



Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg

Hamburg University of Applied Sciences

Bachelor-Thesis

Farbmanagement von LED-Screens

24.08.2016

Tina Trömmel

Matrikel-Nr.: 2130597

Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg

Fakultät Design, Medien und Information

Department Medientechnik

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Roland Greule

Zweitprüfer: Dipl.-Ing. (FH) Matthias Wilkens

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
1. Einleitung	5
2. Lichttechnische Grundlagen	6
2.1. <i>Was ist Licht?</i>	6
2.2. <i>Spektrum</i>	6
2.2.1. <i>Lichtquellen</i>	7
2.3. <i>Spektrale Hellempfindlichkeit, V-Lambda</i>	8
2.4. <i>Leuchtdichte</i>	10
3. Farbmétrische Grundlagen	12
3.1. <i>Additive Farbmischung</i>	12
3.2. <i>RGB-Farbraum</i>	13
3.3. <i>XYZ, xyY</i>	14
3.4. <i>CIE Normfarbtafel</i>	16
3.5. <i>Farbtemperatur</i>	17
3.6. <i>McAdam-Ellipsen und Binning</i>	20
3.7. <i>Farbraum nach Rec. 709 / 2020</i>	22
4. Videotechnische Grundlagen	24
4.1. <i>Gamma</i>	24
4.2. <i>Videonorm</i>	26
4.3. <i>Digitalisignale</i>	27
4.3.1. <i>Abtastfrequenz</i>	27
4.3.2. <i>Quantisierung</i>	27
4.3.3. <i>RGB- und Komponentensignal</i>	28
4.3.4. <i>Abtaststrukturen</i>	30
4.3.5. <i>Datenraten</i>	31
4.4. <i>Schnittstellen</i>	32
4.4.1. <i>SDI</i>	32
4.4.2. <i>HDMI</i>	33
4.4.3. <i>Display Port</i>	34
5. Licht- und Farbmessungen	36
5.1. <i>Messgeräte</i>	36
5.1.1. <i>Dreibereichs-Messgerät</i>	36
5.1.2. <i>Spektralradiometer</i>	37

5.1.3.	Das Dreibereichs-Verfahren und das Spektralverfahren im Vergleich	39
5.2.	<i>Jeti specbos 1211</i>	40
5.2.1.	Die Mess-Software „LiVal“	41
5.2.2.	Die Mess-Software „MoDiCal“	42
5.3.	<i>Konica Minolta CS-2000/2000A</i>	44
5.4.	<i>Messgeräte und Farbtemperatur</i>	45
6.	Grundlagen der Lichterzeugung mit Halbleiterdioden	48
6.1.	<i>Aufbau und Funktionsweise</i>	48
6.2.	<i>Lichtfarben</i>	49
6.3.	<i>Bauweisen und Anwendungsbereiche</i>	50
6.3.1.	T-Type	51
6.3.2.	Superflux LED	51
6.3.3.	COD LED	52
6.3.4.	SMD	52
7.	Aufbau und Funktionsweise von LED-Screens	53
7.1.	<i>Module und Aufbau</i>	53
7.2.	<i>SMD, Black SMD</i>	53
7.3.	<i>Pixel Pitch und Betrachtungsabstand</i>	54
7.4.	<i>Native Farben und Rec. 709 / 2020</i>	54
7.5.	<i>Controller und Software</i>	55
7.6.	<i>Anwendungsbereiche</i>	56
8.	Überblick über Hersteller	58
9.	Parameter zur Beurteilung der Qualität von LED-Screens	61
9.1.	<i>Betrachtungswinkel</i>	61
9.2.	<i>Pixelfehler</i>	62
9.3.	<i>Controller-Software</i>	62
9.4.	<i>Signal / Schnittstellen</i>	63
9.5.	<i>Kennlinie</i>	63
9.6.	<i>Farbe</i>	64
9.7.	<i>Auflösung</i>	65
9.8.	<i>Bewegung</i>	65
9.9.	<i>Herstellerangaben</i>	66
10.	Leitfaden zur LED-Screen Messung	67
10.1.	<i>Messbedingungen und Vorbereitung</i>	68
10.2.	<i>Kalibrier- und Messvorgang</i>	71
11.	Messung und Kalibrierung von LED-Screens	83

11.1.	<i>Messung der vier LED-Screens</i>	84
11.1.1.	LED-Screen 1 – Lighthouse X3	88
11.1.2.	LED-Screen 2 – Unilumin Rt3.9	108
11.1.3.	LED-Screen 3 – Hibino 6mm	132
11.1.4.	LED-Screen 4 – ROE MC-7H	153
11.2.	<i>Gegenüberstellung der LED-Screens</i>	173
12.	Fazit	176
13.	Ausblick	178
14.	Eigenständigkeitserklärung	179
15.	Danksagung	180
16.	Literaturverzeichnis	181
17.	Abbildungsverzeichnis	184
18.	Tabellenverzeichnis	189
19.	Formelverzeichnis	192

1. Einleitung

In dieser Arbeit soll das Farbmanagement von LED-Screens untersucht werden. Dazu werden Messungen an LED-Screens durchgeführt und die LED-Controller, die zur Ansteuerung gebraucht werden, werden analysiert, da sie wesentlich zum Farbmanagement des LED-Screens beitragen.

Aufgrund dessen, dass es für LED-Screens keinerlei Richtlinien oder Empfehlungen bezüglich der Farbräume, der Messung und der Kalibrierung gibt, wird in dieser Arbeit ein Leitfaden zur Messung von LED-Screens erstellt. Außerdem wird neben dem Messvorgang auch der Kalibriervorgang, der auf Messtechnik begründet ist, definiert. Die Kalibrierung zusammen mit Messtechnik soll eine Alternative zur herkömmlichen Kalibrierung mit dem menschlichen Sehapparat darstellen, die wesentlich genauer und reproduzierbarer ist.

Um einen solchen Leitfaden festzulegen und einen Kalibriervorgang zu definieren, bedient sich diese Arbeit an einigen Richtlinien für Monitore und Displays, da der LED-Screen in dieser Arbeit als ein gleichwertiges Wiedergabemedium angesehen und behandelt wird.

2. Lichttechnische Grundlagen

2.1. Was ist Licht?

Licht ist elektromagnetische Strahlung und wird somit im Wellenmodell betrachtet. Das Licht beschränkt sich auf einen bestimmten Wellenlängenbereich der elektromagnetischen Strahlung zu der beispielsweise auch die Radiowellen gehören. Die elektromagnetische Strahlung des Lichtes unterscheidet sich von den anderen elektromagnetischen Wellen darin, dass sie mit dem menschlichen Auge wahrgenommen werden kann und somit sichtbar wird. Der sichtbare Bereich des Lichtes befindet sich zwischen 380nm und 780nm. Für andere physikalische Phänomene und Beschreibungen wird Licht auch als Teilchen bzw. als Lichtquant beschrieben. Dieses Modell des Lichts ist für diese Arbeit jedoch nicht von Bedeutung.

2.2. Spektrum

Wie bereits erwähnt ist Licht ein begrenzter Bereich der elektromagnetischen Strahlung im Wellenlängenbereich zwischen 380nm und 780nm.

In diesem Bereich nimmt das menschlich Auge unterschiedliche Farben wahr, die zu bestimmten kleineren Wellenlängenbereichen zugeordnet werden können.

In folgender Tabelle sind die sieben Spektralfarbenbereiche des sichtbaren Lichtes aufgeführt.

Farbe	Wellenlängenbereich
Violett	Ca. 400- 450nm
Blau	Ca. 450- 490nm
Grün	Ca. 490- 560nm
Gelb	Ca. 560- 590nm
Orange	Ca. 590- 630nm
Rot	Ca. 630-700nm

Tabelle 1: Wellenlängenbereiche der Spektralfarben

Die Farbe Magenta (Purpur) ist keine Spektralfarbe.

Weißes Licht ist ein Erzeugnis, dass sich aus allen Farben bzw. aus dem gesamten sichtbaren Spektralbereich zusammensetzt. Auf das weiße Licht wird im Kapitel 3.5. Farbtemperatur noch weiter eingegangen.

Umgekehrt ist dieses Phänomen an einem Prisma oder auch anhand eines Regenbogens zu erkennen. Wenn auf ein Prisma oder auf ein Wassertröpfchen weißes Licht fällt, wird dieses zweimal an dem optisch dichteren Medium (dem Prisma/Wassertröpfchen) gebrochen. Die unterschiedlich langen Wellenlängen werden dabei unterschiedlich stark an den

Medienübergängen gebrochen, wodurch sich das weiße Licht dann in alle Farben des sichtbaren Spektralbereichs auffächert.

Grob kann das sichtbare Spektrum in drei Spektralbereiche eingeteilt werden und zwar in einen blauen, einen grünen und einen roten Spektralbereich. Auf diese drei Spektralfarben wird im Kapitel 3. Farbmetrische Grundlagen weiter eingegangen. Der Übergang zwischen diesen Farben ist fließend, wodurch die weiteren Farben aus der Tabelle zu erklären sind.

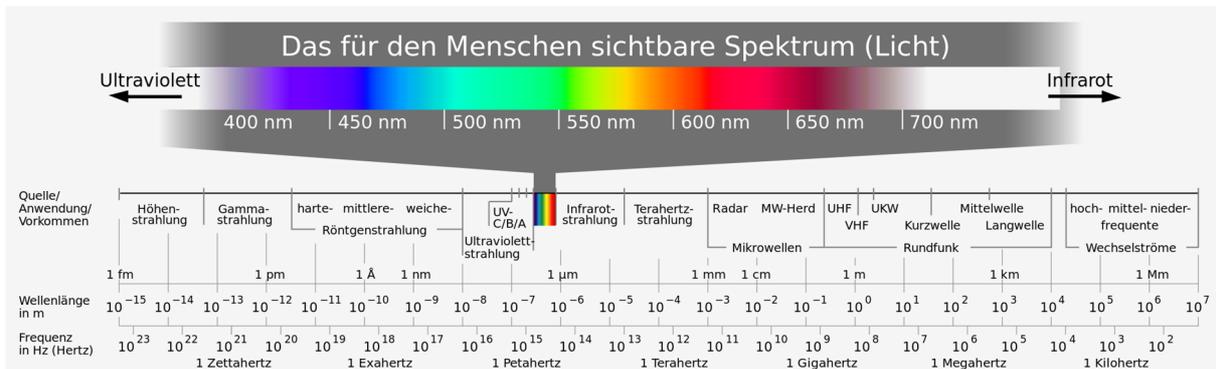


Abbildung 1: Sichtbares Lichtspektrum mit Wellenlängen

Zum optischen Spektrum zählen aber nicht nur die sichtbaren Spektralbereiche, sondern auch die mit dem menschlichen Auge nicht sichtbare UV- und Infrarotstrahlung. Die kurzwellige UV-Strahlung beginnt ca. bei 100nm Wellenlänge und grenzt an den blauen Spektralbereich und die langwellige Infrarotstrahlung grenzt an den roten Spektralbereich und endet bei ca. 1mm Wellenlänge.

2.2.1. Lichtquellen

Unterschiedliche Lichtquellen weisen unterschiedliche Spektren bzw. spektrale Verteilungen auf. Das Spektrum von einer Lichtquelle gibt an, welche Wellenlängen wie stark vertreten sind. Man unterscheidet zwischen kontinuierlichen und Linienspektren.

Bei einem kontinuierlichen Spektrum sind alle Wellenlängen des sichtbaren Spektralbereichs vorhanden und sie liegen alle unter einer Kurve.

In Linienspektren sind nur einzelne schmalbandige Spektralbereiche bzw. Wellenlängen vertreten.

Leuchtstofflampen oder einfarbige LEDs besitzen beispielsweise ein Linienspektrum. Das Tageslicht und die Glühlampe besitzen hingegen eine kontinuierliche spektrale Verteilung.

Weißes LEDs weisen ein annähernd kontinuierliches Spektrum auf. Diese LEDs werden durch die additive Mischung aus einer roten, einer grünen und einer blauen LED hergestellt oder das blaue LED-Licht wird mittels einer Leuchtstoffschicht (Konversionsschicht) zu weißem Licht gewandelt. Mehr dazu ist im Kapitel 3.1. Additive Farbmischung zu finden.

Die Lichtquelle LED wird noch genauer um Kapitel 6 Grundlagen der Lichterzeugung mit Halbleiterdioden beschrieben.

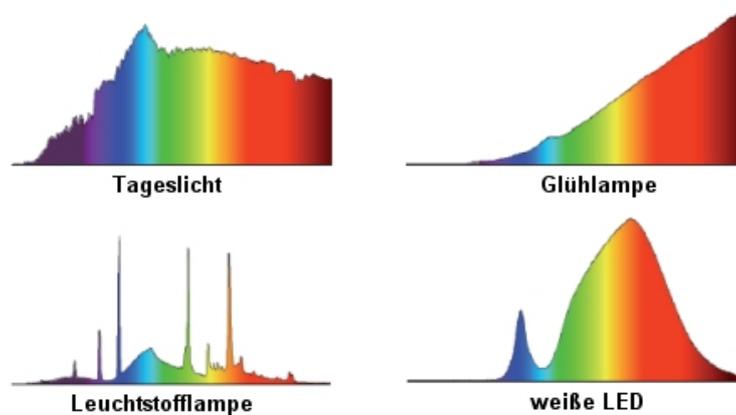


Abbildung 2: Spektren unterschiedlicher Lichtquellen - von kontinuierlichen Spektren bis Linienspektren

2.3. Spektrale Hellempfindlichkeit, V-Lambda

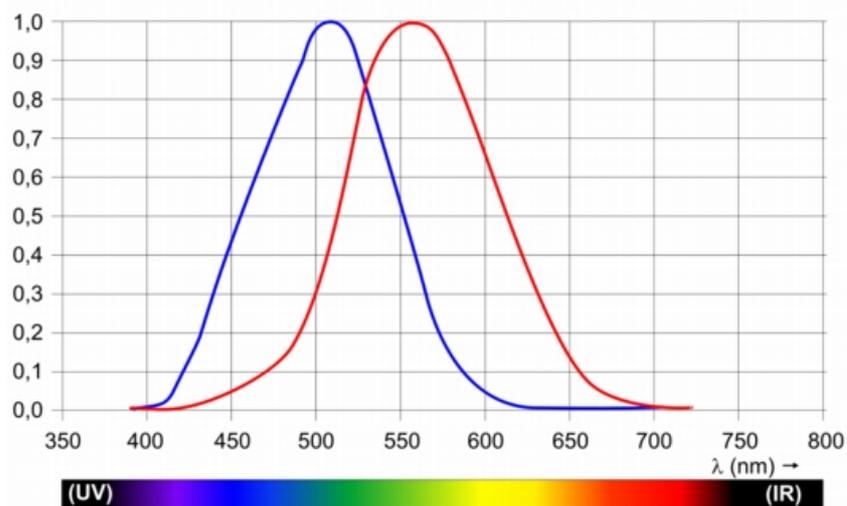


Abbildung 3: Hellempfindlichkeitskurve des menschlichen Auges, blau: bei Nacht, rot: Tagsehen

In obiger Hellempfindlichkeitskurve ist zu erkennen, dass das menschliche Auge bei Tag und bei Nacht unterschiedliche Empfindlichkeiten im Spektrum aufweist.

Dieser Unterschied ist auf die zwei verschiedenen Rezeptoren (Zapfen und Stäbchen) in der Netzhaut zurückzuführen.

Die Stäbchen bestimmen überwiegend die spektrale Hellempfindlichkeitskurve bei Nacht mit dem Maximum bei 505nm und die Zapfen bestimmen zum Großteil die spektrale Hellempfindlichkeitskurve am Tag mit dem Maximum bei 555nm.

Die Nacht wird mit einer Helligkeit unter 1cd/m^2 definiert und der Tag wird durch Helligkeiten größer als 100cd/m^2 festgelegt.

Die Stäbchen sind vor allem für den Helligkeitseindruck im Auge zuständig. Beim Nachtsehen sind sie die einzigen Rezeptoren, die auf die geringen Lichtreize reagieren können. Aus diesem Grund sind in der Dunkelheit keine Farben, sondern nur Helligkeitsunterschiede zu erkennen.

Die Zapfen sind für das Farbsehen als weitere Rezeptoren maßgebend. Weil sie eine höhere Leuchtdichte erfordern um Lichtreize zu verarbeiten, sind diese beim Tagsehen ausschlaggebend für die spektrale Hellempfindlichkeit. Aber auch die Stäbchen sind beim Tagsehen aktiv. Bei den dann vorherrschenden hohen Leuchtdichten sind diese gesättigt und sind somit nur noch für die Mustererkennung zuständig.

Die Zapfen lassen sich in drei Farbrezeptoren unterteilen.

Nach der Dreifarbentheorie gibt es rot-, grün- und blauempfindliche Zapfen.

Da die Zapfen nicht nur eine einzige Wellenlänge verarbeiten, sondern jeweils für einen Wellenlängenbereich zuständig sind, gibt es eine weitere Theorie. Diese Theorie unterteilt die drei Typen in „Long“, „Middle“ und „Short“. Diese Angaben beziehen sich dabei auf die wahrnehmbaren Spektralbereiche/Wellenlängenbereiche der Rezeptoren, die sich zudem überlappen. Das Empfindungsmaximum der „roten“ Zapfen befindet sich eher im Wellenlängenbereich von Gelb. Mit der SML-Theorie („Short“, „Middle“, „Long“) werden die Zapfen also besser beschrieben.

Diejenige $V(\lambda)$ -Kurve für das Tagsehen zeigt, dass das Auge im Wellenlängenbereich zwischen Gelb und Grün am empfindlichsten ist. Das bedeutet, dass der Mensch Licht im gelbgrünen Spektralbereich am hellsten wahrnimmt. Die spektrale Hellempfindung ist in diesem Bereich also am größten.

Dies lässt sich auf die Anzahl der Zapfen in der Netzhaut zurückführen. Die „short“-Zapfen für den blauen Spektralbereich sind in ihrer Anzahl am geringsten, gefolgt von den „long“-Zapfen (Rot). Die „middle“-Zapfen (Grün) weisen die höchste Anzahl auf.

Wenn die „roten“ und die „grünen“ Zapfen gleichzeitig in einem bestimmten Verhältnis angesprochen werden entsteht der Farbeindruck Gelb bzw. wenn gelbes Licht auf die Zapfen in der Netzhaut trifft, werden die „roten“ und die „grünen“ Zapfen angesprochen. Dazu mehr im Kapitel 3.1. Additive Farbmischung.

Außerdem ist zu beachten, dass das menschliche Auge insgesamt wesentlich mehr Stäbchen als Zapfen besitzt. Die Zapfen befinden sich überwiegend in der Nähe des Sehzentrums und die Stäbchen befinden sich zum Großteil in der Peripherie.

2.4. Leuchtdichte

Unter den vier bekannten lichttechnischen Grundgrößen: Lichtstrom, Lichtstärke, Beleuchtungsstärke und Leuchtdichte ist die Leuchtdichte für diese Arbeit die wichtigste.

Mit dieser Grundgröße lässt sich der Helligkeitseindruck des menschlichen Auges einer selbstleuchtenden oder einer beleuchteten Fläche beschreiben (vgl. Greule, Roland: Licht und Beleuchtung im Medienbereich, Carl Hanser Verlag, 2015, S. 43).

Genau diese Beschreibung ist bei Monitoren, Displays oder Screens ein wichtiger Parameter. In dieser Arbeit, die sich mit einer speziellen Art von Screens, den LED-Screens, auseinandersetzt, ist die Leuchtdichte also eine wichtige Größe, um die messtechnisch absolute Helligkeit eines solchen Screens auszudrücken.

Auch innerhalb der Monitormesstechnik stellt die Leuchtdichte eines der wichtigsten Größen zur Beurteilung der Qualität dar.

Leuchtdichte wird in der Einheit cd/m^2 angegeben woraus sich schließen lässt, dass die Leuchtdichte ausdrückt, wie viel Candela (cd) also Lichtstärke auf einer Fläche vorhanden ist. Das Verhältnis dieser Größen ist in folgender Formel angegeben:

$$L = \frac{I}{A}$$

L : Leuchtdichte $[\frac{\text{cd}}{\text{m}^2}]$

I : Lichtstärke $[\text{cd}]$

A : Fläche $[\text{m}^2]$

Formel 1: Berechnung der Leuchtdichte

Die Lichtstärke ist die lichttechnische Grundgröße, die die Lichtausstrahlung in eine bestimmte Richtung angibt. Sie wird, wie bereits erwähnt, in der Einheit Candela (cd) angegeben.

Zu beachten gilt, dass sich der Helligkeitseindruck des menschlichen Auges nicht linear zur Leuchtdichte verhält. Der Zusammenhang der Leuchtdichte und der Helligkeitswahrnehmung wird mithilfe der psychometrischen Helligkeitsfunktion beschrieben.

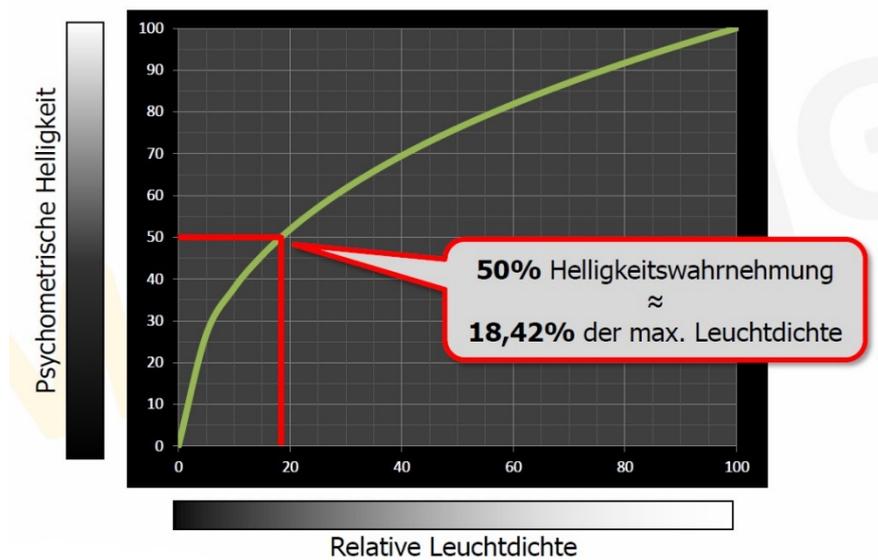


Abbildung 4: Psychometrische Helligkeitsfunktion

Der Graph weist einen annähernd exponentiellen Verlauf auf, weshalb eine Helligkeitswahrnehmung von 50% eben nicht 50% der maximalen Leuchtdichte entspricht, sondern einem wesentlich geringeren Anteil an der maximalen Leuchtdichte.

3. Farbmétrische Grundlagen

3.1. Additive Farbmischung

Wie bereits festgestellt besteht weißes Licht aus mehreren unterschiedlichen Wellenlängen. Umgekehrt kann weißes Licht also auch aus allen Wellenlängen des sichtbaren Spektrums gemischt werden. Das Zusammenwirken bzw. das Zusammenmischen von Lichtfarben wird als additive Farbmischung beschrieben.

Neben der additiven Farbmischung gibt es auch die subtraktive Farbmischung, die zum Beispiel bei Malfarben oder auch bei Farbfolien auftritt.

Wie das Wort additiv schon sagt, handelt es sich bei dieser Art von Farbmischung um eine Summe aus Wellenlängen und Lichtenergien. Die Summe ist dabei immer heller als die einzelnen Summanden.

Außerdem ist bei der additiven Farbmischung darauf zu achten, dass die Sättigung bei der Mischung immer kleiner wird. Aus diesem Grund sollten die zu mischenden Farben möglichst gesättigt sein (vgl. Marchesi, Jost J.: Handbuch der Fotografie, Band 3, Farbtheorie und Farbmétrie; Farbumkehrtechnik, Negativ-Positiv- und Direkt-Positivtechnik; Digitale Fotografie, Verlag Photographie, 1. Auflage, 1998, S. 32).

Mit nur drei Grundfarben lassen sich sehr viele weitere Farben mischen. Diese drei additiven Grundfarben können auch als Primärfarben bezeichnet werden. Hier wird auf die grobe Einteilung des sichtbaren Spektrums in die drei Spektralbereiche zurückgegriffen. Die drei Primärfarben sind folglich Rot, Grün und Blau.

Werden diese drei Farben zu jeweils gleichen Anteilen miteinander gemischt, so ergeben sich Graustufen. Sind die drei Anteile gleich und maximal, so ergibt sich ein neutrales Weiß.

Wenn jeweils nur zwei der Grundfarben zu gleichen Anteilen gemischt werden, dann ergeben sich die drei Sekundärfarben der additiven Farbmischung. Diese Sekundärfarben sind gleichzeitig auch die Komplementärfarben der Primärfarben und es sind die Primärfarben der subtraktiven Farbmischung.

Rot + Grün = Gelb

Rot + Blau = Magenta

Grün + Blau = Zyan

Rot + Grün + Blau = Weiß

Diese Verhältnisse gelten bei gleiche Anteilen der Grundfarben. Ist bei der Mischung ein Farbanteil größer, so entstehen Zwischentöne, die zu der Farbe mit dem größeren Anteil tendieren.

Komplementärfarben können als Ergänzungsfarben zu Weiß beschrieben werden. Gelb ergibt sich beispielsweise aus der Mischung der Primärfarben Rot und Grün. Weiß ergibt

sich bekanntlich aus der Mischung aller drei Primärfarben, also ist die Ergänzungsfarbe zu Gelb Blau. Blau und Gelb sind also Komplementärfarben (vgl. Marchesi, Jost J.: Handbuch der Fotografie, Band 3, Farbtheorie und Farbmeterik; Farbumkehrtechnik, Negativ-Positiv- und Direkt-Positivtechnik; Digitale Fotografie, Verlag Photographie, 1. Auflage, 1998, S. 34). Die additive Farbmischung wird beispielsweise bei Screens bzw. bei Bildschirmen angewendet. Dort besteht ein Bildpixel aus drei farbigen Phosphaten oder aus drei farbigen LEDs in den Farben Rot, Grün und Blau mit denen alle Farben des RGB-Farbraumes in unterschiedlichen Intensitäten gemischt werden können. Die Phosphate oder die LEDs liegen dabei so dicht aneinander, dass ein einheitlicher Farbeindruck im Auge entsteht. Neben der additiven Farbmischung durch Überlagerung von Wellenlängen können Farben auch zeitlich additiv gemischt werden. Folgen die Primärfarben der additiven Farbmischung in sehr kurzen Abständen aufeinander und treffen auf eine Netzhautstelle, so werden diese durch die Trägheit des Auges gemischt und ergeben einen neuen Farbeindruck. Die Frequenz mit der die Farben aufeinander folgen müssen muss mindestens 25Hz betragen (vgl. Greule, Roland: Licht und Beleuchtung im Medienbereich, Carl Hanser Verlag, 2015, S. 83).

3.2. RGB-Farbraum

Der RGB-Farbraum ist ein Farbraum mit den reellen Primärvalenzen Rot (R), Grün (G) und Blau (B).

Dieser Farbraum stellt ein dreidimensionales Konstrukt dar. Die Primärfarben Rot, Grün und Blau bilden das Fundament eines Würfels. Im Ursprung des Würfels liegt das Schwarz. Von diesem Ursprung gehen drei Achsen ab, die in den farbigen Punkten Rot, Grün und Blau enden. Diese Achsen können auch als Vektoren betrachtet werden. Durch Addition dieser Vektoren ergeben sich die restlichen Eckpunkte des Würfels. Diagonal zu Schwarz liegt Weiß, das sich aus der Addition aller drei Vektoren bildet. Die Addition von jeweils zwei der Vektoren bilden die Farben Cyan, Magenta und Gelb. (Vgl. Greule, Roland: Licht und Beleuchtung im Medienbereich, Carl Hanser Verlag, 2015, S. 76f.)

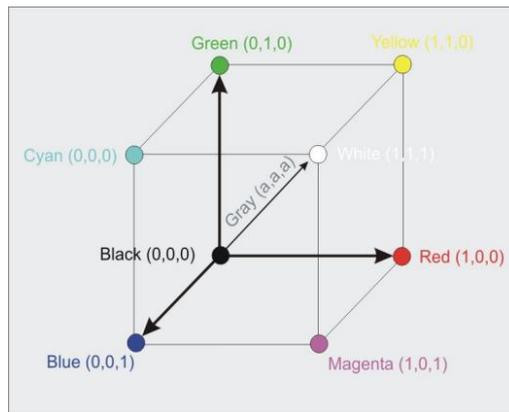


Abbildung 5: RGB-Würfel des RGB-Farbraumes

Diesem System liegen folgende Spektralwertkurven der spektralen Primärvalenzen zugrunde.

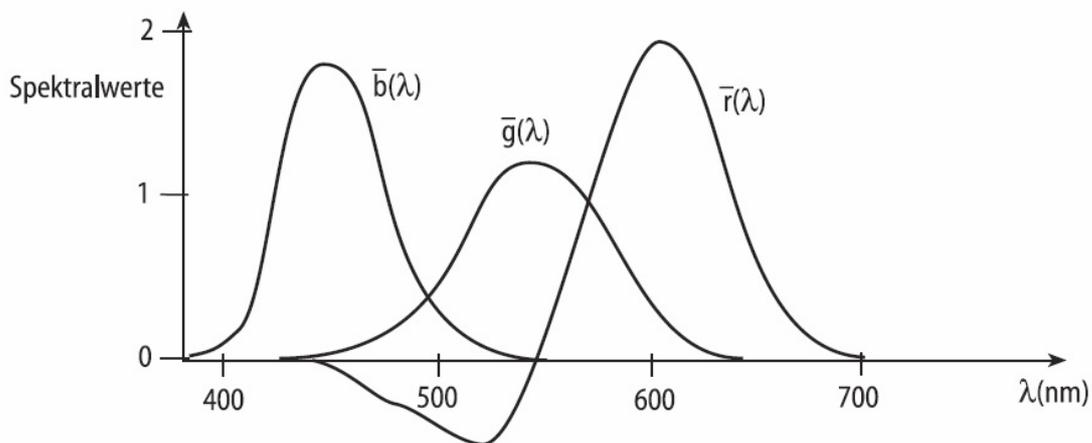


Abbildung 6: Spektralwertkurven der spektralen Primärvalenzen

Die Spektralwertkurven der spektralen Primärvalenz Rot weist im Gegensatz zu denen der Primärvalenzen von Blau und Grün negative Werte auf. Daraus lässt sich schließen, dass für die Mischung von einigen blauen und grünen Farben negative Rotanteile nötig sind. (Vgl. Schmidt, Ulrich: Professionelle Videotechnik. Grundlagen, Filmtechnik, Fernsehtechnik, Geräte- und Studioteknik in SD, HD, DI, 3D, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 6. Auflage, 2013, S. 72.)

3.3. XYZ, xyY

Ein System ohne negative Spektralwertkurven bildet das Normalenzsystem mit den Normfarbwerten XYZ. Die CIE definierte diese Normfarbwerte und ordnete ihnen bestimmte Wellenlängen zu:

„X = 700nm (Rot)

Y = 546,1nm (Grün)

Z = 435,8nm (Blau)“

Greule, Roland: Licht und Beleuchtung im Medienbereich, 2014, S. 78.

Aus diesen Normfarbwerten ergeben sich die Normfarbwertanteile xyz.

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}$$

$$y = \frac{Y}{X+Y+Z}$$

$$z = \frac{Z}{X+Y+Z}$$

Formel 2: Formeln für die Normfarbwerte X, Y und Z

Die dazugehörigen Spektralwertkurven werden Normspektralwertkurven genannt und haben folgenden Verlauf:

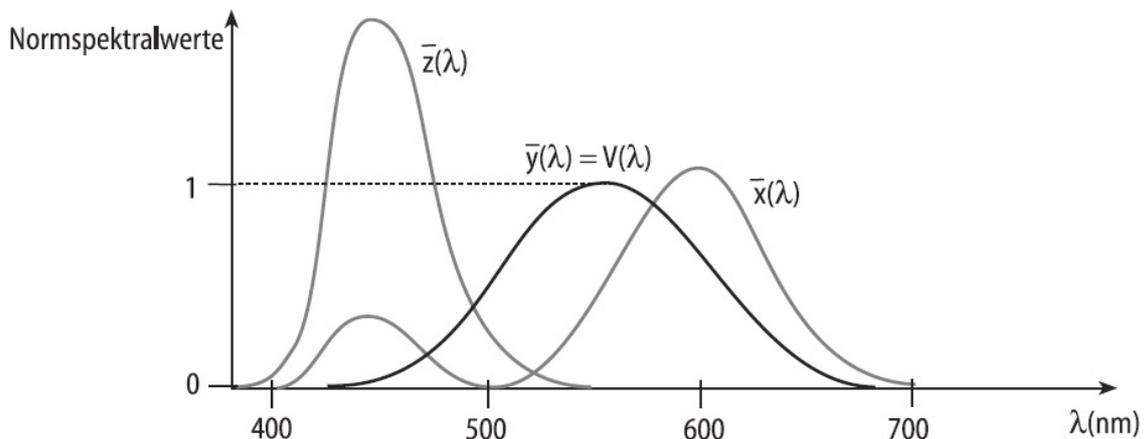


Abbildung 7: Normspektralwertkurven der Normfarbwerte XYZ

Die Normspektralwertkurve, die zum Normspektralwertanteil y und zum Normspektralwert Y gehört, weist einen proportionalen Verlauf zur spektralen Hellempfindlichkeitskurve $V(\lambda)$ auf. Deshalb ist der Normfarbwert Y auch proportional zur Leuchtdichte. (Vgl. Schmidt, Ulrich: Professionelle Videotechnik. Grundlagen, Filmtechnik, Fernsehtechnik, Geräte- und Studioteknik in SD, HD, DI, 3D, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 6. Auflage, 2013, S. 74.) Mit Y kann also die Helligkeit angegeben werden.

Die Summe der Normfarbwertanteile xyz ergibt immer 1. Deshalb ist es nicht nötig für einen Farbort und dessen Sättigung alle drei Normfarbwertanteile anzugeben, sondern es braucht nur zwei. Überwiegend werden die beiden Normfarbwertanteile x und y verwendet. Diese stehen für den Rot- und den Grünanteil eines Farbortes.

Eine Umrechnung von x , y und z zu X , Y , und Z ist nicht möglich, da den Normfarbwerten hierfür Informationen (Helligkeitsinformationen) fehlen.

Mit x und y lässt sich ein Koordinatensystem aufspannen, welches den Spektralfarbenzug beinhaltet und somit alle Farben enthält, die der Mensch sehen kann. Dieses Koordinatensystem stellt einen diagonalen Schnitt durch den dreidimensionalen XYZ-Farbraum (Würfel) dar und es bildet sich so ein Dreieck, in dessen Eckpunkten die Normfarbwerte liegen. Da sie außerhalb des Spektralfarbenzuges liegen und physikalisch nicht zu erreichen sind, werden X , Y und Z auch als virtuelle Primärvalenzen bezeichnet.

(Vgl. Schmidt, Ulrich: Professionelle Videotechnik. Grundlagen, Filmtechnik, Fernsehtechnik, Geräte- und Studioteknik in SD, HD, DI, 3D, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 6. Auflage, 2013, S. 74.)

Innerhalb des Spektralfarbenzuges liegen alle mischbaren und sichtbaren Farbräume wie der RGB-Farbraum und die Farbräume nach Rec. 709 und 2020. Mehr dazu im Kapitel 3.7. Farbraum nach Rec. 709 / 2020.

Um eine vollständige Beschreibung einer Farbe angeben zu können, ist neben dem Farbort und der Sättigung auch die Helligkeit ein wichtiger Faktor. Mithilfe des Tripels xyY sind alle Angaben für eine Farbe möglich.

Das xy -Koordinatensystem und der Spektralfarbenzug sind im nachfolgenden Kapitel 3.4. CIE Normfarbtafel zu sehen.

3.4. CIE Normfarbtafel

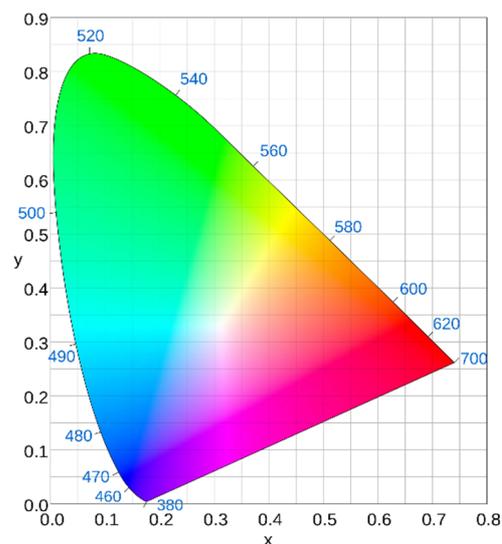


Abbildung 8: CIE Normfarbtafel

Die CIE Normfarbtafel wurde 1931 von der Internationalen Beleuchtungskommission (Commission internationale de l'éclairage) festgelegt.

Der hufeisenförmige Kurvenzug liegt in einem gleichschenkligen Dreieck, in dessen Eckpunkten die drei virtuellen Primärvalenzen liegen.

Dieses Dreieck befindet sich in einem Koordinatensystem. Auf der x-Achse liegen die x-Farbwerte und auf der y-Achse liegen die y-Farbwerte des xyY-Systems. Hierzu mehr im Kapitel 3.3. XYZ, xyY.

Auf dem äußeren Rand des Hufeisens befindet sich die Spektralwertkurve mit allen Spektralfarben des sichtbaren Lichtes. Auf dieser Kurve sind die Spektralfarben am stärksten gesättigt. Die Verbindung zwischen Blau und Rot wird als Purpurlinie beschrieben. Die Farben, die auf dieser Linie liegen, sind keine Spektralfarben.

Alle Farben, die sich innerhalb dieser hufeisenförmigen Fläche befinden, sind mittels der additiven Farbmischung herzustellen.

Im Mittelfunkt des Dreiecks mit den Farbwerten $x = y = z = 0,333$ befindet sich der Unbuntpunkt. Dieser Punkt wird auch als E gekennzeichnet.

Verbindet man einen Punkt auf dem Spektralfarbenzug mit E, so liegt auf dieser Geraden derselbe Farbton mit abnehmender Sättigung zum Unbuntpunkt hin. Der Punkt auf dem Spektralfarbenzug wird als dominante Wellenlänge bezeichnet. Die dominante Wellenlänge entspricht der Wellenlänge der vom Auge wahrgenommenen Farbe. Sie kann auch als empfundene Wellenlänge bezeichnet werden.

Man erhält die Komplementärfarbe „B“ zu einer gewählten Farbe „A“ auf dem Spektralkurvenzug, indem eine Gerade ausgehend von diesem Punkt „A“ durch den Unbuntpunkt E wieder hin zum Spektralkurvenzug gezogen wird.

Die Normfarbtafel befindet sich auf einer zweidimensionalen Fläche und es können mit den Farbwerten x und y nur der Farbton und die Farbsättigung angegeben werden. Die Helligkeit kann nicht in dieser zweidimensionalen Fläche angegeben werden. Für die Helligkeit kommt also eine dritte Dimension hinzu. So entsteht ein asymmetrischer Höhenzug, da nicht alle Farben die maximal mögliche Helligkeit erreichen können.

3.5. Farbtemperatur

Weiß ist nicht gleich Weiß. Weißes Licht kann unterschiedliche Farbigkeit haben. Die Farbigkeit von weißem Licht wird auch als Lichtfarbe oder als Farbtemperatur bezeichnet.

Wie bereits erwähnt besteht weißes Licht aus allen Spektralfarben des sichtbaren Spektrums bzw. aus den drei Grundfarben der additiven Farbmischung. Die Farbigkeit bzw. die Farbtemperatur hängt von den Anteilen des farbigen Lichtes ab, aus denen das Weiß gemischt wird. Vor allem der Rot- und der Blau-Anteil sind dabei wichtige Parameter.

Enthält das gemischte Weiß einen höheren Blau-Anteil im Vergleich zu den Rot- und Grün-Anteilen, dann erscheint das Weiß bläulich und somit wirkt es kühler. Wenn das Weiß allerdings einen verhältnismäßig höheren Rot-Anteil enthält, dann ist es leicht rötlich gefärbt

und wirkt wärmer. Sind Blau- und Rot-Anteil relativ ausgeglichen, so entsteht ein neutrales Weiß. An der Art der Beschreibung von weißem Licht ist schon zu erkennen, dass weißes Licht mit Adjektiven beschrieben wird, mit denen man die Beschreibung einer Temperatur assoziiert.

Die Farbtemperatur lässt sich mit Hilfe des Planck'schen Strahlers gut beschreiben.

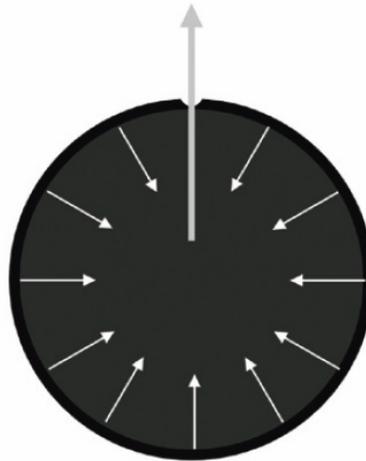


Abbildung 9: Schematische Darstellung des Planck'schen Strahlers

Der Planck'sche Strahler ist ein Hohlkörper, der von innen komplett schwarz ist. Durch eine kleine Öffnung fällt Licht in das Innere des Körpers, das durch die schwarze Färbung fast vollständig absorbiert wird. Der Strahler erhitzt sich dadurch und beginnt ab einer gewissen Temperatur zu glühen. Diese Temperatur liegt bei ca. 800°C , was auf der Kelvin-Temperaturskala einem Wert von 1073K entspricht.

Durch das Glühen des Planck'schen Strahlers, tritt Licht auch wieder durch die kleine Öffnung aus. Mit zunehmender Temperatur des Strahlers verändert sich die Farbigkeit des austretenden Lichtes. Bei der Glühtemperatur von 1073K tritt rötliches Licht aus der Öffnung aus. Je höher die Temperatur des Strahlers wird, desto bläulicher also kühler wird das austretende Licht.

Die Farbtemperatur bzw. die Farbigkeit des weißen Lichtes wird in Kelvin angegeben. Dabei entspricht die Farbtemperaturangabe der Temperatur des Planck'schen Strahlers für die jeweilige Farbigkeit.

Die Kelvin-Temperaturskala beginnt beim absoluten Nullpunkt: -273°C entsprechen 0K . Das bedeutet, dass 273K 0°C entsprechen.

Ein warmes, rötliches Weiß hat also eine niedrige Farbtemperatur und ein kühles, bläuliches Weiß hat dementsprechend eine hohe Farbtemperatur.

Farbtemperatur in Kelvin	Farbigkeit des weißen Lichtes
800 - 1000	Rot

2000 - 3000	Gelblich-weiß
4000	Neutral-weiß
5000 - 7000	Kühl-weiß

Tabelle 2: Sprachliche Beschreibung der Farbtemperatur

In folgendem Diagramm ist der Planck'sche Kurvenzug zu sehen, auf dem unterschiedliche Farbtemperaturen verortet sind.

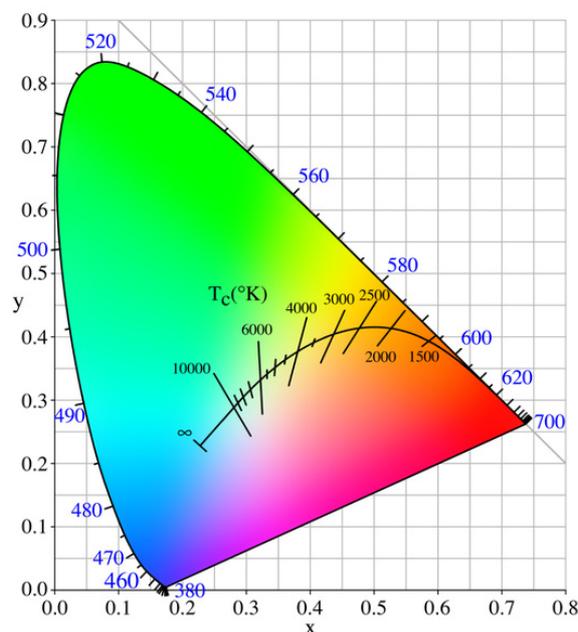


Abbildung 10: CIE Normfarbtafel mit Planck'schem Kurvenzug

Die Geraden, die bestimmte Farbtemperaturen auf dem Planck'schen Kurvenzug schneiden, heißen Judd'sche Geraden. Diese Geraden helfen bei der Bestimmung der ähnlichsten Farbtemperatur.

Die Angabe der „ähnlichsten Farbtemperatur“ kommt viel häufiger vor als die Angabe der Farbtemperatur. Der Unterschied dieser beiden Größen liegt darin, dass die Farbtemperatur ausschließlich für echte Temperaturstrahler wie die Glühlampe und der Planck'sche Strahler gilt und die ähnlichste Farbtemperatur wird für alle weiteren vorhandenen Lichtquellen angegeben.

Die ähnlichste Farbtemperatur ist eine fiktive Größe und bezieht sich auf die Temperatur/Farbtemperatur, die ein Temperaturstrahler bei vorherrschender Farbigkeit hätte.

Liegt ein Farbort auf einer dieser Geraden oder in der Nähe, so entspricht die „ähnlichste Farbtemperatur“ dieses Farbortes der Farbtemperatur auf dem Planck'schen Kurvenzug, die von der Geraden geschnitten wird.

Farbtemperaturunterschiede werden abhängig von der Farbtemperatur (gering, hoch) unterschiedlich stark wahrgenommen. Bei niedrigen Farbtemperaturen werden bereits kleine Farbtemperaturunterschiede sehr deutlich wahrgenommen. Dies liegt daran, dass in dem niedrigen Farbtemperaturbereich kleine Farbtemperaturunterschiede zu großen Änderungen der Farbkoordinaten führen. Dieselbe Änderung der Farbtemperatur ist im hohen Farbtemperaturbereich kaum sichtbar, da die Änderung dort nur zu geringen Änderungen der Farbkoordinaten führt.

Im Bereich der ähnlichsten Farbtemperatur sind solche Aussagen noch ungenauer, da die ähnlichste Farbtemperatur an sich größere Toleranzen im Hinblick auf die Genauigkeit der Farbtemperatur besitzt, denn zwei Farborte mit deutlich unterschiedlichen Farbkoordinaten kann dieselbe ähnliche Farbtemperatur durch die Judd'schen Geraden zugeordnet werden.

Die CIE hat bestimmte Farbtemperaturen als Normlichtarten festgelegt. Für diese Arbeit ist die Normlichtart D65 die wichtigste, da sie den Weißpunkt in den Farbräumen Rec. 709 und Rec. 2020 definiert. Hierzu mehr im Kapitel 3.5. Farbraum nach Rec. 709 / 2020.

Die Normlichtart D65 bezieht sich auf das Tageslicht mit der „ähnlichsten Farbtemperatur“ von 6504K. Diese Normlichtart steht für das natürliche Tageslicht und bezieht deshalb die UV-Anteile des Lichtes mit ein.

3.6. McAdam-Ellipsen und Binning

Die Farbtemperatur ist für die Bestimmung und die Zuordnung von weißem Licht von Bedeutung. Aber auch farbiges Licht sollte klassifiziert werden. Dies ist besonders wichtig, wenn mehrere Lichtquellen einer Farbe zusammen verwendet werden sollen wie es bei LED-Screens der Fall ist. Um die Farbigkeit von Lichtquellen kategorisieren zu können, entwickelte McAdam die nach ihm benannten McAdam-Ellipsen.

„Eine MacAdam-Ellipse ist im CIE-x-y-Diagramm jener Bereich um einen Bezugsfarbton, in dem die Vergleichsfarben als gleichabständig wahrgenommen werden.“ Ris, Hans Rudolf: Beleuchtungstechnik für Praktiker, 5., überarbeitete und erweiterte Auflage, 2015, S. 157

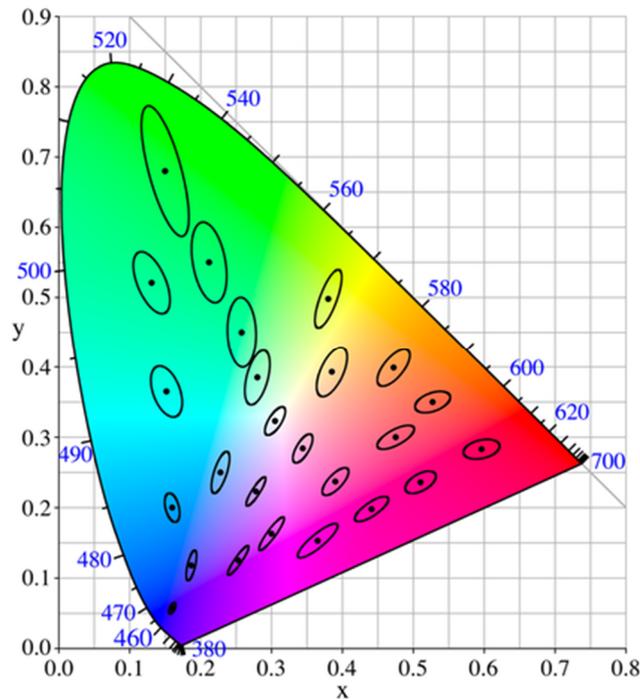


Abbildung 11: McAdam-Ellipsen in der CIE Normfarbtafel

Die Ellipsen sind in der Grafik um den Faktor 10 zu groß dargestellt, damit die Unterschiede deutlich werden (vgl. Greule, Roland: Licht und Beleuchtung im Medienbereich, Carl Hanser Verlag, 2015, S. 155).

Die unterschiedlichen Größen rühren daher, dass die CIE Normfarbtafel nicht gleichabständig ist. Aber auch die einzelnen Ellipsen können in unterschiedliche Größen eingeteilt werden. Diese unterschiedlichen Größen stellen dann die Abweichung vom Zielfarbtort dar und wurden statistisch mit einer größeren Anzahl von Probanden ermittelt. Diese Abweichung wird in SDCM angegeben.

Größe der McAdam-Ellipse	1 MacAdam (SDCM)	2...3 MacAdam (SDCM)	>4 MacAdam (SDCM)
Farbqualität	Farbunterschied nicht sichtbar	Farbunterschied kaum sichtbar	Farbunterschied sichtbar

Tabelle 3: Definition der Farbqualität mithilfe der McAdam-Ellipsen

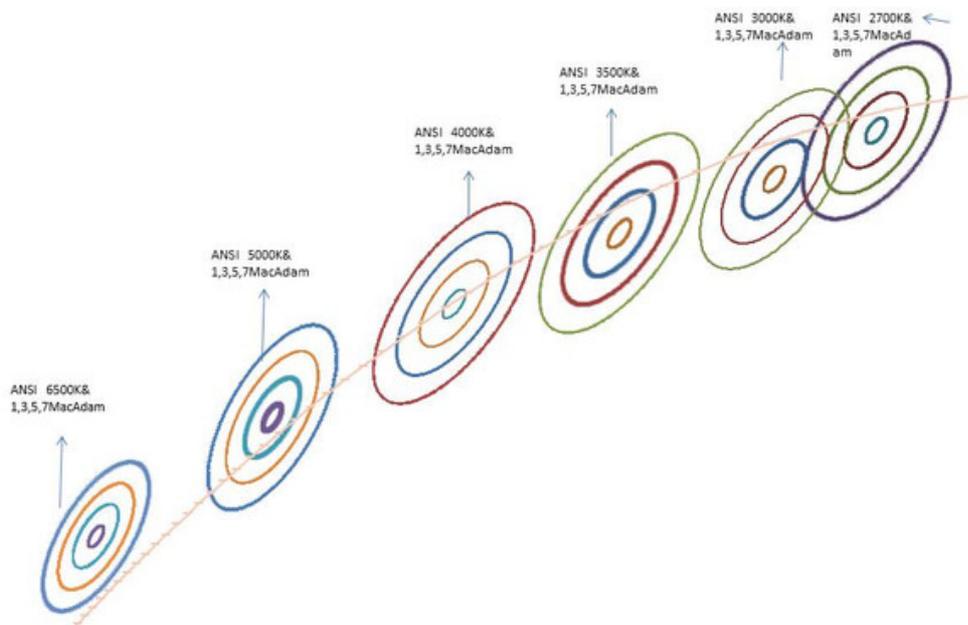


Abbildung 12: 1- bis 7-Step MacAdam (SDCM)

Bei der Produktion von farbigen LED-Chips sind die MacAdam-Ellipsen für die Klassifizierung der Chips wie bereits erwähnt von großer Bedeutung. Es ist zu beachten, dass sich die LED-Chips, die zusammen verwendet werden sollen, in ihrem Farbort und ihrer Helligkeit nicht bemerkbar voneinander unterscheiden sollen. Aus diesem Grund werden die LED-Chips nach bestimmten Kriterien sortiert. Diese Sortierung wird auch als Binning bezeichnet. Die ANSI-Norm (American National Standards Institute) legt die Kriterien für das Binning fest und sieht vor einen Wert von 4 SDCM nicht zu überschreiten, da die Farbunterschiede sonst deutlich sichtbar sind (vgl. Binning garantiert konstante Lichtqualität: Pfad: <http://www.licht.de/de/trends-wissen/licht-specials/modern-und-effizient-leds/qualitaetsmerkmale-von-leds/leds-binning-und-macadams/> (abgerufen am 02.06.16)).

3.7. Farbraum nach Rec. 709 / 2020

Rec. 709 und Rec. 2020 sind Farbräume aus dem Fernsehbereich.

Sie wurden eingeführt, um einheitliche Farbstandards für diesen Bereich zu definieren. Die Wiedergabemedien müssen für eine genaue Farbproduktion, basierend auf den obigen Standards, gewisse Einstellmöglichkeiten bezüglich der Farbwiedergabe und Farbräume besitzen.

Der Standard Rec. 709 bezieht sich auf High Definition Wiedergaben und der Standard Rec. 2020 bezieht sich auf Ultra High Definition Wiedergaben.

