollten danach über die „Brightness Control“ heruntergeregelt werden.

Zur finalen Farbkorrektur ist im Specbos 1211 der „Continuous Scan“ einzustellen. Mit Hilfe des Feedbacks kontinuierlicher Messungen können stark abweichende Farbwerte so lange manuell im Farbraum verschoben werden, bis sie mit dem Zielwert übereinstimmen oder diesem zumindest nahe kommen.

## 8 Fazit

Eine derart große Fläche mit Videocontent zu bespielen und geschickt in die Show zu integrieren ist schon etwas Besonderes und hinterlässt einen bleibenden Eindruck bei den Zuschauern. Umso wichtiger ist, dass die durch den Content geschaffenen Illusionen auch glaubhaft erscheinen und das geht nur über den Eindruck eines einheitlichen Gesamtbildes, nicht über 18 Einzelbilder die sich alle voneinander abheben.

Rückblickend lässt sich feststellen, dass die verwendeten Projektoren im Two70° eine erstaunlich hohe Varianz bezüglich Helligkeiten und Farbverhalten zeigten. Dass Projektoren und Lampen gleichen Fabrikats derartige Unterschiede hervorrufen können, war überraschend und auch ein Stück weit enttäuschend, ließen sich doch nicht alle Schwachstellen ausbessern. Gerade in den Sekundärfarben stieß das Korrekturverfahren früh an seine Grenzen, da keine Eingabe von Cyan- und Magenta-Messwerten möglich war.

Die Möglichkeiten der Kalibrierung seitens der Projektoren waren vielfältig und mit Hilfe geeigneter Messgeräte auch gut umzusetzen. Über mehrere Durchgänge ließ sich das Gesamtbild Stück für Stück aneinander angleichen und das Endergebnis entsprach einem für alle Seiten zufriedenstellenden Ergebnis. Dennoch bleibt anzumerken, dass jede Korrektur das Bild erstmal nicht besser sondern schlechter macht. Eine Anpassung der Helligkeit kann immer nur nach unten geschehen, eine Farbkorrektur den Farbraum immer nur weiter begrenzen. Von daher ergibt sich am Ende zwar ein stimmiges Gesamtwerk, mit den ursprünglichen Spezifikationen ist dies jedoch nicht mehr vergleichbar. Je mehr Projektoren für die Mehrfachprojektion verwendet werden, desto größere Abstriche müssen gemacht werden. So wie in diesem Fall einige Projektoren am Ende lediglich auf 70% ihrer eigentlich möglichen Helligkeit liefen.

## 9 Ausblick

Ganz wichtig für eine erfolgreiche und effektive Farbkalibrierung ist die Kombination aus farbmetrischen Grundkenntnissen, geeigneter Messtechnik und einem guten Auge. Eine reine Kalibrierung über mathematische Berechnungen und Algorithmen funktioniert nur bis zu einem bestimmten Punkt und mit einer gewissen Ungenauigkeit. Es kann also nicht darauf verzichtet werden die getätigten Korrekturen immer mit einem Auge zu beobachten und das Endergebnis nochmal mit eigenem Fingerspitzengefühl gerade zu ziehen.

Gleichzeitig kann aber auch auf den Einsatz der Messtechnik, gerade bei einer solch großen Anzahl von Projektoren, nicht verzichtet werden. Eine Kalibrierung allein durch Ausprobieren würde bei den unterschiedlichen Farbräumen nie das Ergebnis erreichen, das durch die integrierte Color Matching Funktion möglich wird.

Ganz wichtig für zukünftige Projekte ist außerdem, an irgendeiner Stelle eine Grenze zu ziehen, ab der eine weitere Verbesserung des Bilder nicht mehr spürbar möglich ist bzw. nicht mehr im Verhältnis zum nötigen Arbeitsaufwand steht. Ein perfektes Ergebnis wird bei solch einer Anzahl von Projektoren nicht möglich sein und ist auch gar nicht nötig, werden doch gewisse Farbdifferenzen vom menschlichen Auge gar nicht wahrgenommen.