Bei beiden Systemen wird der Weißpunkt auf 6500K (D65) festgelegt. Deshalb weichen die Farbwerte des Weißpunktes von den Farbwerten des „Gleichenergieweiß“ ab, das bei $x = y = 0,33$, also in der Mitte des Farbdreiecks, liegt. Im Folgenden sind die Farbwerte der Primärvalenzen und des Weißpunktes für beide Farbräume aufgeführt.

Farbraum	Farbwerte	Rot	Grün	Blau	Weiß
Rec. 709	x	0,6400	0,3000	0,1500	0,3127
	y	0,3300	0,6000	0,0600	0,3290
Rec. 2020	x	0,7080	0,1700	0,1310	0,3127
	y	0,2920	0,7970	0,0460	0,3290

Tabelle 4: Farbräume nach Rec. 709 und nach Rec. 2020 im Vergleich

Die oben angegebenen Farbwerte der Primärvalenzen geben die Koordinaten der Eckpunkte der Farbräume an. Es fällt auf, dass der Farbraum Rec. 2020 größer ist als der Farbraum Rec. 709 und somit eine größere Anzahl von Farben darstellen kann. Mit Rec. 709 werden ca. 35,9% der CIE Normfarbtafel abgedeckt und Rec. 2020 deckt ca. 75,8% der CIE Normfarbtafel ab. Dies ist ein deutlicher Unterschied.

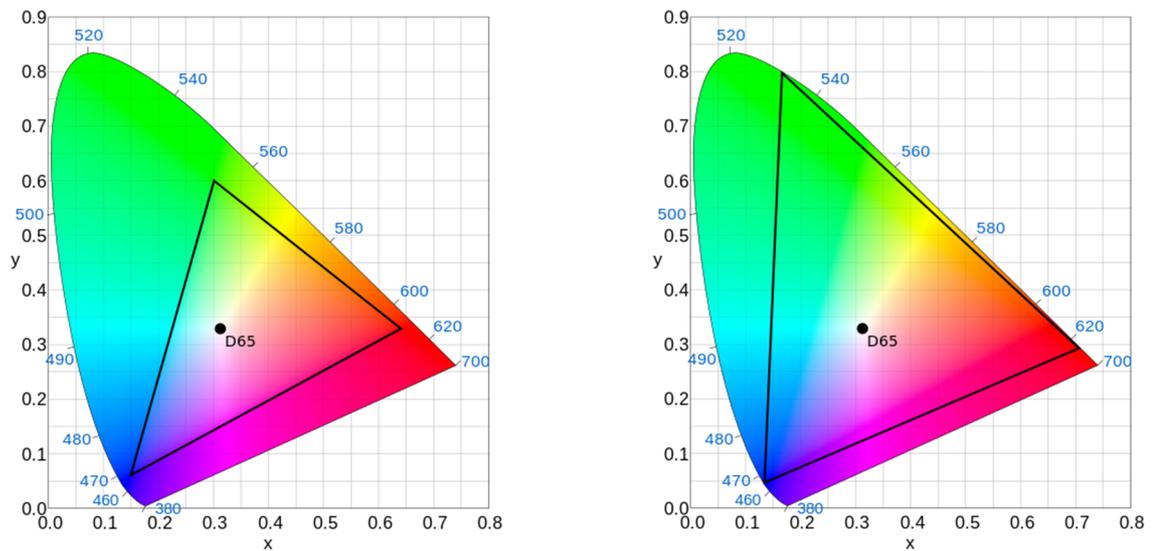


Abbildung 13: Links: Rec. 709 Farbdreieck im CIE Farbraum (1931), Rechts: Rec. 2020 Farbdreieck im CIE Farbraum (1931)

4. Videotechnische Grundlagen

Bei der Beschreibung der videotechnischen Grundlagen wird die Analogtechnik ausgelassen und nur auf die Digitaltechnik eingegangen, da die Digitaltechnik heutzutage in den meisten Bereich bereits Standard ist. Auch für LED-Screens ist nur die Digitaltechnik relevant.

4.1. Gamma

Das Gamma-Prinzip beschreibt das Verhalten der Grauwerte (Gradation) auf einem Monitor. Das Verhalten ist von der Signalspannung und von der Helligkeit angegeben in Leuchtdichte, die am Monitor erzeugt wird, abhängig.

$$\frac{L}{L_{max}} = \left(\frac{U}{U_{max}} \right)^{\gamma_w}$$

L : Leuchtdichte $\left[\frac{cd}{m^2} \right]$

U : Signalspannung $[V]$

γ_w : Gamma bei Wiedergabe

Formel 3: Zusammenhang des Wiedergabe-Gammas

Das Gamma zeigt an, dass das Verhältnis zwischen dem Signal und der Helligkeit nicht linear ist. Dieses Verhalten rührt von der Braun'schen Bildröhre und dessen Steuerkennlinie her. Der Gamma-Wiedergabe-Wert der Braun'schen Röhre liegt bei $\gamma_w = 2,22$.

Das Ziel ist aber, eine lineare „Über-Alles-Kennlinie (Gradation)“ herzustellen. Um das erreichen zu können, muss bereits die Aufnahme verzerrt werden. Der Grad der Vorverzerrung (γ_A) richtet sich nach dem Grad Verzerrung bei der Wiedergabe. Um also eine lineare Kennlinie zu erhalten, müssen beide Verzerrungen zusammen 1 ergeben.

Es gelten folgende Zusammenhänge:

$$\gamma_w \cdot \gamma_A = 1$$

$$\gamma_A = \gamma_w^{-1} = (2,22)^{-1} = 0,45$$

Formel 4: Gamma Zusammenhänge

Auf diesem Prinzip beruht die Vorgabe, dass alle Videosignale vorverzerrt sind. In den folgenden Kapiteln wird diese Vorverzerrung nicht mehr explizit genannt.

Neue Monitortechnologien wie LCD oder Plasma Displays oder auch andere Wiedergabemedien für Videosignale müssen sich also nach der ursprünglichen Wiedergabeverzerrung der Braun'schen Röhre richten und diese elektronisch umsetzen. Der Gamma-Wiedergabe-Wert ist also für alle Wiedergabegeräte auf 2,22 festgelegt.

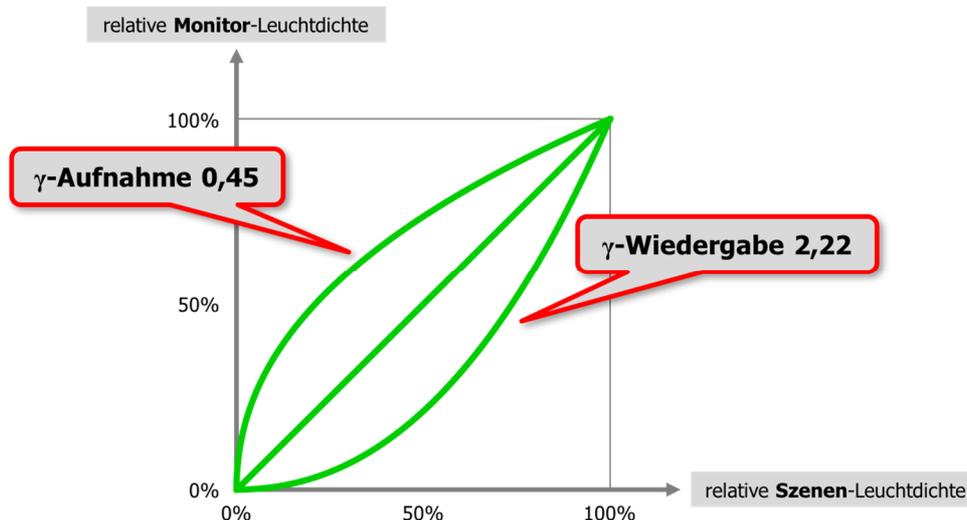


Abbildung 14: Gamma Zusammenhänge und Kennlinien

Der Gamma-Aufnahme-Wert ist hingegen frei wählbar und nicht auf 0,45 festgelegt. Grund dafür ist, dass das Gamma auch ein bildgestaltender Aspekt ist, da das Kontrastverhalten so bewusst beeinflusst werden kann. Mit einem γ_A kleiner als 0,45 krümmt sich die „Über-Alles-Kennlinie) nach unten, weshalb mehr Graustufen im dunklen Bereich möglich sind als im hellen. Umgekehrt verhalten sich die „Über-Alles-Kennlinie“ und die Graustufen bei einem γ_A , das größer als 0,45 ist.

Außerdem kann die Gamma-Aufnahme-Kurve auch eine S-Form haben, wodurch sich die hellen und dunklen Bildbereiche gleichermaßen verändern und die mittleren Grauwerte im Bezug dazu anders verhalten. In dunklen und hellen Bildbereichen gibt es also mehr Graustufen als im Bereich dazwischen.

4.2. Videonorm

In der Videonorm sind wichtige Parameter des Videosignals enthalten. Hier sind einige Videonorm-Beispiele für HD- und UHD-Videosignale.

720p/50 1080i/25 1080p/50 2160p/50

Die Videonorm besteht aus der aktiven Zeilenzahl (Zeilenzahl die tatsächlich sichtbar ist und nicht in den Austastlücken liegt), der Art der Bildabtastung und der Anzahl der Vollbilder pro Sekunde.

Diese und einige weitere wichtige Parameter eines Videosignals werden in diesem Kapitel vorgestellt.

Zu unterschieden gelten die unterschiedlichen Auflösungen von digitalen Videobildern. Die Auflösung wird in Standard Definition, High Definition und Ultra-High Definition aufgegliedert. In den letzten Jahren sind noch weitere Auflösungen hinzugekommen und die Auflösung ist nach oben hin nicht begrenzt.

Ein SD-Videosignal (Standard Definition) stellt hier mit einem Bildseitenverhältnis von 4:3 (bzw. 4,1:3) und einer aktiven Zeilenanzahl von 576 die geringste Auflösung dar. Die Zeilenanzahl ist die vertikale Auflösung und die horizontale Auflösung wird in Pixeln pro Zeile angegeben. Die gesamte Auflösung des SD-Videosignal wird also wie folgt angegeben und berechnet: 576x720.

Bei einem digitalen SD-Signal ist zu beachten, dass die Pixel nicht quadratisch sind.

Ein HD-Videosignal (High Definition) stellt eine Steigerung der Auflösung dar. Auch das Bildseitenverhältnis hat sich von 4:3 zu 16:9 verändert. Allgemein gesagt ist das Bild breiter geworden. Durch das andere Bildseitenverhältnis sind quadratische Pixel wieder gewährleistet.

Zu unterscheiden ist das HD-Signal in ein kleines HD-Signal und in das „normale“ HD-Signal. Die aktive Zeilenanzahl des kleinen HD beläuft sich auf 720 und die des HD-Signals auf 1080. Es gibt also diese beiden HD-Auflösungen: 720x1280 und 1080x1920.

Mit dem UHD-Videosignal (Ultra-High Definition) verdoppelt sich die aktive Zeilenanzahl des HD-Signal und auch die Pixelanzahl pro Zeile verdoppelt sich. Damit ist die Auflösung eines UHD-Signals viermal so groß wie die des HD-Signals. Das Bildseitenverhältnis bleibt 16:9 und besitzt dann eine Auflösung von 2160x3840.

Die Art der Bildabtastung kann allgemein in die zwei Arten i und p geteilt werden. Das i steht dabei für eine interlaced Abtastung und das p für eine progressive Abtastung. Mit interlaced ist gemeint, dass zwei Halbbilder von zwei unterschiedlichen und aufeinander folgenden Bildern ein Bild bilden. 50 Halbbilder pro Sekunde ergeben dann 25 Voll-(Bilder) in der Sekunde. Eine progressive Abtastung hingegen besteht aus realen Vollbildern. Deshalb beträgt die Bildrate auch 50 Vollbilder in der Sekunde. Daraus lässt sich schon vermuten, dass ein progressives Bild eine höhere Datenübertragungsrate auslöst als eine interlaced Abtastung. Dazu mehr im Kapitel 4.3.5. Datenraten.

Bei LED-Screens muss darauf geachtet werden welcher Bildabtastung das wiederzugebende Videosignal unterliegt, da LED-Screens keine interlaced Bilder verarbeiten können. Ist nur ein interlaced Videosignal vorhanden, so muss dies erst gewandelt werden, damit es auf den LED-Screen übertragen werden kann.

Einer Videonorm können also fast alle beschriebenen Parameter entnommen werden.

4.3. Digitalsignale

4.3.1. Abtastfrequenz

Für die Digitalisierung von analogen Signalen ist zunächst die Abtastfrequenz von Bedeutung. Die Abtastfrequenz gibt an, wie oft von dem analogen Signal in der Sekunde ein Wert genommen wird. Es gilt sich nach dem Abtasttheorem zu richten, das besagt, dass die Abtastfrequenz $f_{\text{Abt}} \geq 2 \times f_G$ also die Grenzfrequenz bzw. die Bandbreite ist. Bei dem analogen SD-Signal beträgt die volle Bandbreite (Y-Signal) 5MHz und beim analogen HD-Signale beträgt die volle Bandbreite (Y-Signal) 30MHz. Zudem kommt, dass die Abtastfrequenz ein ganzzahliges Vielfaches von der Zeilenfrequenz des 625 Zeilensystems (Europa) und des 525 Zeilensystems (USA, Japan) betragen soll. Das kleinste gemeinsame Vielfache bildet dabei eine Frequenz von 2,25MHz. International wurde dann die Abtastraten von 13,5MHz (SD) und 74,25MHz (HD) festgelegt.

4.3.2. Quantisierung

Ein nächster Schritt ist die Quantisierung, da digitale Signale nicht nur zeitdiskret, sondern auch wertediskret sind. Das bedeutet, dass zu bestimmten Zeitpunkten bestimmte Werte vorliegen. Diese Werte werden mittels binärer Zahlen wiedergegeben und übertragen. Die Anzahl möglicher Werte bzw. die Auflösung wie fein die Werte sind wird durch die Quantisierung bestimmt. Übliche Quantisierungen für digitale Videosignale sind 8Bit, 10Bit oder auch 12Bit. Mit 8Bit sind theoretisch 2^8 Werte also 256 Stufen möglich, mit 10Bit sind theoretisch 2^{10} also 1024 Stufen möglich und mit 12Bit sind es theoretisch 2^{12} also 4096 Stufen. Die Anzahl der Stufen ist bei Videosignalen für feine Farb- oder Grauabstufungen und Farb-/Grauverläufe wichtig. Wenn beispielsweise ein Bild mit einem blauen Himmel, der sehr feine

Farbverläufe enthält, mit einer zu geringen Bittiefe also mit zu wenig Quantisierungsstufen wiedergegeben wird, so wird kein homogener Farbverlauf dargestellt, sondern ein Himmel mit mehreren deutlich erkennbaren blauen Farbtreppen/-stufen.

Bei den Videopegeln ist die Quantisierung auch von Bedeutung. Die Videopegel (noch analog) für Weiß (100% bzw. 0,7V) und Schwarz (0% bzw. 0V) müssen den Quantisierungsstufen zugeordnet werden. Die Zuordnung wird im nächsten Kapitel 4.3.3. RGB- und Komponentensignal näher beschrieben.

4.3.3. RGB- und Komponentensignal

Das RGB-Signal ist das farbige Videosignal mit der besten Qualität.

Die Farbkamera besitzt drei Bildwandler, die für die unterschiedlichen Wellenlängenbereiche der Farben Rot, Grün und Blau zuständig sind. Vor diesen Bildwandlern befinden sich entsprechende Filter, die nur das Licht der entsprechenden Farbe durchlassen. So entstehen drei Helligkeitssignale für unterschiedliche Wellenlängenbereiche. Diese Signale sind noch analog und müssen wie zuvor beschrieben digitalisiert werden.

Das RGB-Signal beruht auf dem Prinzip der additiven Farbmischung. So können aus diesen drei Farben alle weiteren Farben des RGB-Farbraumes auf dem Bildschirm erzeugt werden. Dies ist von den Helligkeitsanteilen der drei Signale abhängig. Sind die Helligkeitsanteile der drei Signale identisch, so ergeben sich alle unbunten Farben bzw. die Graustufen.

Die Übertragung der drei Signale kann durch die Digitalisierung über nur eine Leitung erfolgen. In der Analogtechnik waren drei Leitungen, für jedes Signal eine Leitung, nötig, doch in der Digitaltechnik können die drei Signale im Zeitmultiplex übertragen werden.

Ein qualitativ ebenso gutes Farbsignal bildet das Komponentensignal $Y C_R C_B$.

Das Komponentensignal ist im Prinzip ein verändertes RGB-Signal, das ganz einfach mit der Schwarz/Weiß-Technik kompatibel ist.

Das Y-Signal ist nichts anderes als das direkte Leuchtdichtesignal (Helligkeit), das für eine S/W-Wiedergabe wichtig ist. Die anderen beiden Komponenten C_R und C_B sind gewichtete Farbdifferenzsignale, in denen nur Farbinformationen (Farbton und Sättigung) aber keine Helligkeitsinformationen enthalten sind.

Die beiden Farbdifferenzsignale sind R-Y und B-Y. Ein drittes Farbdifferenzsignal für Grün G-Y ist nicht nötig, da sich der Anteil aus bereits zwei von drei Farbdifferenzsignalen errechnen lässt. Außerdem würde sich das grüne Farbdifferenzsignal nicht gut eignen, da der Grünanteil am Y-Signal am größten ist und sich dadurch nur sehr geringe Pegel für ein Differenzsignal ergeben würden.

Die Komponenten C_R und C_B ergeben sich aus diesem Farbdifferenzsignalen. Die Farbdifferenzsignale werden in ihren Pegeln reduziert, da sie nicht größer als das Y-Signal sein sollen.

In folgender Tabelle sind die Formeln für die drei Komponenten des Komponentensignals für SD, HD und UHD aufgeführt.

	Digital		
	SD	HD	UHD
Y	$0,2990 * R + 0,587 * G + 0,1140 * B$	$0,2126 * R + 0,7152 * G + 0,0722 * B$	$0,2627 * R + 0,6780 * G + 0,0593 * B$
C_R	$(R - Y) * 0,713$	$(R - Y) * 0,6350$	$(R - Y) / 1,4746$
C_B	$(B - Y) * 0,564$	$(B - Y) * 0,5389$	$(B - Y) / 1,8814$

Tabelle 5: Definition der Digitalkomponenten für SD, HD und UHD

Die Faktoren des Y-Signals ergeben sich aus den verwendeten Leuchtstoffen der Wiedergabemonitore noch aus Zeiten der Analogtechnik. Die Braun'sche Röhre und dessen Leuchtstoffe sind bestimmend für das SD Y-Signal. Mit der Einführung des HD Fernsehens wurde die Formel dann an die damals neu verwendeten Leuchtstoffe angepasst. Die Einführung des digitalen Fernsehens hat an den Faktoren des HD-Komponentensignals, das überwiegend angewendet wird, nichts weiter verändert. Aber für UHD mussten die Faktoren noch einmal angepasst werden.

Weil das menschliche Auge feine Farbabstufungen kaum oder sehr schwer wahrnehmen kann, können die Farbdifferenzsignale in ihrer Auflösung reduziert werden. Diese Reduzierung wird im Kapitel 4.3.4. Abtaststrukturen näher beschrieben.

Wie bereits erwähnt besitzen digitale Signale bestimmte Quantisierungsstufen. Die vorliegenden Videopegel müssen also diesen Quantisierungsstufen zugeordnet werden, um digital übertragen werden zu können.

Bei einer 8-bit Quantisierung entspricht der Pegel 100% (also Weiß) des Y-Signals einer Stufe mit dem Digitalwert 235. Der Pegel 0% (also Schwarz) entspricht einem Digitalwert von 16. Für die Graustufen stehen also 220 Werte zur Verfügung. Die Farbdifferenzsignale bzw. die Farbkomponenten C_R und C_B können Digitalwerte zwischen 16 und 240 annehmen. Es fällt auf, dass die Werte von 0-15 und von 241 bis 255 gar nicht belegt sind. Diese Bereiche werden Head- und Footroom genannt und sind für Übersteuerungsreserven angedacht. Diese Quantisierung kommt bei einem SD-Signal vor.

Bei HD-Videosignalen oder auch bei einigen SD-Signalen liegt eine 10-bit Quantisierung vor. Bei 10-bit liegt das Weiß des Y-Signals bei dem Digitalwert 940 und Schwarz bei dem Digitalwert 64. Die Farbkomponenten C_R und C_B können Digitalwerte zwischen 64 und 960 annehmen. Auch hier sind Head- und Footroom vorhanden.

Bei einem Ultra-HD-Signal kann entweder auch eine 10-bit Quantisierung oder eine 12-bit Quantisierung verwendet werden. Für den Weißwert liegt der Digitalwert 3760 vor und für den Schwarzwert ein Digitalwert von 256. Die Farbkomponenten C_R und C_B können Digitalwerte zwischen 256 und 3840 annehmen. Da mit 12-bit 4096 Digitalwerte erzielt werden können ist zu erkennen, dass auch hier wieder Head- und Footroom vorliegen.

Der höchste oben angegebene Wert entspricht also immer einem analogen Pegel von 100% und der niedrigste oben angegebene Wert entspricht einem Pegel von 0%. Dabei muss darauf geachtet werden, ob es sich um das Helligkeitssignale Y oder um C_R und C_B handelt.

Die Zuordnung der Quantisierungsstufen des RGB-Signals wird hier nicht weiter beschrieben, da es in der Praxis nicht verwendet wird aufgrund von zu hohen Datenraten. Dazu ist im Kapitel 4.3.4 Abtaststrukturen mehr zu finden. Im Prinzip werden aber dieselben Quantisierungsstufen wie bei dem Y -Signal verwendet und dies dreimal.

Wie auch das RGB-Signal kann das Komponentensignal über nur eine Leitung im Zeitmultiplex übertragen werden.

4.3.4. Abtaststrukturen

Abtaststrukturen werden für die Reduzierung von Auflösung verwendet. Wie bereits beschrieben können die Farbkomponenten C_R und C_B des Komponentensignals in ihrer Auflösung reduziert werden. Mit Abtaststrukturen können sogar auch Datenreduktionen erreicht werden, wenn die Auflösungen zu gering abgetastet werden.

Übliche Abtaststrukturen sind: 4:4:4, 4:2:2 und 4:2:0.

Die Abtaststruktur 4:4:4 bedeutet, dass alle drei Komponenten ($Y C_R C_B$) gleichermaßen in voller Auflösung ($3 \times 13,5\text{MHz}$ bzw. $3 \times 74,25\text{MHz}$) d.h. dass sie in allen Zeilen und allen Pixeln des Bildes (horizontal und vertikal) abgetastet werden. Eine Reduzierung hat hier noch nicht stattgefunden. Diese Abtaststruktur wird bei dem RGB-Signal angewendet.

Für das Komponentensignal wird vor allem die Abtaststruktur 4:2:2 angewendet. Diese Abtaststruktur tastet das Y -Signal in voller vertikaler und horizontaler Auflösung ($13,5\text{MHz}$ bzw. $74,25\text{MHz}$) ab und die Farbdifferenzsignale werden in ihrer horizontalen Auflösung (Pixel) halbiert ($6,75\text{MHz}$ bzw. $37,235\text{MHz}$). Dies ist die Standard-Abtaststruktur.

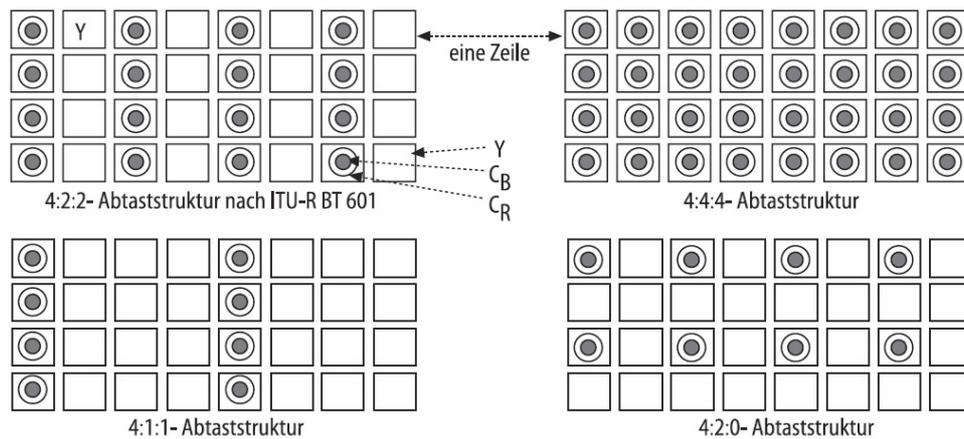


Abbildung 15: Abtaststrukturen im Vergleich

Die Abtaststrukturen 4:1:1 und 4:2:0 stehen dann für datenreduzierte Signale.

Die Abtaststruktur 4:2:0 bewirkt eine Halbierung der Auflösung der Farbdifferenzsignale horizontal und vertikal und die Abtaststruktur 4:1:1 reduziert die horizontale Auflösung der Farbdifferenzsignale auf ein Viertel und die vertikale Auflösung wird dabei nicht reduziert.

4.3.5. Datenraten

Im Digitalen sind vor allem die Datenraten interessant, da an ihnen die digitale Qualität der Signale gemessen wird. Zur Erinnerung waren in der analogen Welt die Bandbreiten ein Maß für die Signalqualität.

Auch für die Übertragung der Signale und die Schnittstellen sind die Datenraten von großer Bedeutung.

Die Datenraten ergeben sich aus der Gesamtzahl der Pixel, der Abtaststruktur, der Bittiefe (8, 10 oder 12 Bit) und aus den Bildern pro Sekunde. Zu beachten ist dabei, dass die Pixel des passiven Bildes betrachtet werden müssen, da natürlich auch alle passiven Daten eines Bildes übermittelt werden.

Rechenbeispiel für ein digitales SD-Signal:

$$\begin{aligned}
 &864 \text{ Pixel} \times 625 \text{ Zeilen} \\
 &\times 2 \text{ (wegen 4:2:2 und der Komponenten } C_R \text{ und } C_B) \\
 &\times 10\text{-bit} \\
 &\times 25 \text{ Bilder/s} \\
 &= \mathbf{270\text{Mbit/s}}
 \end{aligned}$$

Rechenbeispiel für ein digitales HD-Signal:

2640 Pixel x 1125 Zeilen
x 2 (wegen 4:2:2 und der Komponenten C_R und C_B)
x 10-bit
x 25 Bilder/s
= 1,485Gbit/s

Rechenbeispiel für ein digitales UHD-Signal:

3840 Pixel x 2160 Zeilen
x 2 (wegen 4:2:2 und der Komponenten C_R und C_B)
x 12-bit
x 25 Bilder/s
= 4,977Gbit/s

Anhand der Beispielberechnungen sind nochmal die Parameter zu erkennen, von denen die Größe der Datenrate abhängt. Ändert sich also die Videonorm, so ändert sich wohlmöglich auch die Datenrate. Die Datenrate wird beispielsweise größer, wenn sich die Anzahl der aktiven Zeilen bzw. die Pixelanzahl erhöht oder wenn sich die Bildabtastung von interlaced auf progressiv ändert.

Zu beachten ist, dass das digitale SD-Bild keine quadratischen Pixel im Gegensatz zu dem HD-Bild besitzt.

4.4. Schnittstellen

Für die digitalen Schnittstellen sind die Datenraten der Signale bzw. hier des Komponentensignals wichtig zu kennen (siehe Kapitel 4.3.5. Datenraten).

Die für diese Arbeit ist die HD-SDI Schnittstelle die wichtigste, da diese bei den Messungen zur Verwendung kommt.

Weitere gängige Schnittstellen sind außerdem HDMI und der Display Port. Teilweise kommen auch noch ältere Schnittstellen wie DVI zum Einsatz.

4.4.1. SDI

Die Abkürzung SDI steht für „Serial digital Interface“. Damit ist gesagt, dass die Übertragung eine serielle Übertragung ist. Es wird ein Koaxialkabel für die Signalübertragung benötigt dessen Leitungslänge von den verschiedenen SDI-Arten und deren Datenströmen abhängt.

Das Standard SDI kann Datenraten von 270Mbit/s übermitteln. Es eignet sich also für digitale SD-Signalübertragung.

Mit HD-SDI lassen sich Datenraten bis 1,5Gbit/s übermitteln. Die Datenworte umfassen immer 10Bit. Falls ein Datenwort mit nur 8Bit vorliegt, werden einfach zwei Nullen angehängt. HD-SDI ist für 4:2:2-HD-Signale mit 1080i oder 720p geeignet. Für höhere Leistungen gibt es Dual Link oder 3G-SDI. Mit diesen beiden Schnittstellen lassen sich doppelt so große Datenraten, also 2 x 1,485Gbit/s, übertragen. Bei Dual Link werden zwei 1,5Gbit/s-Signale parallel übertragen. Dabei werden zwei HD-SDI Kanäle übertragen. Mit 3G-SDI ist es möglich ebenfalls eine Datenrate von 2,97Gbit/s mit nur einem Kanal zu übertragen.

(Vgl. Schmidt, Ulrich: Professionelle Videotechnik. Grundlagen, Filmtechnik, Fernsehtechnik, Geräte- und Studioteknik in SD, HD, DI, 3D, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 6. Auflage, 2013, S. 154f.)

Entstehen größere Datenraten beispielsweise aufgrund von einem Signal mit mehr Pixeln (UHD) oder einem Signal mit mehr Frames per Seconds, so werden Schnittstellen mit höheren Datenraten verlangt. Auch hochauflösende Vollbilder können im Vergleich zu Halbbildern größere Datenraten auslösen.

In der folgenden Tabelle sind die verschiedenen SDI-Generationen mit zugehörigen Bitraten und Beispiel-Videoformaten ausgeführt.

SDI	Bitraten	Videoformat
SD-SDI	270Mbit/s	576i
HD-SDI	1,485 Gbit/s	720p, 1080i
Dual Link HD-SDI	2,970Gbit/s	1080p
3G-SDI	2,970Gbit/s	1080p
6G-SDI	6Gbit/s	4K
12G-SDI	12Gbit/s	4K

Tabelle 6: Gegenüberstellung der SDI-Schnittstellen

4.4.2. HDMI

Eine weitere Schnittstelle ist HDMI (High Definition Multimedia Interface).

Wie mit einem SCART-Stecker, mit dem sich allerdings nur analoge Daten übertragen lassen, lassen sich neben den Videodaten noch weitere Daten wie Audio- und Steuerdaten übertragen. Die Steckverbindung ist im Vergleich zum SCART-Stecker viel kleiner und kompakter.

Mit HDMI ist es möglich sehr hohe Datenraten zu übertragen. Die unterschiedlichen Generationen dieser Schnittstelle bieten immer größere Datenübertragungsraten, die auch bei der Übertragung von Ultra-HD-Signalen benötigt werden. Außerdem sind mit dieser Schnittstelle auch höhere Farbaufösungen (Bittiefe) möglich.

Einzigster Nachteil dieser Schnittstelle stellt die sehr geringe maximale Leitungslänge von ca. 15m dar. (Vgl. High Definition Multimedia Interface, Pfad: https://de.wikipedia.org/wiki/High_Definition_Multimedia_Interface (abgerufen am 30.05.16).) In folgender Tabelle sind einige HDMI Generationen und deren Datenraten zu finden.

HDMI Generation	Datenraten
HDMI 1.0	4,95Gbit/s
HDMI 1.3	10,2Gbit/s
HDMI 2.0	18Gbit/s

Tabelle 7: Gegenüberstellung der HDMI Generationen

4.4.3. Display Port

Der Display Port stellt die dritte relevante Schnittstelle dar.

Genau wie die HDMI-Schnittstelle können neben dem Videosignal weitere Signale wie Audiodaten übertragen werden. Die Steckverbindung ist ebenfalls relativ klein und weist im Vergleich zu HDMI eine Verriegelung auf. Diese Schnittstelle wurde entwickelt um die bekannten Videoschnittstellen VGA und DVI abzulösen.

Die Signalübertragung ist digital und seriell, was Vorteile für die Anzahl der Leitungen mit sich bringt.

Im Allgemeinen sind für die Datenübertragung mittels dem Display Port 4 Kanäle (Lanes) vorhanden, die je nach Bedarf benutzt werden. Die Anzahl der benutzten Kanäle richtet sich dabei nach der zu übertragenden Auflösung des Videosignals und nach der danach benötigten Bandbreite/Datenrate.

Auch wie bei den anderen Schnittstellen besitzt der Display Port aufgrund der stetigen Weiterentwicklung der Technik mehrere Generationen.

Die maximale Leitungslänge liegt zwischen 7m und 10m.

In der folgenden Tabelle sind einige Generationen des Display Port im Vergleich zu HDMI 2.0 dargestellt.

Standard	HDMI 2.0	DP 1.2	DP 1.3
Maximale Auflösung	3840x2160 Pixel	4096x2560 Pixel	7680x4320 Pixel (mit Kompression)/ 5120x2880 Pixel
Maximale Bandbreite	14,4Gbit/s	17,28Gbit/s	25,92Gbit/s

Tabelle 8: Display Port Schnittstellen im Vergleich zu HDMI

In dieser Aufstellung kann mit HDMI 2.0 ein UHD-Signal übertragen werden, mit dem DP 1.2 ein 4K-Signal und mit dem DP 1.3 ohne Kompression ein 5K-Signal.

Zu beachten ist, dass für die hohen Auflösungen, die mit dem Display Port übertragen werden, alle vier Lanes (Kanäle) der Schnittstelle benötigt werden. Die Datenrate teilt sich dann auf die vier Kanäle auf.

5. Licht- und Farbmessungen

5.1. Messgeräte

Um LED-Screens zu kalibrieren, ihr Farbmanagement zu überprüfen und anschließend auch vergleichen zu können, müssen geeignete Messgeräte ausgewählt werden. Diese Messgeräte müssen bestimmte Größen und Werte ausgeben können. Die Leuchtdichte, die Farbtemperatur und die Farbwerte mit den zugehörigen x- und y-Werten sind hier als wichtigste Größen zu nennen. Auf weitere Parameter zur Beurteilung von LED-Screens wird im Kapitel 9. Parameter zur Beurteilung der Qualität von LED-Screens näher eingegangen.

Das Messgerät, das sich für die Messung und Kalibrierung von LED-Screens eignet, muss also sowohl die Leuchtdichte als auch die Farbe des Lichtes messen können. Das bedeutet, dass das Messgerät sowohl photometrische als auch farbmetrische Daten ausgeben muss. Verwendet wird in dieser Arbeit ein Spektralradiometer, da es sich am besten für das Kalibrieren und für die Überprüfung des Farbmanagements von Displays eignet. Ein LED-Screen wird in dieser Arbeit zweckmäßig wie ein Display behandelt. Mit einem Dreibereichs-Messgerät (oder einem Vierbereichs-Messgerät) können ebenfalls Farbmessungen durchgeführt werden, das Messprinzip ist aber ein anderes.

Zu beachten gilt, dass das Licht und die Farbe von Selbststrahlern gemessen werden und Reflexionsgrade oder andere Einflüsse keine Rolle spielen.

Im Folgenden werden das Dreibereichs-Messverfahren und das Spektralverfahren näher beschrieben.

5.1.1. Dreibereichs-Messgerät

Dreibereichs-Messgeräte zeichnen sich dadurch aus, dass sie drei Sensoren mit jeweils einem Filter besitzen. Die Filter sind den Spektralwertkurven $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ und $\bar{z}(\lambda)$ des menschlichen Auges nachempfunden, weshalb das gesamte Prinzip dieses Messgerätes dem Prinzip der Wahrnehmung von Licht und Farbe des menschlichen Auges nachempfunden ist. Der exakte Verlauf der Spektralwertkurven kann aber nicht mit den Filtern erreicht werden, weshalb sich schon hierdurch Messungenauigkeiten ergeben. Diese nehmen mit Alterung der Filter weiter zu.

Die drei Sensoren nehmen gleichzeitig die Lichtintensität auf und die Filter teilen das eintreffende Licht in drei Spektralbereiche (Rot, Grün und Blau) auf. Das Messgerät kann durch die Filterung mit den angenäherten Spektralwertkurven direkt die Normfarbwerte X, Y und Z ausgeben. Weitere Werte können durch Rechenarbeit im Microcomputer des Messgerätes ausgegeben werden.

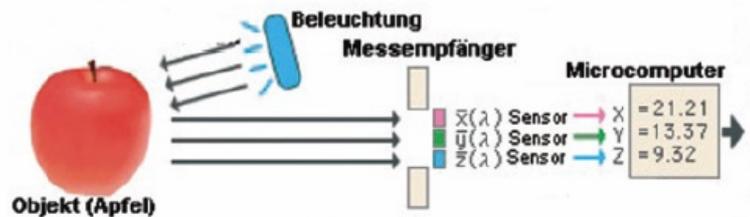


Abbildung 16: Schematischer Aufbau eines Dreibereichs-Messgerätes, hier mit der Messung von Objektfarbe (Apfel)

Das obige Bild zeigt den schematischen Aufbau eines Dreibereichs-Messgerätes. Werden Selbstleuchter wie Displays gemessen, so rückt an Stelle des Apfels ein Display und die Beleuchtung auf das Objekt kann vernachlässigt werden. Die Lichtstrahlen, die in das Messgerät eintreffen, rühren dann nicht von Reflexionen her, sondern kommen direkt von dem Selbstleuchter (Display).

5.1.2. Spektralradiometer

Das Spektralradiometer besitzt im Vergleich zum Dreibereichs-Messgerät keine drei Sensoren, die die Spektralwertkurven aufnehmen. Die Spektralwertkurven sind hier im Microcomputer des Messgerätes implementiert und sind somit auch viel genauer als die Filter des Dreibereichs-Messgerätes. Auch die $V(\lambda)$ -Kurve ist im Computer enthalten.

Wie der Name des Messgerätes vermuten lässt, wird das eintreffende Licht im Messgerät in seine spektralen Anteile aufgeteilt. Hierfür besitzt das Messgerät einen Mehrfachsensor wie ein CCD-Sensor. Mittels eines Beugungsgitters (oder in seltenen Fällen auch ein Prisma) wird die Zerlegung des Lichtes und die Spektralanteile herbeigeführt. Durch die Auslegung des Sensors sind die Anzahl und die Breiten der aufgenommenen Spektralbereiche des Messgerätes bestimmt. So können einige Messgeräte zusätzlich zum sichtbaren Spektralbereich auch den Infrarot- und den UV-Bereich erfassen.

Die aufgenommene Größe ist die Farbreizfunktion $\Phi(\lambda)$, die bei Selbstleuchtern mit der Strahlungsdichteverteilung des Lichtes (der Quelle) $S(\lambda)$ gleichgesetzt ist.

$$\Phi(\lambda) = S(\lambda)$$

Formel 5: Farbreizfunktion von Selbstleuchtern

Auch dieses Messgerät gibt die Normspektralwerte X, Y und Z aus. Diese werden im Microcomputer mit Zuhilfenahme der Spektralwertkurven wie folgt berechnet:

$$Y = \int_{380\text{ nm}}^{780\text{ nm}} \Phi(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) \cdot d\lambda$$

Formel 6: Berechnung des Normspektralwertes Y

Die Normspektralwerte X und Z werden entsprechend mit der zugehörigen Normspektralwertkurve berechnet.

Im Microcomputer oder in der Software des Messgerätes können viele weitere relevante farbmetrische und photometrische Werte berechnet und ausgegeben werden wie die Leuchtdichte, die Normspektralwertanteile x und y (und z), die dominante Wellenlänge, die Farbeinheit, der Farbwiedergabeindex (CRI) und die Correlated Color Temperature (CCT). Die Leuchtdichte wird mithilfe der V(λ)-Kurve berechnet, die Normspektralwertanteile werden wie im Kapitel 3.3. XYZ, xyY aus den Normfarbwerten berechnet und alle weiteren genannten farbmetrischen Größen können mittels der xy-Koordinaten errechnet werden. Außerdem gibt das Spektralradiometer neben dieser Vielzahl an Werten auch die Spektralkurve der Lichtquelle (Display) aus.

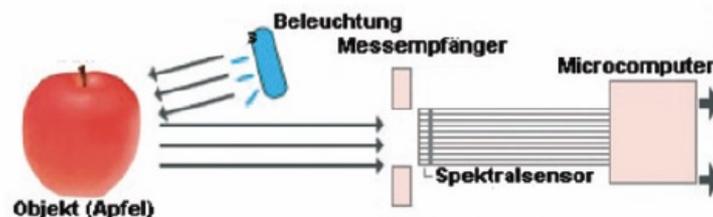


Abbildung 17: Schematischer Aufbau eines Spektralradiometers, hier mit der Messung von Objektfarbe (Apfel)

Auch bei dieser schematischen Darstellung muss beachtet werden, dass die Messung von Objektfarben dargestellt ist und die Messung von Lichtfarben vor dem Messgerät wie bei der Dreibereichs-Messung verändert werden muss.

5.1.3. Das Dreibereichs-Verfahren und das Spektralverfahren im Vergleich

Sowohl mit dem Dreibereichs- als auch mit dem Spektralverfahren (Spektralradiometer) sind Messungen der Lichtfarbe möglich. Die Anwendung (Messung) ist dabei entscheidend, von welchem Messverfahren Gebrauch gemacht wird.

Bei beiden Messverfahren wird das gemessene Licht in spektrale Anteile aufgeteilt, bevor es auf den Sensor oder die Sensoren trifft. Der Unterschied dabei ist, dass bei dem einen Messverfahren drei relativ große Spektralbereiche entstehen und bei dem anderen Verfahren durch viel mehr und viel kleinere Spektralbereiche das gesamte sichtbare Spektrum des Lichtes aufgespannt werden kann. In beiden Messverfahren sind die Normspektralwertkurven implementiert, Bei dem Dreibereichs-Verfahren in Form von drei Filtern und bei einem Spektralradiometer sind diese mathematisch im Microcomputer enthalten. Die Filtertechnik von Dreibereichs-Messgeräten stellt einen Nachteil dieses Messverfahrens dar, da die Filter nicht präzise genug sind, wodurch sich systematische Fehler einschleichen. Vorteile gegenüber des Spektralverfahrens sind die hohe Messgeschwindigkeit und die Anschaffungskosten. Ein schneller Messvorgang ist durch die Filtertechnik begründet, weil direkt die Normspektralwerte ohne aufwändige Berechnung ausgegeben werden können.

Das Spektralradiometer bietet dafür andere Vorteile, die für eine genaue Messung höher bewertet werden können. Es zeichnet sich durch eine hohe Genauigkeit der Messwerte aus, die spektrale Verteilung wird gemessen und angezeigt und sogar metamere Farben können mithilfe des Spektralradiometers unterschieden werden. (Metamere Farben sind gänzlich verschiedenen Farben, die unter bestimmten Bedingungen / Beleuchtungsbedingungen im menschlichen Auge die gleiche Farbwahrnehmung auslösen. Dieser Aspekt gilt eher für Körperfarben, weshalb dieses Phänomen für diese Arbeit nicht weiter relevant ist. (Vgl. Marchesi, Jost J.: Handbuch der Fotografie, Band 3, Farbtheorie und Farbmetrik; Farbumkehrtechnik, Negativ-Positiv- und Direkt-Positivtechnik; Digitale Fotografie, Verlag Photographie, 1. Auflage, 1998, S. 69).)

Der Preis für die Genauigkeit durch Rechenprozesse im Microcomputers des Messgerätes ist die Dauer des Messvorganges. Dies stellt im Verhältnis zu den Vorteilen jedoch einen weniger wichtigen Aspekt dar.

Für diese Arbeit und für die Messungen der LED-Screens wird ein Spektralradiometer verwendet. Zwei gängige Spektralradiometer, die zur farbmetrischen Messung von Displays und LED-Screens verwendet werden können sind das Jeti-Messgerät und ein Spektralradiometer von Konica Minolta.

Diese werden im Folgenden vorgestellt.

5.2. Jeti specbos 1211

Dieses Messgerät wurde für die Messungen, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt werden, ausgewählt.



Abbildung 18: Jeti Spektralradiometer Jeti specbos 1211

Das Jeti specbos 1211 bzw. das Jeti specbos 1211UV ist ein hochwertiges Spektralradiometer, das sich zur Messung und Kalibrierung gut eignet. Mit der Ausführung UV kann Licht im sichtbaren und im ultravioletten Spektralbereich gemessen werden. Für die Messung und Kalibrierung von LED-Screens ist der UV-Bereich nicht relevant und wird aus diesem Grund nicht weiter beachtet.

Die Funktionsweise ist wie im Kapitel 5.1.2. Spektralradiometer beschrieben.

Mit dem Jeti-Messgerät können alle Werte, die für die Kalibrierung und Analyse der LED-Screens wichtig sind, gemessen werden. Die zugehörige Mess-Software, die mit einem externen Computer oder Laptop betrieben wird, ermöglicht die Ausgabe einer Vielzahl von sowohl photometrischen als auch farbmtrischen Werten sowie auch einer Reihe von Grafiken. Die wichtigen Messwerte sind beispielsweise die Leuchtdichte, die xy-Koordinaten, die CCT und die dominante Wellenlänge. Zu den wichtigen Grafiken gehört das Spektrum und die CIE xy Normfarbtafel.

Die Formeln, mit denen einige der Werte aus den xy-Koordinaten berechnet werden, sind nicht bekannt.

Eine wichtige Information für die folgenden Messungen von LED-Screens ist, dass dieses Messgerät für die Angabe der CCT eine Toleranz von $\pm 20K$ aufweist.

Im Folgenden wird auf die standardmäßig zugehörige Mess-Software „LiVal“ und auf die speziell für die Display-Messung geeignete Mess-Software „MoDiCal“ eingegangen.

5.2.1. Die Mess-Software „LiVal“

Die Mess-Software „LiVal“ wird standardmäßig zusammen mit dem Messgerät geliefert.

Es bietet eine Vielzahl an Möglichkeiten der Messungen. Besonders eignet sich diese Software aber um unterschiedliche Lichtquellen zu messen und miteinander zu vergleichen. Aus diesem Grund sind viele wichtige Parameter für Lichtquellen und Leuchten zu finden. Einige dieser Parameter sind aber auch für die Messung und Kalibrierung von LED-Screens wichtig und interessant. Zudem besteht ein LED-Screen aus vielen einzelnen LEDs, die im Einzelnen eine Lichtquelle und in einem Verbund auch eine Leuchte darstellen können.

Die wichtigen Parameter für die Messung und Kalibrierung von LED-Screens, die mit dieser Software abgedeckt werden können, sind die Leuchtdichte, die xy-Koordinaten, die dominante Wellenlänge, die Spektren von Farben und die Verortung auf der CIE Normfarbtafel. Also können mit dieser Software eigentlich alle wichtigen Parameter und Messwerte aufgenommen werden. Zu sehen sind einige dieser Parameter auf der folgenden Abbildung.

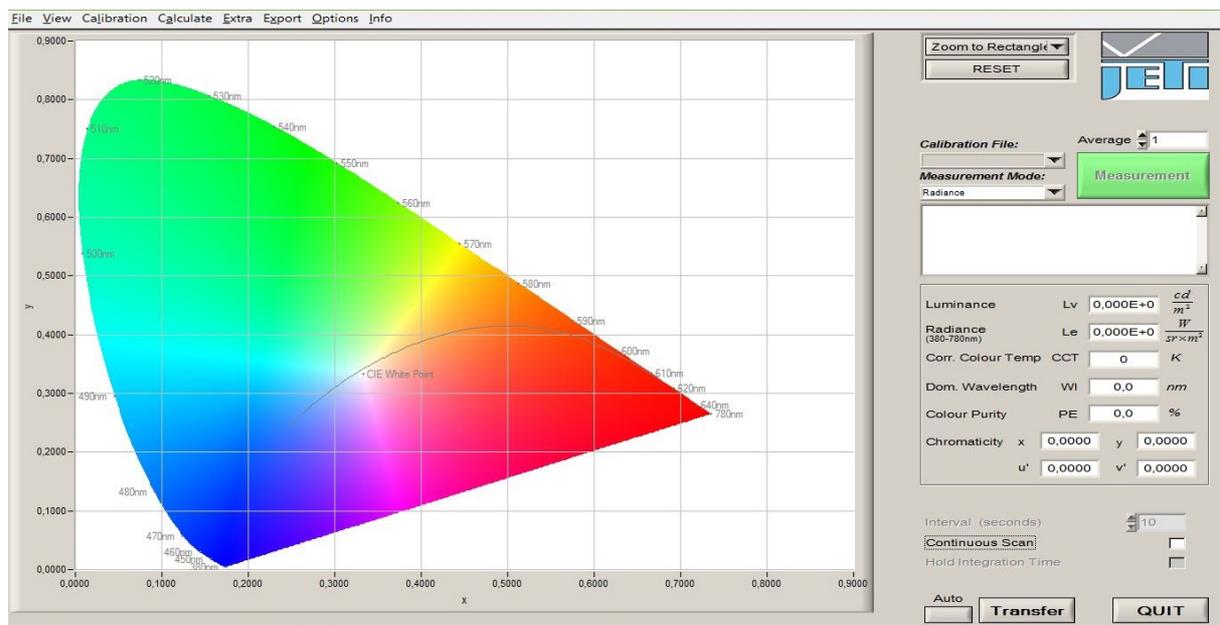


Abbildung 19: Eine Anzeigemöglichkeit der Mess-Software "LiVal" des Jeti Messgerätes

In der Abbildung ist außerdem zu sehen, dass die Anzahl der Messungen, über die gemittelt werden soll, ausgewählt werden kann. Der Maximalwert beträgt 32 Messungen. Dadurch werden die Angaben genauer.

Wenn das Messgerät an den Computer angeschlossen ist, taucht in der Software ein Knopf für den Messpunkt auf. Sobald der Knopf gedrückt wird, werden mittels eines Lasers die Größe und der Bereich des Messpunktes auf der Messfläche angezeigt. Diese Funktion ist ein gutes Hilfsmittel, um das Messgerät korrekt auszurichten und den Messbereich zu wählen.

Trotzdem spricht ein wichtiger Punkt gegen die Verwendung dieser Software als Mittel zur Messung und Kalibrierung von LED-Screens. Dieser Punkt liegt in der Kalibrierung. Denn

Mithilfe einer anderen Software, gestaltet sich die Kalibrierung um einiges einfacher. Diese Software nennt sich „MoDiCal“ und wird im Folgenden vorgestellt.

Mit der „LiVal“-Software wird nur die dominante Wellenlänge gemessen.

5.2.2. Die Mess-Software „MoDiCal“

Die Mess-Software „MoDiCal“ ist speziell für die Monitor-/Display-Messung konzipiert. In dieser Arbeit wird der LED-Screen wie ein Display behandelt und soll daher auch mit einem üblichen Messgerät und einer ebenfalls üblichen Mess-Software gemessen und kalibriert werden.

Mit dieser Software können fast alle wichtigen Parameter bzw. Messwerte aufgenommen, die auch mit der Standard-Software gemessen werden können. Es handelt sich um die Leuchtdichte, die xy-Koordinaten und die ähnlichste Farbtemperatur (CCT). Außerdem kann diese Software auch die Spektren und die Farborte auf der CIE Normfarbtafel anzeigen. Der einzige Messwert, der von dieser Software nicht ausgegeben werden kann, ist die dominante Wellenlänge. Deshalb wird nur dieser Wert mit der Standard-Software gemessen.

Damit ist aber noch nicht geklärt, weshalb sich diese Software für das Messen und Kalibrieren von Displays besonders gut eignet. Vor allem zwei Funktionen tragen dazu bei. Zum einen kann der Zielfarbraum aus einigen vorgeschlagenen Farbräumen ausgewählt oder selber definiert werden und zum anderen wird das Kalibrieren durch die Anzeige von RGB-Balken erleichtert. Diese sind auf der folgenden Abbildung zu sehen.

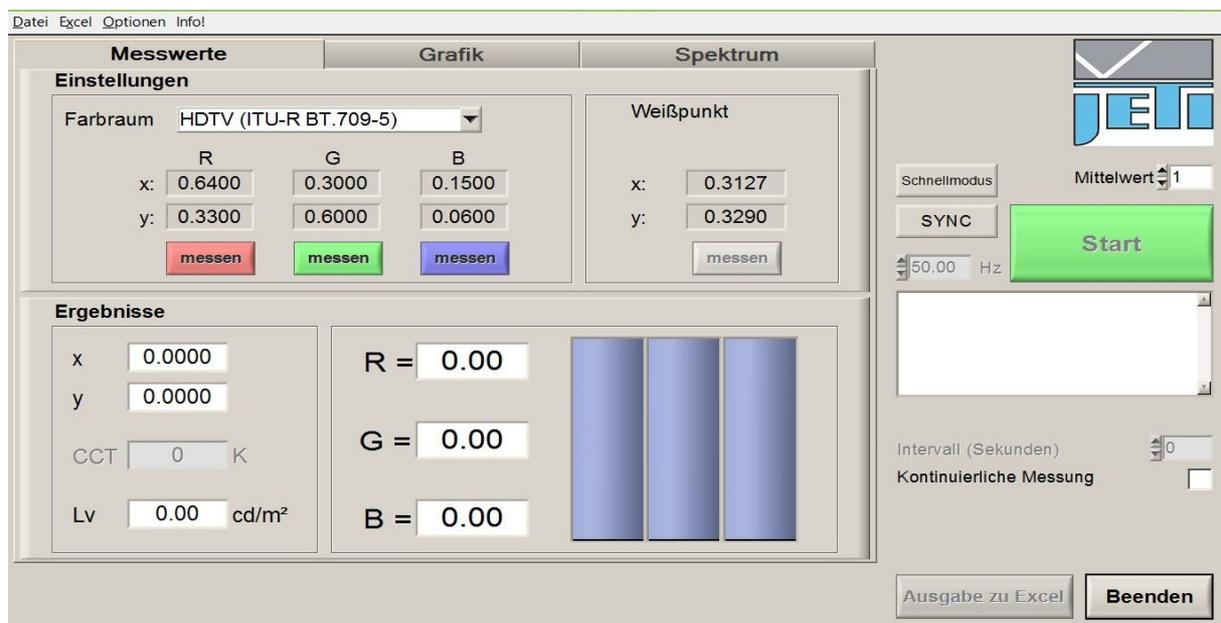


Abbildung 20: Menüpunkt „Messwerte“ der Mess-Software „MoDiCal“ des Jeti Messgerätes

Ist ein Zielfarbraum ausgewählt so werden die Zielwerte in Form von xy-Koordinaten für die drei Primärfarben und für den Weißpunkt in der Software angegeben. Somit wird ein direkter

Vergleich der Messwerte mit den Zielwerten ermöglicht. Außerdem reagieren die RGB-Balken ebenfalls auf den ausgewählten Zielfarbraum. Die Kalibrierung des Weißpunktes wird insofern durch die RGB-Balken und den Farbraum vereinfacht, dass der Weißpunkt dann am besten getroffen bzw. kalibriert ist, wenn die drei Farbbalken in der Waage liegen. Das zugehörige Spektrum hat damit aber nichts zu tun, die RGB-Anteile können sich im Spektrum trotzdem voneinander unterscheiden, was auch in den Messungen zu sehen sein wird.