Des Weiteren ist zu beachten, dass diese Konzeption am Beispiel von Panasonic-Projektoren erstellt wurde. Andere Hersteller bieten unter Umständen andere Korrekturmethode und haben auch ihre Schwächen und Stärken möglicherweise an ganz anderen Stellen. Das Grundgerüst der Vorgehensweise kann dennoch so übernommen werden.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: 18-fach Projektion im Two70° (Quelle: eigene Anfertigung) .....	2
Abbildung 2.1: Two70° am Tag (URL: <a href="http://plsn.com/current-issue/51-installations-1/17895-smooth-sailing.html">http://plsn.com/current-issue/51-installations-1/17895-smooth-sailing.html</a> , Stand: 23.05.2016 13:41 Uhr) .....	5
Abbildung 2.2: „Spectra's Cabaret“ im Two70° (Quelle: eigene Anfertigung) .....	5
Abbildung 2.3: Panasonic PT-DZ21K2 Projektor (URL: <a href="https://www.pavc.panasonic.co.jp/projector/extranet/main/products/dz21k/spec/dz21k_sf.pdf">https://www.pavc.panasonic.co.jp/projector/extranet/main/products/dz21k/spec/dz21k_sf.pdf</a> , Stand: 17.05.2016 10:59 Uhr) .....	6
Abbildung 2.4: Überblick über die Lage aller Projektionen (Quelle: eigene Anfertigung) .....	6
Abbildung 2.5: 3 Chip DLP-Technologie (URL: <a href="http://heimkino-partner.de/lexikon/dlp">http://heimkino-partner.de/lexikon/dlp</a> , Stand: 17.05.2016 11:00 Uhr) .....	7
Abbildung 2.6: Position der Projektoren im Two70° (Quelle: eigene Anfertigung) .....	8
Abbildung 2.7: Spielraum der Projektoren unter der Decke (Quelle: eigene Anfertigung) .....	9
Abbildung 2.8: Lens Shift Korrekturmöglichkeiten (URL: <a href="https://www.pavc.panasonic.co.jp/projector/extranet/main/products/dz21k/manual/dz21k_e_german.pdf">https://www.pavc.panasonic.co.jp/projector/extranet/main/products/dz21k/manual/dz21k_e_german.pdf</a> , Stand: 17.05.2016 11:01 Uhr) .....	9
Abbildung 3.1: RGB-Würfel (URL: <a href="https://www.flickr.com/photos/roofwalker/13829769224">https://www.flickr.com/photos/roofwalker/13829769224</a> , Stand: 17.05.2016 11:11 Uhr) .....	11
Abbildung 3.2: CIE-xy-Diagramm (Quelle: JETI LiVal V6.2.0, eigene Anfertigung) .....	13
Abbildung 3.3: CIE-u'v'-Diagramm (Quelle: JETI LiVal V6.2.0, eigene Anfertigung) .....	14
Abbildung 3.4: Um den Faktor 10 vergrößerte MacAdam-Ellipsen im xy- und u'v'-Diagramm (URL: <a href="http://files.cie.co.at/738_CIE_TN_001-2014.pdf">http://files.cie.co.at/738_CIE_TN_001-2014.pdf</a> , Stand: 20.05.2016 12:05 Uhr) .....	15
Abbildung 3.5: Black-Body-Kurve (URL: <a href="https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/49/CIE-Normfarbtafel.png">https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/49/CIE-Normfarbtafel.png</a> , Stand: 20.05.2016 12:11 Uhr) .....	16
Abbildung 3.6: MacAdam-Kreise an Black-Body-Kurve (URL: <a href="http://files.cie.co.at/738_CIE_TN_001-2014.pdf">http://files.cie.co.at/738_CIE_TN_001-2014.pdf</a> , Stand: 20.05.2016 12:13 Uhr) .....	16
Abbildung 4.1: Specbos 1211 (URL: <a href="http://www.opteema.com/files/specbos1211-1080beigese.jpg">http://www.opteema.com/files/specbos1211-1080beigese.jpg</a> , Stand: 17.05.2016 11:12 Uhr) .....	19
Abbildung 4.2: JETI LiVal V6.2.0 (Quelle: JETI LiVal V6.2.0, eigene Anfertigung) .....	20
Abbildung 4.3: Rec. 709-Farbraum (Quelle: JETI LiVal V6.2.0, eigene Anfertigung) .....	21
Abbildung 4.4: Geometry Manager Pro (Quelle: eigene Anfertigung) .....	22
Abbildung 4.5: Picture-Mode Vergleich Projektor 10 - Messwerte in CIE-Diagramm (Quelle: JETI LiVal V6.2.0, eigene Anfertigung) .....	25

Abbildung 4.6: Spektrum Graphic-Mode – Projektor 10 (Quelle: JETI LiVal V6.2.0, eigene Anfertigung).....	25
Abbildung 4.7: Spektrum Standard-Mode – Projektor 10 (Quelle: JETI LiVal V6.2.0, eigene Anfertigung).....	26
Abbildung 4.8: Spektrum Natural-Mode – Projektor 10 (Quelle: JETI LiVal V6.2.0, eigene Anfertigung).....	26
Abbildung 4.9: Messpunkt im Überlappungsbereich (Quelle: eigene Anfertigung) .....	28
Abbildung 4.10: Skizze 9-Punkte-Messung (Quelle: eigene Anfertigung) .....	29
Abbildung 4.11: Foto Helligkeitsverlauf Projektion 14 (Quelle: eigene Anfertigung) .....	30
Abbildung 4.12: Linearität der Brightness Control Gain - Weiß (Quelle: eigene Anfertigung)	31
Abbildung 4.13: Linearität der Brightness Control Gain - Rot (Quelle: eigene Anfertigung)...	31
Abbildung 4.14: Linearität der Brightness Control Gain - Grün (Quelle: eigene Anfertigung)	32
Abbildung 4.15: Linearität der Brightness Control Gain - Blau (Quelle: eigene Anfertigung)	32
Abbildung 4.16: xy-Diagramm - Sichtbare Farbdifferenzen (Quelle: eigene Anfertigung).....	34
Abbildung 4.17: u'v'-Diagramm - Sichtbare Farbdifferenzen (Quelle: eigene Anfertigung) ....	34
Abbildung 4.18: Von einer Versuchsperson ermittelte sichtbare Farbdifferenzen $\Delta c$ (Quelle: eigene Anfertigung) .....	35
Abbildung 5.1: Skizze des Messaufbaus (Quelle: eigene Anfertigung) .....	37
Abbildung 5.2: Messpositionen im Two70° Grundriss (Quelle: eigene Anfertigung).....	38
Abbildung 5.3: Foto des Messaufbaus – Projektoren 1 und 2 (Quelle: eigene Anfertigung) ..	39
Abbildung 5.4: Leuchtdichteverteilung Ausgangssituation (Quelle: eigene Anfertigung) .....	40
Abbildung 5.5: CIE-xy-Diagramm aller 18 Projektoren - Ausgangssituation (Quelle: JETI LiVal V6.2.0, eigene Anfertigung).....	41
Abbildung 5.6: CIE-u'v'-Diagramm aller 18 Projektoren – Ausgangssituation (Quelle: JETI LiVal V6.2.0, eigene Anfertigung) .....	42
Abbildung 5.7: Farbgamut Projektoren 3 und 15 (Quelle: JETI LiVal V6.2.0, eigene Anfertigung).....	42
Abbildung 5.8: Weißer Content - Ausgangssituation (Quelle: eigene Anfertigung).....	43
Abbildung 5.9: Beispielbild - Ausgangssituation (Quelle: eigene Anfertigung) .....	43
Abbildung 6.1: CIE-xy-Diagramm mit Ziel-Farbgamut (Quelle: JETI LiVal V6.2.0, eigene Anfertigung).....	46
Abbildung 6.2: Leuchtdichteverteilung nach erster Korrektur (Quelle: eigene Anfertigung) ...	47
Abbildung 6.3: CIE-xy-Diagramm aller 18 Projektoren nach erster Korrektur (Quelle: JETI LiVal V6.2.0, eigene Anfertigung).....	48

Abbildung 6.4: CIE-u'v'-Diagramm aller 18 Projektoren nach erster Korrektur (Quelle: JETI LiVal V6.2.0, eigene Anfertigung).....	48
Abbildung 6.5: Leuchtdichteverteilung nach zweiter Korrektur (Quelle: eigene Anfertigung).51	
Abbildung 6.6: CIE-xy-Diagramm aller 18 Projektoren nach zweiter Korrektur (Quelle: JETI LiVal V6.2.0, eigene Anfertigung).....	51
Abbildung 6.7: CIE-u'v'-Diagramm aller 18 Projektoren nach zweiter Korrektur (Quelle: JETI LiVal V6.2.0, eigene Anfertigung).....	52
Abbildung 6.8: Leuchtdichteverteilung nach finaler Helligkeitsanpassung (Quelle: eigene Anfertigung).....	53
Abbildung 6.9: CIE-xy-Diagramm aller 18 Projektoren nach finaler Farbkorrektur (Quelle: JETI LiVal V6.2.0, eigene Anfertigung).....	54
Abbildung 6.10: CIE-u'v'-Diagramm aller 18 Projektoren nach finaler Farbkorrektur (Quelle: JETI LiVal V6.2.0, eigene Anfertigung).....	54
Abbildung 6.11: Beispielbild - Ausgangssituation (Quelle: eigene Anfertigung) .....	55
Abbildung 6.12: Beispielbild nach erster Korrektur (Quelle: eigene Anfertigung) .....	55
Abbildung 6.13: Beispielbild nach zweiter Korrektur (Quelle: eigene Anfertigung) .....	56
Abbildung 6.14: Beispielbild nach finaler Korrektur (Quelle: eigene Anfertigung).....	56
Abbildung 6.15: Mittelwerte der Farbdifferenzen $\Delta c$ vorher / nachher (Quelle: eigene Anfertigung).....	59
Abbildung 6.16: Boxplot-Diagramm der Farbdifferenzen $\Delta c$ (Quelle: eigene Anfertigung) ....	59
Abbildung 6.17: Farbdifferenzen $\Delta c$ - Projektor 2 und 4 (Quelle: eigene Anfertigung).....	60
Abbildung 6.18: Farbdifferenzen $\Delta c$ - Projektor 16 und 18 (Quelle: eigene Anfertigung).....	60