Die Abbildung zeigt außerdem, dass die Messwerte auch in dieser Software über mehrere Messungen gemittelt werden können. Der Maximalwert beträgt hier allerdings 10 Messungen. Auch hier kann der Messpunkt angezeigt werden, sobald das Messgerät an den Computer angeschlossen ist.

Die folgende Abbildung zeigt den Menüpunkt „Grafik“.

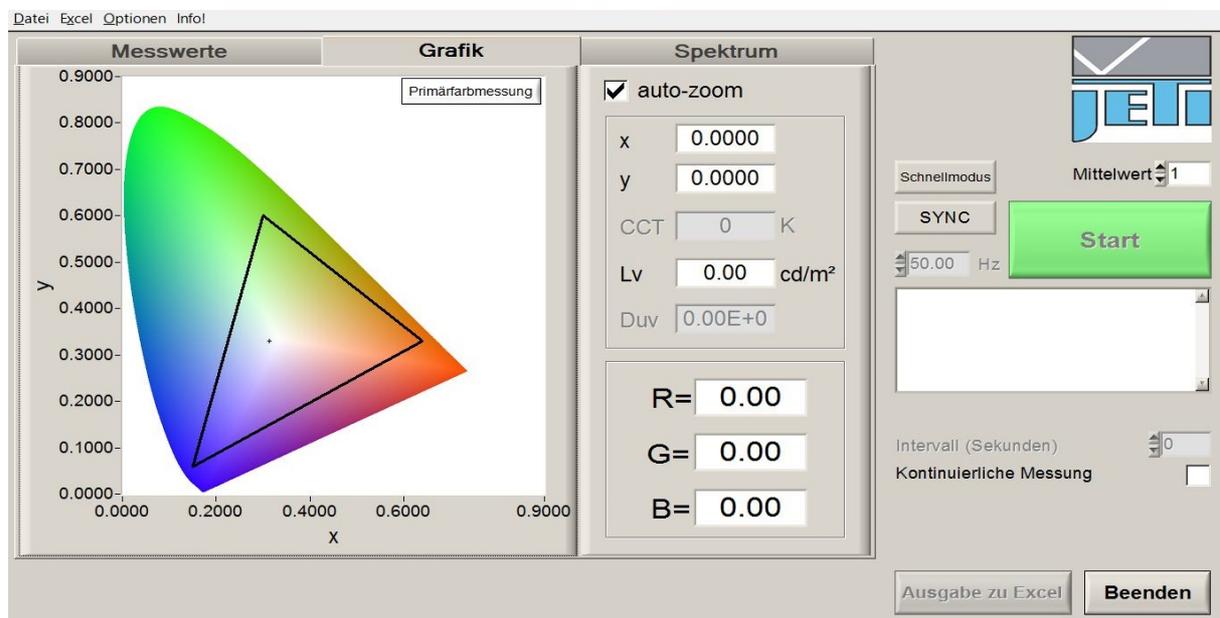


Abbildung 21: Menüpunkt „Grafik“ der Mess-Software "MoDiCall" des Jeti Messgerätes

In diesem Menüpunkt wird die CIE Normfarbtafel mit dem ausgewählten Zielfarbraum angezeigt. Auch der Weißpunkt des Zielfarbraumes ist mit einem Kreuz gekennzeichnet. Die Messwerte des ersten Menüpunktes werden auch hier noch einmal neben der Farbtafel angegeben. Mit der Funktion Primärfarbmessung kann auf der Grafik das Farbdreieck des vorliegenden Displays oder LED-Screens erzeugt werden. Dazu müssen auf das Display oder den LED-Screen nach Aufforderung Testbilder der Primärfarben wiedergegeben werden, die dann nacheinander gemessen werden. Diese Funktion kann überprüfen wie sich der gemessene Farbraum des Displays oder des LED-Screens von dem Zielfarbraum unterscheidet.

Auch das Spektrum kann mit dieser Software angezeigt werden, was in der folgenden Grafik zu sehen ist.

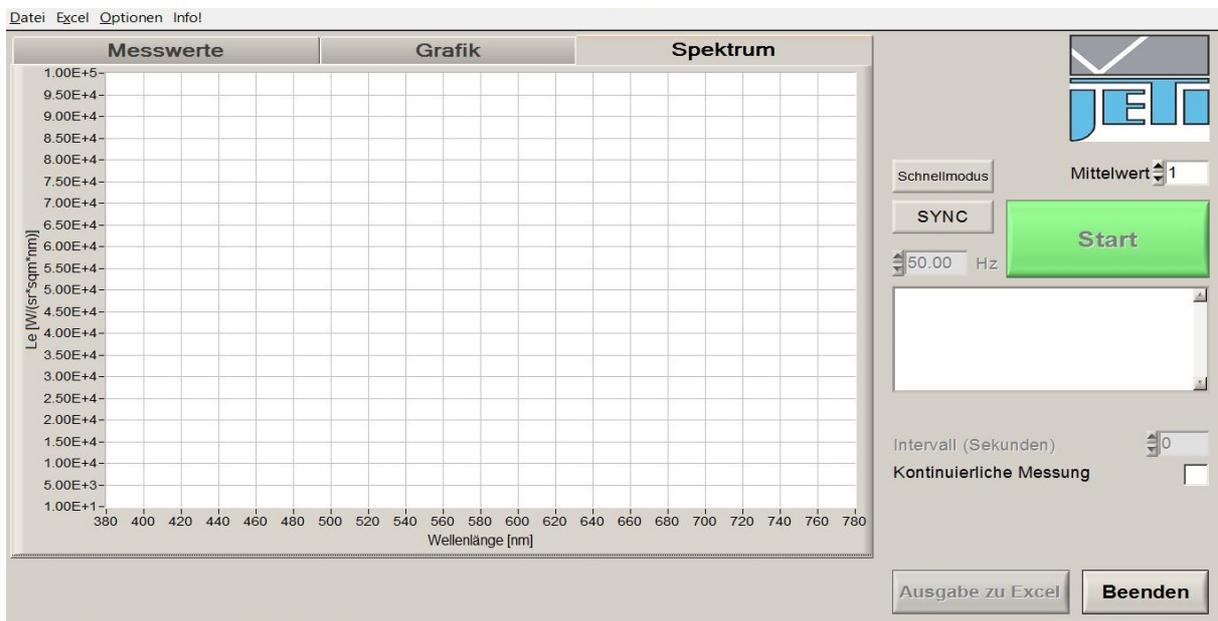


Abbildung 22: Menüpunkt „Spektrum“ der Mess-Software "MoDiCall" des Jeti Messgerätes

Sobald eine Messung durchgeführt wurde, werden in diesem Menüpunkt die vorhandenen Spektralanteile im sichtbaren Spektralbereich angezeigt.

5.3. Konica Minolta CS-2000/2000A

Das Konica Minolta CS-2000 oder die Weiterentwicklung Konica Minolta CS-2000A ist neben dem Jeti specbos 1211 ein weiteres qualitativ hochwertiges und in der Praxis gängiges Spektralradiometer, das zur Messung und Kalibrierung von Displays eingesetzt werden kann.



Abbildung 23: Konica Minolta CS-2000A

Es zeichnet sich besonders darin aus, dass es geringe Leuchtdichten messen kann. Die Weiterentwicklung CS-2000A kann geringe Leuchtdichten von bis zu $0,0005 \text{ cd/m}^2$ messen.

Wie das Jeti-Messgerät kann auch das Konica Minolta mithilfe eines Diffusors die Beleuchtungsstärke aufnehmen.

Auf der Rückseite befindet sich ein kleines Display, das einige Messwerte anzeigt. Mit einer zugehörigen Software und einem externen Computer können weitere Messwerte angezeigt und organisiert werden. Auch die Ansicht einiger Grafiken liefert die Software. Im Allgemeinen ist das Konica Minolta auch in der Lage alle, für diese Arbeit wichtigen, Messwerte wie die Leuchtdichte, die xy-Koordinaten, die dominante Wellenlänge und die CCT aufzunehmen und die relevanten Grafiken zu liefern.

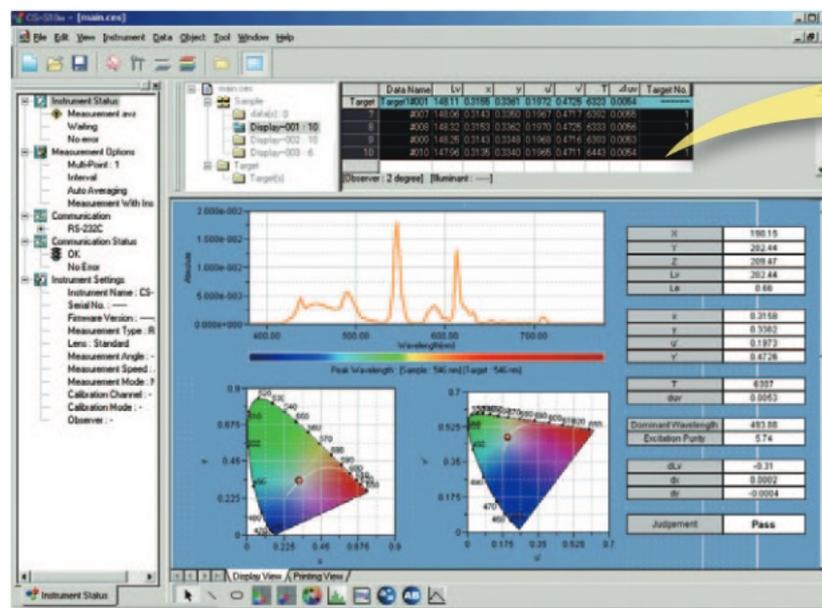


Abbildung 24: Software des Konica Minolta CS-2000A

5.4. Messgeräte und Farbtemperatur

Es stellt sich die Frage, wie die Messgeräte die Farbtemperatur messen und angeben. Wird zwischen der Farbtemperatur und der ähnlichsten Farbtemperatur unterschieden? Und was ist mit CCT gemeint? Welche xy-Koordinaten werden für die Normlichtart D65 angenommen?

Bereits im Kapitel 3.5. Farbtemperatur wurde erklärt, dass es einen Unterschied zwischen der Farbtemperatur und der ähnlichsten Farbtemperatur gibt. Die Farbtemperatur gilt für Temperaturstrahler und die ähnlichste Farbtemperatur wird bei allen anderen Lichtquellen angewendet. Die oben genannten Messgeräte geben Werte für die CCT, also für die korrelierte Farbtemperatur (Correlated Color Temperature), aus. Die CCT ist in den Messgeräten mit der ähnlichsten Farbtemperatur gleichgestellt, da CCT in Beschreibungen zum Messgerät direkt

mit ähnlichster Farbtemperatur übersetzt wird. Wird also die Farbtemperatur von einem Temperaturstrahler gemessen, so wird das Messgerät auch eine CCT angeben, da es nur diese Angabe vom Messgerät gibt.

Mit Bestimmten Annäherungs-Formeln kann ein Weiß eines Nicht-Temperaturstrahlers mithilfe der xy-Koordinaten einer Farbtemperatur auf dem Planck'schen Kurvenzug zugeordnet werden und wird dann als ähnlichste Farbtemperatur angegeben.

Welche Formel das Jeti-Messgerät verwendet ist ungewiss.

Im Nachstehenden werden zwei Annäherungs-Formeln vorgestellt.

$$CCT(x, y, z) = A_0 + \sum_{i=1}^3 A_i \cdot \exp\left[\frac{-n(x, y, z)}{t_i}\right]$$

$$A_0 = -949,86315$$

$$A_1 = 6253,80338$$

$$A_2 = 28,70599$$

$$A_3 = 0,00004$$

$$t_1 = 0,92159$$

$$t_2 = 0,20039$$

$$t_3 = 0,07125$$

$$n = \frac{x - x_e}{y - y_e}$$

$$x_e = 0,3366$$

$$y_e = 0,1735$$

x, y : gemessene Normfarbwertanteile

$$z = 1 - x - y$$

Formel 7: Formel 1 zur Berechnung der CCT aus den xy-Koordinaten

Für ähnlichste Farbtemperaturen, die größer als 50.000K sind, ändern sich die Werte der obigen Konstanten.

Die xy-Koordinaten für den Weißpunkt nach Rec. 709 sind wie folgt festgelegt.

$$x = 0,3127$$

$$y = 0,3290$$

Mit obiger Formel ergibt sich dann eine ähnlichste Farbtemperatur von 6500,74204K.

Die xy-Koordinaten der Normlichtart D65 sind den Koordinaten nach Rec. 709 sehr ähnlich. Sie besitzen zwei weitere Nachkommastellen.

$$x = 0,312713$$

$$y = 0,329016$$

Erwartet wird eine Farbtemperatur von 6504K, allerdings ergibt sich mit der obigen Formel eine ähnlichste Farbtemperatur von 6499,91445K.

Dies ist die zweite Annäherungs-Formel nach McCamy.

$$CCT(x, y) = -499 \cdot n^3 + 3525 \cdot n^2 - 6823,3 \cdot n + 5520,33$$

$$n = \frac{x - x_e}{y - y_e}$$

$$x_e = 0,3320$$

$$y_e = 0,1858$$

Formel 8: Formel nach McCamy zur Berechnung der CCT aus den xy-Koordinaten

Diese Formel ist zwischen ähnlichsten Farbtemperaturen zwischen 2000K und 10.000K genau genug.

Mit dieser Formel wird mit den xy-Koordinaten nach Rec. 709 eine ähnlichste Farbtemperatur von 6504K erreicht und mit den xy-Koordinaten der Normlichtart D65 ergibt sich eine immerhin noch eine ähnlichste Farbtemperatur von 6503K.

Anhand dieser Ergebnisse und Erkenntnisse kann es sich lohnen die ähnlichste Farbtemperatur selber anhand der gemessenen xy-Koordinaten nachzurechnen, um die Angabe des Messgerätes zu überprüfen, da die Messgeräte auch gewisse Toleranzen für die Angabe der CCT erlauben. Die Toleranz des Jeti specbos 1211 beträgt ± 20 K.

6. Grundlagen der Lichterzeugung mit Halbleiterdioden

6.1. Aufbau und Funktionsweise

Halbleiterdioden, die Licht emittieren werden abgekürzt LEDs genannt.

Am häufigsten werden Halbleiter der dritten und fünften Elementhauptgruppe des Periodensystems verwendet.

The image shows a periodic table of elements with a legend for classification and properties. The legend includes:

- Ordnungszahl** (Atomic Number): 1
- Symbol**: H
- Masse (u)** (Mass): 1.0079
- Vorkommen** (Occurrence):
 - o natürlich (natural)
 - o nat. radioaktiv (naturally radioactive)
 - o synthetisch (synthetic)
- Serie** (Series):
 - Alkalimetall (Alkali metal)
 - Erdalkalimetall (Alkaline earth metal)
 - Lanthanoid (Lanthanoid)
 - Actinoid (Actinoid)
 - Übergangsmetall (Transition metal)
 - Halbmetall (Metalloid)
 - Metalloid
 - Nichtmetall (Non-metal)
 - Halogen (Halogen)
 - Edelgas (Noble gas)

The periodic table shows elements from Hydrogen (1) to Oganesson (118). Elements are color-coded according to their series. The legend also includes symbols for solid (x), liquid (x), and gaseous (x) states.

Abbildung 25: Periodensystem der Elemente

An sich sind diese Halbleiter nicht besonders elektrisch leitfähig. Erst mit der Zugabe einer weiteren anderen Hauptgruppe, zum Beispiel eines Halbleiters der vierten Hauptgruppe, sind sie genügend leitfähig. Dies beruht auf den unterschiedlichen Elektronenkonfigurationen der Elemente.

Die leitfähigen Produkte werden als n- und p-dotierte Halbleiter bezeichnet. Eine n-Dotierung bedeutet, dass in dieser Halbleiter Elektronen leiten kann, da in ihm ein Elektronenüberschuss herrscht. Bei den p-dotierten Halbleitern ist genau das Gegenteil vorhanden. Diese Halbleiter weisen einen Elektronenmangel und einen Überschuss an Löchern auf.

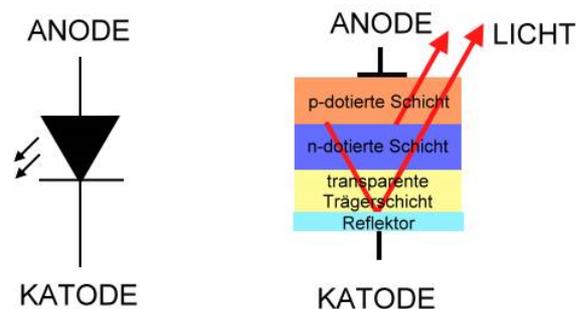
Mittels Dünnschichtverfahren werden pn-Kontakte hergestellt, indem die p- und n-Halbleiter aneinander liegen. Dadurch, dass auf der einen Seite ein Elektronenüberschuss und auf der

anderen Seite ein Löcherüberschuss vorhanden ist, kommt es zu einem sogenannten pn-Übergang bei anliegender Spannung.

Genau in dieser Rekombinationsschicht wird das Licht erzeugt.

(Vgl. Greule, Roland: Licht und Beleuchtung im Medienbereich, Carl Hanser Verlag, 2015, S. 114).

„Die Durchlassspannung liegt zwischen 2V und 4V und ist vom Halbleitermaterial abhängig. Der Durchlassstrom reicht von einigen Milliampère bis zu mehreren hundert Milliampère und ist durch die Leistung der jeweiligen LED bedingt.“ Ris, Hans Rudolf: Beleuchtungstechnik für Praktiker, 5., überarbeitete und erweiterte Auflage, 2015, S. 151.



nullohm.de

Abbildung 26: Schematischer Aufbau einer Licht emittierenden Diode

6.2. Lichtfarben

LEDs emittieren kein weißes Licht wie die meisten anderen Lichtquellen, sondern schmalbandiges oder auch monochromatisches farbiges Licht. Die Lichtfarbe ist dabei abhängig von den verwendeten Halbleitermaterialien/-elementen. Für die Lichtfarben Rot, Gelb, Grün und Blau werden folgende Halbleitermaterialien verwendet:

Rot, Gelb → Aluminium-Indium-Galliumphosphid, AlInGaP

Grün, Blau → Indium-Gallium-Nitrid, InGaN

(Siehe. Ris, Hans Rudolf: Beleuchtungstechnik für Praktiker, VDE Verlag GmbH, 5., überarbeitete und erweiterte Auflage, 2015, S. 153.)

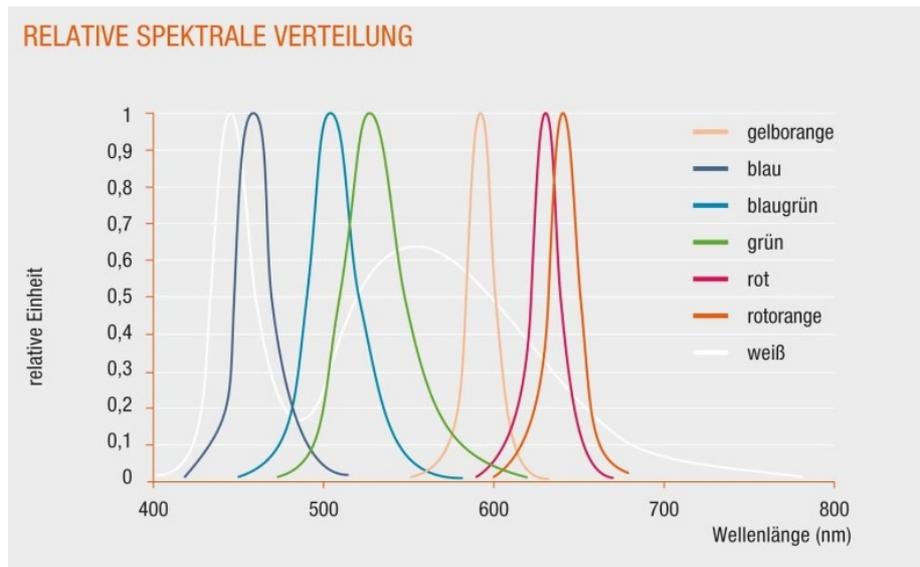


Abbildung 27: Relative Spektrale Verteilung von verschiedenen farbigen LEDs

In der Grafik sind die spektralen Bereiche für die verschiedenen Farben gekennzeichnet. Es ist zu erkennen, dass eine farbige LED ein sehr schmales Spektrum besitzt. Einige farbige LEDs weisen deshalb sehr schmale Linienspektren auf. Alle anderen Farben und auch Weiß können beispielsweise durch additive Farbmischung erzeugt werden.

Eine andere Möglichkeit weißes Licht herzustellen bietet die Konversionsmethode. Bei dieser Methode wird ein blauer LED-Chip und eine gelber Lumineszenzfarbstoff verwendet. Da Blau und Gelb Komplementärfarben sind, die sich zu Weiß ergänzen, kann auf diese Weise weißes Licht abgestrahlt werden.

Werden mehrere LED-Chips in einer Leuchte oder bei einem großen LED-Screen gleichzeitig und zusammen verwendet, ist es wichtig, dass die Lichtfarbe und die Helligkeit bei jedem Chip identisch sind bzw. dass die Abweichungen noch in einem bestimmten Toleranzbereich liegen. Das Binning sorgt dafür, dass die LED-Chips bei der Produktion passend sortiert werden (siehe Kapitel 3.6. McAdam-Ellipsen und Binning).

6.3. Bauweisen und Anwendungsbereiche

LEDs lassen sich in vier unterschiedliche Bauformen einteilen. Die Bauform ist immer von der Anwendung und dessen Anforderungen abhängig. Einige Anwendungsbereiche verlangen beispielsweise nach einer hohen Lichtausbeute und andere brauchen bloß eine Signalanzeige. Die unterschiedlichen Bauformen haben sich mit der Entwicklung der LED ebenfalls weiterentwickelt.

6.3.1. T-Type

Zu Beginn gab es die typische bedrahtete LED, auch T-Type genannt.

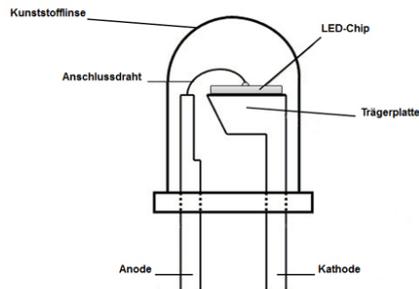


Abbildung 28: Aufbau einer bedrahteten LED

Diese Bauform wird früher wie heute als Kontrollleuchte verwendet. Heutzutage wird sie auch in LED Spots und LED-Lichterketten verwendet.

6.3.2. Superflux LED

Als Weiterentwicklung der bedrahteten LED gilt die Superflux LED.



Abbildung 29: Beispiel für eine Superflux LED

Sie zeichnet sich durch ihren großen Abstrahlwinkel, bedingt durch die Optik, aus. Außerdem besitzt sie vier Kontaktfüße, durch die die Wärme besser abgeleitet werden kann. Diese Bauform kann bis zu vier Chips enthalten, die mittels der vier Pins einzeln angesteuert werden können.

Diese Bauform wird in LED Retrofit Lampen, LED Modulen und in der Autobeleuchtung angewendet.

6.3.3. COD LED

Besondere Leistungsstärke wird mit der COD (Chip on Board) Bauform erreicht.

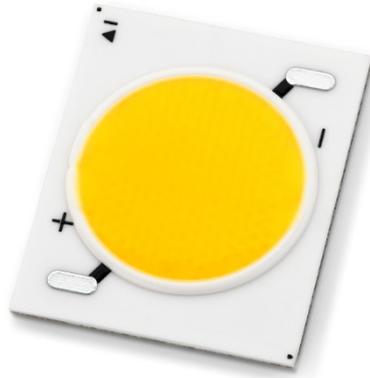


Abbildung 30: Beispiel für eine COD LED

Die Halbleiterkristalle sind direkt auf die Platine kontaktiert, wodurch die Wärme optimal abgeleitet werden kann. Es können Chipdichten von bis zu 70 Chips pro cm^2 hergestellt werden. So kann insgesamt eine sehr hohe Lichtausbeute erreicht werden.

6.3.4. SMD

Die SMD (Surface Mounted Device) ist für diese Arbeit die wichtigste, da sie bei LED-Screens verwendet wird.



Abbildung 31: Beispiel für eine SMD LED

Auch hier sind die Chips direkt auf die Leiterplatte gelötet. Drei bis vier Halbleiterkristalle befinden sich in einer SMD LED. Zum Beispiel kann eine solche SMD jeweils einen grünen, einen roten und einen blauen Chip enthalten. Bei einem LED-Screen stellt so ein SMD-Element ein Pixel dar.

Diese Bauform gibt es auch mit Konversionsschicht.

7. Aufbau und Funktionsweise von LED-Screens

7.1. Module und Aufbau

Ein großer LED-Screen oder eine große LED-Videowall besteht aus vielen einzelnen LED-Modulen. Solche LED-Module weisen abhängig vom Hersteller unterschiedliche Abmessungen auf. Je nach Anzahl und Anordnung in der Horizontalen und Vertikalen lassen sich unterschiedlichste Formate der Videowall zusammenstellen, zum Beispiel ein Hochformat Screen oder ein 16:9-Format, ein 4:3-Format und viele weitere. Auch kreative Anordnungen sind denkbar.

Auch die einzelnen Module bestehen wiederum aus mehreren kleineren Kacheln bzw. Tiles. Auch diese Größe kann bei den verschiedenen Herstellern variieren. Diese Kacheln können meistens mechanisch mittels kleiner Schrauben in ihrer Lage verstellt werden, sodass der gesamte Screen ein homogenes Bild ergibt. Besonders bei einfarbigem Content ist eine Inhomogenität sehr gut und deutlich zu erkennen. Diese ist meist durch unterschiedliche Neigungen der einzelnen Tiles bedingt, weshalb eine präzise und aufeinander abgestimmte Neigung der einzelnen Tiles sehr wichtig ist.

Der gesamte Screen wird dann über einen Controller gesteuert. Aus diesem Grund müssen die einzelnen Module miteinander verbunden werden, damit die Daten überall ankommen.

7.2. SMD, Black SMD

Wie bereits im Kapitel 6.3.4. SMD erwähnt werden die SMD-LEDs für LED-Screens verwendet. Dadurch, dass die drei farbigen LED-Chips für Rot, Grün und Blau in einem kompakten Element enthalten sind, wird diese Bauform gerne verwendet. Eine SMD-LED stellt in einem LED-Screen ein vollwertiges Pixel dar.

Da die einzelnen Farbpunkte nahe beieinanderliegen, können geringe Pixel-Abstände (siehe Pixel Pitch) erreicht werden. Diese Bauform ist auch zu Gunsten der Farbmischung und des Betrachtungsabstandes. Die RGB-Farbmischung findet in der SMD statt und die einzelnen Farbpunkte sind nur bei sehr naher Betrachtung von wenigen Zentimetern zu erkennen. Der Betrachtungsabstand bei SMD-LEDs ist also viel kleiner als bei einzelnen Farbpixeln, da sich die Farben bereits bei einem geringen Abstand gemischt haben. Außerdem wird durch die Nähe der Farbpunkte bei einer SMD die Auflösung des Bildes begünstigt, was ebenfalls einen kürzeren Betrachtungsabstand hervorruft.

Black SMD besitzen ein schwarzes Gehäuse, was sich sehr positiv auf den Schwarzwert des Screens auswirkt. Mit weißen oder grauen SMDs kann gar kein richtiges Schwarz erreicht werden.

7.3. Pixel Pitch und Betrachtungsabstand

Der Pixel Pitch eines LED-Screens gibt den Abstand der einzelnen Pixel zueinander in Millimetern an. Der Abstand wird von Mitte zu Mitte der SMD-Pixel berechnet. Je kleiner der Pixel Pitch, desto höher ist die Auflösung und desto geringer kann der Betrachtungsabstand zum Screen gehalten werden. Das Prinzip des geringeren Abstands bei hoher Auflösung ist bereits bei TV-Geräten bekannt, denn bei einer HD-Auflösung ist der ideale Betrachtungsabstand viel geringer als bei SD-Auflösungen.

Bei LED-Screens ist es wichtig die Anwendung und somit auch den zu bespielenden Content bei der Wahl des Pixel Pitches zu beachten. Sind die Betrachtungsabstände ohnehin groß wie beispielsweise bei einer Outdoor-Anwendung, so kann ein Screen mit einem größeren Pixel Pitch gewählt werden. Ist der Betrachtungsabstand hingegen eher gering, so sollte darauf geachtet werden, dass die Abstände zwischen den Pixeln möglichst gering sind, damit das Auge ein homogenes Bild sieht und keine einzelnen Pixel erkennen kann.

Auch der Content bestimmt, wie groß der Pixel Pitch sein darf. Ein Content, der beispielsweise Text beinhaltet oder der ein hochauflösendes Videosignal überträgt, sollte einen möglichst geringen Pixel Pitch aufweisen. Bei künstlerischem Content oder bei Content, der als Hintergrundatmosphäre dient, kann der Pixel-Abstand größer sein.

Es ist zu beachten, dass der Betrachtungsabstand und der Content zusammen den Pixel Pitch des Screens bestimmen.

Als Faustformel für den Betrachtungsabstand gilt, dass der Pixel Pitch mit der Maßeinheit Meter in etwa den Mindestabstand zum Screen angibt. Als Beispiel ergibt sich bei einem Pixel Pitch von 8mm ein Mindestabstand zum LED-Screen von 8m.

Der Betrachtungsabstand für LED-Screens lässt sich nicht mit der für Fernseher oder Projektionen verwendeten Faustformel $\text{Betrachtungsabstand} = 3 \times \text{Höhe des Bildschirms/Projektionsfläche}$ berechnen, da LED-Screens keine fest vorgeschriebenen Abmessungen aufweisen und nicht immer ein Bild im Seitenverhältnis 16:9 entsteht. Deshalb und aufgrund von unterschiedlichen Pixel-Abstände können beispielsweise zwei LED-Screens mit den gleichen Abmessungen unterschiedliche Betrachtungsabstände aufweisen, da unterschiedlich viele Pixel vorhanden sind bzw. sie unterschiedliche Auflösungen besitzen.

7.4. Native Farben und Rec. 709 / 2020

Der HD-Farbraum Rec. 709 und der UHD-Farbraum Rec. 2020 definieren für die drei Grundfarben Rot, Grün und Blau und für Weiß bestimmte Farbwerte im xy-Koordinatensystem. Ein LED-Screen sollte also in der Lage sein, genau diese Farbwerte zu erreichen, um das ankommende Videosignal korrekt wiederzugeben.

Wie bereits aus Kapitel 6.2. Lichtfarben bekannt, bestimmt das Halbleitermaterial einer LED die Lichtfarbe und somit den spektralen Bereich, in dem die LED ihr Licht aussendet. Das

ausgesendete Licht bzw. die ausgesendete Wellenlänge kann dabei von der geforderten Lichtfarbe der beiden Farbräume abweichen. Die rote, die grüne und die blaue LED einer SMD-LED strahlen jeweils eine bestimmte Farbe (Wellenlänge) mit zugehörigen xy-Koordinaten aus. Diese Farben könne als die nativen Farben des LED-Screens bezeichnet werden, so wie es auch bei TV Displays üblich ist. Wichtig ist dabei, dass alle SDM-LEDs eines LED-Screen Moduls aus einer Charge stammen und sich in derselben Binning-Gruppe befinden, damit homogene Farben über den gesamten Screens hergestellt werden können. Die Abstimmung der einzelnen LED-Screen Module kann mithilfe des LED-Controllers vorgenommen werden. Dieser wird in den Kapiteln 7.5. Controller und Software und 11.1. Messung der vier LED-Screens näher beschrieben.

Die nativen Farben können unterschiedlich stark von den RGB-Werten nah Rec. 709 und Rec. 2020 abweichen. Um also die Farbwerte der Farbräume erreichen zu können, müssen die RGB-Werte aus den nativen Farben gemischt werden. Die xy-Koordinaten für Rot, Grün, Blau und Weiß können der Tabelle aus dem Kapitel 3.7. Farbraum nach Rec 709 / 2020 entnommen werden.

Genau in diesem Sachverhalt findet das Farbmanagement statt. Inwiefern ist der LED-Screen in der Lage die RGB-Werte des Farbraumes herzustellen? Und wie können die geforderten Farbwerte erreicht werden bzw. können diese überhaupt erreicht werden? Hierfür sind die Einstellmöglichkeiten des Screens bestimmend. Welche Einstellmöglichkeiten gibt es und in wie weit gibt es Zugriff zu den Farbeinstellungen?

Das Verhalten zwischen nativem Farbraum und Zielfarbraum und die nötigen Einstellmöglichkeiten werden weiterführend im Kapitel 9.6. Farbe beschrieben.

7.5. Controller und Software

Ein weiteres wichtiges Glied, das ebenfalls zum Gesamtaufbau von LED-Screens gehört, ist der Controller mit zugehöriger Bediensoftware.

Am LED-Screen selber können keine Einstellungen vorgenommen werden, weshalb ein LED-Controller benötigt wird.

Besonders wichtig wird der Controller mit seinen Einstell- und Zugriffsmöglichkeiten bei der Kalibrierung des LED-Screens. In dem Zusammenhang ist die Komponente Controller ein wichtiges Glied für das Farbmanagement des Screens.



Abbildung 32: LED-Screen-Controller von Barco, TransForm ECU-110

Die Abbildung zeigt einen LED-Controller des Herstellers Barco.

Auf der Rückseite von LED-Controllern befinden sich je nach Hersteller unterschiedlich viele Videoschnittstellen. Es gibt Schnittstellen für den Input als auch für den Output. Der LED-Controller ist also das Glied zwischen dem LED-Screen und dem Medienserver oder sonstiger Medienverwaltung. Die Videosignale, die zum LED-Screen gelangen sollen, müssen vorher durch den LED-Controller.

Je nach Controller-Software unterscheiden sich die vorhandenen Einstell- und Bedienmöglichkeiten, wodurch auf das Videosignal Einfluss genommen werden kann.

Die Einstellmöglichkeiten und die Kalibrierung werden im Kapitel 9. Parameter zur Beurteilung der Qualität von LED-Screens weiter ausgeführt.

Es gilt bei den Messungen der LED-Screens auch zu untersuchen, wie die Controller und die zugehörige Software funktionieren, wie sie aufgebaut sind und welche Einstellmöglichkeiten geboten werden. Dazu mehr im Kapitel 11. Messung und Kalibrierung von LED-Screens.

7.6. Anwendungsbereiche

Es gibt viele verschiedene Bereiche, in denen LED-Screens Anwendung finden. Für die verschiedenen Anwendungsbereiche sind schließlich verschiedene Anforderungen an ein LED-Screen nötig. Deshalb gibt es auch einige unterschiedliche Bauweisen und unterschiedliche Ausstattungen für LED-Screens.

Die meisten Hersteller teilen ihr Angebot in Indoor und Outdoor ein. Die LED-Screens müssen für den Indoor-Bereich, also Anwendungen im Innenraum, andere Kriterien erfüllen als LED-Screens, die im Outdoor-Bereich (Außenanwendung) angewendet werden.

Die markantesten Unterschiede zwischen diesen beiden Anwendungsbereichen liegen in der Helligkeit und dem Pixel-Abstand der Screens. LED-Screens für den Außenbereich benötigen meist deutlich höhere Helligkeiten, da mit direkter Sonneneinstrahlung gerechnet werden kann. Die Indoor Screens benötigen im Gegensatz zu den Outdoor Screens meistens kleinere

Pixel-Abstände, da die Betrachtungsabstände im Innenraum geringer als bei der Außenanwendung sind.

Dies kann aber nicht pauschalisiert werden, da die Auswahl des Pixel Pitch bekanntlich auch von dem Content abhängt.

Die Einteilung in Indoor und Outdoor kann noch weiter gegliedert werden, wodurch sich weitere Anwendungsbereiche ergeben.

Indoor	Outdoor
Werbeflächen, Reklame	Werbeflächen, Reklame
Banden (Werbung)	Banden (Werbung)
Sportstätten	Sportstätten
Bühnen, Events	Bühnen, Events
Ausstellungen, Messestände	Verkehrsschilder, Anzeigetafeln
Anzeigetafeln	Architektur, Festinstallationen
Kontrollräume	-

Tabelle 9: Anwendungsbereiche für Indoor und Outdoor LED-Screens

8. Überblick über Hersteller

Im Folgenden sind einige der führenden Hersteller der heutigen Zeit des LED Display Marktes aufgeführt. Sie sind in den USA, in Europa und im asiatischen Raum, vor allem in Shenzhen (China) zu finden. Die Herstellung der LEDs und die Fertigung der LED-Screens findet überwiegend auch im asiatischen Raum statt.

Die hier aufgeführten Hersteller verfügen über unterschiedlich große Angebote von LED-Screens. Einige Hersteller führen viele verschiedene Serien und Modelle, wodurch sie viele Anwendungsbereiche bedienen können. Andere Hersteller besitzen nur ein begrenztes Angebot an LED-Screens.

Die meisten Hersteller verfügen aber sowohl über LED-Screens, die für Innenbereiche geeignet sind, als auch über Screens, die sich für den Außeneinsatz eignen.



Abbildung 33: Links: Indoor LED-Screen von Lighthouse, Rechts: Outdoor LED-Screen von ROE

In der folgenden Tabelle ist ein Überblick über einige namenhafte Hersteller gegeben und deren Bandbreite im Pixel Pitch Bereich und dem Umfang an maximaler Helligkeit (Leuchtdichte).

Einzelne Produkte und deren Spezifikationen sind auf den angegebenen Internetseiten zu finden.

Die Hersteller verfügen außerdem über LED-Controller für ihre Produkte. Auch diese sind auf den Internetseiten zu finden.

Hersteller	Informationen	Pixel Pitch	Leuchtdichte	Internetseite
Absen	Gegründet 2001 in Shenzhen (China)	1,25mm - 31.25mm	600cd/m ² - 12.000cd/m ²	http://www.absen.com/
AOTO	Gegründet 1993 in Shenzhen (China)	1,2mm - 32mm (virtuell 16mm) UHD-Panel: 0,75mm - 3,00mm	800cd/m ² - 6.500cd/m ² UHD-Panel: 800cd/m ² - 1500cd/m ²	http://www.aoto.com/
Barco	Barco wurde 1934 gegründet mit Hauptsitz in Belgien und stellt seit 2003 LED-Screens her.	1,6mm - 16mm	100cd/m ² - 6500cd/m ²	https://www.barco.com/de/
CreateLED	Gegründet 2004 in Shenzhen (China)	1,6mm - 10,42mm	800cd/m ² - 5500cd/m ²	http://www.createled.com/
eyevis	Deutsches Unternehmen mit Hauptsitz in Deutschland und mehreren Standorten in Europa	1,5mm - 2,5mm UHD-Panel: 0,9mm - 1,9mm	1500cd/m ² UHD-Panel: 600cd/m ² - 800cd/m ²	http://www.eyevis.de/
hibino chromatek Div.	Das Unternehmen wurde 1964 in Japan gegründet und produziert seit 1996 LED Technologie.	2,4mm - 12,0mm	1500cd/m ² - 6500cd/m ²	http://www.hibino.co.jp/chromatekdiv/en/
LEDCON	Gegründet 2007 mit Hauptsitz in Deutschland	2,6mm - 25mm UHD-Panel: 0,8mm - 1,9mm	1000cd/m ² - 7000cd/m ² UHD-Panel: 800cd/m ²	http://www.ledcon.de/
LEDitgo	Deutsches Unternehmen mit mehreren Standorten in Europa, 2011 gegründet	2,5mm – 16,66mm	1100cd/m ² - 6500cd/m ²	http://www.leditgo.de/

LEDium	Eigenmarke des deutschen Unternehmens B&K Braun (Großhandel für licht- und Tontechnik), seit 2014	1,25mm - 40mm	≥ 600cd/m ² - 10000cd/m ²	http://www.ledium.de/
Leyard	Gegründet 1995 mit Hauptsitz in Peking (China), Produktion in Shenzhen (China)	1,2mm - 20mm	600cd/m ² - 6500cd/m ²	http://www.leyard.com/en/
Lighthouse	Gegründet 1997 in Hong Kong, China Mehrere Standorte in Europa, Nord- und Südamerika, im asiatischen Pazifikgebiet und in China	3,9mm - 26,67mm	2000cd/m ² - 7500cd/m ²	http://www.lighthouse-tech.com/
PixelFLEX LED	US-amerikanisches Unternehmen mit Hauptsitz in Nashville (Tennessee)	1,6mm - 100mm	700cd/m ² - 6060cd/m ²	http://pixelflexled.com/
ROE	Gegründet 2006 mit Geschäftsstellen in China (Shenzhen), Europa (Niederlande) und den USA (Kalifornien)	2,84mm - 18,75mm	1500cd/m ² - 6000cd/m ²	http://www.roevisual.com/
SiliconCore Technologies (SCT)	US-amerikanisches Unternehmen (Kalifornien), 1997 gegründet	0,95mm - 5,2mm	1700cd/m ² - 4000cd/m ²	http://www.silicon-core.com/
V:LED	Vertrieb durch das deutsche Unternehmen LMP	18mm - 21,33mm	800cd/m ² - >7000cd/m ²	http://www.vled.de/

Tabelle 10: Überblick über LED-Screen Hersteller

9. Parameter zur Beurteilung der Qualität von LED-Screens

Nachfolgend werden nun die wichtigsten Parameter zur Qualitätsbeurteilung von LED-Screens vorgestellt. Einige dieser Parameter werden aus den EBU-Richtlinien Tech 3320 und Tech 3325, die für Monitore und Displays gelten, abgeleitet.

Die Videomonitormessung dient im Allgemeinen als Vorbild für die hier entwickelten Qualitätsparameter und die Messung und Kalibrierung von LED-Screens, da LED-Screens in dieser Arbeit bloß als eine andere Technik für die Wiedergabe von Videodaten angesehen werden. Im Prinzip ist ein LED-Screen eine andere Art von Display, das neben üblichen Displays einige andere Eigenschaften und somit auch Anwendungsmöglichkeiten besitzt.

Die Qualitätsparameter sind in die nun folgenden Kategorien aufgeteilt.

9.1. Betrachtungswinkel

Neben dem Betrachtungsabstand spielt auch der Betrachtungswinkel eine Rolle. Dabei muss der vertikale und auch der horizontale Betrachtungswinkel beachtet werden. Diese Angaben sollten auch auf dem Datenblatt des Screens angegeben sein.

Der Betrachtungswinkel wird von der Mitte des LED-Screens ausgehend gemessen und in Grad angegeben. Ein horizontaler Betrachtungswinkel von 120° bedeutet, dass der Betrachtungswinkel von der Mittel des Screens jeweils nach links und rechts 60° beträgt. Entsprechend verhält sich auch der vertikale Betrachtungswinkel nach oben und nach unten von der Mitte aus gesehen.

Auch andere Display-Arten besitzen Betrachtungswinkel. Ebenso wie bei diesen Displays kann auch bei LED-Screens nur innerhalb der Betrachtungswinkel eine unverfälschte Wiedergabe des Videosignals gewährleistet werden. Außerhalb der Betrachtungswinkel kommt es vor allem zu Farb- und Kontrastverfälschungen. Diese sind auf die Anordnung und Lage der LEDs zurückzuführen. Das auf dem Screen wiedergegebene Bild kann in bestimmten Farben eingefärbt erscheinen, sobald der Betrachtungswinkel verlassen wird. Diese Einfärbung kann beispielsweise auf der linken Seite neben dem Betrachtungswinkel eine andere Farbe besitzen als auf der rechten. Dies kommt durch Verdeckung von bestimmten farbigen Pixeln zustande.

Besondere Beachtung sollten der horizontale und der vertikale Betrachtungswinkel haben, wenn der LED-Screen geneigt oder sogar gekrümmt ist. In diesen Fällen sollte darauf geachtet werden, dass die Beobachter oder Zuschauer noch innerhalb der angegebenen Betrachtungswinkel auf den Screen schauen können. Oftmals kommt es bei solchen speziellen Anwendungen dazu, dass ein unverfälschtes Bild nicht mehr für alle Zuschauer gewährleistet werden kann, sondern nur noch in bestimmten Zuschauerbereichen.

9.2. Pixelfehler

Worauf außerdem geachtet werden sollte sind Pixelfehler.

Pixelfehler äußern sich dadurch, dass einzelne Pixel bzw. einzelne SMDs den Videocontent nicht korrekt bzw. anders als alle anderen Pixel wiedergeben. Häufige Pixelfehler sind zu dunkle Pixel oder Pixel mit der falschen Farbe. Eine falsche Farbe kann dadurch entstehen, dass nicht mehr alle drei farbigen Pixel einer SMD auf das ankommende Signal reagieren oder dass die falschen farbigen Pixel einer SMD angesprochen werden.

Zu erkennen und identifizieren sind Pixelfehler meist mit dem bloßen Auge.

Die fehlerhaften Pixel müssen nicht bedeuten, dass die betroffenen SMDs kaputt sind oder nicht mehr richtig funktionieren, denn der Fehler kann auch softwareseitige Ursachen haben.

9.3. Controller-Software

Ein weiterer wichtiger Parameter stellen die Einstellmöglichkeiten am Controller dar. Diese Einstellmöglichkeiten bestimmen die Einflussnahme auf den Screen und das Farbmanagement wie auch die Kalibrierung.

Es folgt eine Aufzählung aller wichtigen Einstellmöglichkeiten, die der Controller im besten Fall besitzen sollte. Als Grundlage dienen hier die Menüeinstellungen von guten Displays mit vielen Einstellmöglichkeiten für den professionellen Gebrauch. Teilweise sind heutzutage auch einige Consumer-Geräte mit diesen Einstellmöglichkeiten ausgestattet.

- Helligkeit (Schwarzwert)
- Kontrast (Weißwert)
- Gamma
- Schärfe
- Farbsättigung und Blue-Only Modus
- Farbton und Blue-Only Modus
- Farbraumeinstellungen → Native Farben und Benutzerdefinierte Einstellung
- Weißabgleich
- Anpassung des Gamma-Verlaufs und der ähnlichsten Farbtemperatur über mehrere Graustufen
- Bildformat

Einige der hier aufgeführten Einstellmöglichkeiten bzw. Parameter werden unter 9.5. Kennlinie oder 9.6. Farbe noch näher beschrieben.

Im Kapitel 11 Messung und Kalibrierung von LED-Screens werden vier Produkte verwendet und untersucht. Es wird sich herausstellen welche Einstellmöglichkeiten tatsächlich vorhanden

sind und inwiefern die LED-Screens mit diesen Einstellmöglichkeiten Kalibriert werden können.

9.4. Signal / Schnittstellen

Auch die vorhandenen Schnittstellen zur Signalübertragung sind wichtig für die Qualität der auf dem Screen wiederzugegebenen Videosignale.

Diese Schnittstellen befinden sich meist am Controller. Die Signalübertragung zwischen Controller und LED-Screen wird mittels Ethernetleitungen (z.B. CAT5, CAT6) oder Videoschnittstellen realisiert.

Vorzugsweise sollten am Controller mehrere qualitativ hochwertige Schnittstellen vorhanden sein. Zu qualitativ hochwertigen Schnittstellen zählen beispielsweise diverse DVI- und HDMI-Schnittstellen. Im Kapitel 4.4. Schnittstellen sind einige näher beschrieben und charakterisiert. Die Signalübertragung ist außerdem ein wichtiger Punkt, wenn es um die Wiedergabe auf dem LED-Screen geht. Zum einen kann die Wiedergabe auf dem LED-Screen inkorrekt sein, weil das Signal beispielsweise beschädigt ist oder weil die Qualität der Schnittstelle mangelhaft ist. Zum anderen kann eine inkorrekte Wiedergabe des Signals am LED-Screen selber liegen. Bei einigen LED-Screens kann es vorkommen, dass das ankommende Videosignal „beschnitten“ wird. Dies kann dazu führen, dass der LED-Screen das Signal so sehr verändert, dass auch mithilfe von Controller-Einstellungen kein korrektes oder akzeptables Bild mehr wiederhergestellt oder erzeugt werden kann.

9.5. Kennlinie

Der Leuchtdichtebereich des LED-Screens ist ein wichtiger Punkt. Zum gesamten Bereich gehört der Weißpunkt bzw. die maximale Helligkeit, der Schwarzpunkt und auch der Verlauf der Helligkeit bzw. der Leuchtdichte über die Graustufen dazwischen.

Zunächst wird der Schwarzpunkt über die Helligkeit mit einem geeigneten Testbild eingestellt und abgepasst. Danach folgt die Einstellung des Weißwertes, ebenfalls mit einem geeigneten Testbild.

Das Verhältnis zwischen dem Weißwert und dem Schwarzwert wird als Kontrastverhältnis beschrieben. Dieses Verhältnis sollte anhand der Leuchtdichtewerte von Weiß- und Schwarzwert berechnet werden und mit den Herstellerangaben verglichen werden.

Mit dem Auge und mittels eines Graustufen-Testbildes soll überprüft werden, ob alle Graustufen im Hellen sowie im Dunklen gut zu erkennen sind und auch ob alle Graustufen dazwischen voneinander zu unterscheiden sind.

Dann wird das Wiedergabegamma des LED-Screens mit dem eingestellten Gamma-Wert verglichen.

9.6. Farbe

Damit der LED-Screen die Farben des ankommenden Videosignals optimal wiedergeben kann, müssen bestimmte Einstellmöglichkeiten am Screen vorgenommen werden können. Diese Einstellmöglichkeiten wurden bereits im Kapitel 9.3. Controller-Software aufgezählt und betreffen die Farbe und auch die Farbtemperatur bzw. die ähnlichste Farbtemperatur (Weißabgleich).

Die Bitauflösung bzw. die Anzahl aller darstellbaren Farben ist ein wichtiger Parameter. Diese Angabe sollte auch auf dem Herstellerdatenblatt zu finden sein. Es ist darauf zu achten, ob die Bittiefen pro RGB-Farbe der SMD-Chips angegeben sind oder die Bitstufen insgesamt. Die Anzahl der Bitstufen ist besonders bei Bildern mit feinen Farbverläufen wichtig, wie bereits im Kapitel 4.3.2. Quantisierung beschrieben. Mit dem menschlichen Auge gilt solch ein Farbverlauf anhand eines geeigneten Testbildes oder einer geeigneten Testsequenz zu überprüfen. Dies lässt Rückschlüsse darüber ziehen, ob der Screen genügend Bitstufen bietet oder eben auch nicht.

Der native Farbraum des Screens sollte ermittelt werden. Dazu müssen die xy-Koordinaten der drei Primärfarben Rot, Grün und Blau bzw. des Farbtripels der SMD-Chips aufgenommen werden. Durch diese drei Farben wird in der CIE-Farbtabelle ein Dreieck aufgespannt, in dem alle Farben liegen, die mit dem Screen darstellbar sind. Dieser native Farbraum sollte möglichst größer sein als der Zielfarbraum. In dieser Arbeit stellt vor allem der Farbraum nach Rec. 709 den Zielfarbraum dar. Der Farbraum nach Rec. 2020 stellt einen weiteren möglichen und heutzutage wichtigen Zielfarbraum dar. Die xy-Koordinaten dieser beiden Zielfarbräume sind der Tabelle aus dem Kapitel 3.7. Farbraum nach Rec. 709 / 2020 zu entnehmen. Weiterführend sollten auch die Sekundärfarben gemessen werden, die aus den nativen Farben gemischt werden. Auch die Farbwerte der Sekundärfarben sind für den Farbraum Rec. 709 definiert wie auch der Weißpunkt.

Jeder Primär- und jeder Sekundärfarbe ist eine bestimmte Leuchtdichte zugeordnet, die sich aus der zugehörigen Y-Formel berechnen lässt. Diese Leuchtdichtewerte sollten keinesfalls vernachlässigt werden. Auch hier sollte der Vergleich zwischen nativ und Zielfarbraum gemacht werden.

Diese aufgenommenen Farb- und Leuchtdichtewerte sind das Farbmanagement betreffend die wichtigsten Parameter. Anhand dieser Werte kann das Farbmanagement überprüft werden und es kann überhaupt bestimmt werden, wie sehr die Farben der SMDs manuell oder auch automatisch nachgeregelt werden müssen bzw. müssten.

Neben den Primär- und Sekundärfarben muss auch der Weißpunkt gemessen und kalibriert werden. Der Zielwert des Weißpunktes richtet sich ebenfalls nach dem Zielfarbraum. Wichtig

zu beachten ist bei der Kalibrierung der ähnlichsten Farbtemperatur, dass sich diese über die Graustufen nicht verändert. Auch dies sollte mittels Messungen überprüft werden, da auch dies zum Farbmanagement des Screens gehört. Falls nötig sollten auch alle (hier acht) Graustufen auf die richtige Farbtemperatur des Zielfarbraumes kalibriert werden.

Wie diese Werte aufgenommen werden und weiterverarbeitet werden, wird im Kapitel 10.2. Kalibrier- und Messvorgang beschrieben.

9.7. Auflösung

Der Pixel Pitch ist ein wichtiger Parameter für den Anwendungsbereich. Ist ein kleiner Pixel Pitch nötig oder reicht ein größerer aus? Dies ist davon Abhängig wie groß der Betrachtungsabstand durch die äußeren Gegebenheiten ist. Bei Outdoor-Anwendungen sind die Betrachtungsabstände meist viel größer als bei Indoor-Anwendungen. Ein größerer Abstand ermöglicht einen größeren Pixel Pitch, was mit dem Auflösungsvermögen des menschlichen Auges zusammenhängt. Auch der Inhalt, der von LED-Screen wiedergegeben wird ist wichtig für die Wahl des richtigen bzw. geeigneten Pixel Pitch. Ein sehr detailreicher Inhalt braucht einen kleineren Pixel Pitch als ein künstlerischer Inhalt. Besonders Schrift verlangt nach einer hohen Auflösung, um gut lesbar zu sein.

Um also einen guten Pixel Pitch wählen zu können, der für die vorhandene Anwendung geeignet ist, müssen der Betrachtungsabstand und der wiederzugebende Inhalt immer zusammen betrachtet werden. Denn beispielsweise verlangt ein sehr detailliertes Bild auf einem LED-Screen, der in einem kurzen Betrachtungsabstand aufgestellt ist, einen möglichst geringen Pixel Pitch. Mit zunehmendem Abstand ist es dann möglich den Pixel Pitch zu vergrößern.

Oftmals ist der Pixel Pitch auch ein wichtiger Faktor für die Kosten eines LED-Screens, da kleine Pixel Abstände aufgrund der komplexeren Bauweise und der höheren Anzahl von LEDs (SMDs) teurer sind. Auch dies sollte bei der Auswahl eines passenden Screens mit passendem Pixel Pitch immer im Hinterkopf behalten werden.

Der Pixel Pitch ist den Herstellerangaben auf dem Datenblatt zu entnehmen.

9.8. Bewegung

Anhand eines Bewegtbildes kann festgestellt werden, ob das Videosignal auf dem LED-Screen „ruckelig“ wiedergegeben wird oder ob es „flüssig“ läuft.

Außerdem sollte kontrolliert werden, ob das Videosignal ein interlaced Signal ist oder ob das Signal progressiv ist, da LED-Screens nur Vollbilder verarbeiten können. Ein interlaced Signal könnte beispielsweise der Grund für ein nicht korrekt wiedergegebenes Bild sein, besonders wenn es sich um Bewegtbild handelt.

9.9. Herstellerangaben

Je nach Hersteller variiert die Anzahl der Angaben wie auch die Parameter, die preisgegeben werden.

In folgender Aufzählung sind alle wichtigen Parameter aufgeführt, die für eine Qualitätsbeurteilung von LED-Screens nötig wären.

- LED-/Pixel-Typ
- LED Wellenlängen der nativen RGB-Farben
- Helligkeit (max. Leuchtdichte)
- Kontrastverhältnis
- Farbtiefe / Graustufen
- Farbtemperatur (gemeint ist ähnlichste Farbtemperatur)
- Wellenlängen der Farbpixel, xy-Koordinaten der Farbpixel
- Einstelloptionen/-möglichkeiten für: Helligkeit, Farben, Farbtemperatur (ähnlichster Farbtemperatur)
- Betrachtungswinkel horizontal und vertikal
- (Gleichmäßigkeit der Helligkeit in %)
- (Gleichmäßigkeit der Farben in Form von Toleranzen für die Abweichung der xy-Koordinaten)

Bei bestimmten Angaben wie die Helligkeit ist zu beachten, dass oft eine Angabe unter Laborbedingungen gemacht wird oder auch im kalibrierten oder unkalibrierten Zustand. Was in diesem Zusammenhang kalibriert bedeutet, ist jedoch nicht angegeben.

Die oben aufgeführten Parameter werden im Folgenden noch näher beschrieben.

Im Anhang sind die vier Datenblätter der gemessenen LED-Screens aus dem Kapitel 11 Messung und Kalibrierung von LED-Screens zu finden.

10. Leitfaden zur LED-Screen Messung

Bisher gibt es noch keine Veröffentlichungen oder Normen für die Kalibrierung und Vermessung von LED-Screens.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden einige fachkundige Personen aus der Veranstaltungstechnikbranche zu dem Thema Messung und Kalibrierung von LED-Screens befragt. Diese Personen und Firmen arbeiten für große namenhafte Kunden, für die sie Veranstaltungen planen und umsetzen. Sie agieren in Europa und einigen Ländern auf dem Globus verteilt.

Laut aller befragten Personen wird in der Praxis mithilfe des menschlichen Sehorgans kalibriert. Eine messtechnische Ermittlung von Farbwerten und weiteren Parametern, die bereits im Kapitel 9. Parameter zur Beurteilung der Qualität von LED-Screens definiert wurden, findet nicht statt.

Vorgaben bezüglich Farbwerten und Farbraum werden üblicherweise vom Kunden nicht vorgegeben. Die Abstimmung und Kalibrierung beruht auf der Meinung des Kunden. Seine Ansprüche müssen erfüllt werden, wobei die Beurteilung subjektiv vom Auge des Kunden abhängt.

Als Referenz gilt das von den Abmessungen größte und prägnanteste Medium, auf das alle weiteren Medien wie Displays und LED-Screens etc. abgestimmt und angepasst werden.

Es soll eine kleine Anzahl von Experten in der Branche geben, die genau wissen, welchen Einstellungen angepasst werden müssen und bei denen die Abstimmung der Medien aufeinander auch in einer relativ kurzen Zeit aufgrund von Erfahrungswerten vonstattengeht. Die Parameter, auf die von den Experten geachtet wird, sind laut Fachleuten das maximal erreichbare Schwarz, das Kontrastverhältnis, die Bildhomogenität, die Blickwinkelabhängigkeit und die Wiedergabe von Farben auf dem LED-Screen. Außerdem sind die Abmessungen und die Kühlung für die Befestigung und Installation weitere wichtige Faktoren für die Veranstaltungsplaner.

Auch nach den Parametern, die an der Controller Software eingestellt und kalibriert werden, wurden die Personen befragt. Hierzu wurde als wichtigster Parameter die Farbtemperatur bzw. die ähnlichste Farbtemperatur genannt. Daneben sollten gute Controller ihrer Meinung nach die Möglichkeit bieten, die Sättigung, den Schwarz- und den Weißwert, das Wiedergabe-Gamma und die RGB-Werte einzustellen. Ob diese Parameter bei allen oder bei den meisten Controllern zu finden sind, gilt es in dieser Arbeit herauszufinden.

Die Ergebnisse und einige Umsetzungsmöglichkeiten aus der Praxis sind im Kapitel 11. Messung und Kalibrierung von LED-Screens zu finden.

Nun soll ein Leitfaden mit den wichtigsten Parametern für die Kalibrierung und Vermessung von LED-Screens hergestellt werden. Außerdem soll anhand einiger der Parameter ermittelt werden können, wie und wie gut das Farbmanagement von LED-Screens funktioniert. Dazu

werden im Kapitel 11 Messung und Kalibrierung von LED-Screens vier Screens nach dem entwickelten Leitfaden gemessen, um dann Rückschlüsse über das Farbmanagement zu erhalten.

Als Grundlage für den in dieser Arbeit entwickelten Leitfaden zur Kalibrierung von LED-Screens und die dafür nötigen Einstell- / bzw. Kalibriermöglichkeiten dienen einige übliche Consumer TV-Geräte oder Smart TVs. Diese TV-Geräte bieten viele Einstellmöglichkeiten, die vor wenigen Jahren nur im professionellen Bereich vorhanden waren.

Das Prinzip einer idealen Messung und Kalibrierung, das auf den genannten TV-Geräten basiert, wird in diesem Kapitel im Abschnitt 10.2. Kalibrier- und Messvorgang vorgestellt.

Wie gut dies dann umsetzbar ist wird im Kapitel 11 Messung und Kalibrierung von LED-Screens untersucht.

10.1. Messbedingungen und Vorbereitung

Um eine gute Kalibrierung und eine verwendbare Messung durchführen zu können, müssen bestimmte Messbedingungen und Vorbereitungen getroffen werden, die auch unbedingt dokumentiert werden sollten.

Der Ort, an dem die Messungen und die Kalibrierung stattfinden, muss bestimmte Bedingungen erfüllen. Es sollte möglichst dunkel sein, das bedeutet näher, dass die Beleuchtungsstärke im Raum unter 1lx liegen sollte. Die zu messende Fläche, was in diesem Fall der LED-Screen ist, sollte frei von Streulicht sein, was die Messung verfälschen würde. Auch Streulicht, welches ins Messgerät fallen würde, verfälscht die Messung.

Der Messwinkel und der Messabstand des Messgerätes müssen festgelegt werden. Der Winkel der Messung sollte zum Screen 0° betragen. Die Messung ist also senkrecht zur Screen Oberfläche, aus der das Licht austritt. Der Abstand des Messgerätes ist von dem Pixel Pitch des Screens abhängig, sollte aber möglichst gering sein.

Auch der bzw. die Messpunkte auf dem Screen müssen bereits vor der Messung genau festgelegt werden. Bei dieser LED-Screen Messung sollte ein horizontal und vertikal mittiger Messpunkt gewählt werden, der aber die Grenzen eines LED-Screen Moduls nicht überschreitet.

Bevor mit der Messung und Kalibrierung begonnen werden kann, muss der Screen für eine gewisse Zeit „warmlaufen“. Üblicherweise beträgt diese Zeit bei LED-Screens in etwa 30 Minuten. Innerhalb dieser 30 Minuten kann es zu sehr starken Temperaturschwankungen kommen, die sich erheblich auf die Leuchtdichte und auch auf den Weißpunkt auswirken. Nach der Zeit sollte der Screen dann relativ stabil sein. Das bedeutet, dass die Temperatur des

Screens sich kaum mehr verändert, wodurch Farb- und Helligkeits-Shifts, die temperaturbedingt sind, nicht mehr auftreten sollten. Innerhalb dieser „Warmlaufzeit“ sollte auf den Screen ein Bild mit einem mittleren Grau oder auch ein helleres Bild gegeben werden. Das Bild sollte aber vor allem eine homogene Farb- bzw. Graufäche sein, damit alle Pixel die Möglichkeit haben, gleichermaßen auf die Betriebstemperatur zu kommen.

Für die Einstellung der Schärfe ist es wichtig, dass das Videobild 1:1 auf den Screen wiedergegeben wird. Das bedeutet, dass ein Videopixel auch nur auf einem Pixel des Screens dargestellt wird und es keine Über- oder Unterskalierung gibt. Das zugehörige Testbild sollte außerdem komplett auf dem Screen bzw. Modul zu sehen sein.

Es sind unterschiedliche Testbilder für die Messung und die Kalibrierung nötig. Zum einen sind Testbilder für die messtechnische Aufnahme von Werten mit dem Spektralradiometer nötig und zum anderen braucht es Testbilder für die Beurteilung mit dem menschlichen Auge.

Das Messgerät wird für die Parameter Helligkeit (Schwarzwert), Kontrast (Weißwert), Gamma bzw. Leuchtdichte über 8 Graustufen, native Screen-Farben, Farbanpassung an die Zielfarbräume und Weißabgleich bzw. ähnlichste Farbtemperatur über die Graustufen benötigt. Das Messgerät nimmt für diese Parameter Leuchtdichtewerte in cd/m^2 , die xy-Koordinaten, die dominante Wellenlänge und die ähnlichste Farbtemperatur (CCT) auf. Für das Messgerät werden also Testbilder benötigt, mit denen diese Werte gut aufgenommen werden können.

Für die Primär- und Sekundärfarbe braucht es farbige Testbilder und für die Grauwerte ist ein Graustufen-Testbild nötig. Wie diese Testbilder dann genau verwendet werden, wird im nächsten Kapitel 10.2. Kalibrier- und Messvorgang beschrieben. Mit dem Auge werden die Parameter Helligkeit (Schwarzwert), Kontrast (Weißwert), Gamma, (Schärfe,) Farbsättigung und Farbton mit Testbildern überprüft, die für das Kalibrieren mit dem menschlichen Auge ausgelegt sind.

Mit einem Graustufen-Testbild können gleich mehrere Parameter überprüft werden. Für die Farbeinstellungen wird vorzugsweise ein Farbbalken-Testbild mit allen sechs Grundfarben empfohlen.

Auch die Benutzung und Verwendung dieser Testbilder wird im nachfolgenden Kapitel 10.2. Kalibrier- und Messvorgang erklärt.

Für die Messung und Kalibrierung wird folgendes Equipment benötigt: Der LED-Screen oder ein oder mehrere LED-Module, der LED-Controller mit zugehöriger Software (Laptop), ein Laptop mit den Testbildern, ein Videosignal-Generator, das Messgerät und ein Laptop zur Ansteuerung des Messgerätes und zur Aufnahme der Messergebnisse. Diese Komponenten finden sich in der Skizze zum Messaufbau wieder.

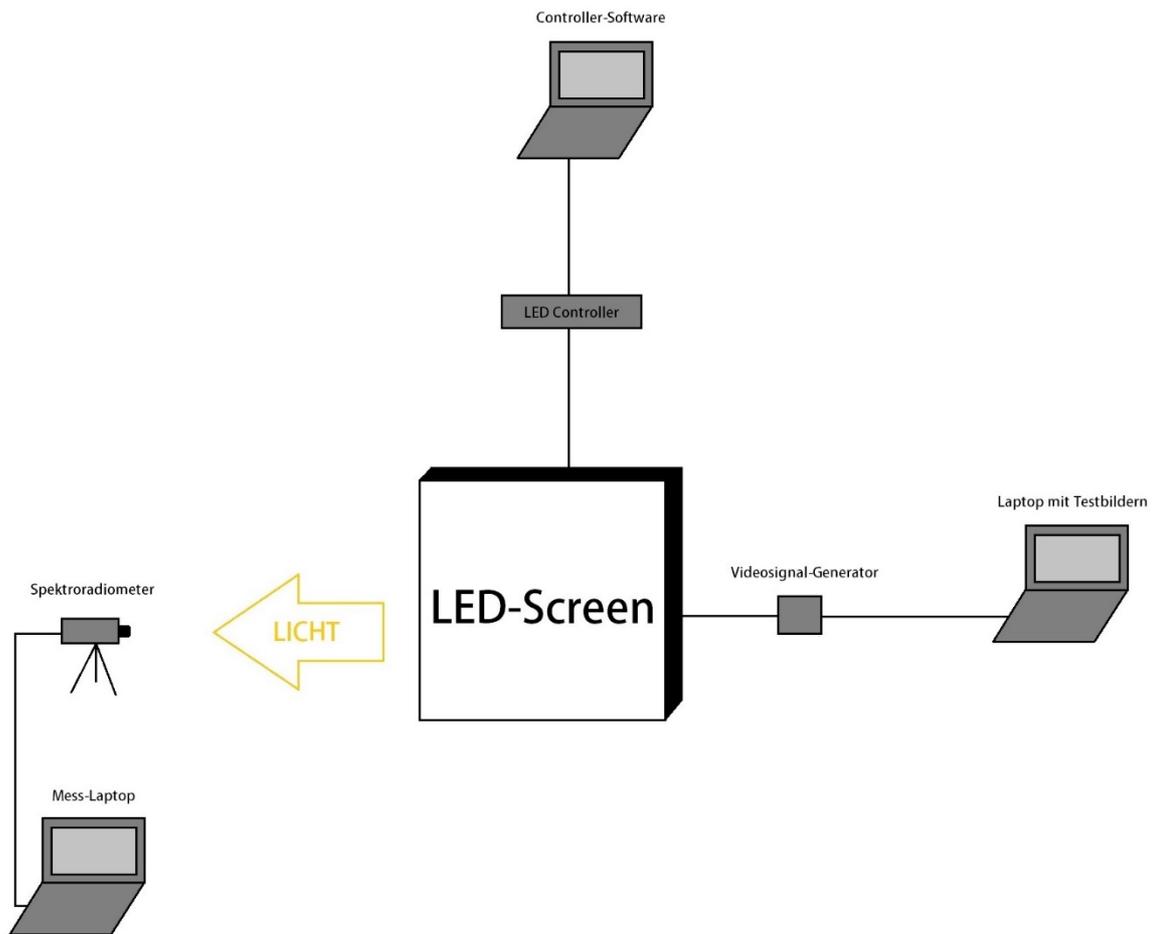


Abbildung 34: Skizze des Messaufbaus

10.2. Kalibrier- und Messvorgang

Die Kalibrierung von LED-Screens und der Messvorgang sollten in einer bestimmten Reihenfolge erfolgen. Die Kalibrierung erfolgt über das Einstellen mithilfe des menschlichen Auges im Zusammenspiel mit Messtechnik. Im Allgemeinen kann man sagen, dass mit dem Auge vorkalibriert werden kann und die Feineinstellungen bzw. die exakte Kalibrierung wird dann über die messtechnische Ermittlung von farbmtrischen und photometrischen Werten durchgeführt.

Zu beachten ist, dass bei den Messungen und der Kalibrierung in dieser Arbeit die Farbe der LED-Screens im Mittelpunkt steht, da das Farbmanagement untersucht bzw. analysiert werden soll.

Neben wichtigen Werten, die das Farbmanagement betreffen, werden noch einige weitere Qualitätsparameter aufgenommen.

Die Reihenfolge, in der die Messung und Kalibrierung erfolgen sollte, wurde im Rahmen dieser Arbeit entwickelt und stellt einen wichtigen Teil für den Leitfaden der LED-Screen Messung dar. Die folgende Aufzählung gibt die erarbeitete Messreihenfolge wieder.

- I. Einstellung von Helligkeit und Kontrast (und Sättigung)
- II. Nativer / unkalibrierter Zustand des LED-Screens
 - a. Native Primär- und Sekundärfarben
 - b. Unkalibriertes Weiß
 - c. Gamma-Kurve / -Verlauf
 - d. Ähnlichste Farbtemperatur über Graustufen
- III. Kalibrierung
 - a. Anpassung der Primär- und Sekundärfarben an den Zielfarbraum
 - b. Weißanpassung
 - c. Gamma-Anpassung
 - d. Farbtemperaturanpassung (ähnlichste Farbtemperatur) über die Graustufen
- IV. Beurteilung weiterer Qualitätsparameter
 - a. Kontrastverhältnis
 - b. Betrachtungswinkelabhängigkeit

Im Folgenden wird diese Messreihenfolge näher beschrieben. Es wird darauf eingegangen worauf speziell zu achten ist, wie genau vorgegangen wird und welche Testbilder wie angewendet werden.

I. Einstellung von Helligkeit und Kontrast

Zu Beginn des Mess- und Kalibriervorgangs werden die Helligkeit und der Kontrast des LED-Screens eingestellt. Die Einstellungen richten sich dabei nach den äußeren Gegebenheiten wie der Umgebungshelligkeit. Aufgrund der Messbedingungen ist die Umgebungshelligkeit bei der Messung sehr gering. Die Helligkeit und der Kontrast werden dementsprechend an die niedrige Umgebungshelligkeit angepasst.

Mithilfe eines geeigneten Testbildes können die der Umgebungshelligkeit entsprechenden Einstellungen vorgenommen werden. Das Testbild sollte eine Grautreppe enthalten mit einem 100% Weiß und einem 0% Schwarz.

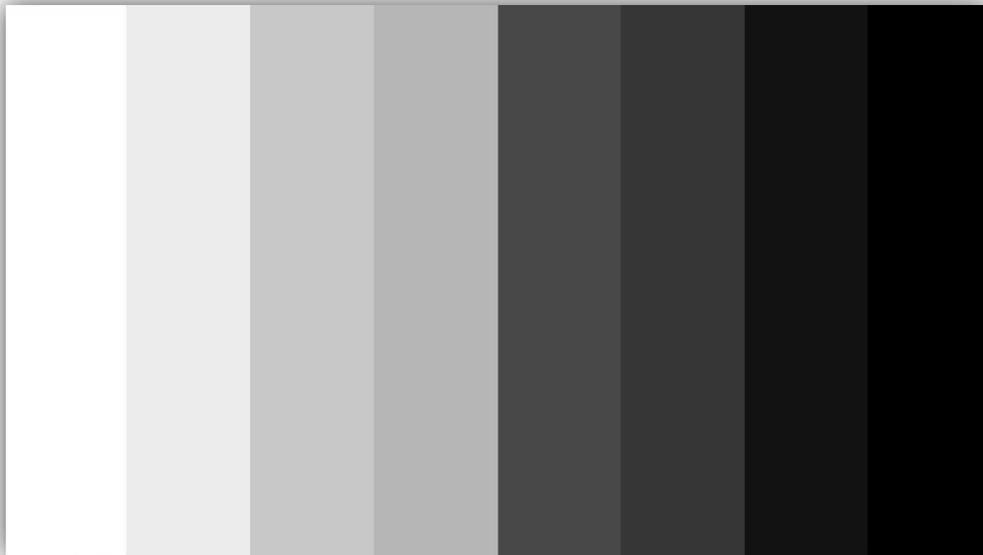


Abbildung 35: Graustufen-Testbild

Die Prozentangaben beziehen sich dabei auf den Videopegel der Testbildbereiche. Das 100% Weiß sollte von nebenliegenden hellen Grautritten gut zu unterscheiden sein wie auch das 0% schwarz von nebenliegenden dunklen Grautritten. Sind diese Unterschiede sichtbar und alle weiteren Graustufen voneinander unterscheidbar, so sind der Schwarz- und der Weißwert korrekt eingestellt. Die gesamte Bewertung der korrekten Einstellung von Schwarz- und Weißwert wird mit dem Auge vorgenommen.

Die Graustufen, die zwischen Schwarz und Weiß liegen können gegebenenfalls mit dem Gamma angepasst werden.

Neben den korrekten Einstellungen von Helligkeit und Kontrast kann auch die Sättigung vorab eingestellt werden. Diese Einstellung lässt sich am besten mit einem Farbbalken-Testbild vornehmen, das die drei Farben Cyan, Magenta und Blau enthält.

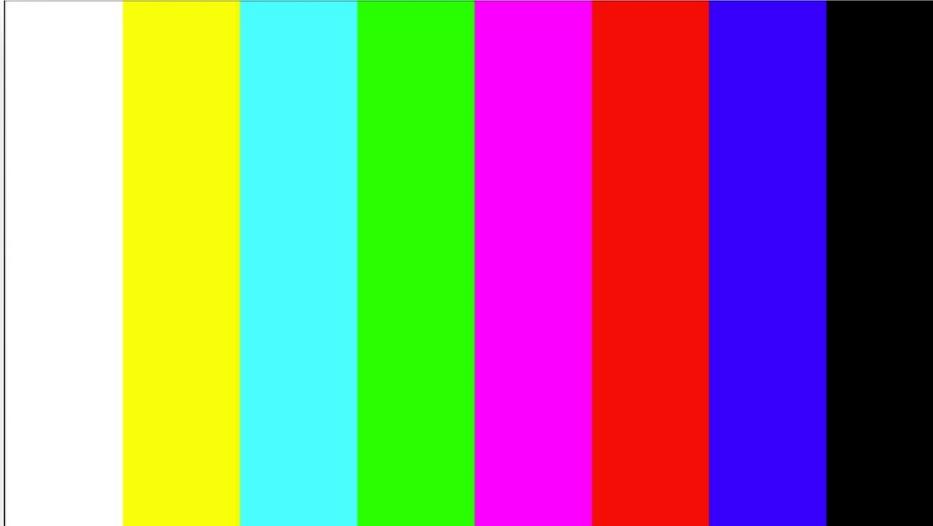


Abbildung 36: Farbbalken-Testbild (100 / 100)

Aufgrund des Druckes kann es zu Farbabweichungen dieses Testbildes kommen. Zusätzlich zu diesem Testbild sollte der „Blue Only“-Modus am Screen eingestellt werden. Beim „Blue Only“-Modus sind nur die blauen Farbpixel der SMD Pixel aktiv. Eine korrekte Sättigungseinstellung ist dann erreicht, wenn die drei Farben Cyan, Magenta und Blau und das Weiß im „Blue Only“-Modus ein einheitliches Blau darstellen. Das Kontrastverhältnis kann nach diesen Einstellungen gemessen werden. Dazu wird ein Testbild benötigt, das Weiß und Schwarz auf einem Bild zeigt. Mit dem Messgerät werden dann die Leuchtdichtewerte dieser beiden Bereiche aufgenommen. Dies sollte nach der Kalibrierung des LED-Screens wiederholt werden.

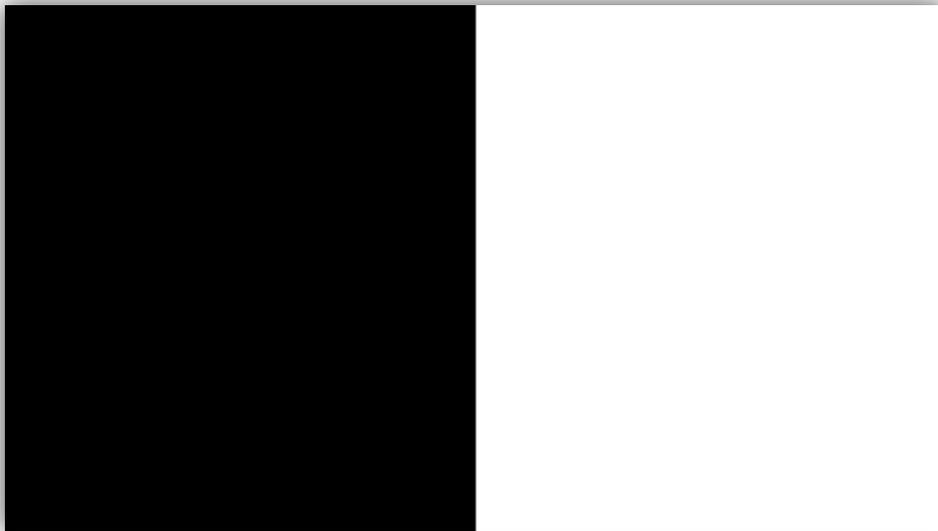


Abbildung 37: Testbild zur Kontrastmessung

II. Nativer / unkalibrierter Zustand des LED-Screens

Im nächsten Schritt wird der LED-Screen in seinem unkalibrierten Zustand aufgenommen. Dabei gilt herauszufinden welche nativen Farben der Screen aufweist und wie dieser bestimmte Werte und Videosignale unkalibriert wiedergibt.

a) Native Primär- und Sekundärfarben:

Als erstes werden die nativen Farben des LED-Screens gemessen. Neben der drei Primärfarben Rot, Grün und Blau werden auch die Sekundärfarben Cyan, Magenta und Gelb gemessen.

Die Messwerte, die mit dem Messgerät und der entsprechenden Mess-Software aufgenommen werden sollten sind die xy-Koordinaten, die RGB-Werte, die dominante Wellenlänge, die Leuchtdichte und auch das Spektrum jeder einzelnen Farbe sollte aufgenommen werden. Anhand des Spektrums lässt sich die spektrale Verteilung jeder Farbe erkennen.

Das Spektrum ist neben dem Auge ein wichtiges Kriterium um beurteilen zu können, ob die jeweilige Farbe vom Screen nativ dargestellt wird oder ob bereits im unkalibrierten Zustand ein unbekanntes Farbmanagement stattgefunden hat. Besonders gut lässt sich dies an den drei Grundfarben Rot, Grün und Blau untersuchen, da die SMD Pixel des Screens aus diesen drei Farbpixeln bestehen. Bei einem nativen Rot beispielsweise sollte das Spektrum bloß einen relativ engen Peak im Rotbereich des Spektrums ausweisen. Sind weitere Peaks in anderen Spektralbereichen im Spektrum vorhanden, so lässt sich vermuten, dass das dargestellte Rot nicht nativ ist. Denn bei einem nativen Rot sollten nur die roten Farbpixel der SMD-Pixel Licht aussenden und die anderen beiden Farbpixel keines. Ein weiterer Peak im Spektrum könnte folglich ein Hinweis darauf sein, dass neben dem roten Farbpixel ein weiterer Farbpixel Licht aussendet. Dies weist darauf hin, dass ein internes, automatisches Farbmanagement im LED-Screen eingebaut ist. Mit dem bloßen Auge oder auch unter Zuhilfenahme eines optischen Gerätes wie einem Vergrößerungsglas kann dann untersucht werden, ob die Vermutungen der Wahrheit entsprechen und neben dem gewünschten Farbpixel weitere Farbpixel Licht aussenden.

Neben der Erkenntnis darüber, ob der vorliegende LED-Screen Informationen über seine tatsächlich nativen Farben liefern kann, wird mit den bereits genannten Messgrößen die Größe des nativen bzw. unkalibrierten Farbraumes aufgenommen. Besonders die Lage der Eckpunkte der drei Primärfarben und das sich daraus ergebende Dreieck auf der CIE Farbtafel sind für die Farbkalibrierung wichtig. Das native Farbdreieck sollte eine größere Fläche auf der Farbtafel umschließen als das Farbdreieck des Zielfarbraumes, damit letzterer überhaupt mit einer Farbkalibrierung erreicht werden kann.

Die weiteren genannten Messgrößen sind im Allgemeinen für den Vergleich der nativen bzw. unkalibrierten Farben mit den kalibrierten Farben nötig.

Angaben zum Farbmanagement von LED-Screens sind bisher auf keinem Datenblatt angegeben oder anderweitig zu finden. Selten sind Angaben zu den Wellenlängen der drei Farbpixel der SMD-Pixel auf dem Datenblatt zum Screen angegeben. Diese Wellenlängen lassen sich nur dann mit dem Messgerät nachmessen, sofern der LED-Screen seine nativen Farben darstellen kann.

Für diese Messungen werden im Idealfall Testbilder aller sechs Grundfarben benötigt. Sofern diese nicht vorhanden sind, kann auch das Farbbalken-Testbild verwendet werden.

Für die LED-Screen Messungen dieser Arbeit soll für die Sekundärfarben das Farbbalken-Testbild verwendet werden und für die Primärfarben jeweils ein Testbild.

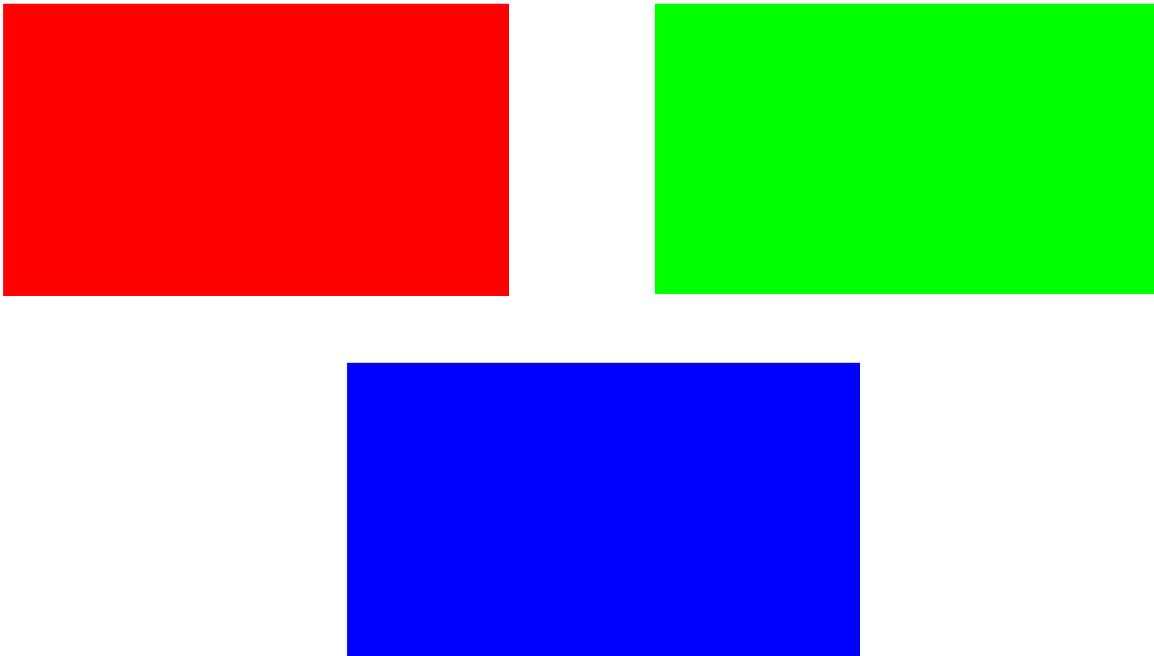


Abbildung 38: Testbilder für die drei Primärfarben

b) Unkalibriertes Weiß:

Neben der nativen bzw. unkalibrierten Farben des LED-Screens ist auch das unkalibrierte Weiß eine wichtige Größe.

Auch hier sollten die xy-Koordinaten, die RGB-Werte, die Leuchtdichte und das Spektrum mit dem Messgerät aufgenommen werden. Zusätzlich zu diesen Größen sollte außerdem die Farbtemperatur des vorliegenden Weiß mit dem Messgerät bestimmt werden.

Hier gilt es gleichzeitig zu überprüfen, ob die gemessene ähnlichste Farbtemperatur beziehungsweise die gemessene CCT mit den Angaben am Controller übereinstimmen.

Einige Controller bieten voreingestellte Farbtemperaturwerte, die ausgewählt werden können. Da die ähnlichste Farbtemperatur des LED-Screens später auf D65 bzw. 6504K kalibriert werden soll, ist es sinnvoll am Controller eine Farbtemperatur (ähnlichste Farbtemperatur) nahe 6500K zu wählen und diese dann mittels des Messgerätes zu prüfen. Falls der Controller keine Farbtemperaturen anbietet, wird das Weiß, ohne weitere Angaben zu der ähnlichsten Farbtemperatur, gemessen.

Das Testbild für diese Messung ist ein einfaches weißes Testbild.

c) Gamma-Kurve / -Verlauf:

Der unkalibrierte Gamma-Verlauf des LED-Screens sollte aufgenommen werden.

Wie bereits bekannt unterliegt das gesamte Videosystem, das die Aufnahme und die Wiedergabe von Videosignalen einschließt, einer bestimmten Kennlinie. Die System-Kennlinie besitzt einen linearen Verlauf der aus der Aufnahme-Kennlinie und der Wiedergabe-Kennlinie des Systems resultiert. Dies wird näher im Kapitel 4.1. Gamma beschrieben. Bekannt ist, dass die Wiedergabe-Kennlinie einen exponentiellen Verlauf aufweist und in der Regel einen Gamma-Wert zwischen 2,2 und 2,4 besitzt. Dieser Wert richtet sich nach dem Wiedergabesystem.

Mithilfe eines Graustufen-Testbildes werden die Leuchtdichtewerte der einzelnen Graustufen gemessen.

Anhand folgender Formel kann die ideale Gamma-Kurve über bestimmte Graustufen berechnet werden.

$$L = a(\max[(V + b), 0])^\gamma$$

$$a = (L_W^{\frac{1}{\gamma}} - L_B^{\frac{1}{\gamma}})^\gamma$$

$$b = \frac{L_B^{\frac{1}{\gamma}}}{L_W^{\frac{1}{\gamma}} - L_B^{\frac{1}{\gamma}}}$$

$$V = \frac{D - 64}{876}$$

L: Leuchtdichtewert des Screens [*cd/m*²]

L_W: Leuchtdichte für Weiß [*cd/m*²]

L_B: Leuchtdichte für Schwarz [*cd/m*²]

V: Videopegel mit *V* = 0 für Schwarz und *V* = 1 für Weiß

γ: Gamma – Wert

a: Kontrastvariable

b: Helligkeitsvariable (Schwarzwert)

D: Digitalwert, 10 – bit, Rec. 709

Formel 9: ITU-R Richtlinie Recommendation ITU-R BT.1886 „Reference electro-optical transfer function for flat panel displays used in HDTV studio production“

Diese Formel stammt aus der ITU-R Richtlinie Recommendation ITU-R BT.1886 „Reference electro-optical transfer function for flat panel displays used in HDTV studio production“. Diese Richtlinie bezieht sich auf Flachbildschirme, die in einer HDTV Studioproduktion verwendet werden. Die Formel wurde 1:1 für die Berechnung eines idealen Gamma-Verlaufs von LED-Screens übernommen. Dies rechtfertigt sich damit, dass die Testbilder der Richtlinie Rec. 709 entsprechen und der LED-Screen auch nach dieser Richtlinie kalibriert werden soll.

Die maximale Helligkeit *L_W*, also die Helligkeit bei dem Videopegel 100%, ist wichtig für die Berechnung der Helligkeitswerte aller Graustufen. Die maximale Helligkeit wurde im ersten Schritt mit Einstellen des Schwarz- und des Weißwertes festgelegt.

Der am Controller eingestellte Gama-Wert fließt in die Berechnung ein und somit kann der, für diesen Wert ideale Gamma-Verlauf, mit dem Gamma-Verlauf des LED-Screens verglichen werden. Im Idealfall stimmen die Verläufe überein.

d) Farbtemperatur über Graustufen:

Mit der Farbtemperatur ist natürlich die ähnlichste Farbtemperatur gemeint, da der LED-Screen aus LEDs besteht, die nicht zu den Temperaturstrahlern gehören. Gemeint ist also mit der Farbtemperatur hier immer die ähnlichste Farbtemperatur bzw. die CCT, die mit dem Messgerät gemessen wird. Dies gilt auch für den vorhergehenden Text.

Genauso wie für jede der festgelegten Graustufen die Leuchtdichtewerte mit dem Messgerät aufgenommen werden, sollte auch die ähnlichste Farbtemperatur über die Graustufen gemessen werden. Gewünscht ist, dass sich die Farbtemperatur über die Graustufen nicht ändert. Dies gilt es zu überprüfen.

Von LEDs ist bekannt, dass sie beim Dimm-Vorgang in der ähnlichsten Farbtemperatur relativ konstant sind und sich nicht wie die Temperaturstrahler verhalten. Beim Dimm-Vorgang von Temperaturstrahlern nimmt die Farbtemperatur mit sinkender Helligkeit, also beim Runterdimmen, ab.

Für diese Messung wird dasselbe Testbild wie bei der Aufnahme des Gamma-Verlaufs benötigt. Da der LED-Screen hier im unkalibrierten Zustand ist und dasselbe Testbild verwendet werden kann, können der Gamma-Verlauf und die ähnlichste Farbtemperatur über die Graustufen in einem Schritt aufgenommen werden. Die Mess-Software gibt sowohl die Leuchtdichtewerte als auch gleichzeitig die CCT aus.

III. Kalibrierung

Nach der Aufnahme der unterschiedlichen Werte des unkalibrierten LED-Screens folgt nun die Kalibrierung des Screens. In diesem Abschnitt wird beschrieben was kalibriert werden sollte und wie die Kalibrierung durchgeführt werden sollte.

Auch die Kalibrierung sollte in einer bestimmten Reihenfolge erfolgen wie die Aufnahme der Werte des unkalibrierten Screens. Die Reihenfolge ist in diesem Schritt sogar noch wichtiger.

a) Anpassung der Primär- und der Sekundärfarben an den Zielfarbraum:

Der erste Schritt der Kalibrierung sollte die Anpassung der Farbwerte der Primär- und Sekundärfarben des LED-Screens sein. Angepasst werden die unkalibrierten bzw. nativen Farbwerte an die Farbwerte eines festgelegten Zielfarbraumes. In dieser Arbeit wird der HD-Farbraum nach Rec. 709 verwendet, da dieser auch der Mess-Software „MoDiCal“ zur Verfügung steht. Ein weiter wichtiger Farbraum ist der Ultra-HD Farbraum Rec. 2020, da dieser besonders in Zukunft oder für Ultra-HD-Anwendungen bzw. sehr große hochauflösende LED-Screen Anwendungen benötigt wird. Die Farbwerte dieser Farbräume sind fest definiert.

Neben den xy-Farbkoordinaten der drei Primärfarben sind auch die xy-Koordinaten der Sekundärfarben wichtig für die Kalibrierung wie auch die zugehörigen Leuchtdichtewerte zu jeder einzelnen Farbe.

Auch der Weißpunkt ist in dem Farbraum definiert und dieser sollte nach der Kalibrierung die richtigen xy-Koordinaten und auch die richtige ähnlichste Farbtemperatur aufweisen. Dies wird näher im nächsten Schritt der Kalibrierung beschrieben. Die Leuchtdichte des kalibrierten Weißpunktes wird dann für die Berechnung der Leuchtdichtewerte der Farben benötigt.

Die Sekundärfarben und auch die Leuchtdichtewerte der Farben werden bei der Kalibrierung häufig nicht beachtet. Dies macht die Kalibrierung ungenau und sie verliert dadurch an Bedeutung. Es ist bekannt, dass Farbe eine dreidimensionale Größe ist und deshalb sollten auch alle der drei Dimensionen Farbton, Farbsättigung und Helligkeit bei der Kalibrierung beachtet werden.

Für die Kalibrierung und Messung der LED-Screens dieser Arbeit liegt folgende Tabelle als Grundlage vor.

Rec. 709	x	y	Leuchtdichte in cd/m²
Rot	0,64	0,33	21,26
Grün	0,3	0,6	71,52
Blau	0,15	0,06	7,22
Cyan	0,225	0,329	78,74
Magenta	0,321	0,154	28,48
Gelb	0,419	0,505	92,78
Weiß	0,3127	0,329	100

Tabelle 11: Definition des Farbraumes nach Rec. 709 mit allen sechs Grundfarben und den Leuchtdichtezusammenhängen

Die Helligkeitswerte der Farben lassen sich mit der Luma-Formel (Y-Formal) des entsprechenden Farbraumes und der Leuchtdichte des kalibrierten Weißpunktes berechnen. Die Leuchtdichtewerte des Farbraumes nach Rec. 709 lassen sich mithilfe dieser Formel berechnen:

$$Y = 0,2126 \cdot R + 0,7152 \cdot G + 0,0722 \cdot B$$

Die Leuchtdichtewerte des Farbraumes nach Rec. 2020 können durch diese Formel berechnet werden:

$$Y = 0,2627 \cdot R + 0,6780 \cdot G + 0,0593 \cdot B$$

Auf die Berechnung der Farbluminanzen haben die Gewichtungsfaktoren der drei Primärfarben Rot, Grün und Blau der Y-Formeln großen Einfluss. Die Faktoren der Sekundärfarben lassen sich durch einfache Addition der jeweiligen Faktoren der Primärfarben berechnen, aus denen die Sekundärfarbe gemischt wird. Beispielsweise lässt sich der Faktor für die Sekundärfarbe Cyan aus den Faktoren der Primärfarben Grün und Blau berechnen und beträgt dementsprechend 0,7874 für den Farbraum nach Rec. 709. Die zugehörige Helligkeit berechnet sich dann aus der maximal definierten Helligkeit des kalibrierten Weißpunktes (in der Tabelle beispielhaft 100cd/m²) und dem entsprechenden Faktor der zu berechnenden Farbluminanz.

Eine Beispielrechnung verdeutlicht wie der Helligkeitswert einer Sekundärfarbe berechnet werden kann. Die maximale Helligkeit in der Beispielrechnung beträgt 180cd/m² und der Leuchtdichtewert ist für die Sekundärfarbe Cyan zu berechnen.

$$180 \text{ cd/m}^2 \cdot 0,7874 = 141,732 \text{ cd/m}^2$$

Die Anpassung der sechs Grundfarben an die Farbwerte des Zielfarbraumes wird mittels der Controller-Software erreicht. Der Controller sollte dabei die Einstellmöglichkeit bieten, die RGB-Anteile sowie Farbton, Farbsättigung und Helligkeit zu variieren. Dabei ist daran zu denken, dass im Grün-Anteil die meiste Leuchtdichte steckt. Muss die Leuchtdichte einer Farbe also eine relativ hohe Leuchtdichte im Verhältnis zur maximalen Leuchtdichte (Weiß) aufweisen, so muss beispielsweise der Grünanteil erhöht werden. Dabei müssen die xy-Koordinaten aber auch denen des Zielfarbraumes entsprechen.

b) Weißanpassung:

Wie bereits im Abschnitt Anpassung der Primär- und Sekundärfarben an den Zielfarbraum erwähnt, ist der Weißpunkt des Zielfarbraumes auch fest definiert. Mit der Weißanpassung soll also der Weißpunkt an den Weißpunkt des Zielfarbraumes angepasst werden. Die Anpassung geschieht über die xy-Koordinaten. Die xy-Koordinaten entsprechen dabei einem Punkt auf der CIE Farbtafel, der die CCT von 6500K bzw. eigentlich von 6504K ergibt. Dieser Punkt liegt also nahe an dem Planck'schen Kurvenzug und kann auf einer Judd'schen Geraden liegen, die der Farbtemperatur von 6500K bzw. 6504K entspricht.

Der Leuchtdichtewert des Weißpunktes ist im Prinzip nicht durch den Zielfarbraum definiert. Dieser Wert wurde im ersten Schritt festgelegt.

Auch hier werden die Zielkoordinaten durch Anpassung der RGB-Werte in der Controller-Software erreicht. Die RGB-Anteile werden so lange angepasst, bis die xy-Koordinaten denen des Zielfarbraumes sehr nahekommen und die ähnlichste Farbtemperatur der Vorgabe von 6504K mit einer möglichst geringen Abweichung entspricht.

c) Gamma-Anpassung:

Mit Gamma-Anpassung ist gemeint, dass der unkalibrierte Gama-Verlauf des LED-Screens an eine bestimmte Gamma-Kurve angepasst werden soll. Diese Gamma-Kurve wird durch die Formel im Abschnitt II c) Gamma-Kurve / -Verlauf definiert. Der Gamma-Wert, der in der Controller-Software eingestellt ist, muss mit dem Gamma Wert γ der Formel übereinstimmen, damit die richtigen Leuchtdichtewerte für die Graustufen berechnet werden können. Nach der rechnerischen Ermittlung der idealen Leuchtdichtewerte für die Graustufen bzw. des Gamma-Verlaufs muss genau auf diese Leuchtdichtewerte kalibriert werden.

Mithilfe eines Grautreppe-Testbildes, das auch bei der unkalibrierten Überprüfung der Leuchtdichtewerte bzw. des Gamma-Verlaufs benutzt wurde, sollen nun auch die Zielwerte für die Leuchtdichte kalibriert werden.

Die Leuchtdichtewerte der einzelnen Graustufen werden mit dem Messgerät gemessen und die RGB-Anteile bzw. die Helligkeit wird dann so lange am Controller angepasst, bis die Zielwerte der Rechnung erreicht werden.

d) Farbtemperaturanpassung über die Graustufen:

Bei diesem Kalibrierungsschritt macht es Sinn, ihn zusammen mit dem vorherigen durchzuführen, da die Farbtemperatur bzw. die ähnlichste Farbtemperatur der Graustufen von den RGB-Anteilen abhängt, die am Controller eingestellt werden. Das Vorgehen bei der Kalibrierung der ähnlichsten Farbtemperatur über die verschiedenen Graustufen entspricht genau dem Vorgehen der Weißanpassung. Der einzige Unterschied ist, dass die Weißanpassung für jede definierte Graustufe durchgeführt werden muss.

IV. Beurteilung weiterer Qualitätsparameter

Neben der messtechnischen Beurteilung und Auswertung der wichtigsten Qualitätsparameter sollen auch noch einige weitere Parameter mit den Messungen dieser Arbeit zusammen überprüft werden.

Zu diesen Parametern zählen das Kontrastverhältnis, das nach der idealen Einstellung von Helligkeit und Kontrast mit dem LED-Screen vor und nach der Kalibrierung erreicht werden kann, und die Betrachtungswinkelabhängigkeit.

a) Kontrastverhältnis:

Die Beurteilung des Kontrastverhältnisses beruht auch auf messtechnischer Basis. Die Leuchtdichtewerte von Weiß und Schwarz müssen mit dem Messgerät aufgenommen werden, um danach gegenübergestellt werden zu können. Diese Messwerte werden von einem Testbild aufgenommen, das zur Hälfte Weiß und zur anderen Hälfte Schwarz ist. Schwarz und Weiß sind also gleichzeitig auf einem Testbild enthalten und somit auch gleichzeitig auf dem LED-Screen zu sehen.

Das Kontrastverhältnis ergibt sich dann aus den Leuchtdichtewerten von Schwarz und Weiß und macht eine Aussage darüber, welche Leuchtdichteunterschiede bzw. Helligkeitsunterschiede maximal im Bild erreicht werden können. Zu beachten ist dabei, dass in dieser Arbeit die maximalen Helligkeitsunterschiede angegeben werden, die nach der idealen Einstellung von Helligkeit und Kontrast erreicht werden können .

b) Betrachtungswinkelabhängigkeit:

Die Betrachtungswinkelabhängigkeit wird in dieser Arbeit mit dem bloßen Auge beurteilt und dann beschrieben. Für die Beurteilung wird auf dem LED-Screen ein weißes Testbild abgespielt.

Wichtige Faktoren, die die Winkelabhängigkeit beeinflussen, sind die Lage und Verteilung der Farbpixel in den SMD-Pixeln und die sogenannten Shader. Als Shader wird das Abdeckungsmaterial der LED-Screen Module bezeichnet.

Die Lage der Farbpixel beeinflusst die Einfärbung des Screens je nach Betrachtungswinkel. Diese Färbung entsteht aber erst oder sollte erst dann entstehen, wenn die Betrachtungswinkel, die in den Datenblättern angegeben sind, verlassen und überschritten werden. Der LED-Screen erscheint beispielsweise blau eingefärbt, wenn die blauen Farbpixel, bedingt durch den Betrachtungswinkel, die anderen Farbpixel überdecken. Ebenso kann der Screen auch rot erscheinen. Eine grünliche Färbung ist eher selten oder unwahrscheinlich, da die Anordnung der Farbpixel in den Meisten Fällen Rot – Grün – Blau oder Blau – Grün – Rot (von oben nach unten gesehen) ist. Dadurch überdecken je nach Winkel die roten oder die blauen Pixel die anderen Farbpixel.

Auch die Shader haben einen Einfluss auf die Winkelabhängigkeit, da sie durch ihre Beschaffenheit die Winkelabhängigkeit positiv beeinflussen können. Außerdem können sie einen größeren Kontrastumfang begünstigen.

11. Messung und Kalibrierung von LED-Screens

In diesem Kapitel werden vier unterschiedliche Produkte gegenübergestellt.

Die vier LED-Screen können in zwei Gruppen eingeteilt werden. In der einen Gruppe befinden sich die von den Benutzern als hochwertig beschriebene Produkte, die im Vergleich zur anderen Gruppe auch einen höheren Preis besitzen. In der anderen Gruppe befinden sich dann die preiswerteren Produkte, die laut Benutzer qualitativ nicht so hoch einzustufen sind. Um die Screens gegenüber stellen zu können, werden Produkte ausgewählt, die einen ähnlich Pixel Pitch aufweisen. Das bedeutet, dass ein hochwertiges Produkt einem weniger hochwertigen Produkt gegenübergestellt wird, das einen ähnlichen Pixel Pitch aufweist. Die folgende Tabelle verdeutlicht dies noch einmal.

LED-Screen	Einstufung des LED-Screens	Pixel Pitch
Lighthouse X3	Hochwertiges Produkt, teuer	3,9mm
Unilumin RT3.9	Weniger hochwertiges Produkt, günstiger	3,9mm
Hibino 6mm	Hochwertiges Produkt, teuer	6,0mm
ROE MC-7H	Weniger hochwertiges Produkt, günstiger	7,5mm

Tabelle 12: Überblick der zu messenden LED-Screens

Der Aufbau und Ablauf der Messungen wird beschrieben, die unterschiedlichen verwendeten Controller und ihre Software werden vorgestellt, es wird auf die Kalibriermöglichkeiten der vorhandenen Produkte eingegangen, an jedem der vier LED-Screens werden die Messungen aus dem Kapitel 10. Leitfaden zur LED-Screen Messung soweit möglich durchgeführt und schließlich wird jeder der Screens im Rahmen seiner Möglichkeiten kalibriert.

Dieses Kapitel soll außerdem zeigen, welche Einstellmöglichkeiten die LED-Controller bieten und welche Kalibrierungsschritte sich damit durchführen lassen.

Am Schluss dieses Kapitels werden die vier Produkte anhand ihrer Messergebnisse und ihrer Gegebenheiten miteinander verglichen.

Im Allgemeinen zeigt dieses Kapitel auf, was in der Praxis an LED-Screens gemessen werden kann, wie dies gemessen werden kann und wie schließlich die Kalibrierung durchgeführt werden kann. Es wird sich zeigen, dass die heutige Praxis mit ihren Möglichkeiten noch nicht an die Theorie und den idealen Vorstellungen und Ansprüchen aus dem Kapitel 10. Leitfaden zur LED-Screen Messung heranreicht.

11.1. Messung der vier LED-Screens

Im Allgemeinen lässt sich bei allen vier LED-Screens relativ schnell feststellen, dass die Kalibrierung des Screens nur sehr beschränkt vorgenommen werden kann, was auf die Controller-Software begründet ist. Das Vorgehen ist genau wie im Kapitel 10.2. Kalibrier- und Messvorgang beschrieben, allerdings muss beachtet werden, dass die Kalibrierung in Kapitel 10.2. eine ideale Kalibrierung beschreibt, die sich in der Praxis so nicht unbedingt umsetzen lässt.

Heutige Smart TVs bzw. hochwertige Consumer TV-Geräte bieten im Gegensatz zu den LED-Controllern die Möglichkeit, für bestimmte Helligkeiten / Graustufen Werte abzuspeichern, die sich das Gerät merkt und dann anwendet. Auch einzelne Farben können angepasst werden, wodurch der gesamte Farbraum des TV-Gerätes verändert, angepasst, abgespeichert und schließlich auch angewendet werden kann. Die LED-Controller bieten die Möglichkeit der Speicherung mit anschließender Anwendung nicht. So ist die Einflussnahme sehr gering.