## Literaturverzeichnis

DIN 5033-1: *Farbmessung – Teil 1: Grundbegriffe der Farbmessung*, Mai 2009

DIN EN ISO 11664-5:2011-07: *Farbmessung – Teil 5: CIE 1976 L\*u\*v\* Farbenraum und gleichabständige u'v'-Farbtafel*, Juli 2011

Greule, Roland: *Licht und Beleuchtung im Medienbereich*, München: Hanser, 2015

Klauser, Alina: *Eine Untersuchung der Wirkung von Farben und Formen*, Bachelor-Thesis, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Fakultät Design, Medien und Information, Department Medientechnik, 2015

Ochlast, Dariusch Peter: *Konzeption und Modellierung eines Retouren Workflows zur Optimierung der Retourenbearbeitung*, Bachelor-Thesis, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Fakultät Design, Medien und Information, Department Medientechnik, 2015

Smyrek, Volker; Kruse, Diana; Hascher, Ralph: *Lichttechnik und Energieversorgung für Veranstaltungstechniker*, Stuttgart: Hirzel, 2010



## Quellenverzeichnis

### *Beamer Discount – Beamer DLP*

[http://www.beamer-discount.de/unternehmen/beamer\\_dlp.html](http://www.beamer-discount.de/unternehmen/beamer_dlp.html)

Stand 17.05.2016 10:11 Uhr

### *CIE Technical Note – Chromaticity Difference Specification for Light Sources*

[http://files.cie.co.at/738\\_CIE\\_TN\\_001-2014.pdf](http://files.cie.co.at/738_CIE_TN_001-2014.pdf)

Stand 20.05.2016 12:29 Uhr

### *HD Beamer Guide – Beamer Helligkeit*

<http://www.hd-beamer-guide.de/beamer-helligkeit.php5>

Stand 17.05.2016 10:08 Uhr

### *HD Beamer Guide – Beamer Kontrast*

<http://www.hd-beamer-guide.de/beamer-kontrast.php5>

Stand: 17.05.2016 10:07 Uhr

### *Heimkinopartner Bremen - DLP*

<http://heimkino-partner.de/lexikon/dlp/>

Stand 17.05.2016 10:16 Uhr

### *ITWissen – BT.709*

<http://www.itwissen.info/definition/lexikon/BT-709-ITU-R-BT-709.html>

Stand 10.05.2016 14:12 Uhr

### *ITWissen – UHP-Lampe*

<http://www.itwissen.info/definition/lexikon/UHP-Lampe-ultra-high-pressure-UHP.html>

Stand 10.05.2016 11:19 Uhr

### *Panasonic – Multi-Lamp-Technologie*

<http://business.panasonic.de/visuelle-systeme/Multi-Lamp-Technologie>

Stand 23.05.2016 13:30 Uhr

### *Panasonic PT-DZ21KE Manual*

[https://eww.pavc.panasonic.co.jp/projector/extranet/main/products/dz21k/manual/dz21k\\_e\\_ger-man.pdf](https://eww.pavc.panasonic.co.jp/projector/extranet/main/products/dz21k/manual/dz21k_e_ger-man.pdf)

Stand 17.05.2016 10:13 Uhr

### *Royal Caribbean – Ovation of the Seas*

<https://www.royalcaribbean.de/schiffe/ovation-of-the-seas.htm>

Stand 11.05.2016 13:08 Uhr

### *ScanDig - Farbmodelle*

<http://www.filmscanner.info/Farbmodelle.html>

Stand 17.05.2016 10:15 Uhr

### *ScanDig - Farbtemperatur*

<http://www.filmscanner.info/Farbtemperatur.html>

Stand 17.05.2016 10:13 Uhr

### *ScanDig - Fotometrie*

<http://www.filmscanner.info/Fotometrie.html>

Stand 17.05.2016 10:12 Uhr

### *Wikipedia – MacAdam-Ellipse*

<https://de.wikipedia.org/wiki/MacAdam-Ellipse>

Stand 20.05.2016 12:26 Uhr