Ein weiterer großer Unterschied zu TV-Geräten stellt die nicht vorhandene Menüführung der LED-Controller dar, mit der die oben beschriebenen Kalibrierungen und Einstellungen vorgenommen werden können.

Festgestellt wurden obige Erkenntnisse durch Analysieren und Ausprobieren der Controller-Software. Zunächst wurde der Weißpunkt auf ca. 6504K kalibriert. Anschließend sollte das unkalibrierte Rot des LED-Screens auf das Rot des Farbraumes Rec. 709 kalibriert werden. Nach dieser Kalibrierung hat sich der zuvor kalibrierte Weißpunkt wieder verschoben. Speicher- oder Zuweisungsmöglichkeiten der vorgenommenen Einstellungen sind in keiner der vier Controller-Softwares zu finden. Dieses Ausprobieren hat die vorangegangene Vermutung, dass die Kalibriermöglichkeiten durch den LED-Controller und dessen Software sehr eingeschränkt sind, noch einmal bestätigt.

Ein weiteres Problem stellen erweiterte Gamma-Einstell-Optionen dar. Bei einigen Controller-Softwares kann die Gamma-Kurve für Weiß und für jede der drei Primärfarben angepasst und mittels einer Tabelle verändert werden. In solch einer Tabelle sind alle Digitalwerte, je nach Quantisierung, aufgeführt und ihnen kann ein Helligkeitswert zugeordnet werden. Dadurch werden die Gamma-Kurven verändert. Nachdem solche Änderungen in der Controller-Software vorgenommen wurden, kann es zu einer Art Beschädigung der LED-Prozessor-Karten kommen. Dies macht sich bemerkbar, indem die LED-Screens und Controller nicht mehr üblich auf andere Einstellung wie die Helligkeit reagieren. Es kann beispielsweise dazu kommen, dass nur noch gewisse Farbpixel reagieren oder überhaupt funktionieren. Es kann auch passieren, dass der gesamte LED-Screen oder einzelne Module schwarz werden und auf keinerlei Einstellungen mehr reagieren. Dies ist auch bereits einigen Nutzern in der Vergangenheit aufgefallen, die noch weitere Folgen festgestellt haben. Solch ein Problem ist leider auch nicht so schnell wieder behoben, da die Prozessor-Karte repariert werden oder

formatiert werden muss. Aus diesen Gründen werden bei den Messungen dieser Arbeit solche Gamma-Einstell-Optionen nicht weiter beachtet und nicht benutzt.

Auf die einzelnen Controller wird bei jeder Messung noch genauer eingegangen.

Da also die Kalibrierung des Farbraumes, die Kalibrierung der Farbtemperatur über die Graustufen und des Gammas bzw. der Leuchtdichte über die Graustufen durch die Gegebenheiten des Controllers wegfallen, wird in den nachfolgenden Messungen der vier LED-Screens nur der Weißpunkt kalibriert. Danach wird überprüft, ob sich die Farbwerte, die Farbtemperatur über die Graustufen und die Leuchtdichtewerte über die Graustufen gegenüber der Ausgangswerte verändert haben.

Der Mess-Aufbau sieht bei jedem LED-Screen fast identisch aus.

Die Geräte des Aufbaus sind: LED-Screen, LED-Controller, DVI-Switch, Video-Scaler, Laptop mit Controller-Software, Laptop mit Testbildern, Mini Monitor (Videosignal-Generator), Messgerät und Laptop mit Mess-Software.

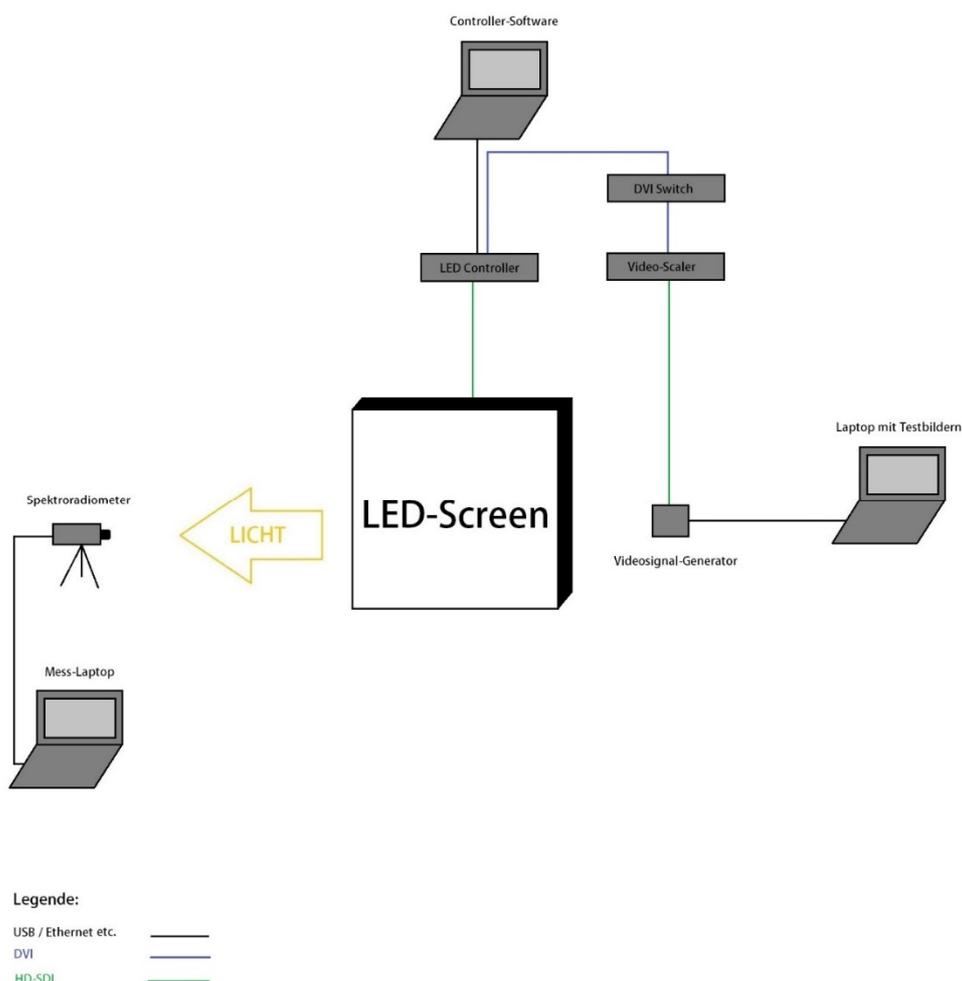


Abbildung 39: Schematische Darstellung des Messaufbaus für die vier Messungen

Die Videosignale, die aus dem Videosignal-Generator kommen sind mit einem Video-Scaler über HD-SDI verbunden. Dieser ist wiederum über DVI mit einem DVI-Switch verbunden, der das Videosignal über DVI an die vier vorhandenen LED-Controller verteilt. Die LED-Screens sind mit ihrem jeweiligen Controller wieder über HD-SDI oder DVI verbunden.

Zugriff auf die LED-Controller bietet die jeweilige Software, die auf dem Ansteuerungs-Laptop installiert ist. Verbunden ist der Laptop entweder über USB oder über Ethernet mit dem jeweils zu benutzenden Controller.

Der Video-Scaler ist für die Anpassung und Skalierung des Videosignals auf den vier verschiedenen Screens zuständig. In dem Mess-Aufbau für diese Arbeit ist der Video-Scaler ein nützliches Gerät, da ein und dasselbe Testbild auf vier LED-Screens mit unterschiedlichem Pixel Pitch angezeigt werden muss. Die Anpassung der Testbilder an den jeweiligen Screen ist für die Messung mit dem Messgerät wichtig, da das Messgerät zum Teil nur Bereiche von einigen Testbildern messen soll.

Die Schärfen-Einstellung kann bei den Messungen folglich nicht ausgeführt und beachtet werden.

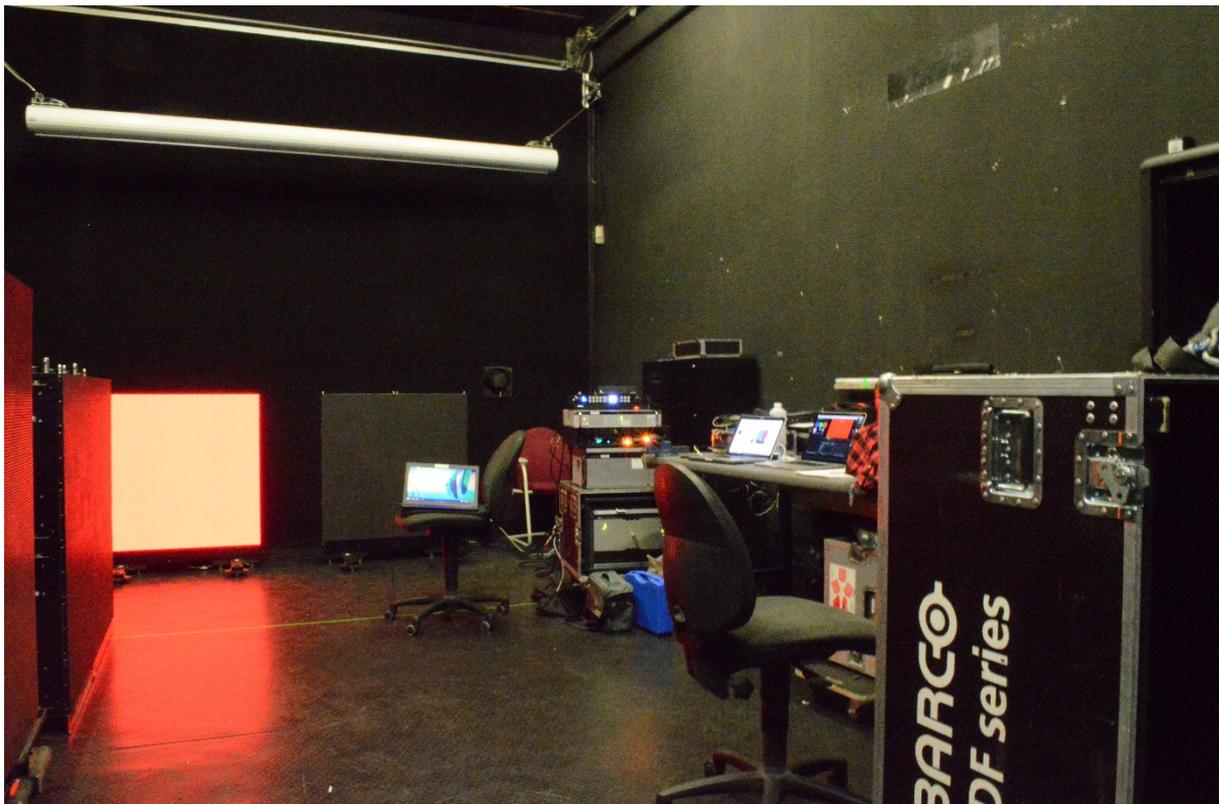


Abbildung 40: Foto des Messaufbaus vor Ort

Die LED-Screens bestehen jeweils aus vier Modulen, die in einer 2x2-Matrix angeordnet sind. Die Module sind aufeinander abgestimmt und kalibriert.

Die Messbedingungen sind für jeden der vier LED-Screens dieselben.

Die Beleuchtungsstärke der Umgebung wurde mit dem Jeti-Messgerät gemessen und beträgt 0,003045lx. Der Raum, in dem die Messungen durchgeführt werden, ist also dunkel. Die Bedingung aus Kapitel 10.1. Messbedingungen und Vorbereitung, die die Umgebungshelligkeit betreffen, sind erfüllt, da die gemessene Beleuchtungsstärke kleiner als 1lx ist.

Bevor mit der Messung eines LED-Screens begonnen wird, wird eine „Warmlaufzeit“ von mindestens 30 Minuten eingehalten. Diese Zeit brauchen die LED-Screens, um auf ihre Betriebstemperatur zu kommen. Dies ist ein wichtiger Vorgang damit der LED-Screens relativ konstant ist. Das bedeutet, dass beispielsweise Helligkeitsschwankungen oder Schwankungen der ähnlichsten Farbtemperatur nach dieser Zeit weniger vorkommen bzw. dass die Schwankungen verringert sind.

Es wird ein Messpunkt festgelegt, an dem alle Messungen durchgeführt werden. Dieser Messpunkt befindet sich nur auf einem der vier Module, aus denen jeweils alle der vier LED-Screens aufgebaut sind. Da es in dieser Arbeit nicht um das Farbmanagement unter den Modulen eines LED-Screens geht, sondern um das Farbmanagement und die Kalibrierungsmöglichkeiten im Allgemeinen, ist es wichtig, dass nur ein Modul gemessen wird und dass sich der Messpunkt bzw. der Messbereich nicht über mehrere Module erstreckt.

Lediglich bei der Kontrastmessung gibt es zwei Messpunkte, die aber auch noch auf einem Modul liegen.

Der Abstand der Messung richtet sich etwas nach dem vorhandenen Pixel Pitch des zu messenden LED-Screens. Wird der Pixel Abstand größer, so wird auch der Mess-Abstand vergrößert. Bei den LED-Screens mit dem Pixel Pitch von 3,9mm beläuft sich der Mess-Abstand auf ca. 70cm. Bei den beiden Screens mit einem größeren Pixel Pitch ist der Abstand zwischen Messgerät und LED-Screen etwas größer und beträgt ca. 1,20m. Die Gegebenheiten des Messraumes und des Aufbaus schränken die Mess-Abstände zum Teil ein.

11.1.1. LED-Screen 1 – Lighthouse X3

Bei dem ersten LED-Screen handelt es sich um ein hochwertiges Produkt mit einem Pixel Pitch von 3,9mm.

Einige weitere wichtige Angaben des Hersteller-Datenblattes werden hier genannt.

Herstellerangaben	Wert
Helligkeit	2000 cd/m ²
Betrachtungswinkel <ul style="list-style-type: none">• Horizontal• Vertikal	140° 140°
Minimaler Betrachtungsabstand	4m
Kontrastverhältnis	5000:1
Pixel pro Quadratmeter	65536

Tabelle 13: Angaben aus dem Hersteller Datenblatt zum Lighthouse X3 Screen

Laut Benutzer wird dieses Produkt beispielweise auf namenhaften Automobilmessen eingesetzt, was für seinen hohen Wert sprechen soll. Live-Kamerabilder sollen gut wiedergeben werden, was an den Grundeinstellungen des Screens liegen soll. Diese gilt es in der Messung zu untersuchen.

Es wurde vom Benutzer, bei dem die Messungen durchgeführt werden konnten, und einem Hersteller zusammen entwickelt. Als Basis für das Processing und den Controller wurde ein anderes älteres Produkt, das ebenfalls als hochwertig eingestuft wird, herangezogen. Dieses Basis-Produkt wird in dieser Arbeit auch gemessen. Das entwickelte Produkt zeichnet sich besonders darin aus, dass die einzelnen Cabinets, aus denen ein LED-Modul eines großen LED-Screens besteht, herausgenommen und geserviced werden können. So wird auch die Möglichkeit geboten, diese Cabinets mechanisch zu kalibrieren. Das bedeutet, dass die Cabinets durch Arretier-Schrauben ausgerichtet werden können, so dass eine Einheitliche Fläche und ein homogenes Bild auf dem LED-Screen hergestellt werden können.

Vom Benutzer wurde angemerkt, dass dieses Produkt eine Schwäche im Betrachtungswinkel aufweisen soll. Dies gilt es innerhalb der Messung zu untersuchen.

Bei diesem LED-Screen handelt es sich ausschließlich um ein Indoor-Produkt.

Der Controller, mit dem der LED-Screen angesteuert werden kann, ist ebenfalls vom Hersteller Lighthouse. Der Name des verwendeten Controllers ist „LCM-HDC“ und die zugehörige Controller-Software nennt sich „LCM Processor Control Software“.



Abbildung 41: Bild des LED-Controllers zu dem Lighthouse X3 LED-Screen

Dieser Controller verfügt an seiner Rückseite über die Schnittstellen SD- und HD-SDI, HDMI und DVI. Bei dem Mess-Aufbau ist der Controller über DVI mit dem DVI-Switch verbunden über HD-SDI mit dem LED-Screen.

Die Controller-Software „LCM Processor Control Software“ verfügt über zwei für die Messung und Kalibrierung interessante Menüpunkte. In dem einen Menüpunkt können allgemeine Einstellungen wie Helligkeit, Gammawert und Farbtemperatur vorgenommen werden. Der zweite Menüpunkt bietet weitere Einstellungsmöglichkeiten. Dieser Menüpunkt wird mit Farbeinstellungen bezeichnet. Diese Bezeichnung ist allerdings nicht wirklich passend, da die Farben bzw. die nativen Farben des LED-Screens mit diesem Menüpunkt nicht verändert oder eingestellt werden können. Vielmehr bietet dieser Menüpunkt die Möglichkeit noch einmal die Helligkeit einzustellen und auch den Kontrast, die Sättigung und die RGB-Anteile.

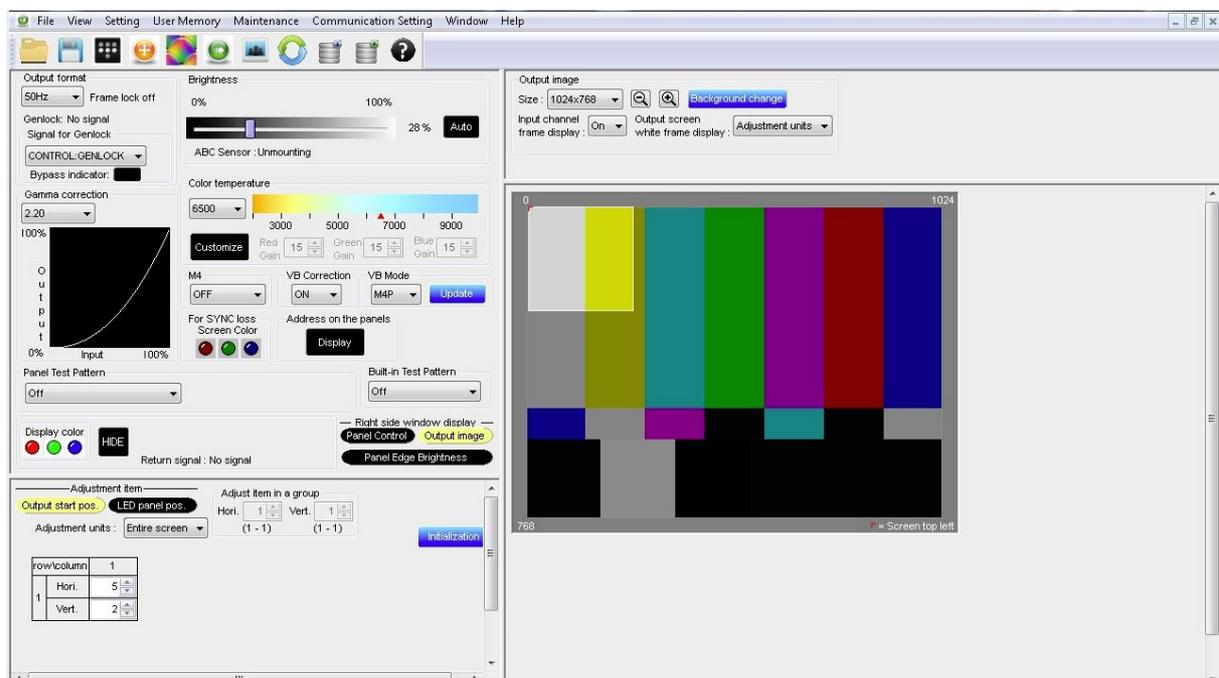


Abbildung 42: Controller-Software, Menüpunkt 1

Auf der linken Seite der Abbildung sind die Einstellmöglichkeiten des ersten Menüpunktes zu sehen.

Auf der rechten Seite dieses Menüpunktes ist mit dem hellen Quadrat die Größe des vorhandenen LED-Screens dargestellt. Die Größe richtet sich dabei nach der Anzahl der vorhandenen Pixel des Screens, was die einzelnen SMD-Pixel sind. Diese werden dann im Bezug zur eingestellten Output-Größe, hier 1024x768 Pixel, dargestellt. Die Output-Größe lässt sich aus einigen Vorschlägen auswählen. Die Größe 1920x1080 für HD Videosignale ist dabei nicht vorhanden und auswählbar. Durch Verschieben des hellen Quadrates kann der Ausschnitt des anliegenden Testbildes auf dem LED-Screen verändert werden. Es ist darauf zu achten, dass die verwendeten Testbilder 1920x1080 Pixel haben und der Output am Controller auf 1024x768 eingestellt ist, wodurch die Verschiebung des Quadrates nicht 1:1 übertragbar ist.



Abbildung 43: Controller-Software, Menüpunkt 2

Diese Abbildung zeigt den zweiten Menüpunkt der Controller-Software.

Die Helligkeit sollte zunächst über den ersten Menüpunkt eingestellt werden und kann dann auf diesem Menüpunkt nochmal angepasst werden. Das Vorgehen anders herum würde die Helligkeit so einschränken, dass mit der Helligkeitseinstellung des ersten Menüpunktes dann keine 100% mehr erreicht werden können.

Das Vektorskop und der Waveform-Monitor (die zwei unteren Anzeigen auf der linken Seite) sind lediglich andere Darstellungsformen für die Sättigungseinstellung und die RGB-Anteile. Das anliegende Videosignal wird nicht gemessen und im Vektorskop oder im Waveform-Monitor angezeigt.

Die rechte Seite dieses Menüpunktes würde die Möglichkeit bieten bestimmte eingestellte Werte in einer Tabelle abzuspeichern, allerdings funktioniert dies am vorhandenen Controller nicht. Laut Handbuch könnten mit diesen Einstellungen bestimmte Farben weiterführend kalibriert werden. Leider können diese Einstellmöglichkeiten nicht genutzt werden und die Möglichkeit so den Farbraum oder die Graustufen zu kalibrieren bleibt verwehrt.

Nachdem alle Vorbereitungen für die Messung und Kalibrierung getroffen wurde, kann mit der Messung begonnen werden.

Als erstes werden mithilfe das Graustufen-Testbildes der Schwarz- und der Weißwert eingestellt. Der Schwarzwert sollte zuerst mit dem Helligkeitsregler eingestellt werden. Dann folgt der Weißwert mit dem Kontrastregler. Eine optimale Einstellung ist dann erreicht, wenn alle Graustufen zu sehen sind, sich also voneinander unterscheiden und wenn das Schwarz wirklich Schwarz und nicht Grau ist.

Der Helligkeitsregler des ersten Menüpunktes wird auf 28% (0% bis 100%) gestellt und der Helligkeitsregler des zweiten Menüpunktes bleibt auf 0 (-20 bis +20). Der Kontrast wird leicht angehoben und der Regler befindet sich auf dem Wert 114 (0 bis 200).

Die Sättigung wird mithilfe des Farbbalken-Testbildes (100/100) eingestellt. Dazu wird manuell ein „Blue Only“-Modus erzeugt. Die Regler für die Farbanteile Rot und Grün werden auf null gestellt und der Blau-Anteil auf 100. Nun müssen das Weiß, das Cyan, das Magenta und das Blau des Testbildes genau dasselbe Blau aufweisen. Mit der Sättigungseinstellung von 100 (0 bis 200) wird dies erreicht.

Danach folgt die Kontrastmessung. Um das Kontrastverhältnis im Anschluss an die Messung berechnen zu können, müssen die Leuchtdichten von Schwarz und Weiß gemessen werden. Das nötige Testbild zeigt dabei Schwarz und Weiß zusammen an.

Im Datenblatt ist ein Kontrastverhältnis von 5000:1 angegeben. Diese Angabe beachtet kein korrekt dargestelltes Bild (Graustufen), sondern gibt an, was der LED-Screen maximal kann.

Bei der Messung ergab sich für Weiß eine Leuchtdichte von $484,23\text{cd/m}^2$ und für Schwarz eine Leuchtdichte von $0,14\text{cd/m}^2$. Daraus ergibt sich ein Kontrastverhältnis von 3458,79:1. Wenn man beachtet, dass die Helligkeit (Weiß) ca. ein Viertel der maximalen Helligkeit des Herstellerdatenblattes beträgt, dann ist das erreichte Kontrastverhältnis auch im Verhältnis zur Angabe aus dem Datenblatt gut.

Im nächsten Schritt der Messung werden die nativen bzw. die unkalibrierten Grundfarben des LED-Screens gemessen. Für diese Messung liegt für jede Primärfarbe (Rot, Grün und Blau) ein Testbild vor und für die Messung der Sekundärfarben (Cyan, Magenta und Gelb) wird das Farbbalken-Testbild verwendet. Neben der Mess-Software „MoDiCal“ wird auch die Software

„LiVal“ verwendet. Das Messen mit der zusätzlichen Mess-Software ist nötig, da die dominanten Wellenlängen der Grundfarben gemessen werden sollen und die Software „MoDiCal“ diese Option nicht anbietet. Neben der dominanten Wellenlänge werden die xy-Koordinaten der Farben aufgenommen, die Leuchtdichte und das Spektrum.

Zunächst wird mit dem bloßen Auge untersucht, welche Farbpixel der SMD-Pixel bei den drei Primärfarben-Testbildern Licht aussenden. Dabei fällt auf, dass bei jeder der drei Grundfarben mindestens ein weiterer Farbpixel zusätzlich Licht aussendet, wenn auch nur relativ schwach. Das folgende Foto versucht dies darzustellen.

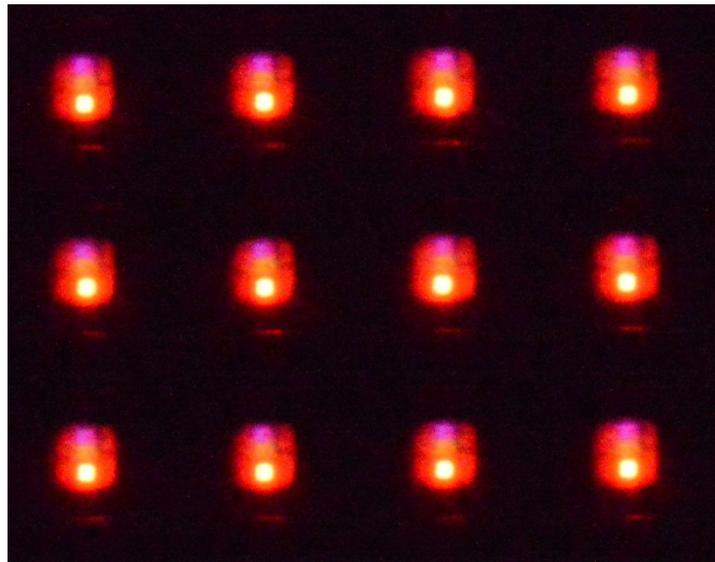


Abbildung 44: Foto von den Farbpixeln bei der Messung des unkalibrierten Rotes

Teilweise ist dies auch in den Spektren mit kleinen Peaks (Ausschlägen) in anderen Spektralbereichen zu erkennen wie im Spektrum des unkalibrierten Grüns.

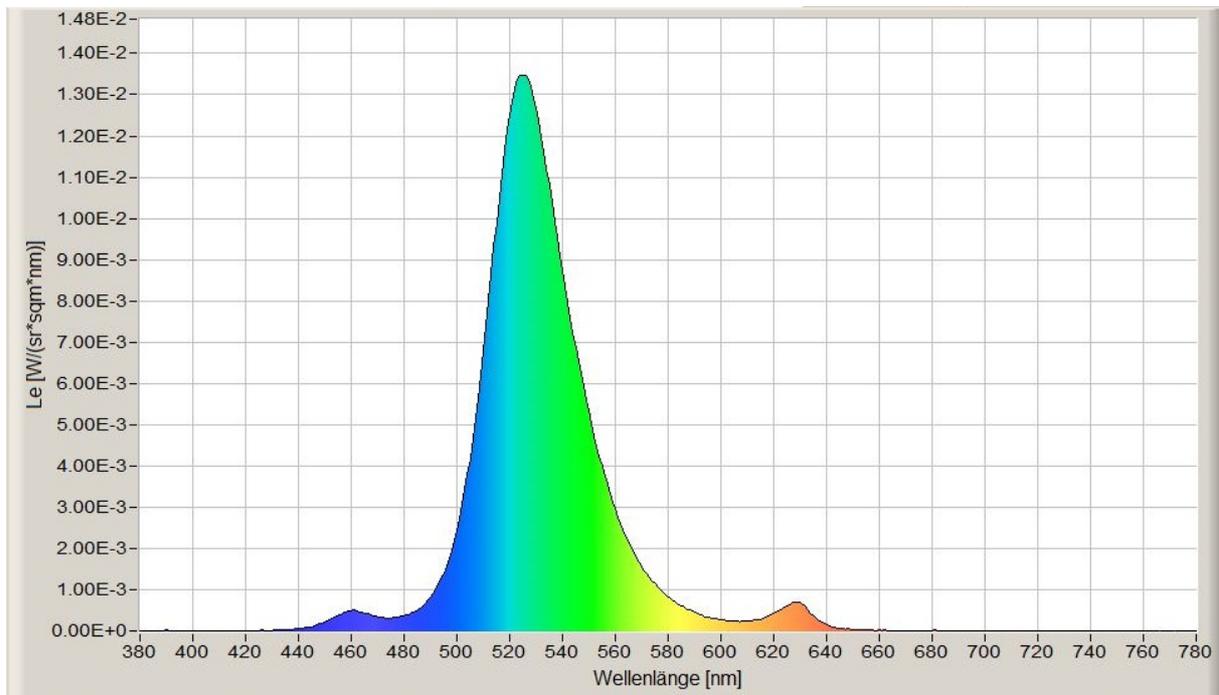


Abbildung 45: Spektrum des unkalibrierten Grüns

Bei den Sekundärfarben tritt der gleiche Fall auf. Auch hier gibt entsprechend der dritte Farbpixel Licht ab. An diesem Verhalten des LED-Screens ist zu erkennen, dass bereits ein internes Farbmanagement stattfindet und die nativen Screen-Farben nicht angezeigt werden können. Es lassen sich also bloß unkalibrierte Farben statt native Farben messen. Meist soll dieses interne Farbmanagement eine Annäherung der Farbwerte an einen bestimmten Farbraum bewirken. Die Messergebnisse zeigen dabei aber, dass das interne Farbmanagement die drei Primärfarben nicht sehr an die Farbwerte des HD-Farbraumes Rec. 709 annähert.

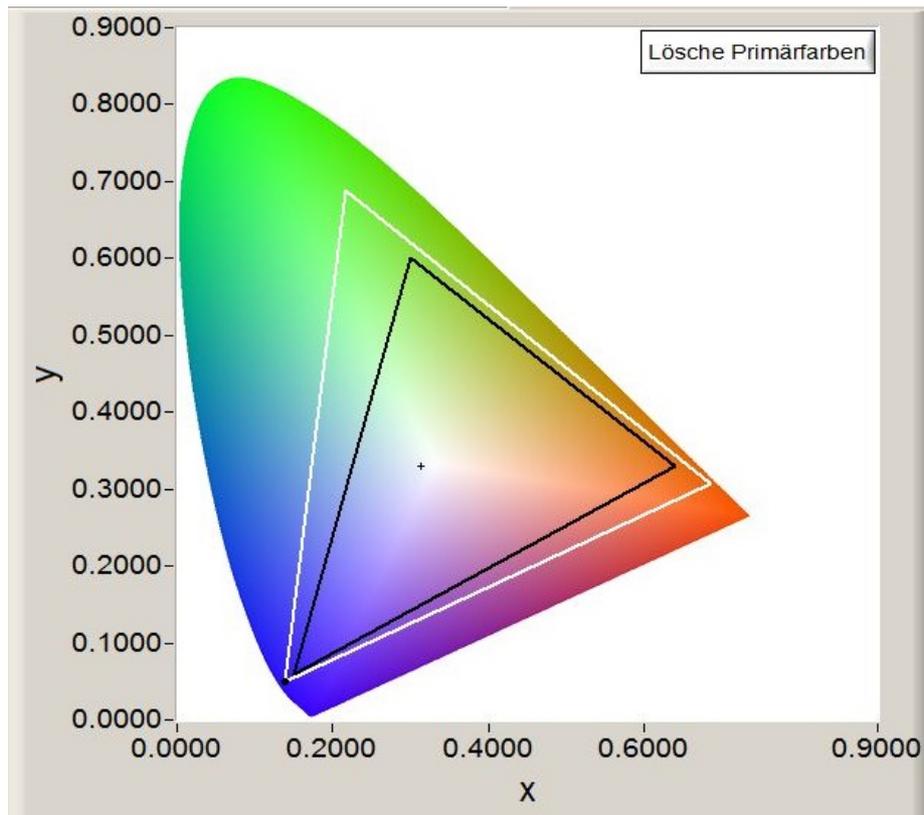


Abbildung 46: Weiß: unkalibrierte Primärfarben, Schwarz: Farbdreieck nach Rec. 709

Diese Grafik zeigt die Mess-Software „MoDiCal“ an, nachdem eine Primärfarbmessung (Rot, Grün und Blau) durchgeführt wurde. Dazu wurden die Testbilder mit den drei Primärfarben verwendet. Das weiße Farbdreieck ist aus der Messung entstanden und das schwarze Dreieck zeigt den Zielfarbraum, also Rec. 709, an. Die Helligkeitswerte der Primärfarben werden dabei nicht beachtet, sondern nur die xy-Koordinaten.

An dieser Grafik ist zu erkennen, dass das interne Farbmanagement die Farbwerte der Primärfarben des Screens nicht wirklich an die Farbwerte der Primärfarben nach Rec. 709 angenähert hat. Da die Darstellung mit der CIE Farbtabelle nicht gleichabständig ist, wirkt die Annäherung der Farbwerte von Blau im Vergleich zu den anderen beiden Farben als besser gelungen. Die nicht vorhandene Gleichabständigkeit muss also beachtet werden.

Das Farbdreieck der gemessenen Primärfarben ist aber insofern positiv zu werten, dass die eingeschlossene Fläche größer als die des Farbraumes nach Rec. 709 ist und die Ecken des Farbdreiecks nach Rec. 709 einschließt. Durch Kalibrierung der Farborte wäre es also durchaus möglich die Farborte der Grundfarben des Zielfarbraumes zu erreichen. Ein kleinerer Zielfarbraum kann im Gegensatz zu einem größeren durch Kalibrierung, sofern diese möglich ist, immer erreicht werden. Andersherum geht dies nicht, da die nativen bzw. unkalibrierten Farben das maximal mögliche Farbdreieck bilden.

In folgender Tabelle sind die xy-Koordinaten und die Leuchtdichtewerte der unkalibrierten Grundfarben sowie auch des unkalibrierten Weißpunktes zu sehen. Letzterer wird im nächsten Mess-Schritt näher beschrieben.

Unkalibriert	x	y	Leuchtdichte in cd/m ²
Rot	0,6834	0,3085	132,35
Grün	0,2152	0,6915	300,76
Blau	0,1394	0,0490	40,31
Cyan	0,1675	0,2787	355,06
Magenta	0,3311	0,1400	175,63
Gelb	0,4501	0,4961	430,96
Weiß	0,3001	0,2804	465,99

Tabelle 14: Farbwerte und Leuchtdichtewerte der unkalibrierten Farben, Lighthouse X3

Die dominanten Wellenlängen der sechs unkalibrierten Grundfarben sind in nachfolgender Tabelle zu finden.

Unkalibriert	Dom. Wellenlänge in nm
Rot	620,5
Grün	534,0
Blau	465,6
Cyan	486,8
Magenta	-555,2
Gelb	574,0

Tabelle 15: Dominante Wellenlängen der unkalibrierten Farben, Lighthouse X3

Auffällig ist in der Tabelle, dass die dominante Wellenlänge von Magenta ein negativer Zahlenwert ist. Grund dafür ist, dass es sich bei der Grundfarbe Magenta und allen weiteren Farbtönen, die dem Magenta ähnlich sind, nicht um eine Spektralfarbe handelt. Der für das menschliche Auge sichtbare Spektralbereich reicht von ca. 380nm bis 780nm. Dieser Bereich wird auf der einen Seite von Blauviolett und auf der anderen Seite von Rot begrenzt. Unter den Spektralfarben, die zwischen diesen Grenzen liegen befindet sich kein Magenta. Magenta ist eine reine Mischfarbe und kann deshalb keiner Wellenlänge des sichtbaren Spektralbereichs zugeteilt werden. Das negative Vorzeichen der dominanten Wellenlänge kennzeichnet diesen Sachverhalt.

Nach der Messung der unkalibrierten Grundfarben folgt die Messung des unkalibrierten Weißpunktes. Die Messwerte, die aufgenommen werden, sind wieder die xy-Koordinaten, die Leuchtdichte, das Spektrum und die Farbtemperatur. Die Farbtemperatur wird mittels der xy-Koordinaten und der beiden Formeln des Kapitels 5.4. Messgeräte und Farbtemperatur noch einmal nachgerechnet.

Am Controller wird eine Farbtemperatur von 6500K eingestellt. Zu vermuten ist, dass die eingestellte Farbtemperatur bzw. ähnlichste Farbtemperatur nicht der am LED-Screen gemessenen entspricht. Dies soll anhand der Messung ermittelt werden.

Hier sind die Ergebnisse der Messung.

Weißpunkt	Unkalibriert
Farbwerte	
x	0,3001
y	0,2804
CCT	465,99
Farbtemperatur	
Messgerät	8296
Formel 1	8266
McCamy	8247

Tabelle 16: Messergebnisse des unkalibrierten Weißpunktes, Lighthouse X3

Der Vergleich und das Nachrechnen der Farbtemperatur bzw. der CCT soll zeigen, dass die Angabe je nach verwendeter Berechnungsformel abweicht. Die Berechnung beruht dabei immer auf den xy-Koordinaten. Bei der Kalibrierung des Weißpunktes wird dieses Verhalten wichtig.

Im folgenden Spektrum ist deutlich zu sehen, dass das Weiß auf dem LED-Screen aus den drei Primärfarben, also den drei Farbpixeln der SMD-Pixel, gemischt wird. Die drei ausgeprägten Peaks im blauen, im grünen und im roten Spektralbereich sind typisch dafür. Wie bereits im Kapitel 2.2.1. Lichtquellen erwähnt, erzeugen einfarbige LEDs ein Linienspektrum. Die Überlagerung von mehreren einfarbigen LEDs ergibt also ein Spektrum wie das dieser Messung.

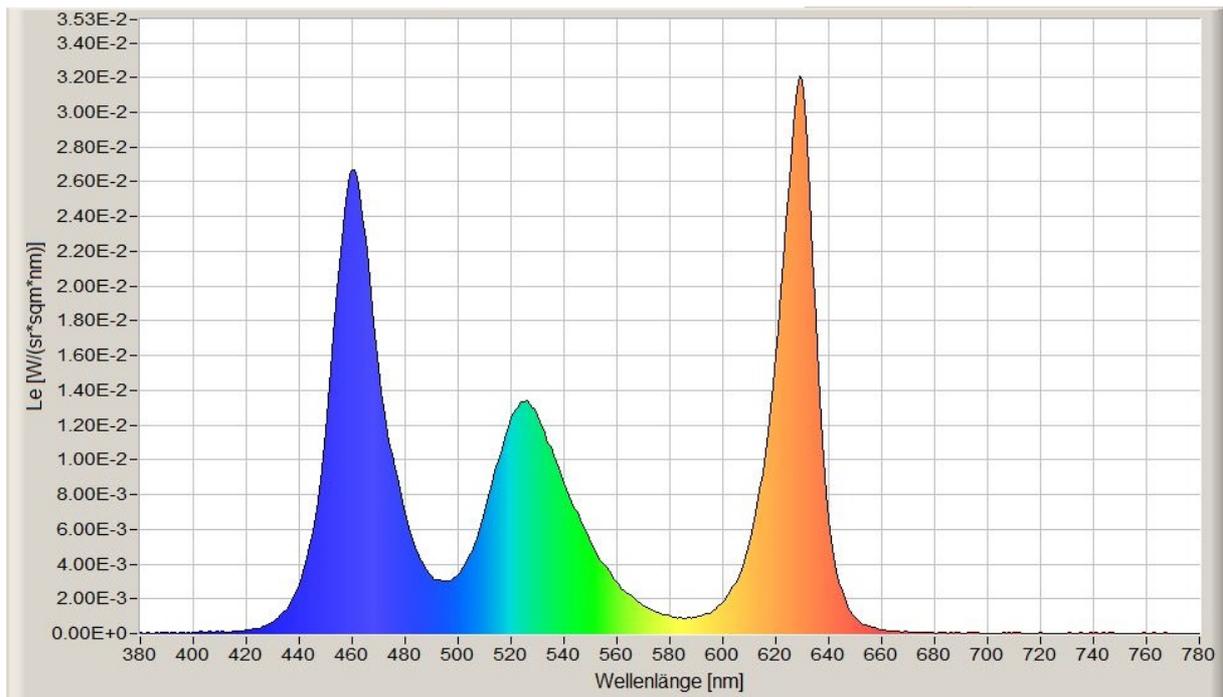


Abbildung 47: Spektrum des unkalibrierten Weißpunktes

Anschließend wird der unkalibrierte Gamma-Verlauf des LED-Screens zusammen mit der ähnlichsten Farbtemperatur über die Graustufen gemessen. Für diese Messung wird das Graustufen-Testbild benötigt. Dieses Testbild beruht auf dem 100/100 Farbbalken-Testbild. Die Farben des Farbbalken-Testbildes sind im Graustufen-Testbild als ihre Graustufen dargestellt. Die Videopegel, die sich hinter diesen Graustufen verbergen sind folgende.

Videopegel in %	Farbe / Graustufe
100	Weiß
92,78	Gelb
78,74	Cyan
71,52	Grün
28,48	Magenta
21,26	Rot
7,22	Blau
0	Schwarz

Tabelle 17: Zuordnung der Videopegel zu den Graustufen des Testbildes

Die Videopegel ergeben sich aus der Y-Formel für HD-Videosignale.

Am Controller wurde ein Gamma-Wert von 2,2 eingestellt. Dieser wird unter anderem für die Berechnung des idealen Gamma-Verlaufs benötigt. Der berechnete, ideale Gamma-Verlauf entspricht also einem Gamma-Wert von 2,2.

Für die Berechnung des idealen Gamma-Verlaufs wird die Formel 9 verwendet. Neben dem Gamma-Wert werden außerdem die Videopegel der Graustufen und die Leuchtdichtewerte von Weiß und Schwarz nach der Weißpunktkalibrierung benötigt. Diese Werte werden im Mess-Abschnitt Gamma-Verlauf nach der Weißpunktkalibrierung bekanntgegeben. Der ideale Verlauf wird mit den Messwerten des unkalibrierten Gamma-Verlaufs verglichen. Diese beiden Verläufe werden dann wieder mit dem Gamma-Verlauf des LED-Screens nach der Weißpunktkalibrierung verglichen. Eine Grafik dazu folgt im Mess-Abschnitt Gamma-Verlauf über die Graustufen nach Weißpunktkalibrierung.

Die erreichten Messwerte und die Werte für den idealen Verlauf sind in folgender Tabelle gegenübergestellt.

Videopegel in %	L gemessen in cd/m ² unkalibriert	L ideal in cd/m ²
100	465,99	427,35
92,78	467,83	357,8786115
78,74	371,43	241,7563379
71,52	303,54	191,5644965
28,48	55,56	17,26279934
21,26	34,57	7,078865964
7,22	8,37	0,002816728
0	0	0

Tabelle 18: Gemessene Leuchtdichtewerte der Graustufen im Vergleich zu den Idealwerten, Lighthouse X3

L steht in der Tabelle für Leuchtdichte.

Auch die ähnlichste Farbtemperatur wird über die Graustufen des Testbildes aufgenommen. Es soll überprüft werden, welchen Wert sie bei jeder Graustufe aufweist und ob oder inwieweit sie sich konstant verhält. Ein konstanter Verlauf und ein Wert von ca. 6504K sind als ideal anzunehmen.

Videopegel in %	ideale Farbtemperatur in K	gemessene Farbtemperatur in K unkalibriert
100	6504	8345
92,78	6504	8386
78,74	6504	8351
71,52	6504	8390
28,48	6504	7694
21,26	6504	7817
7,22	6504	6721
0	6504	5988

Tabelle 19: Gemessene CCT-Werte der Graustufen im Vergleich zu den Idealwerten, Lighthouse X3

Die Videopegel der Graustufen des Testbildes sind mit denen der Gamma-Messung identisch. Wie bereits bei der Messung des unkalibrierten Weißpunktes festgestellt, entspricht die am Controller eingestellte ähnlichste Farbtemperatur nicht der, die auf dem LED-Screen wiedergegeben wird. Über die oberen vier Graustufen verhält sich die ähnlichste Farbtemperatur relativ konstant. Bei den unteren vier Graustufen beginnt sie stärker zu schwanken und ihr Wert reduziert sich immer stärker. Bei der untersten Graustufe (Schwarz) sind die SMD-Pixel des LED-Screens aus. Die Messung ergibt für die Leuchtdichte auch einen Wert von $0,00\text{cd/m}^2$. Deshalb kann diese Graustufe eigentlich keine Informationen über die ähnlichste Farbtemperatur enthalten. Lediglich das Streulicht der nebenliegenden Graustufe enthält diese Informationen. Aus diesen Gründen ist die Angabe bezüglich der CCT des Messgerätes für die unterste Graustufe kein ernstzunehmender Wert. Trotzdem macht das Messgerät eine Aussage, die hier auch aufgeführt wird.

Die Grafik mit dem Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur über die unkalibrierten Graustufen wird zusammen mit dem Verlauf nach der Weißpunktkalibrierung im Mess-Abschnitt Farbtemperatur über die Graustufen nach der Weißpunktkalibrierung aufgeführt.

Nach der Aufnahme der obigen Parameter des unkalibrierten LED-Screens folgt nun die Kalibrierung des Screens. Wie bereits erwähnt bietet keiner der vier LED-Controller die Möglichkeit den zugehörigen LED-Screen so zu kalibrieren wie im Leitfaden beschrieben. Die Kalibrierung der Grundfarben auf den Zielfarbraum Rec. 709 kann also nicht vorgenommen werden. Deshalb wird mit dem nächsten Kalibrier-Schritt, der Weißpunktkalibrierung, fortgefahren. Der Weißabgleich ist in der bisherigen Praxis der wichtigste Kalibrierungsschritt, der auch mit den meisten LED-Controllern durchgeführt werden kann.

Nachdem am Controller ein Wert für die Farbtemperatur ausgewählt wurde, kann dieser Wert durch Verändern und Anpassen der RGB-Anteile auf die 6504K bzw. auf die xy-Koordinaten des Weißpunktes nach Rec. 709 gebracht werden. Die Mess-Software zeigt die RGB-Anteile des vorhandenen Weiß in Form von drei Balken an. Liegen die RGB-Anteile bzw. die drei Balken ungefähr im Gleichgewicht, so liegt der vorhandene Weißpunkt nahe bei dem Zielwert. Die RGB-Anteile werden also so lange am Controller angepasst, bis die drei RGB-Balken der Mess-Software ungefähr auf der gleichen Höhe liegen. Die xy-Koordinaten werden dann überprüft und es werden weitere Feineinstellungen am Controller vorgenommen, bis das bestmögliche Ergebnis und die bestmögliche Annäherung an die Zielwerte erreicht sind. Da das Messgerät eine Toleranz von $\pm 20\text{K}$ die CCT betreffend aufweist, hat die Anpassung der xy-Koordinaten eine höhere Priorität.

Die bestmöglichen Ergebnisse, die erreicht wurden, sind folgende.

Weißpunktkalibrierung	Messwerte nach Kalibrierung	Zielwerte nach Rec. 709
x	0,3126	0,3127
y	0,3302	0,3290
CCT in K	6502	6504
Leuchtdichte in cd/m²	427,35	--

Tabelle 20: Ergebnisse der Weißpunktkalibrierung, Lighthouse X3

Es ist zu erkennen, dass die Weißpunktkalibrierung bei diesem LED-Screen sehr gut funktioniert hat. Die xy-Koordinaten liegen ebenso wie die angegebene CCT sehr nahe bei den Vorgabewerten.

Die RGB-Anteile, die am Controller angepasst wurden betragen für Rot 80,5%, für Grün 99,5% und für Blau 71,5%. Bereits eine Änderung um 0,5% der RGB-Anteile am Controller hat sich deutlich auf die Messwerte ausgewirkt. Bei der Anpassung der RGB-Anteile ist darauf zu achten, dass im Grün die meisten Helligkeitsinformationen liegen, weshalb der Grünanteil möglichst nicht sehr reduziert werden sollte, da sonst auch Helligkeit verloren geht.

Für die Helligkeit des Weißpunktes gibt es keine Vorgabe, allerdings ist die Leuchtdichte des Kalibrierten Weißpunktes sehr wichtig, da auf dieser einige Berechnungen von Idealwerten basieren wie die Berechnung der idealen Leuchtdichtewerte für die sechs Grundfarben. Auch für die Berechnung des idealen Gamma-Verlaufs, also für die Berechnung der Leuchtdichtewerte der einzelnen Graustufen, ist dieser Wert unabdinglich.

Nach der Weißpunktkalibrierung können keine weiteren Kalibrierungen vorgenommen werden. Nun gilt es also zu prüfen, inwieweit sich die Farbwerte, der Gamma-Verlauf und die ähnlichste Farbtemperatur über die Graustufen verändert haben.

In der folgenden Tabelle sind die xy-Koordinaten des Farbraums Rec. 709 aufgeführt und die mit der Leuchtdichte des kalibrierten Weißpunktes berechneten Leuchtdichtewerte zu jeder der sechs Farben.

Rec. 709	x	y	Leuchtdichte in cd/m²
Rot	0,64	0,33	90,85461
Grün	0,3	0,6	305,64072
Blau	0,15	0,06	30,85467
Cyan	0,225	0,329	336,49539
Magenta	0,321	0,154	121,70928
Gelb	0,419	0,505	396,49533
Weiß	0,3127	0,329	427,35

Tabelle 21: Farbraumes nach Rec. 709 mit den ideal berechneten Leuchtdichtewerten aus dem kalibrierten Weißpunkt, Lighthouse X3

Die nächste Tabelle zeigt die nach der Weißpunktkalibrierung erreichten Werte an.

"Kalibriert"	x	y	Leuchtdichte in cd/m²
Rot	0,6838	0,3087	91,56
Grün	0,2156	0,6965	291,68
Blau	0,1395	0,0493	20,98
Cyan	0,1744	0,3478	320,35
Magenta	0,3595	0,1541	116,05
Gelb	0,4277	0,5215	402,99
Weiß	0,3126	0,3302	427,35

Tabelle 22: Farbwerte und Leuchtdichtewerte der Farben nach der Weißpunktkalibrierung, Lighthouse X3

„Kalibriert“ ist hier in Anführungszeichen geschrieben, da die Farbwerte nicht kalibriert werden konnten, sondern bloß die Farbwerte nach der Weißpunktkalibrierung hier angegeben werden können.

Die Leuchtdichtewerte liegen mal näher an den Zielwerten als die der unkalibrierten Farben, aber zum Teil sind die Werte auch etwas schlechter geworden.

In der nun folgenden Tabelle sind die Differenzwerte der Farbwerte vor und nach der Weißpunktkalibrierung in Absolutwerten dargestellt.

Abweichung	Δx	Δy	Δ Leuchtdichte in cd/m^2
Rot	0,0004	0,0002	40,79
Grün	0,0004	0,005	9,08
Blau	0,0001	0,0003	19,33
Cyan	0,0069	0,0691	34,71
Magenta	0,0284	0,0141	59,58
Gelb	0,0224	0,0254	27,97
Weiß	0,0125	0,0498	38,64

Tabelle 23: Abweichung der Farb- und Leuchtdichtewerte des LED-Screens nach der Weißpunktkalibrierung, Lighthouse X3

Diese Tabelle zeigt, dass sich die Farbwerte zum Großteil sehr gering verändert haben. Die Abweichungen der gemessenen Werte sind bei den Sekundärfarben allerdings größer als bei den Primärfarben. Im Allgemeinen können diese Abweichungen aber eher auf Messungenauigkeiten oder Toleranzen der Messangaben zurückzuführen sein, als auf eine tatsächliche Veränderung der Farbwerte aufgrund der Weißpunktkalibrierung. Es lässt sich folglich feststellen, dass die Weißpunktkalibrierung kaum bis leichte Auswirkungen auf die Farben und die Farbwerte hat.

Für eine Anpassung der Farben wäre also zusätzlich eine Kalibrierung nötig, wie es auch im Leitfaden vorgesehen ist.

In der folgenden Grafik soll nun noch überprüft werden, ob es theoretisch mithilfe dieser Farbkalibrierung möglich wäre, die Farben des Farbraumes nach Rec. 2020 zu erreichen.

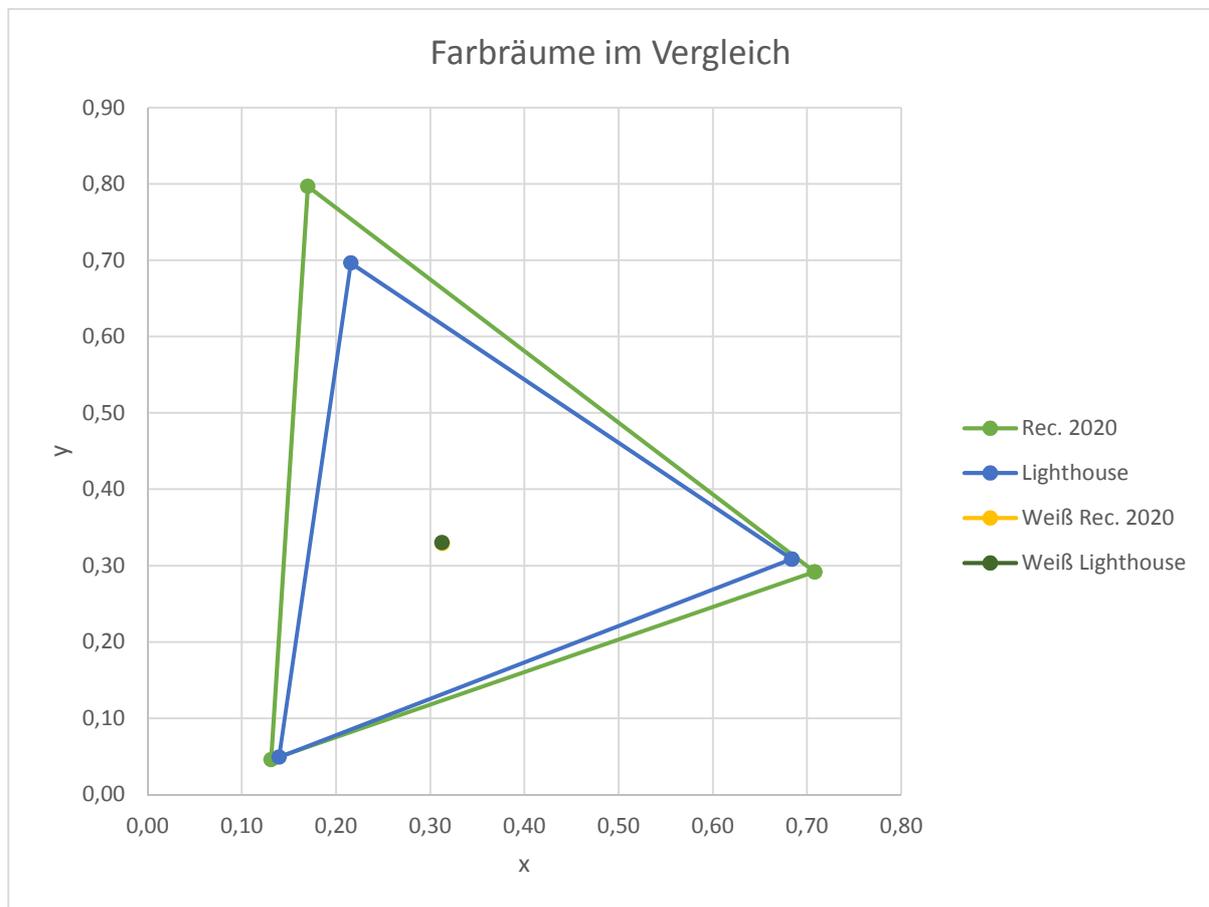


Abbildung 48: Farbdreieck nach Rec. 2020 und des Lighthouse LED-Screens im Vergleich

Diese Grafik zeigt direkt an, dass es mit einer Farbkalibrierung nicht möglich wäre, den UHD Farbraum nach Rec. 2020 zu erreichen, da das Farbdreieck des Farbraumes nach Rec. 2020 um einiges größer ist.

Mithilfe des Graustufen-Testbildes werden nach der Weißpunktkalibrierung die Leuchtdichtewerte der Graustufen noch einmal nachgemessen, um überprüfen zu können wie und ob sich der Gamma-Verlauf nach der Weißpunktkalibrierung im Vergleich zum Zustand davor verändert hat.

Die folgende Grafik zeigt den idealen, berechneten Gamma-Verlauf im Vergleich zum Gamma-Verlauf vor und nach der Weißpunktcalibrierung.

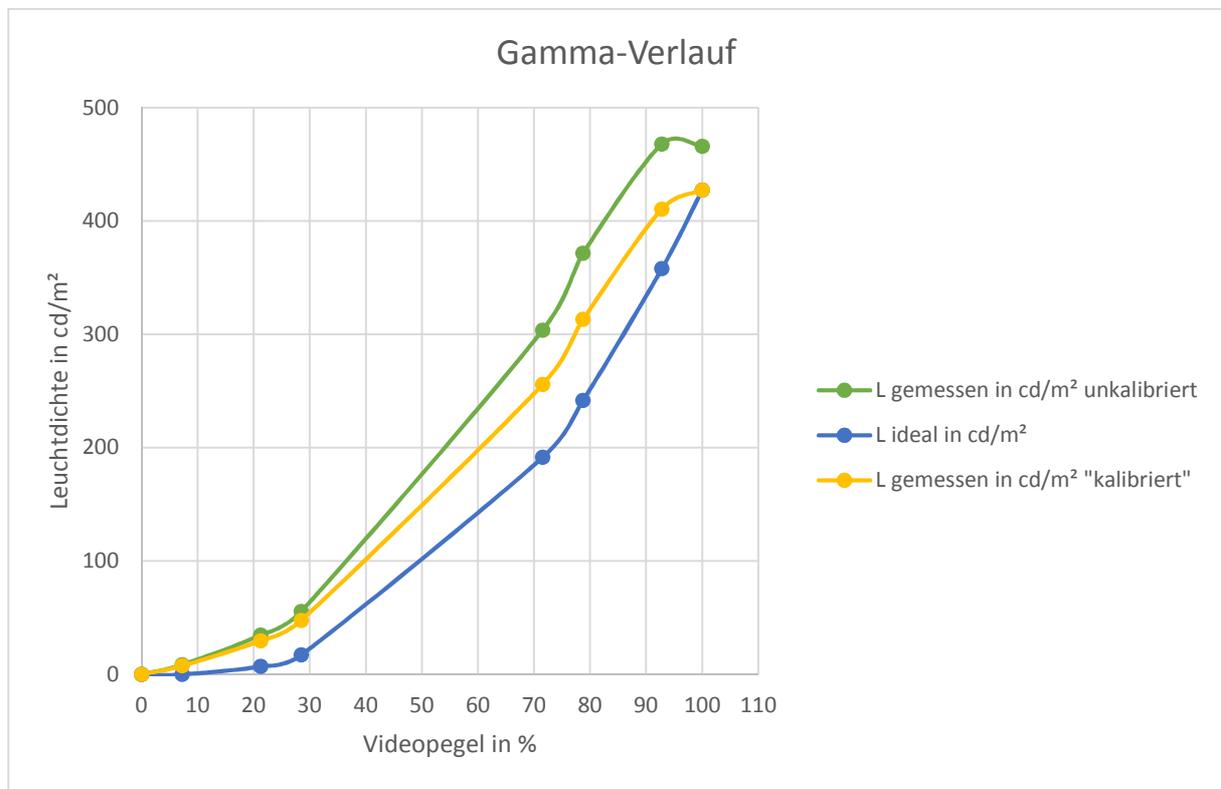


Abbildung 49: Gamma-Verläufe im Vergleich

L steht hier auch wieder für die Leuchtdichte.

Die blaue Kurve zeigt den über die vorhandenen Graustufen idealen Gamma-Verlauf für ein Gamma von 2,2. Dieser berechnet sich nach der Formel 9 aus dem Kapitel 10.2. Kalibrier- und Messvorgang.

Die Leuchtdichtewerte der blauen und gelben Kurve stimmen bei einem Videopegel von 100% überein, was daran liegt, dass dieser Messwert eine Grundlage für die Berechnung des idealen Verlaufs ist.

Allgemein ist zu erkennen, dass der Gamma-Verlauf nach der Weißpunktcalibrierung sich im Vergleich zum Zeitpunkt vor der Kalibrierung leicht an die ideale Kurve angenähert hat. Bei den unteren Graustufen unterschieden sich die grüne und die gelbe Kurve allerdings kaum voneinander. Durch die Weißpunktcalibrierung hat sich der Leuchtdichtewert von Weiß, also 100% Videopegel, leicht verringert, was sich dann auf alle weiteren Graustufen auswirkt. Um den idealen Verlauf erreichen zu können, müsste eine Kalibrierung der einzelnen Graustufen möglich sein, da die Graustufen unterschiedlich stark angepasst werden müssten.

Auch ob es Veränderungen der ähnlichsten Farbtemperatur über die Graustufen gibt, wird nach der Weißpunkt kalibrierung überprüft.

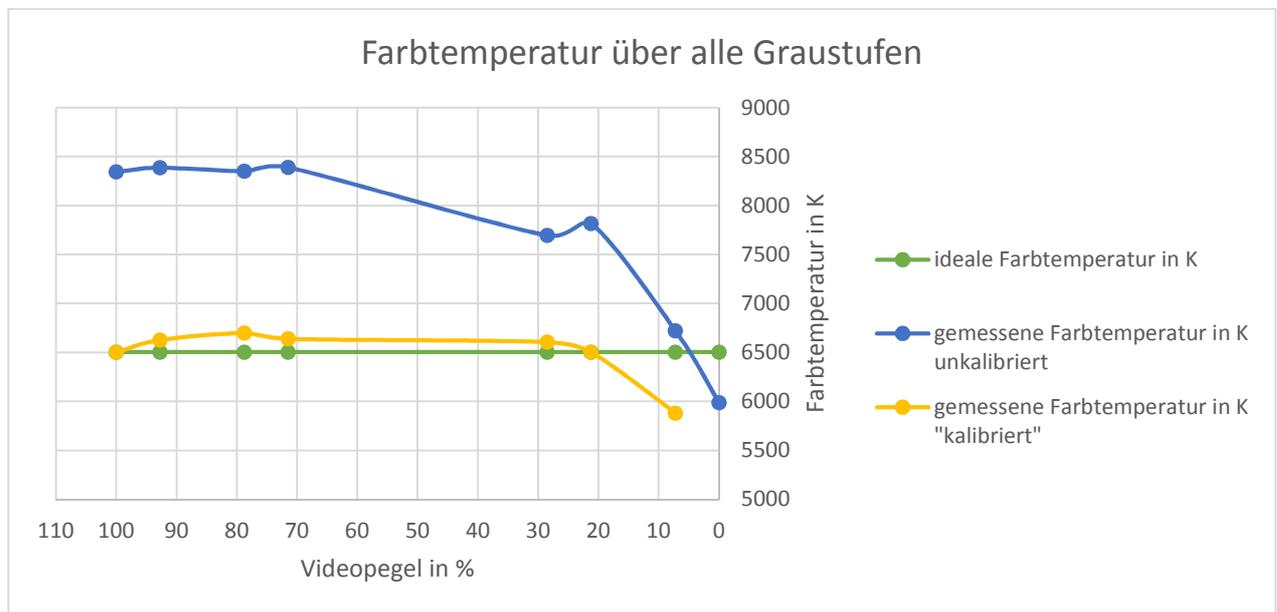


Abbildung 50: Vergleich der Änderung der CCT über die Graustufen

Die blaue Kurve zeigt die Werte der ähnlichsten Farbtemperatur über die Graustufen vor der Weißpunkt kalibrierung. Im unteren Graustufenbereich nehmen die Schwankungen der ähnlichsten Farbtemperatur deutlich zu und insgesamt fallen die Werte in den unteren Bereich und nähern sich so immer weiter dem Zielwert an. Für 0% Videopiegel hat das Messgerät wieder einen Wert angegeben, der aber kritisch gesehen werden muss, da die Leuchtdichte bei diesem Videopiegel $0,00\text{cd/m}^2$ beträgt und eigentlich keine Farbinformationen enthalten kann. Die gelbe Kurve verläuft konstanter, besonders im unteren Graustufenbereich fallen die Werte nicht so stark ab. Insgesamt liegen die Werte der ähnlichsten Farbtemperatur nach der Weißpunkt kalibrierung näher an dem Zielwert von 6504K. Für die Graustufe mit dem Videopiegel von 0% konnte das Messgerät in diesem Fall keine Aussage treffen. Die ähnlichste Farbtemperatur nach der Kalibrierung weicht am stärksten bei der Graustufe mit dem Videopiegel von 7,22% ab. Es ist allgemein zu sagen, dass sich die Weißpunkt kalibrierung sehr positiv auf das Verhalten der ähnlichsten Farbtemperatur über die Graustufen auswirkt. Eine Kalibrierung, die eine Anpassung der ähnlichsten Farbtemperatur zu jeder Graustufe ermöglicht, wäre trotzdem positiv und würde eine noch konstantere Kurve erlauben.

Abschließend wird nach der Weißpunktkalibrierung noch einmal das Kontrastverhältnis berechnet. Dazu werden wieder die Leuchtdichtewerte von Schwarz und Weiß mit demselben Testbild der ersten Kontrastmessung aufgenommen. Weiß weist nun eine Leuchtdichte von 445,81cd/m² auf und Schwarz eine Leuchtdichte von 0,04cd/m². Daraus ergibt sich ein Kontrastverhältnis von 11145,25:1. Dieses Ergebnis ist mehr als dreimal besser als vor der Weißpunktkalibrierung. Dies liegt am besseren Schwarzwert, der um 0,1 kleiner ist. Im Vergleich zur Angabe auf dem Herstellerdatenblatt ist dieses Ergebnis mehr als zweimal besser.

Auch die Betrachtungswinkelabhängigkeit wird noch untersucht, auch wenn diese nicht gemessen wird, sondern mit dem Auge beurteilt wird.

Vom Nutzer wurde bereits erwähnt, dass dieser LED-Screen stark winkelabhängig sein soll. Dies bestätigte sich auch bei dem Untersuchen mit dem Auge. Am besten eignet sich dafür ein komplett weißes Testbild, da bei Weiß alle drei Farbpixel der SMD-Pixel Licht aussenden. Die Winkel, unter denen der Screen betrachtet wurde, können hier nicht angegeben werden, deshalb werden die Richtungen angegeben, aus denen die Betrachtung dann relativ steil war. Die Winkel sind aber größer, als die angegebenen Betrachtungswinkel des Datenblattes. Der Screen wurde von oben, von unten und von links und rechts betrachtet. Die Ergebnisse sind in folgender Tabelle eingetragen.

Betrachtungsrichtung	Wirkung
Oben	Gelblich bis rötliche Verfärbung je steiler der Winkel wird
Unten	Hellblaue bis blaue Verfärbung je steiler der Winkel wird
Links	Nach oben hin verfärbt sich der Screen blau und nach unten hin rot
Rechts	Nach oben hin verfärbt sich der Screen blau und nach unten hin rot

Tabelle 24: Beschreibung der Betrachtungswinkelabhängigkeit, Lighthouse X3

Die Verfärbungen in Abhängigkeit zum Betrachtungswinkel bzw. zur Betrachtungsrichtung sind bedingt durch die Anordnung der Farbpixel in den SMD-Pixeln. Bei diesem Screen befinden sich die Farbpixel untereinander. Der oberste Farbpixel ist blau, gefolgt von einem grünen Pixel und abschließend kommt der rote Pixel. Wird der LED-Screen also von oben betrachtet, so werden die blauen Pixel verdeckt, weshalb die Mischfarbe Gelb entsteht. Wenn der Winkel steiler wird, so wird auch der grüne Farbpixel mit verdeckt und der Screen färbt

sich rot, da nur doch dieser Farbpixel zu sehen ist. Bei der Betrachtung von unten werden also die roten und die grünen Farbpixel von den blauen verdeckt. Eine grünliche Verfärbung tritt in keiner Richtung auf, was wohl daran liegt, dass sich der grüne Farbpixel in der Mitte der anderen beiden Farbpixel befindet.

Die Beurteilung der Winkelabhängigkeit wurde in einem sehr geringen Abstand zum LED-Screen vorgenommen. Es gilt je geringer der Betrachtungsabstand zum Screen, desto stärker ist die Winkelabhängigkeit.

Auf dem beigefügten Datenträger befindet sich das Hersteller Datenblatt zu diesem LED-Screen.

11.1.2. LED-Screen 2 – Unilumin Rt3.9

Bei dem LED-Screen von Unilumi handelt es sich um ein preiswerteres Vergleichsprodukt zu dem Lighthouse X3 mit dem gleichen Pixel Pitch von 3,9mm. Auch dieser LED-Screen ist ein reines Indoor-Produkt. Laut Benutzer ist dieser Screen nicht so hochwertig wie sein Vergleichsprodukt. Die Abmessungen der einzelnen Module des LED-Screen entsprechen genau den Abmessungen der Lighthouse-Module. Ein Qualitätsunterschied ist darin zu erkennen, dass das Unilumin-Produkt nicht die Möglichkeit bietet die einzelnen Cabinets, aus denen ein Modul besteht, auszutauschen oder mechanisch zu kalibrieren, da man von außen nicht an diese herankommt.

Außerdem muss das ankommende und wiederzugebende Videosignal zu DVI gewandelt werden, da dieser Screen lediglich über die DVI-Schnittstelle verfügt.

Die Controller-Software ist von dem Hersteller NovaStar. Diese Software ist eine Standard-Software, die für unzählige LED-Screens aus Shenzhen verwendet wird. Allgemein sind der Controller und die Software Allzweckprodukte, die aufgrund ihrer Preiswertigkeit gerne und häufig für LED-Screens verwendet werden. Die Qualität und die Möglichkeiten sind deshalb nicht groß, was sich noch in der Messung zeigen wird.

Einige weitere wichtige Angaben des Hersteller-Datenblattes werden hier genannt.

Herstellerangaben	Wert
Helligkeit	1200 cd/m ²
Betrachtungswinkel	
• Horizontal	120°
• Vertikal	100°
Kontrastverhältnis	5000:1
LED Wellenlängen	
• Rot	620nm-630nm
• Grün	520nm-535nm
• Blau	465nm-475nm

Tabelle 25: Angaben aus dem Hersteller Datenblatt zum Unilumin Rt3.9 Screen

Die Wellenlängen gilt es mit der Messung der nativen LED-Screen Farben zu überprüfen.

Der Controller, mit dem der LED-Screen angesteuert werden kann, ist ebenfalls vom Hersteller Unilumin. Der Name des verwendeten Controllers ist „LED Processor SD600E“ und die zugehörige Controller-Software nennt sich „Nova LCT-Mars“ und ist von der Marke Nova Star.



Abbildung 51: Schematische Darstellung des LED-Controllers "SD600E)

Dieser Controller verfügt an seiner Rückseite über die Schnittstellen HDMI und DVI. Bei dem Mess-Aufbau ist der Controller über DVI mit dem DVI-Switch verbunden und ebenfalls über DVI mit dem LED-Screen.

Die Controller-Software „Nova LCT-Mars“ weist für die Anpassung und Kalibrierung zwei Hauptmenüpunkte auf. Der eine Menüpunkt heißt „Brightness Adjustment“ und der andere Menüpunkt stellt eine erweiterte Anpassung dar und benötigt ein Passwort. Dieser Menüpunkt nennt sich „Advanced Color Adjustmet“.

Der Menüpunkt „Brightness Adjustment“ bietet die Möglichkeit die Helligkeit einzustellen, ein Gamma-Wert auszuwählen und ein Wert für die Farbtemperatur bzw. die ähnlichste Farbtemperatur anzugeben. Sowohl der Gamma-Wert als auch die Farbtemperatur sind aus einer bestimmten vorgegebenen Auswahl auszuwählen. Die möglichen Gamma-Werte beginnen bei 1,0 und enden bei 4,0. Die Farbtemperatur ist aus ca. 10 verschiedenen Werten zu wählen und reicht von warmen Farbtemperaturen über neutrale bis kalte. Auch ein Farbraum kann ausgewählt werden, allerdings bleibt diese Funktion ohne jegliche Wirkung. Diese Funktion ist also sinnlos, da sie nicht funktioniert und somit keinen Nutzen hat.

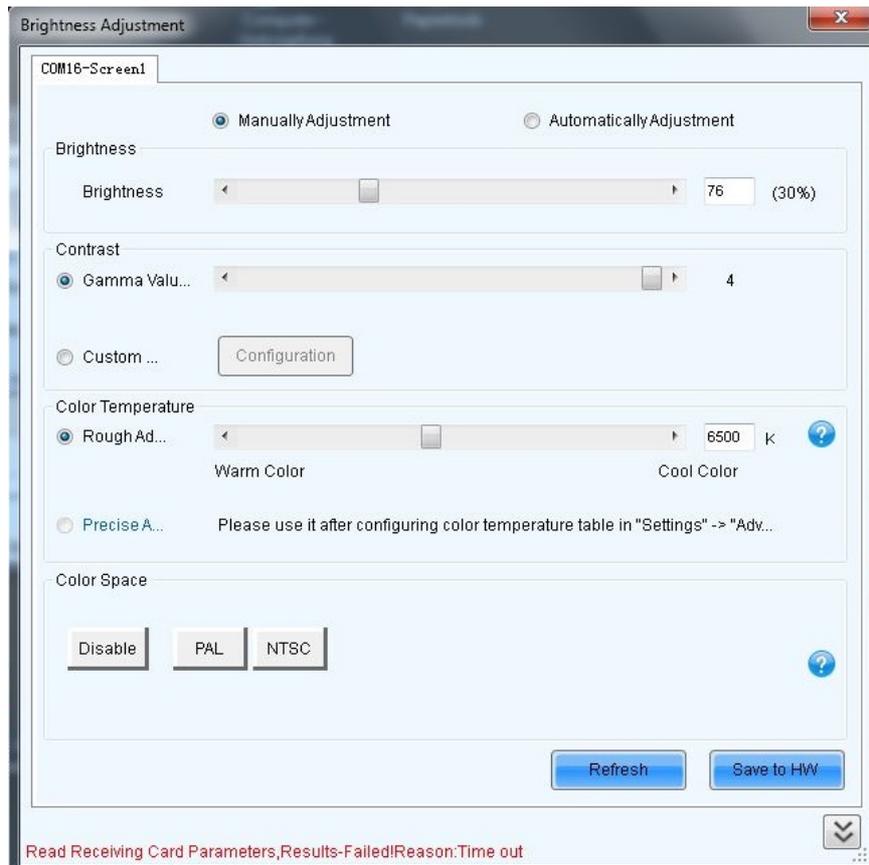


Abbildung 52: Menüpunkt "Brightness Adjustment" der Controller-Software NovaStar NovaLCT-Mars

Der Menüpunkt „Advanced Color Configuration“ ist in drei Fenster unterteilt. Im ersten Fenster können der „Current Gain“ über RGB-Anteile, die auch synchronisiert werden können, und die „RGB Brightness“, die genauso funktioniert wie der „Current Gain“, eingestellt werden. Mit der „RGB Brightness“ bietet sich die Möglichkeit, die zuvor ausgewählte ähnlichste Farbtemperatur über die RGB-Regler anzupassen und auf einen bestimmten Wert zu kalibrieren. Einzelne Farbpixel können mit dieser Funktion auch komplett ausgeschaltet werden. Über „Current Gain“ können die RGB-Anteile eigentlich verstärkt werden, doch auch diese Funktion funktioniert nicht so, wie sie sollte.

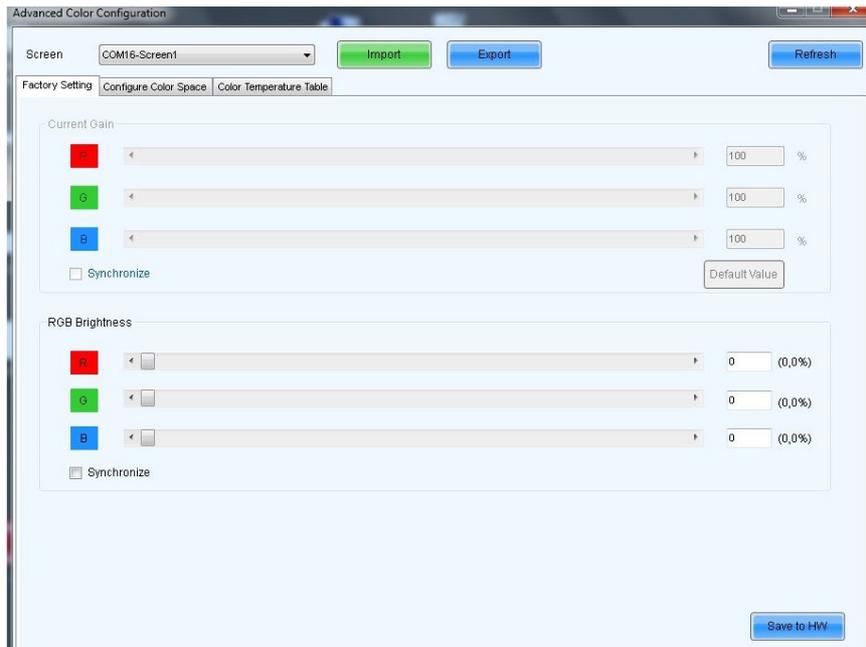


Abbildung 53: Menüpunkt "Advanced Color Configuration" der Controller-Software NovaStar NovaLCT-Mars, RGB-Einstellungen

Das zweite Fenster dieses Menüpunktes nennt sich „Configure Color Space“ und macht den Anschein, dass hier der Farbraum verändert und angepasst bzw. kalibriert werden kann. Ein Original-Farbraum ist angegeben und ein Zielfarbraum kann ausgewählt werden. Zusätzlich dazu gibt es eine Visualisierung der beiden Farbdreiecke auf einer Farbtafel (CIE Farbtafel). Den Original-Farbraum gilt es in der Messung der nativen Farben zusätzlich zu den Wellenlängen aus dem Datenblatt zu überprüfen. Zu den zwei vorgegebenen Zielfarbräumen kann ein eigener Zielfarbraum hinzugefügt werden. Bei dem benutzerdefinierten Zielfarbraum können die xy-Koordinaten der drei Primärfarben angegeben werden. Danach berechnen sich dann irgendwelche Leuchtdichtewerte für diese Farben und für den Weißpunkt. Die xy-Koordinaten des Weißpunktes können allerdings nicht verändert werden und behalten xy-Koordinaten des Original-Farbraumes bei. Was sehr negativ auffällt ist, dass sich der benutzerdefinierte Farbraum und die eingegebenen Werte immer wieder verändern, sobald ein anderer Zielfarbraum ausgewählt wird, und dass keine Veränderungen am LED-Screen zu sehen und zu messen sind, nachdem ein Zielfarbraum ausgewählt und dem Controller gesendet wurde. Dieses Farbkalibrierungsmenü ist zwar vorhanden aber ohne Nutzen, da es ebenfalls nicht funktioniert.

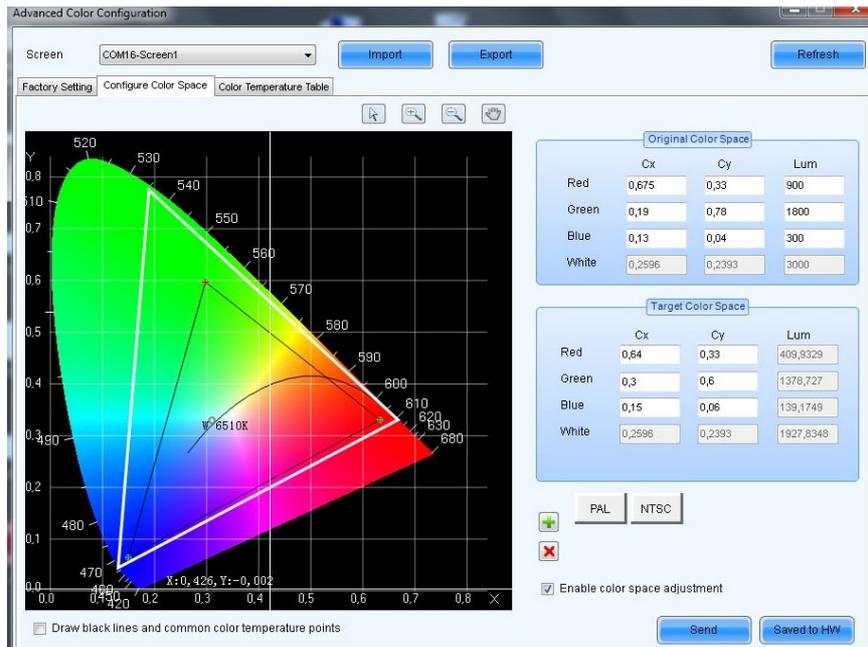


Abbildung 54: Menüpunkt "Advanced Color Configuration" der Controller-Software NovaStar NovaLCT-Mars, Farbraum-Konfiguration

Über die „RGB Brightness“ ist es auch nicht möglich die nativen Farben des Screens zu kalibrieren, da bei einem farbigen (Primärfarbe) Videosignal auf dem LED-Screen durch die RGB-Regler keine weiteren farbigen Pixel zugeschaltet werden können. Nur bei einem weißen Videosignal oder bei Graustufen kann diese Funktion angewendet werden.

Das dritte Fenster heißt „Color Temperature Table“ und bietet die Möglichkeit über zehn Graustufen bzw. Helligkeitsniveaus von 100% bis 10% in zehner Schritten die ähnlichste Farbtemperatur über RGB Gain und RGB Brightness zu kalibrieren. Im „Color Temperature“-Feld kann der Name für den Button angegeben werden, der nach der Erstellung der Tabelle erzeugt wird und im Menüpunkt „Brightness“ auftaucht. Ein großer Nachteil an dieser Tabelle ist, dass die vorgenommenen Einstellungen nicht auf dem LED-Screen zu sehen sind. So können die eingestellten Werte für die ähnlichste Farbtemperatur nicht gemessen werden, weshalb auch die Farbtemperatur nicht kalibriert werden kann. Die eingestellten Werte des RGB Gains und der RGB Brightness können nur „blind“ angegeben werden und die komplette Funktion dieser Tabelle erweist sich so als sinnlos, da eine exakte Kalibrierung anders aussieht und anders funktionieren muss.

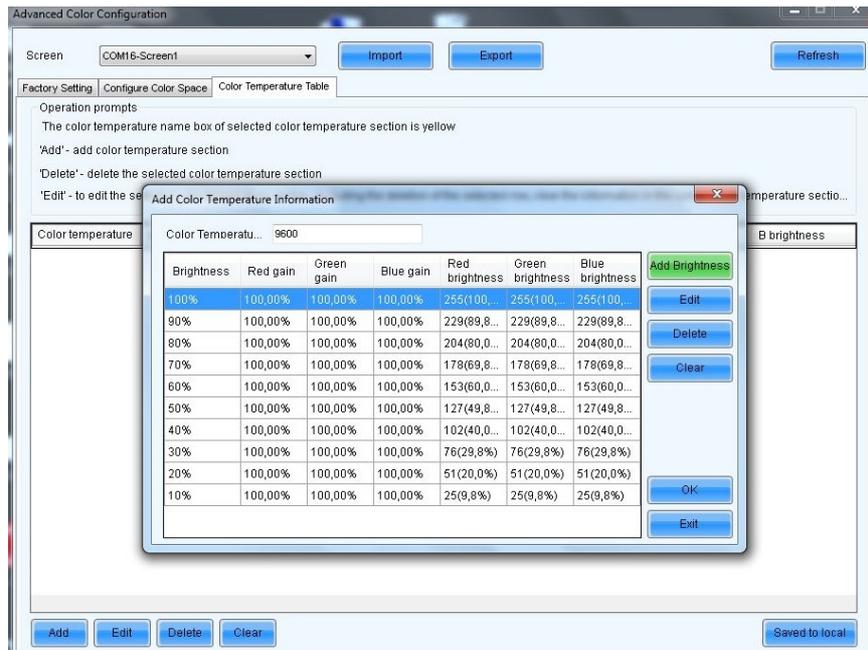


Abbildung 55: Menüpunkt "Advanced Color Configuration" der Controller-Software NovaStar NovaLCT-Mars, (ähnlichste) Farbtemperatur-Tabelle

Allgemein lässt sich also festhalten, dass die Controller-Software auf den ersten Blick den Anschein erweckt, dass komplexere Kalibrierungen wie die Farbkalibrierung und die Kalibrierung der ähnlichsten Farbtemperatur über mehrere Graustufen möglich seien, allerdings wird beim Ausprobieren dieser Funktionen recht schnell deutlich, dass entweder keine oder keine sinnvollen Kalibrierungen vorgenommen werden können. Lediglich der Weißpunkt lässt sich über die RGB-Regler der „RGB Brightness“ kalibrieren.

Laut Datenblatt sind Farbkalibrierungen, also Anpassungen bestimmter Farben, nur für einzelne Module und nicht für den gesamte LED-Screen möglich. Diese Funktion dient dazu, ausgewechselte Module an den Screen anzupassen. Sie ist auch unter einem ganz anderen Menüpunkt zu finden. Dieser Menüpunkt nennt sich „Screen Calibration“. Unter dem Unterpunkt „Manage coefficients“ und „4. Set coefficients for a new module“ können dann die drei Primärfarben, die Sekundärfarben und der Weißpunkt eingestellt und verändert werden. Die Primärfarben können über Farbton, Sättigung und Helligkeit angepasst werden und sowohl die Sekundärfarben als auch der Weißpunkt können über RGB-Regler kalibriert werden.

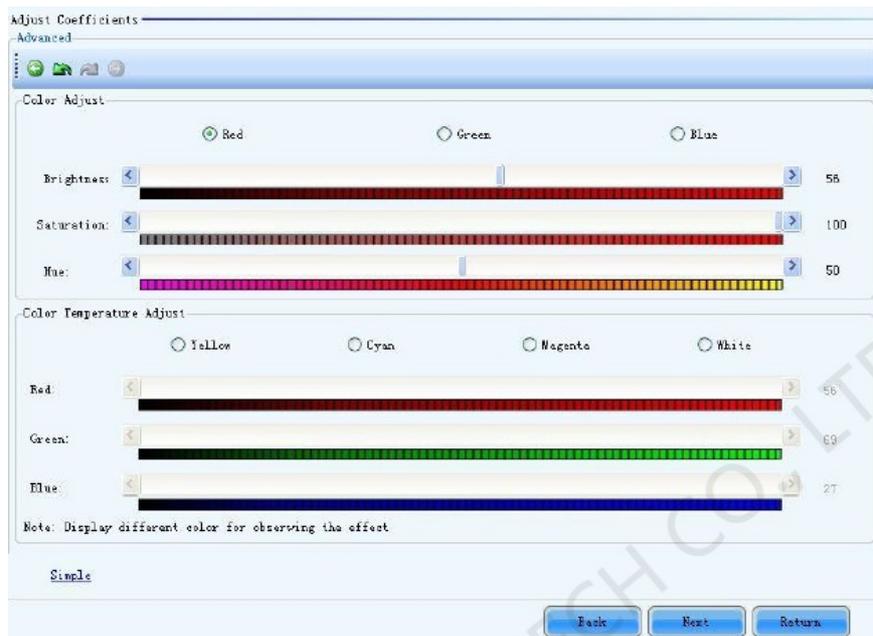


Abbildung 56: Menüpunkt "Screen Calibration" zur Anpassung und Kalibrierung einzelner Module

Diese Kalibrierung wurde nur ausprobiert aber nicht weiter für die Messung und Kalibrierung verwendet, da auf diese Art und Weise nicht der gesamte LED-Screen kalibriert werden kann. Auch die Kalibrierung der Graustufen wird nicht ermöglicht. Es bleibt also dabei, dass lediglich der Weißpunkt des Screens kalibriert wird.

Nach der Analyse der Controller-Software kann mit den Messungen und den möglichen Kalibrierungs-Schritten begonnen werden.

Als erstes werden wieder mithilfe des Graustufen-Testbildes der Schwarz- und der Weißwert eingestellt. Der Schwarzwert sollte zuerst mit dem Helligkeitsregler eingestellt werden. Dann folgt der Weißwert. Da kein Kontrastregler vorhanden ist, muss die Einstellung des Weißwertes über den Gamma-Wert geregelt werden. Da sich das Gamma auch über alle Graustufen auswirkt, sollte das gesamte Graustufe-Testbild bei der Einstellung eines geeigneten Wertes betrachtet werden. Schließlich wurde am Controller eine Helligkeit von 100% und ein Gamma-Wert von 4,0, was dem Maximum entspricht, eingestellt. So wurde optisch das beste Ergebnis erzielt und alle Graustufen des Testbildes sind zu sehen und voneinander zu unterscheiden. Ein zusätzlicher Kontrast-Regler würde aber eine noch bessere Einstellung ermöglichen, da das Gamma ohne diesen Regler einen untypischen Wert annehmen musste. Außerdem fehlt ein Sättigungs-Regler. Die vorhandene Sättigung der Farben muss so akzeptiert werden wie sie vorhanden ist.

Ohne weitere Einstellungen vorgenommen zu haben, wirken die Graustufen gelblich bis grünlich verfärbt.

Als erste Messung wird die Kontrastmessung des unkalibrierten LED-Screens vorgenommen. Das nötige Testbild zeigt einen schwarzen und einen weißen Bereich gleichzeitig auf dem Screen. Dann werden das Weiß und das Schwarz gemessen. Wichtig sind die Leuchtdichtewerte, damit ein Kontrastverhältnis berechnet werden kann, dass sich aus dem Verhältnis der Leuchtdichtewerte von Schwarz und Weiß berechnet. Das Datenblatt gibt ein Kontrastverhältnis von 5000:1 an. Es wird aber nicht genannt unter welchen Bedingungen dieses Kontrastverhältnis eintritt oder zu erreichen ist.

Der Leuchtdichtewert der Messung für Weiß beträgt $801,97\text{cd/m}^2$ und der für Schwarz beträgt $0,07\text{cd/m}^2$. Aus diesen Werten ergibt sich ein Kontrastverhältnis von 11456,71:1. Dieses Kontrastverhältnis ist um einiges höher als im Datenblatt angegeben.

Im nächsten Mess-Schritt werden die nativen Farben des Unilumin LED-Screens gemessen. Die Testbilder bleiben dieselben wie bei der Messung des LED-Screens von Lighthouse. Für jede der Primärfarben gibt es ein Testbild und die Sekundärfarben werden mithilfe des Farbbalken-Testbildes gemessen. Bevor die sechs Grundfarben gemessen werden, werden die SMD-Pixel mit dem bloßen Auge betrachtet. Diese Betrachtung ergibt, dass dieser LED-Screen seine tatsächlich nativen Farben anzeigt, da sowohl bei den Primär- als auch bei den Sekundärfarben jeweils nur die, für die jeweilige Farbe nötigen, Farbpixel an sind.

Dann werden mit dem Messgerät und den beiden zugehörigen Mess-Softwares die xy-Koordinaten, die Leuchtdichtewerte, die Spektren und die dominanten Wellenlängen der sechs Grundfarben aufgenommen. Die Spektren bestätigen die Beobachtung mit dem Auge.

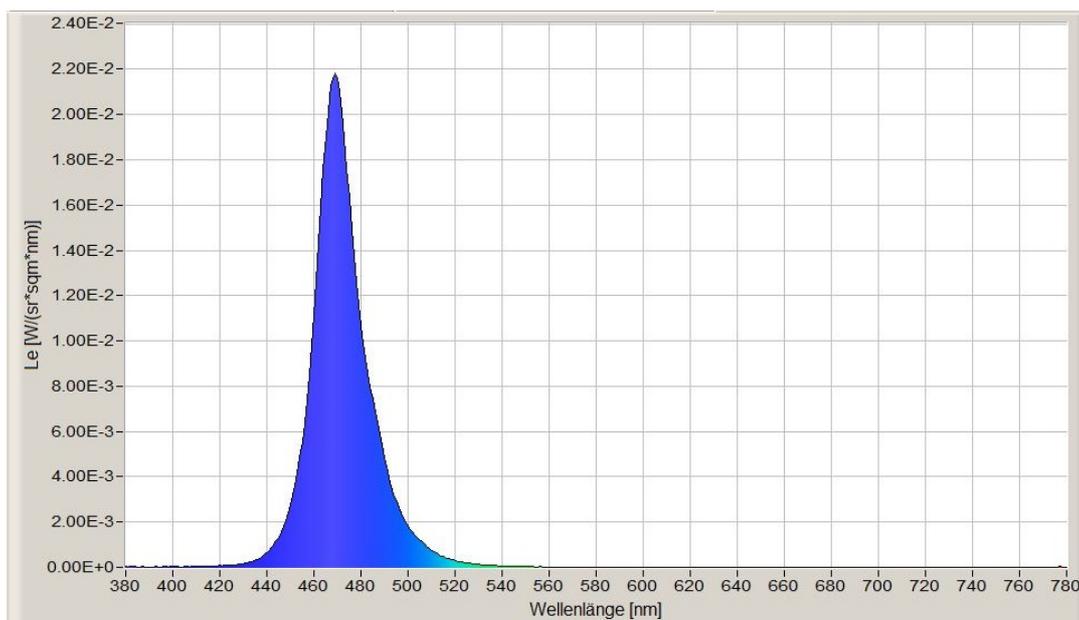


Abbildung 57: Spektrum der Messung der nativen LED-Screen-Farbe Blau

Dieses Spektrum ist bei der Messung des nativen Blaus des LED-Screens entstanden. Neben dem Peak im blauen Wellenlängenbereich treten keine weiteren Peaks in anderen Wellenlängenbereichen auf. Dies beweist noch einmal, dass bei dem Unilumin LED-Screen keine interne Farbmischung bzw. kein internes Farbmanagement vorliegt, sondern dass die tatsächlich nativen Farben des Screens angezeigt werden.

Wie bereits erwähnt, soll mit der Messung der nativen Farben überprüft werden, ob der in der Software angegebene originale Farbraum der Realität entspricht. Des Weiteren sollen die Angaben des Datenblattes bezüglich der Wellenlängen auf ihr Richtigkeit überprüft werden.

In folgender Tabelle sind die xy-Koordinaten und die Leuchtdichtewerte des originalen Farbraumes aus der Controller-Software den gemessenen Werten der nativen Farben des LED-Screens gegenübergestellt.

	Originaler Farbraum (Software)			Messung der nativen LED-Screen Farben		
	x	y	Leuchtdichte in cd/m ²	x	y	Leuchtdichte in cd/m ²
Rot	0,6750	0,3300	900,00	0,6928	0,3071	202,91
Grün	0,1900	0,7800	1800,00	0,1857	0,7365	554,01
Blau	0,1300	0,0400	300,00	0,1235	0,0825	45,80
Cyan	\	\	\	0,1588	0,4684	603,13
Magenta	\	\	\	0,4460	0,2118	262,32
Gelb	\	\	\	0,4270	0,5316	766,00
Weiß	0,2596	0,2393	3000,00	0,3454	0,4125	828,00

Tabelle 26: Vergleich der gemessenen Farb- und Leuchtdichtewerten mit den Angaben der Controller-Software, Unilumin Rt3.9

Es ist zu erkennen, dass die Software keine Werte für die Sekundärfarben angibt, obwohl diese auch wichtig für das Farbmanagement sind. Außerdem ist nicht zu erkennen wie die Leuchtdichtewerte entstehen und wo diese Angaben herkommen. Die gemessenen Leuchtdichtewerte weisen komplett andere Werte auf, die aber der Realität entsprechen, die am LED-Screen vorliegt und durch einige vorherige Einstellungen entstanden ist. Man könnte daher vermuten, dass sich die angegebenen Werte des originalen Farbraumes auf den unkalibrierten LED-Screen beziehen und dass bei Weiß die Maximalhelligkeit angegeben ist. Allerdings ist im Datenblatt eine Helligkeit von 1200cd/m² angegeben. Wo die 3000cd/m² des originalen Farbraumes herkommen, ist nicht zu erschließen. Die Abweichungen der xy-Koordinaten der gemessenen nativen Farben zum Original-Farbraum sind bei einigen Farben größer als bei anderen.

Die nachfolgende Tabelle stellt die Herstellerangaben bezüglich der Wellenlängen der Primärfarben mit den Messergebnissen gegenüber.

Vergleich der Wellenlängen	Herstellerangaben in nm	Messungen in nm
Rot	620 - 630	620,8
Grün	520 - 535	530,8
Blau	465 - 475	473,6

Tabelle 27: Vergleich der gemessenen dominanten Wellenlängen mit den Herstellerangaben, Unilumin Rt3.9

Mit den Messergebnissen bestätigen sich also die Herstellerangaben, da die Werte der gemessenen dominanten Wellenlängen der Primärfarben innerhalb des angegebenen Bereiches des Hersteller-Datenblattes liegen. Der Hersteller ist mit der Angabe eines Wellenlängenbereiches für eine gewisse Zeit auf der sicheren Seite, da sich die Farben bzw. die Wellenlängen der Pixel beispielsweise durch Alterung oder Verschmutzung verändern und verschieben.

Die dominanten Wellenlängen der Sekundärfarben wurden auch gemessen.

Nativ	Dom. Wellenlänge in nm
Cyan	502,1
Magenta	-507,2
Gelb	569,2

Tabelle 28: Gemessene dominante Wellenlängen der Sekundärfarben, Unilumin Rt3.9

Die dominante Wellenlänge der Farbe Magenta besitzt auch hier wieder ein negatives Vorzeichen, da es sich bei Magenta um eine reine Mischfarbe und keine Spektralfarbe handelt.

Es gilt noch zu prüfen, wie groß das native Farbdreieck gegenüber dem Farbdreieck des Zielfarbraumes nach Rec. 709 ist. Mit der Messung der Primärfarben und unter der Angabe eines Zielfarbraumes in der Mess-Software „MoDiCal“ erstellt die Mess-Software folgende Grafik.

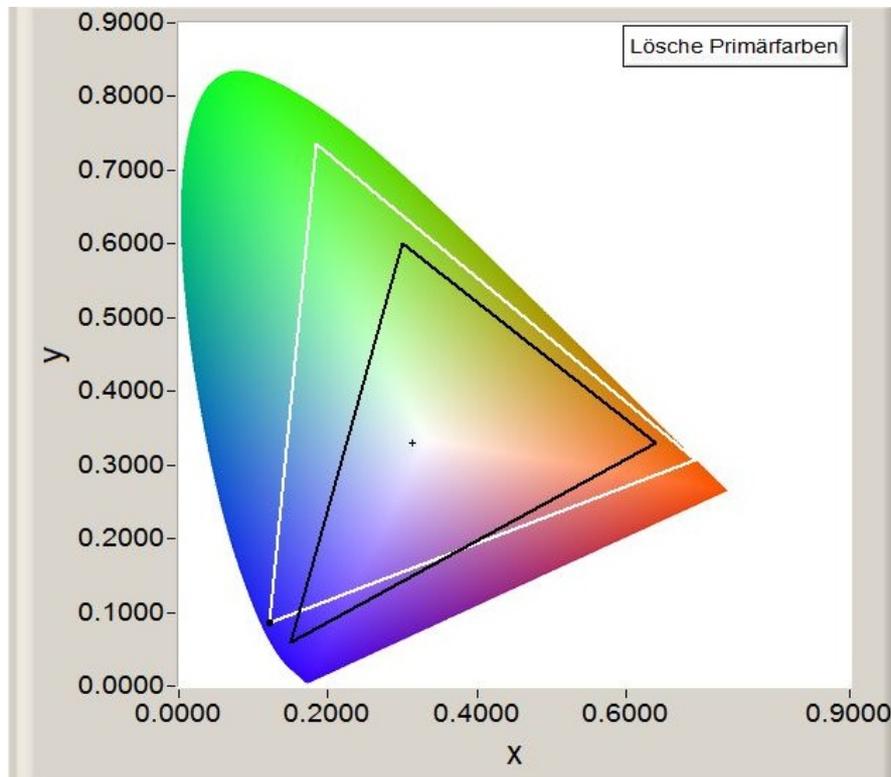


Abbildung 58: Weiß: Natives Primärfarben-Dreieck, Schwarz: Farbdreieck nach Rec. 709

Diese Grafik ist sehr aufschlussreich in Bezug auf das Farbmanagement und die mögliche Kalibrierung des Farbraumes. Das weiße Farbdreieck ist aus den Messungen der nativen Primärfarben entstanden und das schwarze Dreieck zeigt den Zielfarbraum nach Rec. 709 an. Durch eine Kalibrierung des Farbraumes sollte es möglich sein den Zielfarbraum zu erreichen. Diese Grafik zeigt aber bereits an, dass eine Kalibrierung auf den Zielfarbraum nicht möglich ist bzw. nicht vollständig möglich ist. Eine Voraussetzung für eine erfolgreiche Kalibrierung des Farbraumes ist, dass das native Farbdreieck größer als das des Zielfarbraumes ist und dass sich das Farbdreieck des Zielfarbraumes komplett innerhalb des nativen Farbdreiecks befindet. Diese Voraussetzung ist bei dem Unilumin LED-Screen nicht erfüllt, da das native Dreieck besonders den blauen Bereich des Zielfarbraumes schneidet. Durch eine Kalibrierung sind nur Farben bzw. Farbwerte innerhalb des nativen Farbdreiecks zu erreichen. Das Blau des Zielfarbraumes kann folglich nicht erreicht werden. Ebenso können einige Farbtöne im Magenta-Bereich nicht durch eine Farbkalibrierung erreicht werden.

Nach der Messung der nativen LED-Screen Farben wird der unkalibrierte Weißpunkt gemessen. Wichtige Werte sind die xy-Koordinaten, die Leuchtdichte, das Spektrum und die ähnlichste Farbtemperatur (CCT).

Die Helligkeit und der Gamma-Wert am Controller sind nach der Einstellung des Weiß- und des Schwarzwertes unverändert. Die Farbtemperatur wurde am Controller auf 6500K gestellt, allerdings lässt sich bereits nach einer optischen Abschätzung mit dem Auge vermuten, dass die eingestellte ähnlichste Farbtemperatur nicht der vom LED-Screen wiedergegebenen entspricht. Dies wird anhand des Messwertes überprüft. Außerdem wird die ähnlichste Farbtemperatur anhand der gemessenen xy-Koordinaten mit den beiden Formeln 7 und 8 zur Berechnung der CCT aus dem Kapitel 5.4. Messgeräte und Farbtemperatur noch einmal nachgerechnet.

Die Ergebnisse sind in folgender Tabelle festgehalten.

Weißpunkt	Unkalibriert
xy-Koordinaten	
x	0,3454
y	0,4125
Leuchtdichte in cd/m²	828,00
CCT	
Messgerät	5146
Formel 1	5083
McCamy	5126

Tabelle 29: Messergebnisse des unkalibrierten Weißpunktes, Unilumin Rt3.9

Bei diesem Screen liegt die ähnlichste Farbtemperatur mehr als 1000K unter dem am Controller eingestellten Wert.

Der Vergleich und das Nachrechnen der ähnlichsten Farbtemperatur soll zeigen, dass die Angabe je nach verwendeter Berechnungsformel abweicht. Die Berechnung beruht dabei immer auf den xy-Koordinaten, mit denen auch das Messgerät eine CCT berechnet. Bei der Kalibrierung des Weißpunktes wird dieses Verhalten wichtig.

Die nächste Abbildung zeigt die spektrale Verteilung des unkalibrierten Weiß auf dem LED-Screen.

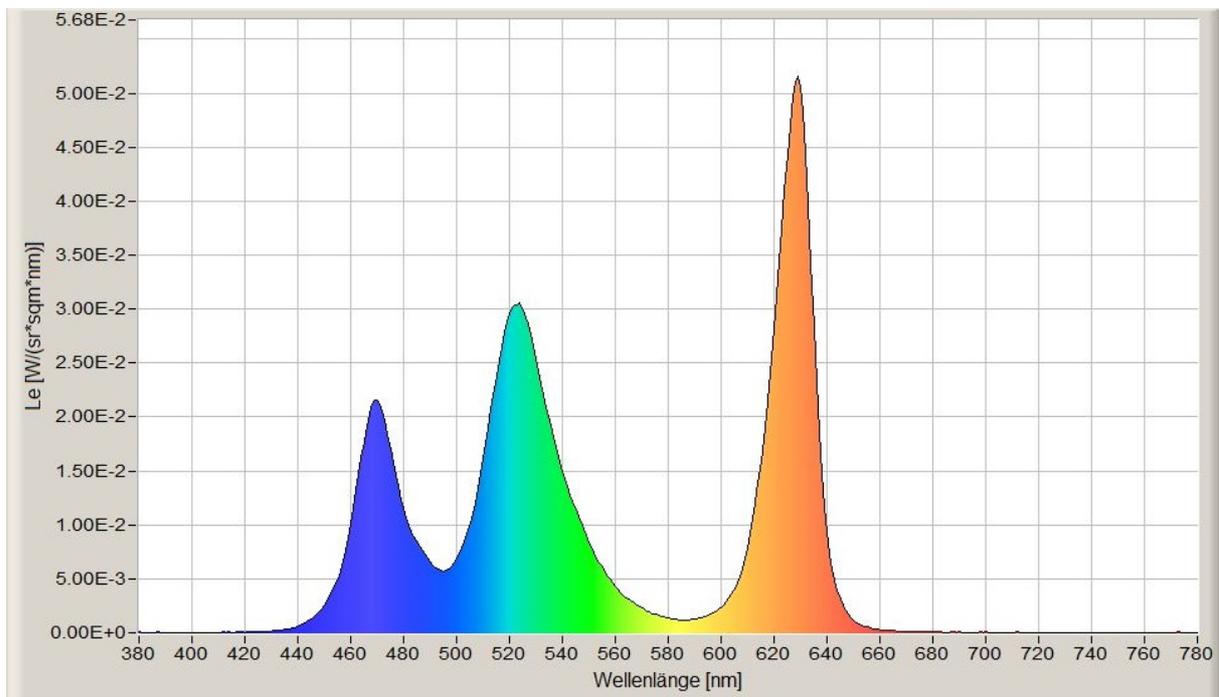


Abbildung 59: Spektrum des unkalibrierten Weißpunktes des Unilumin LED-Screens

Dieses Spektrum zeigt an, dass das Weiß aus drei relativ schmalbandigen Lichtquellen, den drei Farbpixeln der SMD-Pixel, gemischt ist. Schmalbandig bezieht sich auf den Wellenlängenbereich, den die Farbpixel der SMD-Pixel an Licht aussenden. Dies kann auch als Peak beschrieben werden. Das obige Spektrum zeigt drei Peaks in den Wellenlängenbereichen der drei Farbpixel Rot, Grün und Blau. Das vorhandene Spektrum ähnelt eher einem Linienspektrum als einem kontinuierlichen. Eigentlich liegt es dazwischen, da es auch mehreren relativ schmalbandigen Lichtquellen entstanden ist. Der hohe rote Peak deutet darauf hin, dass die vorhandene ähnlichste Farbtemperatur auf jeden Fall nicht einer kalten Farbtemperatur nahekommt, da der Rotanteil dafür zu hoch ist.

Nach der Messung des unkalibrierten Weißpunktes folgt die Messung des Gamma-Verlaufs im unkalibrierten Zustand und die Messung der Farbtemperatur über die Graustufen. Diese Messung wird mit dem Graustufentestbild durchgeführt. Das Graustufen-Testbild beruht auf einem 100/100 Farbbalken, weshalb sich die Videopegel mithilfe der Y-Formel für HD-Videosignale berechnen lassen. Diese ist im Kapitel 4.3.3. RGB- und Komponentensignal zu finden.

Nach einigen Einstellungen und dem Testen einiger Controller-Software-Funktionen hat sich die Helligkeit des Screens geändert. Nach erneutem Einstellen ergibt sich dann eine

Helligkeitseinstellung von 100% (255). Damit sind dann wieder alle Graustufen des Testbildes zu sehen und die vorherige Leuchtdichte des Weißpunktes ist annähernd wieder erreicht. Am Controller wurde ein Gamma-Wert von 4,0 eingestellt. Es gilt nun zu prüfen, ob der vorhandene Gamma-Verlauf des LED-Screens dem eingestellten Gamma-Wert entspricht. Dazu werden die gemessenen Leuchtdichtewerte der Graustufen den ideal berechneten Leuchtdichtewerten dieser Graustufen für das eingestellte Gamma gegenübergestellt.

Videopegel in %	L gemessen in cd/m ² unkalibriert	L ideal in cd/m ²
100	828	905,88
92,78	729,04	656,1202823
78,74	537,12	321,545082
71,52	452,06	210,6159429
28,48	81,86	2,6492363
21,26	51,16	0,523861028
7,22	7,57	3,4435x10 ⁻⁷
0	0	0

Tabelle 30: Gemessene Leuchtdichtewerte der Graustufen im Vergleich zu den Idealwerten, Unilumin Rt3.9

L steht für die Leuchtdichte. Die idealen Werte berechnen sich mithilfe der Formel 9 und es sind der eingestellte Gamma-Wert und die obere und untere Grenze (Weiß und Schwarz) der Leuchtdichtewerte des kalibrierten Weißpunktes nötig.

Die gemessenen Leuchtdichtewerte weichen von den idealen Werten ab. Die Abweichung nimmt bei den unteren Graustufen sehr stark zu. Daraus lässt sich schließen, dass der LED-Screen oder der LED-Controller den in der Software eingestellten Gamma-Wert nicht richtig verarbeitet, sodass nicht das eingestellte Gamma am LED-Screen wiedergegeben werden kann. Dem eingestellten Gamma-Wert in der Controller-Software ist daher nicht zu trauen.

Auch bei der ähnlichsten Farbtemperatur-Einstellung gilt zu überprüfen, ob die Einstellung in der Controller-Software der Wiedergabe am LED-Screen entspricht oder nicht. Bei der Messung des unkalibrierten Weißpunktes ließ sich bereits vermuten, dass auch die eingestellte ähnlichste Farbtemperatur nicht der vom Screen wiedergegebenen entspricht.

Am Controller wurde eine Farbtemperatur von 6500K eingestellt, die beim unkalibrierten Weißpunkt eine CCT um die 5100K ausgelöst hat.

In folgender Tabelle sind die gemessenen ähnlichsten Farbtemperaturwerte über die Graustufen der gewünschten CCT von 6504K gegenübergestellt.

Videopegel in %	Ideale Farbtemperatur in K	Gemessene Farbtemperatur in K unkalibriert
100	6504	5231
92,78	6504	5275
78,74	6504	5283
71,52	6504	5305
28,48	6504	5273
21,26	6504	5266
7,22	6504	5544
0	6504	5725

Tabelle 31: Gemessene CCT-Werte der Graustufen im Vergleich zu den Idealwerten, Unilumin Rt3.9

Ein konstanter Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur wäre wünschenswert wie bei der idealen ähnlichsten Farbtemperatur in der Tabelle angegeben.

Die gemessene ähnlichste Farbtemperatur des LED-Screens verhält sich über die Graustufen relativ konstant und hat einen Wert um die 5200K. Bei den unteren beiden Graustufen nimmt die Abweichung etwas mehr zu und die CCT erhöht sich. Die Angabe der Graustufe mit dem Videopegel 0% muss auch hier wieder kritisch betrachtet werden, da der Screen bei diesem Videopegel keinerlei Licht aussendet. Trotzdem gibt das Messgerät einen Wert für die CCT an.

Auch diese Messung bestätigt noch einmal, dass die am Controller eingestellte CCT nicht der CCT entspricht, die der LED-Screen wiedergibt. Hier liegt die ähnlichste Farbtemperatur in etwa 1300K unter dem eingestellten Wert.

Die Aufnahme der Messwerte des unkalibrierten LED-Screens ist nun abgeschlossen und es kann in der Theorie mit der Kalibrierung begonnen werden. Wie bereits festgestellt ist eine Kalibrierung des Farbraumes aufgrund des Controllers und der Controller-Software nicht möglich. Deshalb fällt dieser Kalibrierungsschritt weg. Auch die Kalibrierung der ähnlichsten Farbtemperatur und des Gamma-Verlaufs ist nicht möglich. Der Controller und die zugehörige Software erlauben lediglich eine Kalibrierung des Weißpunktes. Also wird der Weißpunkt im Rahmen der Möglichkeiten kalibriert und anschließend wird überprüft, ob sich die Farbwerte, der Gamma-Verlauf und die ähnlichste Farbtemperatur über die Graustufen verändert haben. Die Einstellung der ähnlichsten Farbtemperatur wird am Controller auf 6500K belassen. Über den Menüpunkt „Advanced Color Configuration“ können die RGB-Anteile der RGB-Brightness angepasst werden, um die ähnlichste Farbtemperatur auf den gewünschten Zielwert zu bringen. Mit dem Messgerät werden alle Veränderungen der RGB-Anteile so lange gemessen,

bis der beste Wert für die CCT erreicht ist. Die xy-Koordinaten haben allerdings eine höhere Priorität als die angegebene CCT des Messgerätes, da die xy-Koordinaten genauer sind. Für eine ähnlichste Farbtemperatur von 6504K ist ein x-Wert von 0,3127 und ein y-Wert von 0,3290 nötig. Erfahrungsgemäß ist der beste Wert für die ähnlichste Farbtemperatur erreicht, wenn die RGB-Balken der Mess-Software ungefähr in der Waage liegen. Die nächste Abbildung zeigt die Messwerte für den kalibrierten Weißpunkt.

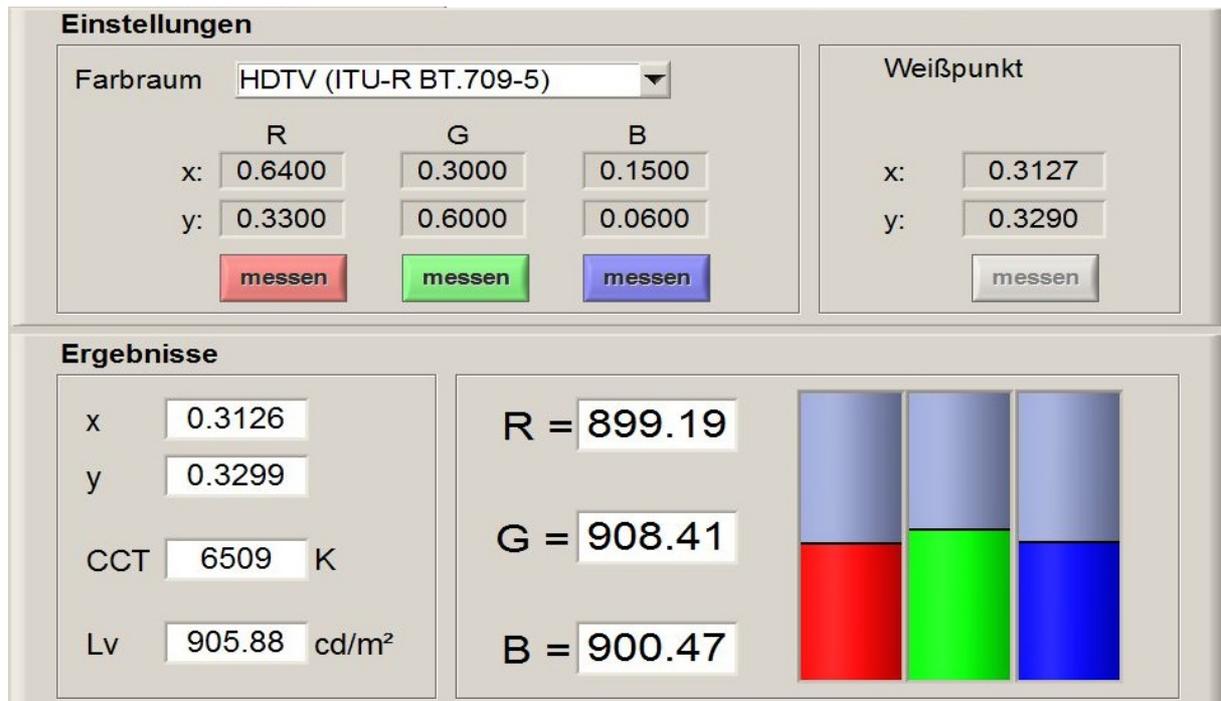


Abbildung 60: Ausgabe der Mess-Software für den kalibrierten Weißpunkt

Die erreichten xy-Koordinaten liegen sehr nahe an den Zielwerten. Auch die angegebene CCT liegt nahe bei den gewünschten 6504K.

Die Leuchtdichte des kalibrierten Weißpunktes beträgt 905,88cd/m².

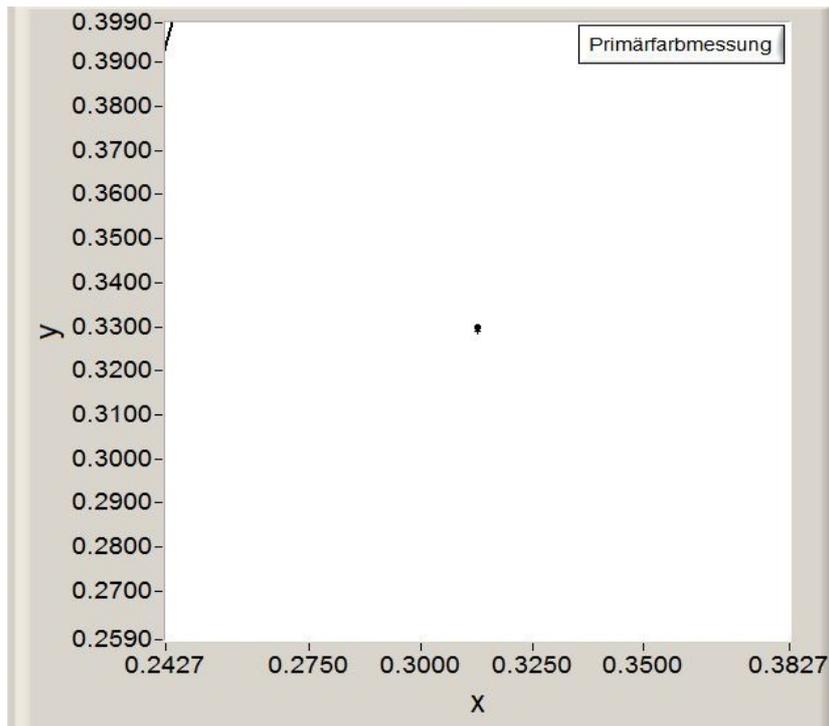


Abbildung 61: Ausgabe der Mess-Software, Weißpunkt auf der CIE Farbtafel

In dieser Grafik ist zu erkennen, dass der Kalibrierte Weißpunkt sehr dicht am Zielwert liegt, da der schwarze Punkt (kalibrierter Weißpunkt) das schwarze Kreuz (Zielwert) fast komplett überdeckt.

Am Controller wurde der Rot-Anteil auf den Wert 255, Grün auf den Wert 245 und Blau auf den Wert 203 gesetzt. Der Wert 255 entspricht dabei 100%, da die Einstell-Skala eine Auflösung von 8-bit besitzt, also Werte von 0 bis 255.

Die Kalibrierung des Weißpunktes hat mit dem Controller und der Software des Unilumin-Screens sehr gut funktioniert. Der Gelb- bzw. Grünstich des unkalibrierten LED-Screens ist mit der Kalibrierung entfernt worden.

Die Leuchtdichte des kalibrierten Weißpunktes ist für die Berechnung einiger Idealwerte wichtig. Die Idealwerte der Leuchtdichte der sechs Grundfarben ist auf sie begründet und auch der ideale Gamma-Verlauf kann ohne sie nicht berechnet werden.

Im nächsten Schritt soll überprüft werden inwiefern sich die Farbwerte nach der Weißpunktkalibrierung verändert haben.

Die folgende Tabelle zeigt die xy-Koordinaten und die Leuchtdichtewerte des Zielfarbraumes nach Rec. 709. Die Leuchtdichtewerte basieren auf dem Leuchtdichtwert des kalibrierten Weißpunktes.

Rec. 709	x	y	Leuchtdichte in cd/m²
Rot	0,64	0,33	192,590088
Grün	0,3	0,6	647,885376
Blau	0,15	0,06	65,404536
Cyan	0,225	0,329	713,289912
Magenta	0,321	0,154	257,994624
Gelb	0,419	0,505	840,475464
Weiß	0,3127	0,329	905,88

Tabelle 32: Farbraumes nach Rec. 709 mit den ideal berechneten Leuchtdichtewerten aus dem kalibrierten Weißpunkt, Unilumin Rt3.9

Die nächste Tabelle zeigt die Farbwerte (xy-Koordinaten und Leuchtdichte) nach der Weißpunktkalibrierung. Die Überschrift „Kalibriert“ ist in Anführungszeichen gesetzt, da der Farbraum nicht kalibriert werden konnte, sondern nur der Weißpunkt.

"Kalibriert"	x	y	Leuchtdichte in cd/m²
Rot	0,6939	0,3057	247,53
Grün	0,1747	0,7320	544,24
Blau	0,1243	0,0809	90,81
Cyan	0,1442	0,3401	629,88
Magenta	0,3663	0,1764	343,38
Gelb	0,4482	0,5076	795,44
Weiß	0,3126	0,3299	905,88

Tabelle 33: Farbwerte und Leuchtdichtewerte der Farben nach der Weißpunktkalibrierung, Unilumin Rt3.9

Die xy-Koordinaten und die Leuchtdichtewerte der Messung weichen mal mehr und mal weniger von den Zielwerten ab.

In der folgenden Tabelle sind die Abweichungen der Farbwerte vor und nach der Weißpunktkalibrierung als Absolutwerte dargestellt.

Abweichung	Δx	Δy	Δ Leuchtdichte in cd/m^2
Rot	0,0011	0,0014	44,62
Grün	0,0110	0,0045	9,77
Blau	0,0008	0,0016	45,01
Cyan	0,0146	0,1283	26,75
Magenta	0,0797	0,0354	81,06
Gelb	0,0212	0,0240	29,44
Weiß	0,0328	0,0826	77,88

Tabelle 34: Abweichung der Farb- und Leuchtdichtewerte des LED-Screens nach der Weißpunktkalibrierung, Unilumin Rt3.9

Diese Tabelle zeigt, dass sich die xy-Koordinaten der drei Primärfarben kaum nach der Weißpunktkalibrierung verändert haben. Die Abweichungen der Sekundärfarben sind etwas größer. Auch die Leuchtdichtewerte haben sich verändert, was aber vor allem daran liegt, dass diese stark von der Weißpunktkalibrierung und der so entstandenen Leuchtdichte abhängen. Vor der Weißpunktkalibrierung war die Leuchtdichte des Weißpunktes geringer, woran sich dann die Leuchtdichtewerte der Farben anpassen.

Um die Farbwerte besser an den Zielfarbraum annähern zu können, wäre eine Kalibrierung des Farbraumes, also der einzelnen Farben, nötig. Der Controller bietet diese Möglichkeit aber nicht.

In der folgenden Grafik soll nun noch überprüft werden, ob es theoretisch mithilfe dieser Farbkalibrierung möglich wäre, die Farben des Farbraumes nach Rec. 2020 zu erreichen.

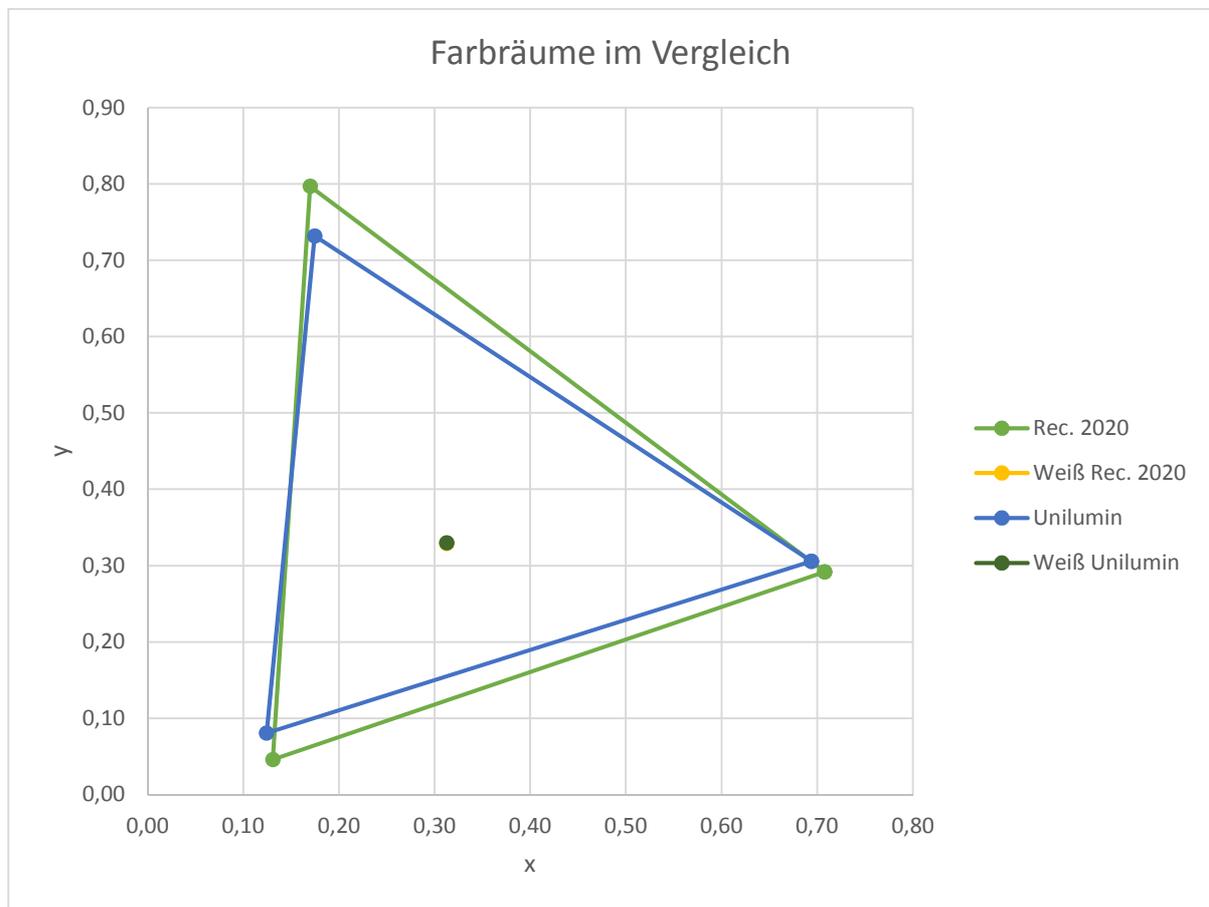


Abbildung 62: Farbdreieck nach Rec. 2020 und des Unilumin LED-Screens im Vergleich

Diese Grafik zeigt direkt an, dass es mit einer Farbkalibrierung nicht möglich wäre, den UHD Farbraum nach Rec. 2020 zu erreichen, da das Farbdreieck des Farbraumes nach Rec. 2020 um einiges größer ist.

Mit dem Graustufen-Testbild wird nun auch überprüft, ob sich der Gamma-Verlauf und das Farbtemperaturverhalten nach der Weißpunktkalibrierung verändert haben. Die Leuchtdichtewerte und die xy-Koordinaten der Graustufen werden mit dem Messgerät aufgenommen.

Die folgende Grafik zeigt den idealen berechneten Gamma-Verlauf im Vergleich zum Gamma-Verlauf vor und nach der Weißpunktcalibrierung.

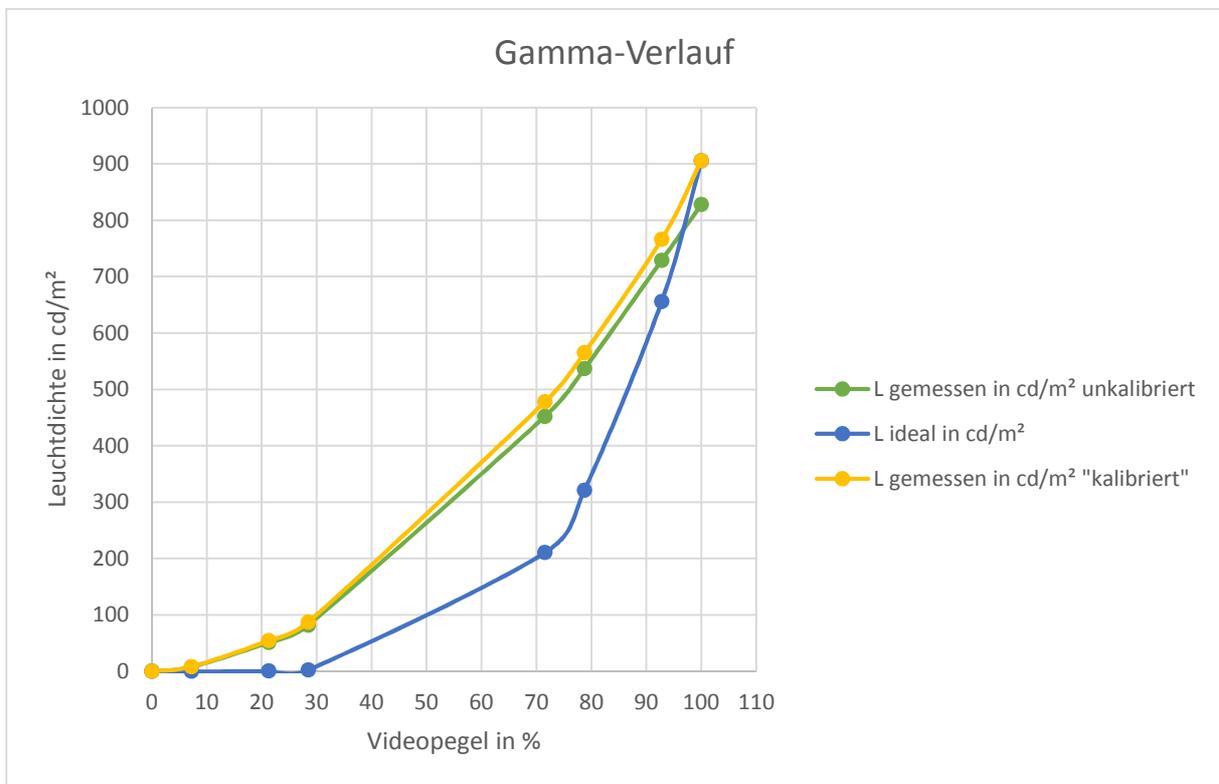


Abbildung 63: Gamma-Verläufe des Unilumin-Screens im Vergleich

Die blaue Kurve zeigt den idealen Gamma-Verlauf für ein eingestelltes Gamma von 4,0. Die Berechnungsgrundlage stellt die Formel 9 dar. Die grüne Kurve zeigt den Verlauf vor der Weißpunktcalibrierung und die gelbe Kurve den Verlauf nach der Kalibrierung. Es ist deutlich zu erkennen, dass die gemessenen Gamma-Verläufe deutlich von dem idealen Verlauf abweichen. Daraus lässt sich wieder schließen, dass der Controller den eingestellten Gamma-Wert in der Software nicht korrekt umsetzt. Die beiden gemessenen Kurven sind sich aber sehr ähnlich. Lediglich die Leuchtdichtewerte weichen voneinander ab, was an der Weißpunktcalibrierung liegt. Nicht nur die Leuchtdichtewerte, sondern auch die Form der idealen Kurve weichen stark von den gemessenen Kurven ab. Der vom LED-Screen wiedergegebene Gamma-Wert ist also ein ganz anderer als in der Software eingestellt. Da die Graustufen mit dem wiedergegebenen Gamma -Wert gut zu erkennen sind, würde es keinen Sinn machen, den Gamma-Verlauf auf die ideale Kurve für einen Gamma-Wert von 4,0 zu kalibrieren. Trotz dessen wäre eine Möglichkeit der Kalibrierung des Gamma-Verlaufs zu wünschen.

Die nachfolgende Grafik stellt dar, inwieweit sich die ähnlichste Farbtemperatur über die Graustufen nach der Weißpunktkalibrierung verändert hat. Außerdem ist der ideale Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur über die Graustufen angegeben.

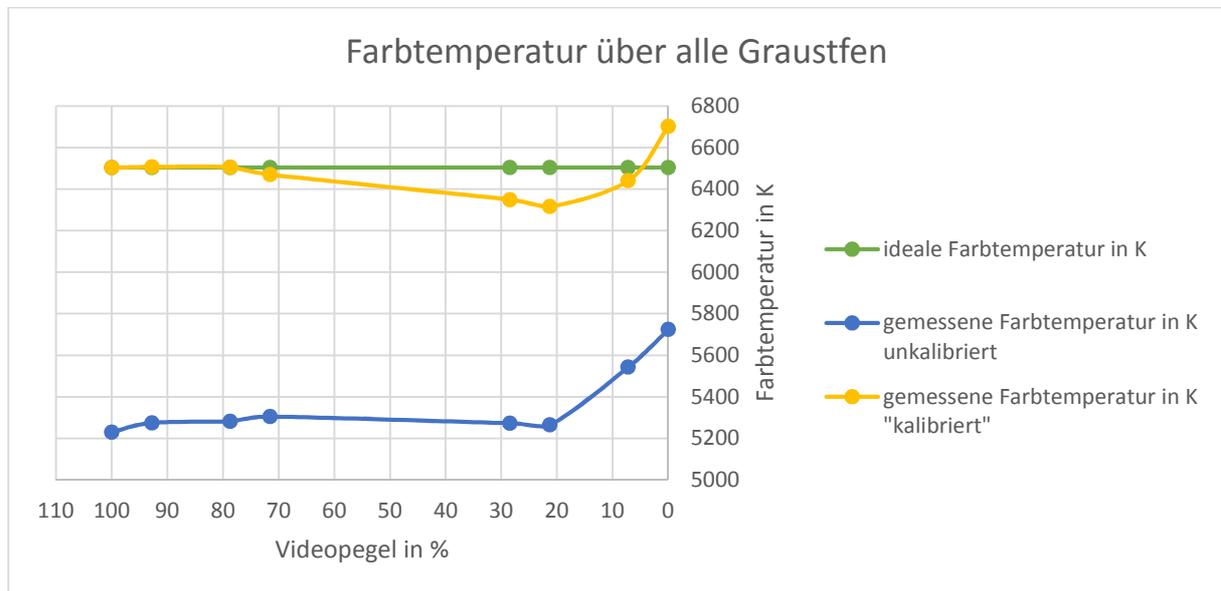


Abbildung 64: Vergleich der Änderung der CCT über die Graustufen, Unilumin LED-Screen

Die grüne Kurve zeigt den idealen Verlauf mit der Ziel-CCT von 6504K. Der ideale Verlauf ist eine Konstante. Die beiden Kurven, die zu den gemessenen ähnlichsten Farbtemperaturen vor und nach der Weißpunktkalibrierung gehören, weisen keinen konstanten Verlauf auf. Die blaue Kurve beschreibt den Zustand vor der Weißpunktkalibrierung und die gelbe Kurve den Zustand danach. Beide Kurven beginnen im unteren Graustufenbereich nach dem Videopegel von 21,26% ihre ähnlichste Farbtemperatur deutlich zu ändern. In diesem Bereich steigt die CCT an. Der Wert bei dem Videopegel von 0% ist wieder kritisch zu betrachten. Es ist zu erkennen, dass sich an dem eigentlichen Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur über die Graustufen nach der Weißpunktkalibrierung nichts ändert. Die Kurve ist lediglich angestiegen, um sich dem Zielwert anzunähern. Die Möglichkeit, die ähnlichste Farbtemperatur über mehrere Graustufen anzupassen, wäre also nötig, damit sich der Weißabgleich über die Graustufen nicht verändert.

Zum Schluss wird noch einmal eine Kontrastmessung durchgeführt, um zu überprüfen, ob sich das Kontrastverhältnis des LED-Screens nach der Weißpunktlibrierung verändert hat. Die Leuchtdichtewerte von Schwarz und Weiß des Kontrast-Testbildes werden erneut gemessen. Die Leuchtdichte von Weiß beträgt nun $832,25\text{cd/m}^2$ und von Schwarz $0,03\text{cd/m}^2$. Daraus ergibt sich ein Kontrastverhältnis von $27741,67:1$. Das Kontrastverhältnis hat sich nach der Weißpunktlibrierung mehr als verdoppelt, was vor allem an dem geringeren Schwarzwert liegt. Im Vergleich zur Herstellerangabe ist dieses Ergebnis mehr als fünfmal so gut.

Auch die Betrachtungswinkelabhängigkeit wird noch untersucht, auch wenn diese nicht gemessen wird, sondern mit dem Auge beurteilt wird. Am besten eignet sich dafür ein komplett weißes Testbild, da bei Weiß alle drei Farbpixel Licht abgeben.

Die Winkel, unter denen der Screen betrachtet wurde, können hier nicht angegeben werden, deshalb werden die Richtungen angegeben, aus denen die Betrachtung dann relativ steil war. Der Screen wurde von oben, von unten und von links und rechts betrachtet. Die Ergebnisse sind in folgender Tabelle eingetragen. Die Winkel, unter denen die Beobachtung durchgeführt wurde, sind aber größer als die Angaben aus dem Datenblatt

Betrachtungsrichtung	Wirkung
Oben	Der LED-Screen verfärbt sich ins Cyan und mit zunehmender Steilheit ins Blau.
Unten	Der LED-Screen verfärbt sich ins Magenta bis Rötliche.
Links	Nach oben hin verfärbt sich der Screen rötlich und nach unten hin bläulich.
Rechts	Nach oben hin verfärbt sich der Screen rötlich und nach unten hin bläulich.

Tabelle 35: Beschreibung der Betrachtungswinkelabhängigkeit, Unilumin Rt3.9

Die Verfärbungen in Abhängigkeit zum Betrachtungswinkel bzw. zur Betrachtungsrichtung sind bedingt durch die Anordnung der Farbpixel in den SMD-Pixeln. Bei diesem Screen befinden sich die Farbpixel untereinander. Der oberste Farbpixel ist rot, gefolgt von einem grünen Pixel und abschließend kommt der blaue Pixel. Wird der LED-Screen also von oben betrachtet, so werden die roten Pixel verdeckt, weshalb die Mischfarbe Cyan entsteht. Wenn der Winkel steiler wird, so wird auch der grüne Farbpixel mit verdeckt und der Screen färbt sich blau, da nur doch dieser Farbpixel zu sehen ist. Bei der Betrachtung von unten werden also die grünen Farbpixel verdeckt. Die blauen Farbpixel des benachbarten SMD-Pixels werden nicht ganz so stark verdeckt, weshalb sich der LED-Screen dann ins Magenta verfärbt.

Bei zunehmender Steilheit werden dann auch die blauen Pixel verdeckt und der Screen ist rötlich. Eine grünliche Verfärbung tritt in keiner Richtung auf, was wohl daran liegt, dass sich der grüne Farbpixel in der Mitte der anderen beiden Farbpixel befindet.

Die Beurteilung der Winkelabhängigkeit wurde in einem sehr geringen Abstand zum LED-Screen vorgenommen. Es gilt umso geringer der Betrachtungsabstand zum Screen, desto stärker ist die Winkelabhängigkeit.

Im Verhältnis zum Vergleichsprodukt ist dieser LED-Screen nicht so stark winkelabhängig, obwohl im Datenblatt geringere Betrachtungswinkel angegeben sind.

Auf dem beigefügten Datenträger befindet sich das Hersteller Datenblatt zu diesem LED-Screen.

11.1.3. LED-Screen 3 – Hibino 6mm

Der nächste LED-Screen ist von dem Hersteller Hibino und wird vom Benutzer als ein hochwertiges Produkt mit einem Pixel Pitch von 6mm eingestuft. Dieser Screen eignet sich ausschließlich für Indoor-Anwendungen. Laut Benutzer ist dieser LED-Screen ungefähr acht Jahre alt und ist trotzdem eines der besten Produkte in dem Pixel Pitch Bereich, das auf dem Markt erhältlich ist. Acht Jahre sind in der LED-Technologie ein sehr hohes Alter, da sich diese Technologie sehr schnell und stetig weiterentwickelt. Die hochwertige Qualität belegt der Benutzer mit dem Großkunden Mercedes Benz, da dieser LED-Screen für diesen Kunden beispielsweise auf wichtigen Automobilmessen eingesetzt wird. Außerdem solle die Farbwiedergabe des LED-Screens laut Benutzer für ein natürliches Bild sorgen, was sich besonders bei Live-Kameraübertragungen und der Wiedergabe von Gesichtern bemerkbar machen solle. Die gute Qualität solle außerdem mit dem Prozessor bzw. Controller zusammenhängen, da auch dieser eines der besten verfügbaren Produkte sein soll. Aus diesen Gründen wurde dieser Controller und die Controller-Software bei der Entwicklung des Lighthouse Produktes zum Vorbild genommen.

Einige für diese Arbeit interessante Angaben aus dem Hersteller-Datenblatt sind in folgender Tabelle zusammengetragen.

Herstellerangaben	Wert
Helligkeit	1200 cd/m ²
Betrachtungswinkel	
• Horizontal	120°
• Vertikal	120°
Kontrastverhältnis	2000:1
Pixel pro Quadratmeter	27556

Tabelle 36: Angaben aus dem Hersteller Datenblatt zum Hibino 6mm Screen

Der Controller, mit dem der LED-Screen angesteuert werden kann, ist ebenfalls von Hibino. Der Name des verwendeten Controllers ist „DLC-612“ und die zugehörige Controller-Software nennt sich „DLC-612 Control Software“.



Abbildung 65: Bild des LED-Controllers zu dem Hibino 6mm LED-Screen

Dieser Controller verfügt an seiner Rückseite über die Schnittstellen SD- und HD-SDI und über DVI. Bei dem Mess-Aufbau ist der Controller über DVI mit dem DVI-Switch verbunden und über HD-SDI mit dem LED-Screen.

Die Controller-Software „DLC-612 Control Software“ ist der des Controllers von Lighthouse sehr ähnlich, was daran liegt, dass das Lighthouse-Controlling auf Basis des Hibino-Controllers entwickelt wurde. Es gibt deshalb wieder für die Messung und Kalibrierung zwei interessante Menüpunkte. Zum einen den Menüpunkt „Output setting“ und zum anderen den Menüpunkt „Color adjustment“.

Unter dem Menüpunkt „Output setting“ können vor allem grundlegende Einstellungen vorgenommen werden und unter dem Menüpunkt „Color adjustment“ sind dann weitere Einstellmöglichkeiten vorhanden.

In beiden Menüpunkten ist eine Einstellmöglichkeit für die Helligkeit zu finden, allerdings unterscheiden sich die einzustellenden Werte voneinander. Im „Output setting“ lässt sich für die Helligkeit ein Wert zwischen 1 und 16 einstellen und im „Color adjustment“ kann die Helligkeit einen Wert zwischen -20 und +20 annehmen. Die Einstellmöglichkeit im „Output setting“ ist der anderen übergeordnet, da vor allem hier die Helligkeit begrenzt werden kann. Ist der eingestellte Wert hier eher gering, so kann mit der Einstellmöglichkeit im „Color adjustment“ die Helligkeit nicht wieder bis auf den Maximalwert erhöht werden. Im „Color adjustment“ kann die eingestellte Helligkeit nur noch einmal etwas feiner eingestellt bzw. nachgeregelt werden. Also sollte die Helligkeit zuerst im „Output setting“ eingestellt werden und dann erst, wenn nötig, im „Color adjustment“ weiter angepasst werden. Insgesamt ist es aber nicht möglich die Helligkeit auf 0% herunterzuregeln. Der LED-Screen kann also über Controller-Einstellungen nicht aus- bzw. schwarz geschaltet werden. Neben der Helligkeit können im „Output setting“ ein Gamma-Wert zwischen 1.0 und 3.0 und eine (ähnlichste) Farbtemperatur zwischen ca. 2000K und 9000K eingestellt werden. Es gibt außerdem die

Möglichkeit eine Output-Größe, hier für die Testbilder, auszuwählen. Die Testbilder haben eine Größe von 1920x1080. Dieser Wert kann nicht an der Controller-Software ausgewählt werden, da der maximal größte Output-Wert 1024x768 beträgt. Auf der ausgewählten Output-Größe wird der Bereich, den der LED-Screen mit seinen vorhandenen Pixeln ausfüllt, als Fenster dargestellt, dass über die Output-Größe verschoben werden kann. Die Verschiebung des Fensters kann allerdings nicht 1:1 auf das anliegende Testbild übertragen werden, da die Output-Größe nicht mit der des Testbildes übereinstimmt. Trotzdem bietet der Controller so eine Möglichkeit, den Ausschnitt des anliegenden Videosignals auf dem LED-Screen zu verschieben.

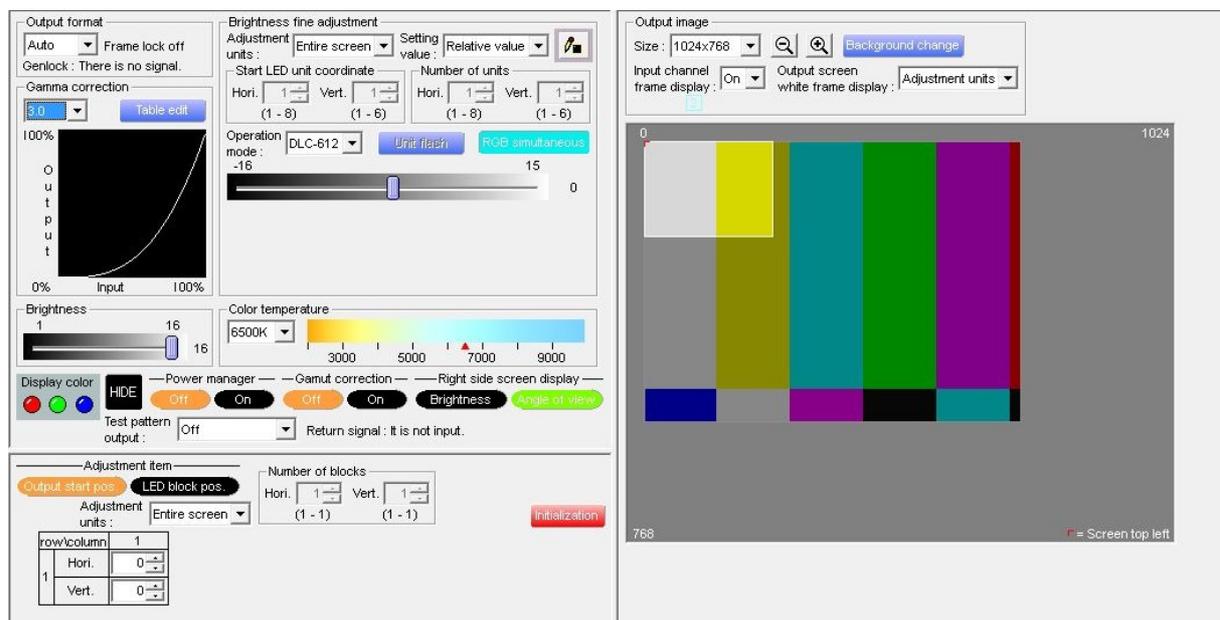


Abbildung 66: Menüpunkt "Output setting"

Im „Color adjustment“ Menü kann die Helligkeit noch einmal nachgeregelt werden, der Kontrast und die Sättigung können eingestellt werden und die RGB-Anteile können einzeln angepasst werden. In diesem Menüpunkt sind auch die Anzeigen eines Vektorskops und eines Waveform-Monitors (Anzeigen unten links) zu finden. Diese fungieren tatsächlich nur als bloße Anzeigen der eingestellten Sättigung und der RGB-Anteile und messen nicht das anliegende Videosignal. Die eigentlichen Funktionen eines Vektorskops und eines Waveform-Monitors werden also nicht erfüllt.

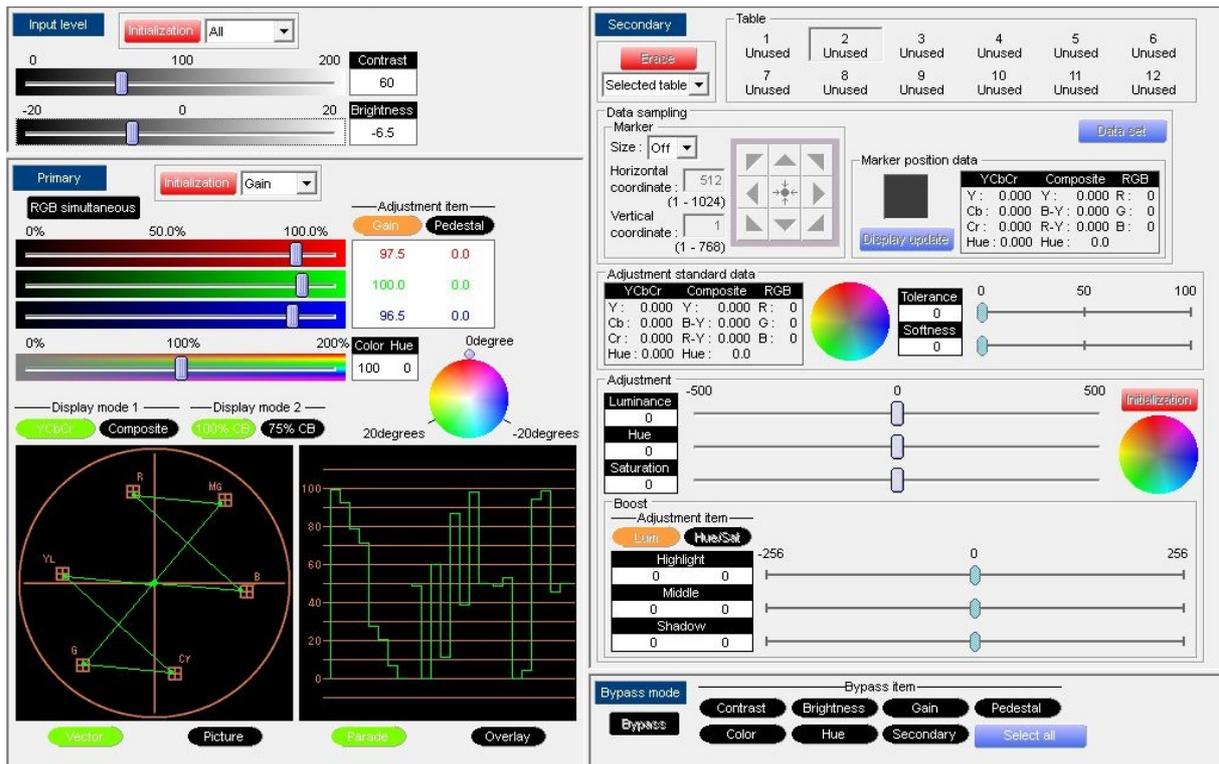


Abbildung 67: Menüpunkt "Color adjustment"

Die rechte Seite des Menüpunkts „Color adjustment“ macht den Anschein, dass weiterführende, die Farbkalibrierung betreffende, Kalibrierungsschritte mithilfe von Tabellen durchgeführt werden können. Laut Handbuch könnten mit diesen Einstellungen bestimmte Farben kalibriert werden. Es stellt sich jedoch heraus, dass keine Regler, Knöpfe etc. funktionieren. Die Funktionen lassen sich auch in keiner Weise freischalten oder zugänglich machen. Deshalb sind weiterführende Kalibrierungsschritte auch mit dieser Controller-Software nicht durchzuführen. Lediglich die Kalibrierung des Weißpunktes lässt sich mithilfe der RGB-Anteile durchführen. Ein solch ungeeignetes Menü stellt für den Benutzer eine Verwirrung dar und deckt zusätzlich die eingeschränkten Einstell- und Kalibriermöglichkeiten auf.

Nachdem die Funktionen und die Möglichkeiten des Controllers und der zugehörigen Software analysiert wurden, kann mit der Messung und Kalibrierung, sofern dies möglich ist, begonnen werden. Der erste Schritt ist die Einstellung der Helligkeit und des Kontrasts mithilfe des Graustufen-Testbilds. Die Einstellung sollen ein möglichst optimales Bild hervorrufen, auf dem alle vorhandenen Graustufen deutlich zu sehen und voneinander zu unterscheiden sind. Auch die Einstellung des Gamma-Wertes kann zu einem optimal möglichen Ergebnis beitragen. Auf dem unkalibrierten LED-Screen sind die hellen Graustufen optisch nicht voneinander zu unterscheiden, besonders die beiden Graustufen mit den Videopegeln 100% und 92,78% nicht. Insgesamt ist die Abstufung der Graustufen voneinander bei den dunklen Graustufen

viel besser zu erkennen als bei den hellen. Die Gamma-Einstellung hat nur sehr geringe Auswirkungen darauf, was nach dem Ausprobieren unterschiedlichster Gamma-Werte deutlich wird. Auch mit den Einstellungen der Helligkeit und des Kontrasts verbessert sich das Bild auf dem LED-Screen nur schwach. Die besten Ergebnisse werden mit folgenden Einstellungen erzielt:

Helligkeit ("Output setting"):	16 (1 bis 16)
Helligkeit („Color adjustment“):	-6,5 (-20 bis +20)
Kontrast:	60 (0 bis 200)
Gamma-Wert:	3.0 (1.0 bis 3.0)

Trotzdem sind die oberen beiden Graustufen optisch immer noch nicht zu unterscheiden. Die Sättigung wird mithilfe eines manuell herbeigeführten „Blue Only“-Modus eingestellt. Dafür wird das Farbbalken-Testbild benötigt und die Regler des Rot- und des Grünanteils werden auf null gestellt, sodass nur die Blauanteile im Bild aktiv sind. Eine optimale Einstellung der Sättigung ist dann erreicht, wenn die Farbbalken Weiß, Cyan, Magenta und Blau im „Blue Only“-Modus genau denselben Blauton aufweisen. Dies ist mit einer Einstellung von 100% (Bereich 0%-200%) Sättigung gegeben.

Im nächsten Schritt kann nach diesen grundlegenden Einstellungen die Kontrastmessung durchgeführt werden. Das nötige Testbild zeigt Schwarz und Weiß gleichzeitig auf dem LED-Screen. Die Leuchtdichtewerte dieser beiden Bereiche werden dann mit dem Messgerät aufgenommen. Für Weiß beträgt die Leuchtdichte einen Wert von $170,78\text{cd/m}^2$ und für Schwarz beträgt die Leuchtdichte $0,02\text{cd/m}^2$. Daraus ergibt sich ein Kontrastverhältnis von 8539:1, was um einiges größer ist als die Angabe im Datenblatt. Im Datenblatt sind aber auch keinerlei Angaben dazu zu finden, wie dieses Kontrastverhältnis zustande kommt und wie der Schwarz- und der Weißwert gemessen wurden.

Die nächste Messung ist die der nativen Farben des LED-Screens. Hierzu wird das Farbbalken-Testbild für die Sekundärfarben benötigt und jeweils ein rotes, ein grünes und ein blaues Testbild für die Messung der Primärfarben. Zwingend sind die Testbilder mit den Primärfarben aber nicht nötig, da auch die drei Primärfarben auf dem Farbbalken-Testbild enthalten sind.

Zunächst wird mit dem Auge untersucht, ob die sechs Grundfarben tatsächlich nativ sind oder ob der Controller ein verdecktes Farbmanagement durchführt. Die Untersuchung hat ergeben, dass dieser LED-Screen seine nativen Farben anzeigt, da nur die betroffenen Farbpixel der SMD-Pixel Licht aussenden und keine weiteren Farbpixel hinzugemischt werden, um die

Farborte zu beeinflussen. Auch die Spektren der Grundfarben, die nach der Messung in der Mess-Software ausgegeben werden, bestätigen, dass der LED-Screen seine nativen Farben anzeigt, da in den Spektren der Primärfarben jeweils nur ein Peak im betroffenen Spektralbereich zu sehen ist und bei den Sekundärfarben treten jeweils nur zwei Peaks in den Spektralbereichen auf, aus denen die jeweilige Mischfarbe entstanden ist.

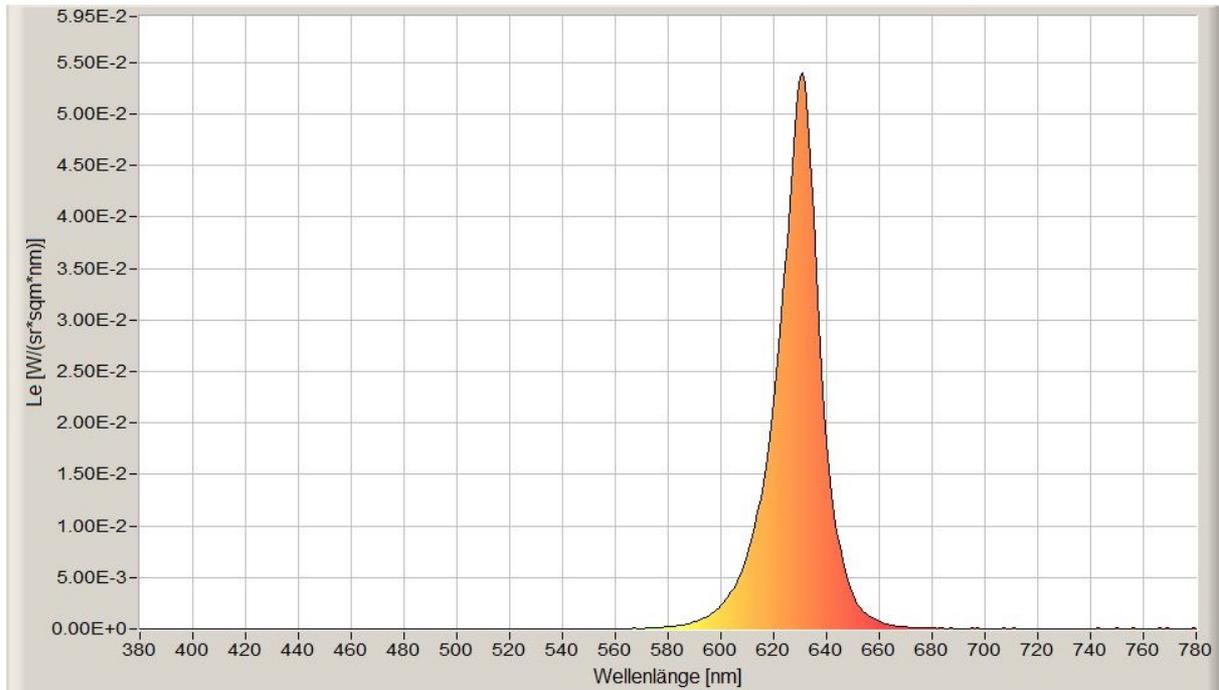


Abbildung 68: Spektrum der Messung der nativen LED-Screen-Farbe Rot

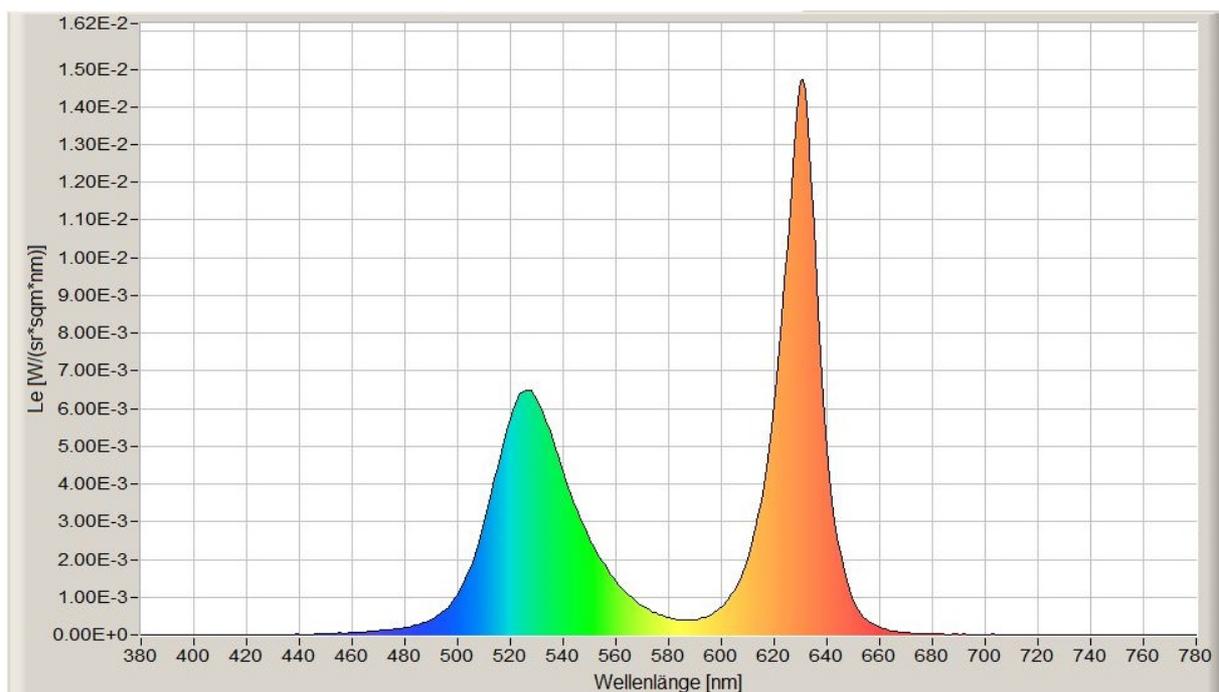


Abbildung 69: Spektrum der Messung der nativen LED-Screen-Farbe Cyan

In der folgenden Tabelle sind die Messergebnisse der nativen Farbmessung zu finden.

Nativ	x	y	Leuchtdichte in cd/m²
Rot	0,6949	0,3048	215,97
Grün	0,2191	0,7121	225,99
Blau	0,1356	0,0540	70,62
Cyan	0,1650	0,3176	211,25
Magenta	0,3553	0,1528	245,47
Gelb	0,4482	0,5125	201,71
Weiß	0,3132	0,3145	186,63

Tabelle 37: Farbwerte und Leuchtdichtewerte der nativen Farben, Hibino 6mm

Die nachfolgende Tabelle zeigt die xy-Koordinaten und Leuchtdichtewerte des Zielfarbraumes nach Rec. 709. Die Leuchtdichtewerte werden mithilfe der Videopegel der einzelnen Farben und der Y-Formel berechnet. Außerdem ist der Maximalwert nötig, der sich nach der Weißpunkt kalibrierung ergibt.

Rec. 709	x	y	Leuchtdichte in cd/m²
Rot	0,6400	0,3300	38,508238
Grün	0,3000	0,6000	129,544176
Blau	0,1500	0,0600	13,077586
Cyan	0,2250	0,3290	142,621762
Magenta	0,3210	0,1540	51,585824
Gelb	0,4190	0,5050	168,052414
Weiß	0,3127	0,3290	181,13

Tabelle 38: Farbraumes nach Rec. 709 mit den ideal berechneten Leuchtdichtewerten aus dem kalibrierten Weißpunkt, Hibino 6mm

Die nächste Grafik zeigt das Farbdreieck der Messung der drei Primärfarben in Weiß und das Farbdreieck des Zielfarbraumes in Schwarz.

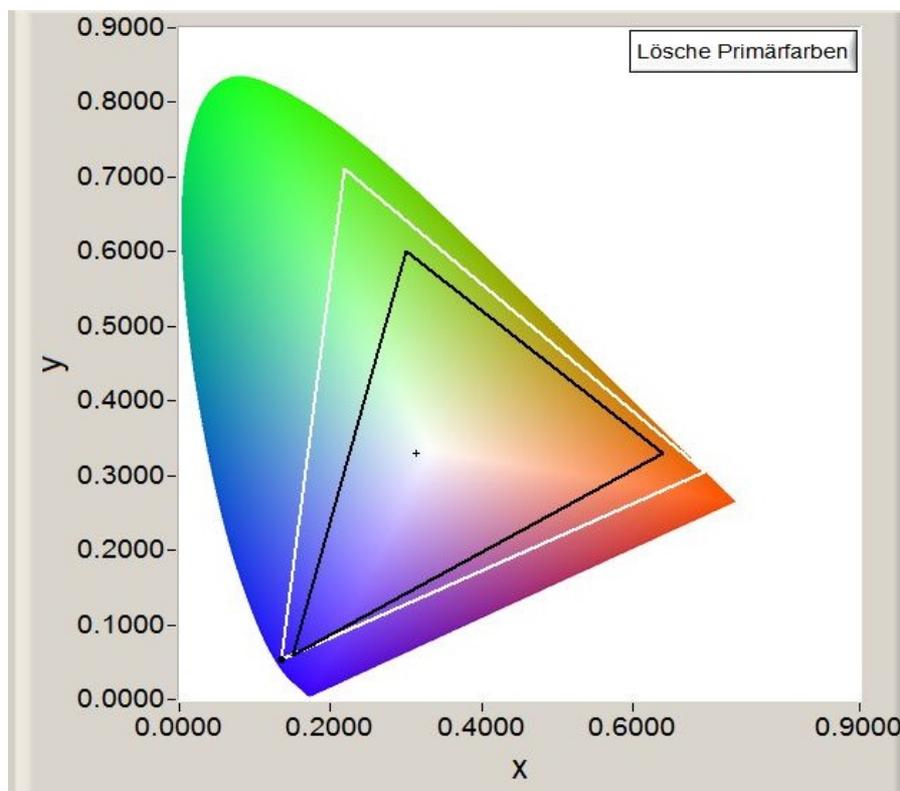


Abbildung 70: Weiß: Natives Primärfarben-Dreieck, Schwarz: Farbdreieck nach Rec. 709

Mit dieser Grafik können der Zielfarbraum und der gemessene native Farbraum noch besser miteinander verglichen werden. Es ist zu erkennen, dass sich beide Farbräume im blauen Bereich scheiden. Mithilfe einer Farbkalibrierung können nur die Farben erreicht werden, die sich innerhalb des nativen Farbdreiecks befinden. Da das Farbdreieck des Zielfarbraumes gerade noch so in den Grenzen bzw. auf den Grenzen des nativen Farbdreiecks liegt, wäre es in der Theorie möglich, die nativen Farben auf die Zielfarben zu kalibrieren.

Im späteren Verlauf der Messung und Kalibrierung des Hibino LED-Screens werden die Werte der nativen Farbmessung mit den Messergebnissen nach der Weißpunktkalibrierung verglichen.

Mit der Mess-Software „LiVal“ werden die dominanten Wellenlängen der sechs Grundfarben gemessen. Die Ergebnisse sind in folgender Tabelle aufgeführt.

Nativ	Dom. Wellenlänge in nm
Rot	622,0
Grün	534,0
Blau	467,4
Cyan	490,5
Magenta	-548,0
Gelb	572,7

Tabelle 39: Dominante Wellenlängen der nativen Farben, Hibino 6mm

Die dominante Wellenlänge der Grundfarbe Magenta unterscheidet sich von allen anderen dominanten Wellenlängen, da diese dominante Wellenlänge ein negatives Vorzeichen besitzt. Dieses Vorzeichen rührt daher, dass es sich bei der Grundfarbe Magenta im Vergleich zu allen anderen fünf Grundfarben nicht um eine Spektralfarbe handelt. Magenta kann nur durch die Mischung von zwei Spektralfarben (Blau und Rot) entstehen. Das negative Vorzeichen gibt außerdem an, dass es sich bei der Farbe um die Komplementärfarbe der angegebenen dominanten Wellenlänge handelt. Die dominante Wellenlänge von Magenta ohne das negative Vorzeichen ist der dominanten Wellenlänge von Grün sehr ähnlich, da diese beiden Farben Komplementärfarben sind.

In den Tabellen mit den xy-Koordinaten und den Leuchtdichtewerten der Grundfarben sind bereits die Werte des unkalibrierten Weißpunktes enthalten, da dieser teilweise mitgemessen wurde. Im Folgenden werden einige weitere Messergebnisse des unkalibrierten Weißpunktes aufgeführt.

Zu Beginn aller Messungen und Einstellungen wurde die ähnlichste Farbtemperatur am Controller bereits auf 6500K eingestellt. Mit der Messung des unkalibrierten Weißpunktes gilt es auch zu überprüfen, ob die eingestellte ähnlichste Farbtemperatur am Controller vom LED-Screen wiedergegeben wird. Die xy-Koordinaten und eine zugehörige Rechnung liefern eine genauere Auskunft über die ähnlichste Farbtemperatur des LED-Screens als die Angabe der CCT in der Mess-Software. Durch Rec. 709 ist der Weißpunkt bzw. die ähnlichste Farbtemperatur durch xy-Koordinaten definiert. Also können diese Werte mit den Messergebnissen verglichen werden. Besonders bei der Kalibrierung des Weißpunktes ist dieser Aspekt wichtig.

Die Zielwerte des Weißpunktes nach Rec. 709 sind folgende:

x: 0,3127

y: 0,3290

In der nachfolgenden Tabelle sind die wichtigsten Informationen über den unkalibrierten Weißpunkt zusammengetragen, die sich aus der Messung und den beiden Formeln 7 und 8 für die Berechnung der ähnlichsten Farbtemperatur aus dem Kapitel 5.4. Messgeräte und Farbtemperatur ergeben.

Weißpunkt	Unkalibriert
xy-Koordinaten	
x	0,3132
y	0,3145
Leuchtdichte in cd/m²	186,63
CCT	
Messgerät	6595
Formel 1	6604
McCamy	6593

Tabelle 40: Messergebnisse des unkalibrierten Weißpunktes, Hibino 6mm

Die xy-Koordinaten des unkalibrierten Weißpunktes liegen bereits nahe bei den xy-Koordinaten des Zielfarbraumes nach Rec. 709. Auch die CCT des Messgerätes und das Ergebnis der Formel 8 nach McCamy liegen relativ nahe bei dem Zielwert von 6504K. Daraus lässt sich schließen, dass der Controller und die Controller-Software des Hibino-Screens sehr gut zusammenarbeiten und dass die eingestellten Werte relativ gut vom LED-Screen wiedergegeben werden.

Der Vergleich zwischen den CCT-Werten soll zeigen, dass die Angabe der CCT je nach verwendeter Formel unterschiedlich ist. Dies zeigt, dass der Abgleich mit den xy-Koordinaten genauer ist also mit dem angegebenen CCT-Wert der Mess-Software oder auch mit einem Wert einer der beiden Formeln.

Die nächste Abbildung zeigt die spektrale Verteilung des unkalibrierten Weiß auf dem LED-Screen.

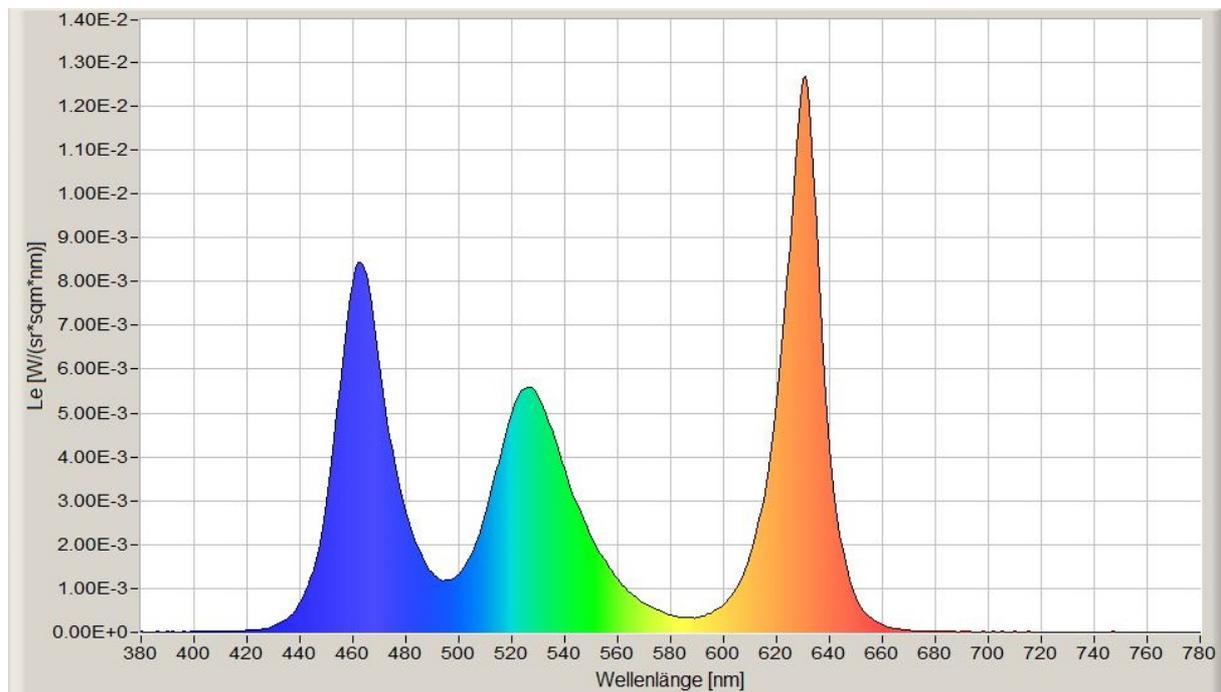


Abbildung 71: Spektrum des unkalibrierten Weißpunktes des Hibino LED-Screens

Dieses Spektrum ist typisch für ein Weiß, das aus der Überlagerung von drei relativ schmalbandigen Lichtquellen entsteht. Das Weiß entsteht also durch die additive Überlagerung von roten, grünen und blauen LEDs.

Das Spektrum zeigt außerdem wie stark die drei Wellenlängenbereiche für die vorhandene ähnlichste Farbtemperatur vertreten sind. Dies äußert sich in der Intensität der Peaks. Obwohl es sich um keine warmweiße (ähnlichste) Farbtemperatur handelt, ist der Rotanteil im Vergleich zu den anderen beiden Farbanteilen noch relativ hoch.

Im Folgenden soll nun überprüft werden, ob der LED-Screen auch den Gamma-Wert, der in der Controller-Software eingestellt ist, genau wiedergibt und welchen Verlauf die ähnlichste Farbtemperatur über die Graustufen aufweist. Dafür werden die Leuchtdichtewerte aller acht Graustufen und die CCT-Werte dieser gemessen.

Zunächst werden die gemessenen Leuchtdichtewerte der Graustufen den ideal berechneten Leuchtdichtewerten, die auf dem eingestellten Gamma-Wert von 3.0 beruhen und mit der Formel 9 berechnet werden, gegenübergestellt.

Videopegel in %	L gemessen in cd/m ² unkalibriert	L ideal in cd/m ²
100	186,63	181,13
92,78	167,6	143,5769445
78,74	127,68	86,13899171
71,52	109,92	63,74687805
28,48	23,81	3,249028195
21,26	15,33	1,189123995
7,22	1,93	0,01373352
0	0,01	0,01

Tabelle 41: Gemessene Leuchtdichtewerte der Graustufen im Vergleich zu den Idealwerten, Hibino 6mm

Die obere und untere Grenze ergeben sich nach der Weißpunktkalibrierung und sind neben dem Gamma-Wert für die Berechnung der idealen Werte nötig. Nach der Weißpunktkalibrierung wird der Gamma-Verlauf noch einmal gemessen. In diesem Mess-Abschnitt werden dann alle drei Gamma-Verläufe in einer Grafik gegenübergestellt und können verglichen werden.

Die gemessenen Leuchtdichtewerte über die Graustufen weichen von den Idealen ab und liegen alle insgesamt etwas höher. Daran lässt sich schon vermuten, dass der Gamma-Verlauf des LED-Screens ein anderer als der ideal berechnete ist. Dies wird sich dann nach der Weißpunktkalibrierung und in der Grafik zeigen.

Die eingestellte ähnlichste Farbtemperatur sollte im Idealfall einen konstanten Verlauf über die Graustufen aufweisen. Das Verhalten der ähnlichsten Farbtemperatur wird anhand der Messungen der CCT der einzelnen Graustufen überprüft. Die Ergebnisse und die idealen Werte sind in folgender Tabelle aufgezeigt.

Videopegel in %	ideale Farbtemperatur in K	gemessene Farbtemperatur in K unkalibriert
100	6504	6600
92,78	6504	6599
78,74	6504	6589
71,52	6504	6598
28,48	6504	6583
21,26	6504	6578
7,22	6504	6203
0	6504	6971

Tabelle 42: Gemessene CCT-Werte der Graustufen im Vergleich zu den Idealwerten, Hibino 6mm

Wie bereits beim unkalibrierten Weißpunkt festgestellt liegen die gemessenen CCT-Werte der Graustufen überwiegend schon relativ nahe am dem Zielwert von 6504K. Insgesamt schwank die CCT über die Graustufen auch nicht sehr stark. Lediglich bei den letzten beiden Graustufen nehmen die Abweichungen stärker zu. Die Angabe der Graustufe mit dem Videopegel von 0% ist kritisch zu betrachten, da diese eigentlich keine Farbinformationen enthalten kann, da die Leuchtdichte dieser Graustufe auch sehr gering ist und deutlich unter 1cd/m^2 liegt.

Die Messungen des unkalibrierten LED-Screens sind nun vollständig und es kann mit der Kalibrierung begonnen werden. Wie bereits erwähnt, lassen der Controller und die zugehörige Software bloß eine Kalibrierung des Weißpunktes zu. Die Kalibrierung des Farbraumes, der ähnlichsten Farbtemperatur über die Graustufen und eine mögliche Gamma-Anpassung können nicht durchgeführt werden. Also wird im nächsten Schritt der Weißpunkt nach Rec. 709 kalibriert.

Für die Kalibrierung des Weißpunktes stellen die RGB-Anteile in der Controller-Software die wichtigste Einstellmöglichkeit dar. Mithilfe dieser Farbanteile, kann die auf ihren Zielwert nach Rec. 709 kalibriert werden. Wie bereits erwähnt sind die xy-Koordinaten genauer als die CCT-Angabe der Mess-Software weshalb diese Werte so gut es geht an die Zielwerte angenähert werden. Die RGB-Säulen der Mess-Software müssen ungefähr in der Waage liegen, damit die Zielwerte erreicht werden.

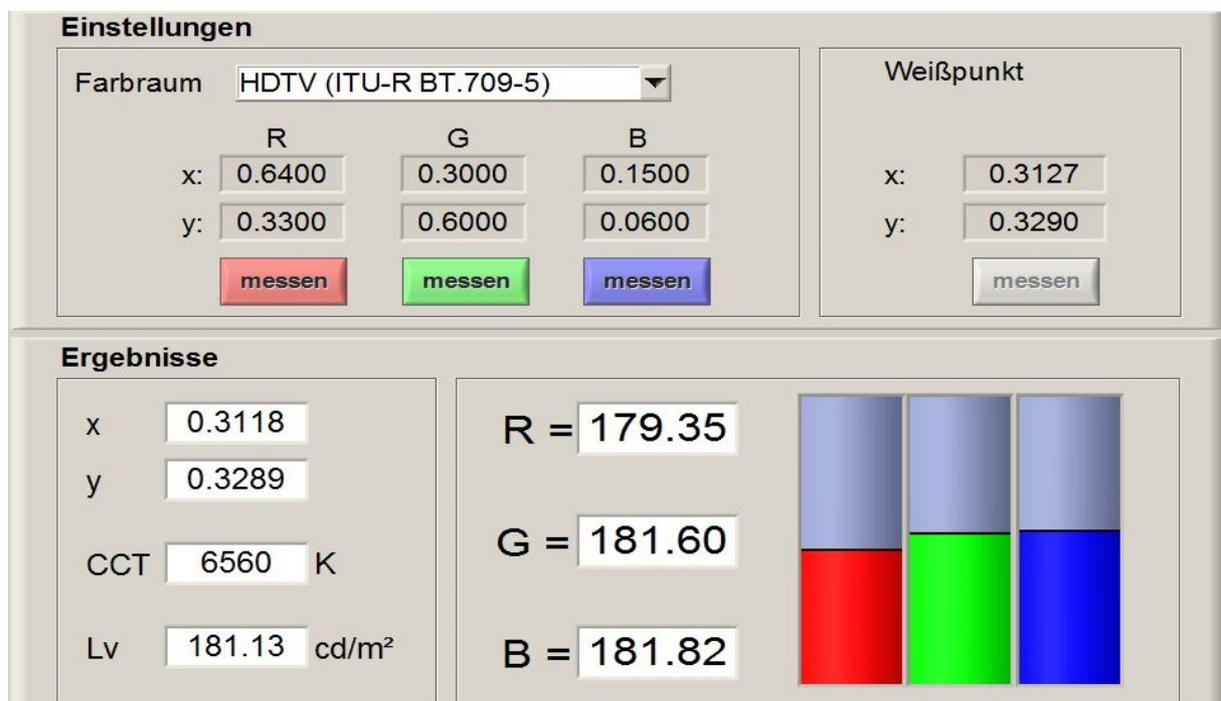


Abbildung 72: Ausgabe der Mess-Software "MoDiCal" für den kalibrierten Weißpunkt des Hibino LED-Screens

Daher werden die RGB-Anteile in der Controller-Software so lange angepasst, bis das beste Ergebnis erreicht ist. Dieses wird mit den folgenden RGB-Anteilen möglich.

R: 97,5%
 G: 100,0%
 B: 96,5%

Bereits eine Änderung um 0,5% wirkt sich relativ stark auf die xy-Koordinaten aus.

Die Ergebnisse des kalibrierten Weißpunktes sind in folgender Tabelle festgehalten. Sie werden dem unkalibrierten Zustand gegenübergestellt.

Weißpunkt	Kalibriert	Unkalibriert
xy-Koordinaten		
x	0,3118	0,3132
y	0,3289	0,3145
Leuchtdichte in cd/m²	181,13	186,63
CCT		
Messgerät	6560	6595
Formel 1	6550	6604
McCamy	6554	6593

Tabelle 43: Ergebnisse der Weißpunktkalibrierung im Vergleich zum unkalibrierten Zustand, Hibino 6mm

Die erreichten xy-Koordinaten liegen relativ nahe an den Zielwerten $x=0,3127$ und $y=0,3290$. Die Leuchtdichte ergibt sich aus der zu Beginn eingestellten Helligkeit, dem Kontrast und dem Gamma-Wert. An diesen Werten hat sich nichts mehr verändert. Die Leuchtdichte des kalibrierten Weißpunktes beträgt $181,13\text{cd/m}^2$. Mithilfe diesen Wertes können alle bereits erwähnten Idealwerte berechnet werden.

Da der Farbraum nicht kalibriert werden kann, wird nun überprüft, ob sich die xy-Koordinaten und die Leuchtdichtewerte nach der Weißpunktkalibrierung verändert haben.

In der folgenden Tabelle sind die Messwerte nach der Weißpunktkalibrierung zu sehen. Die Überschrift „Kalibriert“ ist in Anführungszeichen gesetzt, da die Farbwerte und Leuchtdichtewerte nicht kalibriert wurden, es sich aber um Messwerte nach der Weißpunktkalibrierung handelt.

"Kalibriert"	x	y	Leuchtdichte in cd/m²
Rot	0,6951	0,3046	179,70
Grün	0,2100	0,7131	218,82
Blau	0,1354	0,0545	61,28
Cyan	0,1673	0,3369	210,07
Magenta	0,3584	0,1541	212,34
Gelb	0,4363	0,5225	196,95
Weiß	0,3118	0,3289	181,13

Tabelle 44: Farbwerte und Leuchtdichtewerte der Farben nach der Weißpunktkalibrierung, Hibino 6mm

Die nachfolgende Tabelle zeigt noch einmal die Zielwerte, die sich mithilfe der Leuchtdichte des Weißpunktes errechnet werden konnten.

Rec. 709	x	y	Leuchtdichte in cd/m²
Rot	0,6400	0,3300	38,508238
Grün	0,3000	0,6000	129,544176
Blau	0,1500	0,0600	13,077586
Cyan	0,2250	0,3290	142,621762
Magenta	0,3210	0,1540	51,585824
Gelb	0,4190	0,5050	168,052414
Weiß	0,3127	0,329	181,13

Tabelle 45: Farbraumes nach Rec. 709 mit den ideal berechneten Leuchtdichtewerten aus dem kalibrierten Weißpunkt, Hibino 6mm

Die xy-Koordinaten weichen nach der Weißpunktkalibrierung immer noch von den Zielwerten ab. Je nach Farbe sind die Abweichungen größer oder kleiner. Dabei muss beachtet werden, dass sich die xy-Koordinaten auf die CIE Farbtabelle beziehen, die nicht gleichabständig ist, weshalb die Toleranzen für die Abweichungen bei jeder Farbe anders sind. Beispielsweise weist Blau die geringste Toleranz auf. Auch die Leuchtdichtewerte weichen unterschiedlich stark ab. Besonders hier wäre eine Kalibrierungsmöglichkeit sehr sinnvoll.

Die nächste Tabelle stellt die Abweichungen der gemessenen Werte vor und nach der Weißpunktkalibrierung dar.

Abweichung	Δx	Δy	Δ Leuchtdichte in cd/m²
Rot	0,0002	0,0002	36,27
Grün	0,0091	0,0010	7,17
Blau	0,0002	0,0005	9,34
Cyan	0,0023	0,0193	1,18
Magenta	0,0031	0,0013	33,13
Gelb	0,0119	0,0100	4,76
Weiß	0,0014	0,0144	5,50

Tabelle 46: Abweichung der Farb- und Leuchtdichtewerte des LED-Screens nach der Weißpunktkalibrierung, Hibino 6mm

Diese Tabelle zeigt am deutlichsten, dass sich bezüglich der xy-Koordinaten der sechs Grundfarben nach der Weißpunktkalibrierung die Werte kaum verändert oder verbessert haben.

Die Option einer Farbraumkalibrierung wäre also von Nöten und äußerst sinnvoll.

In der folgenden Grafik soll nun noch überprüft werden, ob es theoretisch mithilfe dieser Farbkalibrierung möglich wäre, die Farben des Farbraumes nach Rec. 2020 zu erreichen.

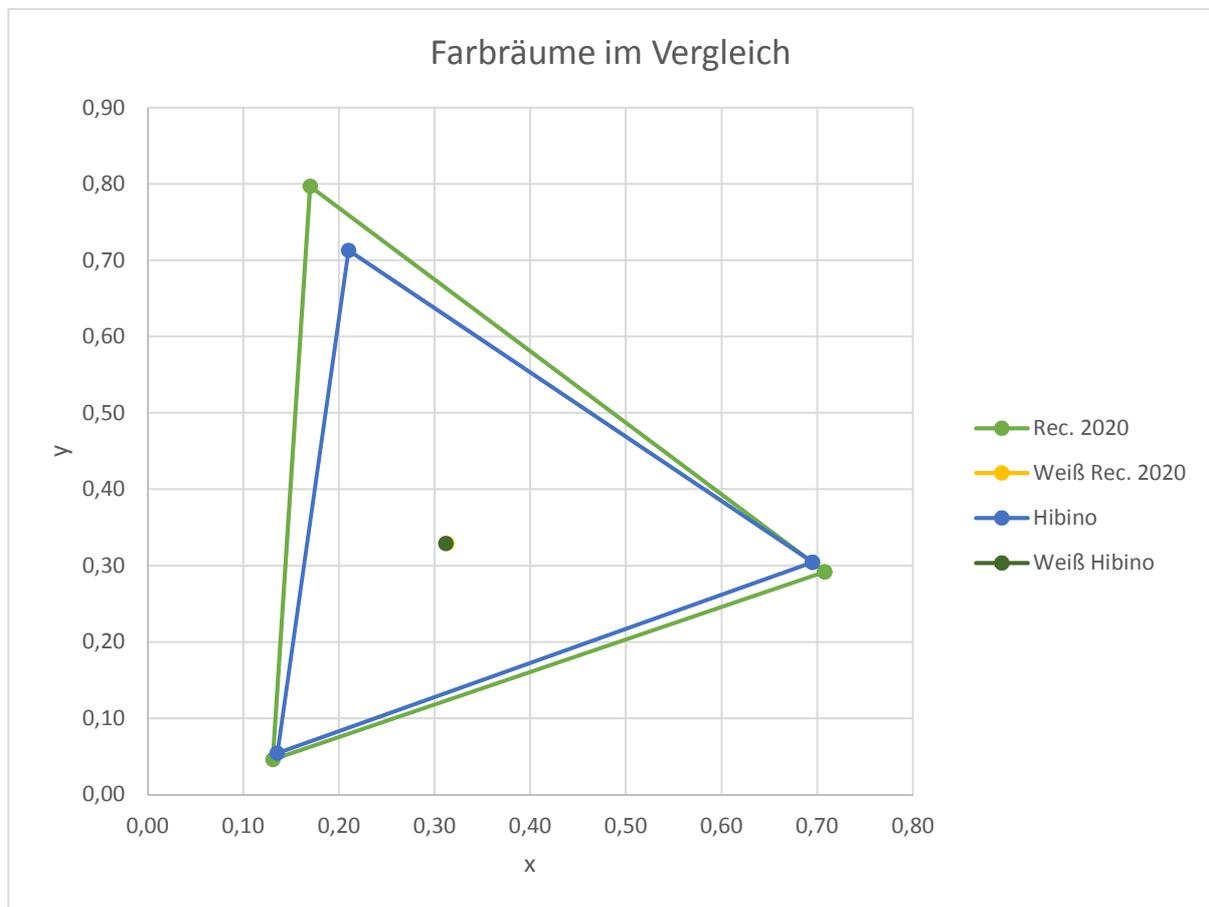


Abbildung 73: Farbdreieck nach Rec. 2020 und des Hibino LED-Screens im Vergleich

Diese Grafik zeigt direkt an, dass es mit einer Farbkalibrierung nicht möglich wäre, den UHD Farbraum nach Rec. 2020 zu erreichen, da das Farbdreieck des Farbraumes nach Rec. 2020 um einiges größer ist.

Der Gamma-Verlauf und das Verhalten der ähnlichsten Farbtemperatur über die Graustufen sollen nun auch noch einmal überprüft und gemessen werden. Dazu wird das Graustufen-Testbild benötigt. Das Messgerät misst für den Gamma-Verlauf die Leuchtdichtewerte und für die ähnlichste Farbtemperatur ist die CCT-Angabe des Messgerätes wichtig.

In der folgenden Grafik sind dem ideal berechneten Gamma-Verlauf für ein Gamma von 3,0 die Gama-Kurven des LED-Screens vor und nach der Weißpunktcalibrierung gegenübergestellt.

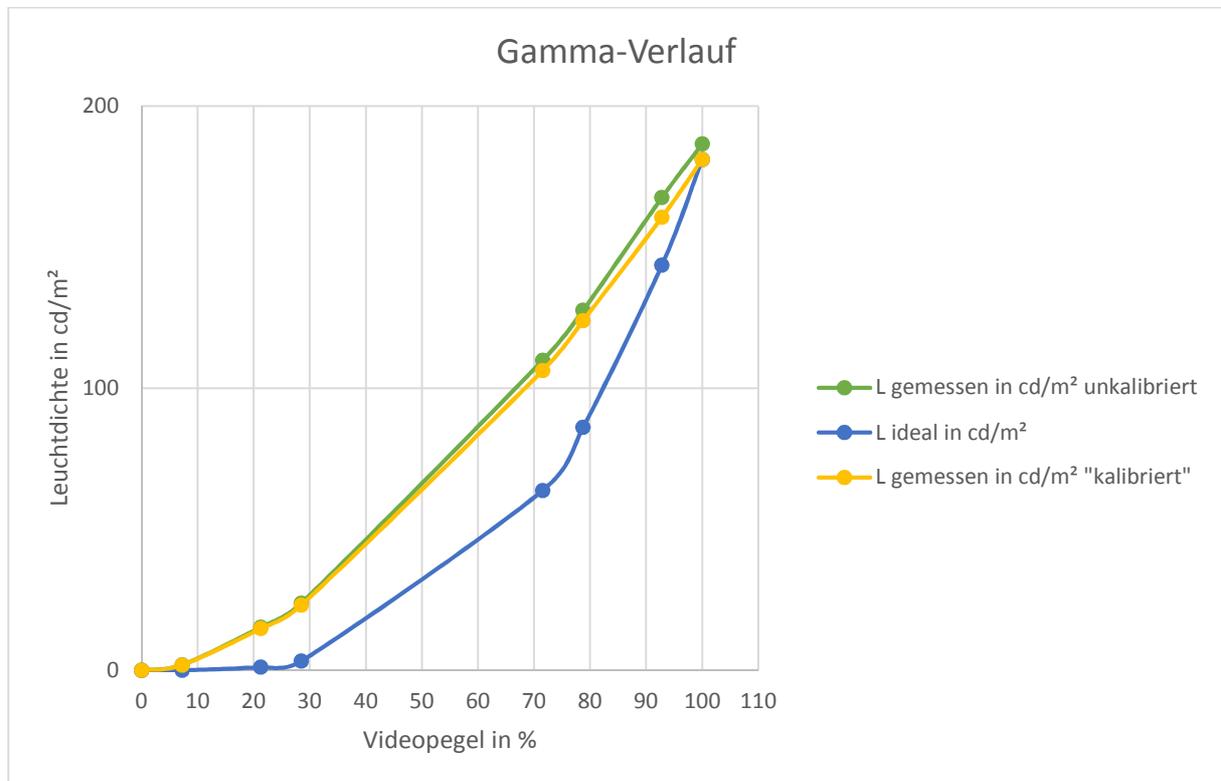


Abbildung 74: Gamma-Verläufe des Hibino LED-Screens im Vergleich

Anhand dieser Grafik ist zu erkennen, dass der LED-Screen weder vor noch nach der Kalibrierung des Weißpunktes (grüne und gelbe Kurve) dem Gamma-Verlauf des eingestellten Gamma-Wertes von 3,0 folgt. Die Formen der Kurven sind anders als die des idealen Verlaufs und die Leuchtdichtewerte sind bei den meisten Graustufen höher. Daraus lässt sich schließen, dass dem in der Controller-Software eingestellten Gamma-Wert nicht zu trauen ist bzw. dass der LED-Screen einen anderen Gamma-Wert wiedergibt. Da die optischen Ergebnisse des Graustufen-Testbildes mit dem gewählten aber auch mit allen weiteren möglichen Gamma-Werten des LED-Controllers nicht optimal sind, wird es schwierig herauszufinden, welcher Gamma-Wert tatsächlich optimal wäre. Auch wenn dieser Wert herausgefunden wird, macht eventuell eine Kalibrierung der Leuchtdichtewerte der Graustufen auf diesen Wert keinen Sinn, da am LED-Screen womöglich und höchstwahrscheinlich ein anderer Gamma-Wert wiedergegeben wird, mit dem das Bild korrekt wiedergegeben wird. Eine Kalibrierung des Gamma-Verlaufs ist also generell etwas schwieriger.

Die nächste Grafik stellt das Verhalten der ähnlichsten Farbtemperatur vor und nach der Weißpunktkalibrierung dem idealen Verhalten gegenüber.

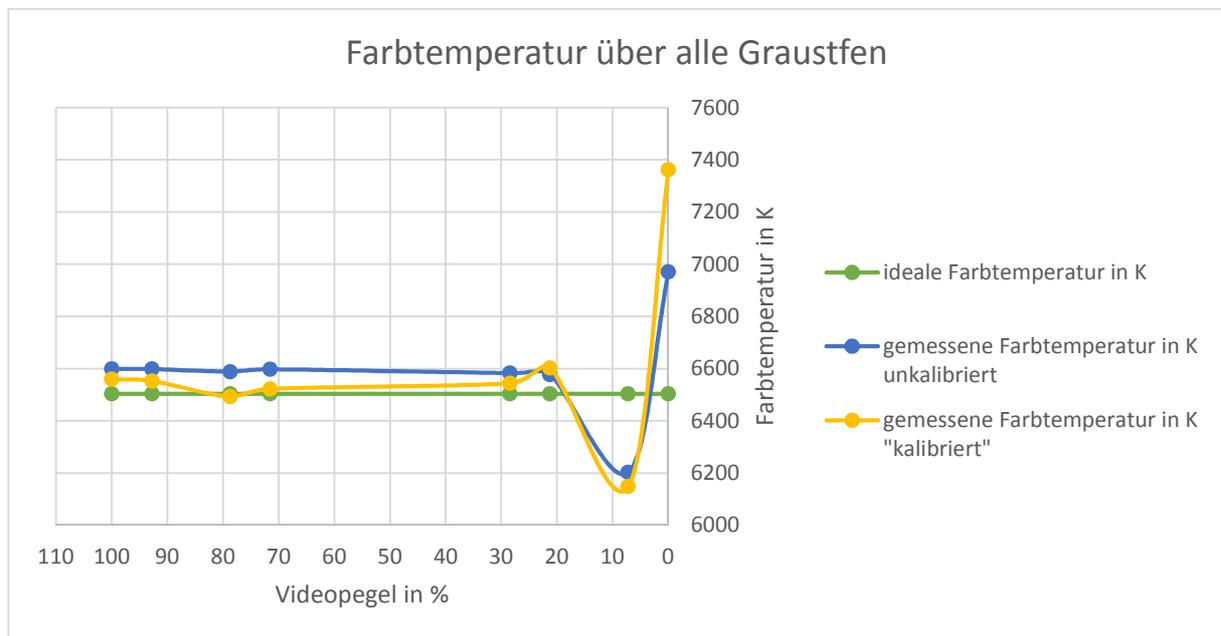


Abbildung 75: Vergleich der Änderung der CCT über die Graustufen, Hibino LED-Screen

Die grüne Kurve zeigt den idealen Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur über alle Graustufen. Dieser Kurve ist eine konstante, was bedeutet, dass sich die ähnlichste Farbtemperatur im besten Fall über die Graustufen nicht verändert.

Die gelbe und die blaue Kurve weisen sehr ähnliche Verläufe auf. Daraus lässt sich bereits schließen, dass sich der eigentliche Verlauf und das Verhalten der ähnlichsten Farbtemperatur über die Graustufen nach der Weißpunktkalibrierung nicht geändert hat. Lediglich der Wert der ähnlichsten Farbtemperatur wurde an den Zielwert angenähert. Guckt man sich die Kurven genauer an, so stellt man fest, dass sich die ähnlichste Farbtemperatur bis zu einem gewissen Videopegel aber relativ konstant verhält. Dieser Videopegel liegt bei ca. 21,26%. Bei Videopegeln, die geringer als dieser Wert sind, schafft es der LED-Screen folglich nicht mehr die CCT konstant zu halten.

Eine weitere Kalibrierung der ähnlichsten Farbtemperatur wäre bei diesem LED-Screen also erst ab dem kritischen Videopegel-Wert nötig.

Auch das Kontrastverhältnis soll nach der Weißpunktcalibrierung nochmals berechnet werden. Dazu werden mit dem Messgerät die Leuchtdichtewerte von Weiß und Schwarz des passenden Testbildes gemessen. Für Weiß beträgt der Leuchtdichtewert nun 192,50cd/m² und für Schwarz beträgt dieser Wert 0,01cd/m². Daraus ergibt sich ein Kontrastverhältnis von 19250:1. Dieses Kontrastverhältnis ist mehr als doppelt so groß wie das vor der Weißpunktcalibrierung. Zurückzuführen ist dies auf einen geringeren Schwarzwert und einen erhöhten Weißwert. Die beiden Werte liegen also noch weiter auseinander. Im Vergleich zur Herstellerangabe ist dieser Wert mehr als neunmal so groß. Woran dies liegt ist schwer festzustellen, da der Hersteller die Messbedingungen nicht preisgibt, unter denen das angegebene Kontrastverhältnis gemessen und schließlich berechnet wurde.

Die Betrachtungswinkelabhängigkeit wird außerdem noch untersucht, auch wenn diese nicht gemessen wird, sondern mit dem Auge beurteilt wird. Am besten eignet sich dafür ein komplett weißes Testbild, da bei Weiß alle drei Farbpixel Licht abgeben.

Die Winkel, unter denen der Screen betrachtet wurde, können hier nicht angegeben werden, deshalb werden die Richtungen angegeben, aus denen die Betrachtung dann relativ steil war. Der Screen wurde von oben, von unten und von links und rechts betrachtet. Die Ergebnisse sind in folgender Tabelle eingetragen.

Betrachtungsrichtung	Wirkung
Oben	Der LED-Screen verfärbt sich ins Cyan und mit zunehmender Steilheit ins Blau.
Unten	Der LED-Screen verfärbt sich ins Magenta bis Rötliche.
Links	Nach oben hin verfärbt sich der Screen rötlich und nach unten hin bläulich.
Rechts	Nach oben hin verfärbt sich der Screen rötlich und nach unten hin bläulich.

Tabelle 47: Beschreibung der Betrachtungswinkelabhängigkeit, Hibino 6mm

Die Verfärbungen in Abhängigkeit zum Betrachtungswinkel bzw. zur Betrachtungsrichtung sind bedingt durch die Anordnung der Farbpixel in den SMD-Pixeln. Bei diesem Screen befinden sich die Farbpixel untereinander. Der oberste Farbpixel ist rot, gefolgt von einem grünen Pixel und abschließend kommt der blaue Pixel. Wird der LED-Screen also von oben betrachtet, so werden die roten Pixel verdeckt, weshalb die Mischfarbe Cyan entsteht. Wenn der Winkel steiler wird, so wird auch der grüne Farbpixel mit verdeckt und der Screen färbt sich blau, da nur doch dieser Farbpixel zu sehen ist. Bei der Betrachtung von unten werden

also die grünen Farbpixel verdeckt. Die blauen Farbpixel des benachbarten SMD-Pixels werden nicht ganz so stark verdeckt, weshalb sich der LED-Screen dann ins Magenta verfärbt. Bei zunehmender Steilheit werden dann auch die blauen Pixel verdeckt und der Screen ist rötlich. Eine grünliche Verfärbung tritt in keiner Richtung auf, was wohl daran liegt, dass sich der grüne Farbpixel in der Mitte der anderen beiden Farbpixel befindet.

Die Beurteilung der Winkelabhängigkeit wurde in einem sehr geringen Abstand zum LED-Screen vorgenommen. Es gilt umso geringer der Betrachtungsabstand zum Screen, desto stärker ist die Winkelabhängigkeit.

Auf dem beigefügten Datenträger befindet sich das Hersteller Datenblatt zu diesem LED-Screen.

11.1.4. LED-Screen 4 – ROE MC-7H

Bei diesem LED-Screen von ROE handelt es sich um ein zum Hibino LED-Screen preisgünstigeres Vergleichsprodukt. Laut Benutzer soll dieser LED-Screen qualitativ nicht so hochwertig wie das Vergleichsprodukt sein.

Die Ausführung ROE MC-7H besitzt einen Pixel Pitch von 7,5mm. Dieser Pixel Pitch ist etwas größer als der des Vergleichsproduktes. Außerdem handelt es sich hier um ein Outdoor-Produkt, dass vom Benutzer oft bei Public Viewing Veranstaltungen, Konzerten oder Ähnlichem eingesetzt wird.

Einige Angaben aus dem Datenblatt sind in der folgenden Tabelle zu finden.

Herstellerangaben	Wert
Helligkeit	4000cd/m ²
Betrachtungswinkel	
• Horizontal	160°
• Vertikal	160°
Pixel pro Quadratmeter	17778

Tabelle 48: Angaben aus dem Hersteller Datenblatt zum ROE MC-7H Screen

Der Controller, mit dem der LED-Screen angesteuert werden kann, ist ebenfalls von ROE. Der Name des verwendeten Controllers ist „Evision HD101 Controller“ und die zugehörige Controller-Software ist ebenfalls von Evision.



Abbildung 76: Bild des LED-Controllers zu dem ROE MC-7H LED-Screen

Dieser Controller verfügt an seiner Rückseite über die Schnittstellen HDMI und DVI. Bei dem Mess-Aufbau ist der Controller über DVI mit dem DVI-Switch verbunden und ebenfalls über DVI mit dem LED-Screen.

Die Controller-Software ist eine Art Standard-Produkt, da diese auch für einige weitere LED-Screens von anderen Herstellern eingesetzt wird. Es handelt sich bei der Software also um ein universelles Produkt. Die Software fordert die Angabe des verwendeten Controllers, um zu erkennen um welches Produkt es sich handelt. Erst dann funktioniert die Software und kann bedient werden.

Gegliedert ist die Bedienoberfläche in zwei für die Messung und Kalibrierung wichtige Menüpunkte. Diese Menüpunkte sind mit „LED Display Setup“ und „Testing and Adjusting“ benannt.

In dem Menüpunkt „LED Display Setup“ sind einige Funktionen und Einstellmöglichkeiten bezüglich der LED-Screen Konfiguration zu finden. Konfiguration bezieht sich dabei auf den physischen Aufbau des LED-Screens mit Verkabelung. In der Software werden die Module des LED-Screens in der richtigen bzw. verkabelten Reihenfolge durchnummeriert. Der einzige wichtige Parameter für die Messung und Kalibrierung, die dort zu finden ist, ist der Gamma-Wert. Dieser Wert kann zwischen 1,0 und 3,0 eingestellt werden.

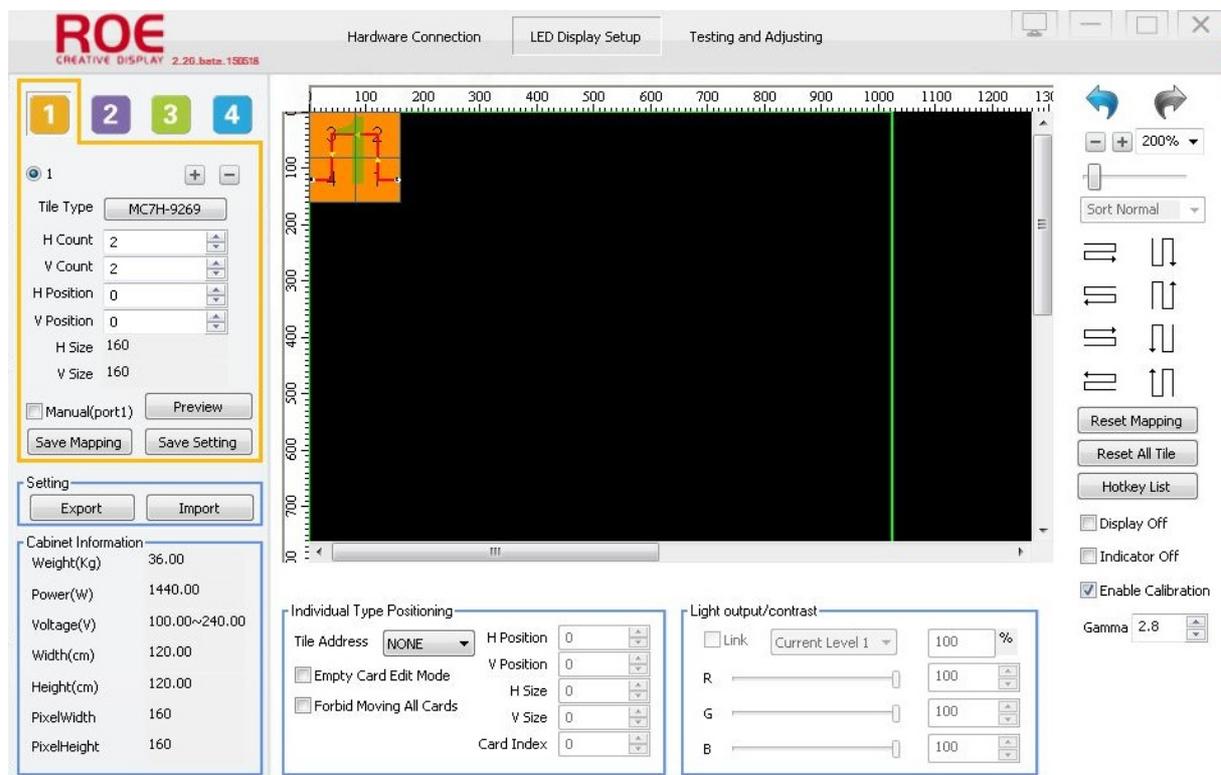


Abbildung 77: Menüpunkt "LED Display Setup" der Controller-Software des ROE MC-7H LED-Screens

Der Menüpunkt „Testing and Adjusting“ ist dann für die Bildeinstellungen auf dem LED-Screen zuständig. Hier finden sich im Vergleich zu anderen Controllern-Software-Lösungen eher wenig Einstellmöglichkeiten und Regler. Die ähnlichste Farbtemperatur, die Helligkeit und die RGB-Anteile können eingestellt werden. Die ähnlichste Farbtemperatur kann in einem Reiter mit vorgeschlagenen Werten ausgewählt werden. Durch die einstellbaren RGB-Anteile wird eine Anpassung der ähnlichsten Farbtemperatur ermöglicht. Ein weiterer Regler ist der „Grey Scale“-Regler. Aufgrund des Namens ist nicht ganz klar, ob die Helligkeit oder der Kontrast eingestellt werden kann. Durch Ausprobieren hat sich dann herausgestellt, dass dieser Regler für die Helligkeitseinstellung zuständig ist.

Außerdem kann die Größe des Outputs auf dem LED-Screen ausgewählt werden. Der maximal größte Wert beträgt 1024x768. Dieser Wert ist kleiner als der anliegende Output bzw. die Testbilder, da diese eine Größe / Auflösung von 1920x1080 besitzen. Auch der Videosignal-Input kann angegeben werden und es ist eine Auswahl mit Testbild in dieser Software implementiert. Von den Testbildern, die in dieser Arbeit für die Messung und Kalibrierung verwendet werden, sind aber nicht alle in der Software zu finden. Die Software bietet jeweils ein Testbild für die Primärfarben und für Weiß an und zusätzlich noch bewegten Content.

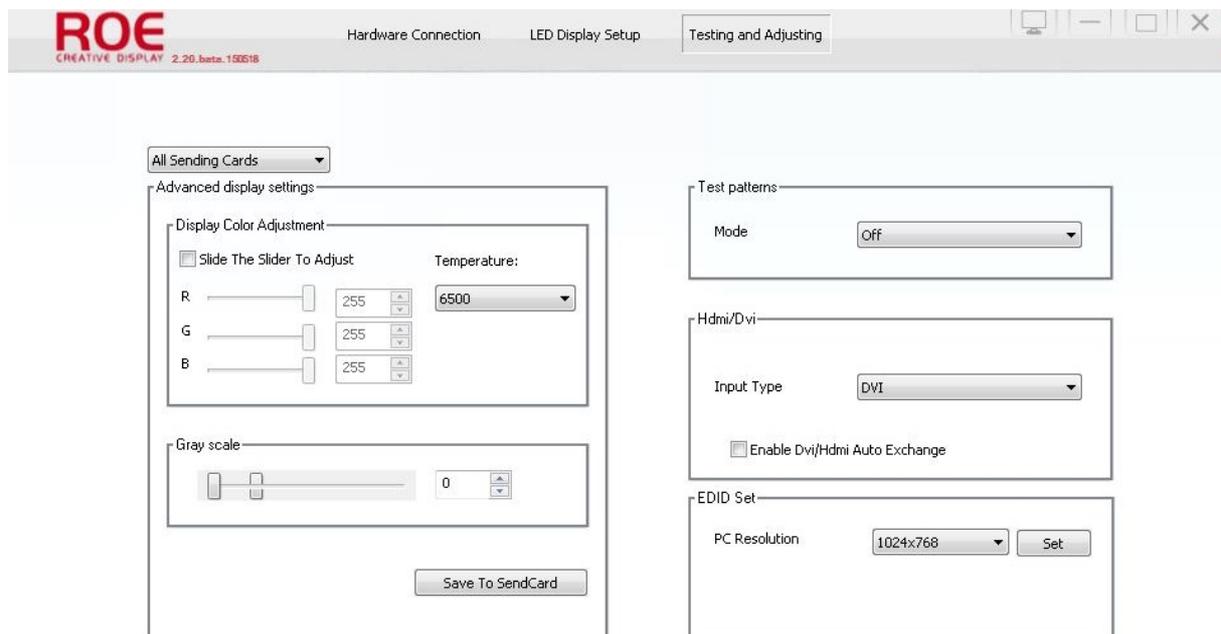


Abbildung 78: Menüpunkt "Testing and Adjusting" der Controller-Software des ROE MC-7H LED-Controllers

Nach dem ersten Blick auf diese Controller-Software ist bereits zu erkennen, dass sich nur der Weißpunkt im Rahmen der Möglichkeiten, die sich durch die Software bieten, kalibrieren lässt. Es sind keine weiteren Kalibrierungen des Leitfadens möglich.

Dadurch, dass zudem einige grundlegende Einstellmöglichkeiten wie der Kontrast und die Sättigung nicht vorhanden sind, kann der Output bzw. das Bild, das auf dem LED-Screen wiedergegeben wird, nicht vollständig und höchstwahrscheinlich auch nicht optimal eingestellt werden.

Nach der Analyse der Einstellmöglichkeiten, die die Controller-Software bietet, wird mit der Messung und Kalibrierung des LED-Screens begonnen.

Zunächst soll das Graustufen-Testbild so gut wie möglich auf dem LED-Screen dargestellt werden. Da kein Kontrastregler vorhanden ist, können nur die Helligkeit und der Gamma-Wert eingestellt werden. Die Helligkeit kann Werte zwischen 0% und 100% annehmen und der

Gamma-Wert kann zwischen 1,0 und 3,0 ausgewählt werden. Standardmäßig ist ein Gamma-Wert von 2,8 eingestellt. Während der Einstellung hat sich bemerkbar gemacht, dass eine Veränderung des Gamma-Wertes auf das vom LED-Screen wiedergegebene Bild keinen Einfluss hat. Der Gamma-Wert kann also auch nicht wirklich zur Einstellung eines bestmöglichen Bildes eingesetzt werden. Die Einstellung wurde dann auf dem Standardwert belassen. Also kann das Videobild bloß mit dem Helligkeitsregler angepasst werden.

Die vier Graustufen mit den größten Videopegeln unterscheiden sich kaum voneinander und die beiden Graustufen mit den höchsten Pegeln lassen sich optisch gar nicht auseinanderhalten. Da der Helligkeitsregler vor allem den Schwarzwert beeinflusst, kann an der Darstellung der hellen Graustufen nichts verändert oder gar verbessert werden. Der Helligkeitsregler wurde für eine relativ gute Darstellung der dunkleren Graustufen auf 25% geregelt.

Mit dem nun vorhandenen Bild, das vom LED-Screen wiedergegeben wird, muss die weitere Messung und Kalibrierung fortgeführt werden, da die Software keine weiteren Einstellmöglichkeiten für eine weitere Optimierung liefert.

Die Kontrastmessung muss also mit dem eher weniger optimal eingestellten Bild des LED-Screens durchgeführt werden. Das Testbild, das für die Kontrastmessung benutzt wird, zeigt Schwarz und Weiß gleichzeitig auf einem Bild an. Mit dem Messgerät werden die Leuchtdichtewerte von Schwarz und Weiß gemessen und daraus ergibt sich dann das vorhandene Kontrastverhältnis, das mit den vorgenommenen Einstellungen erreicht werden kann. Für Weiß wurde eine Leuchtdichte von $937,55\text{cd/m}^2$ gemessen und für Schwarz eine Leuchtdichte von $0,12\text{cd/m}^2$. Daraus ergibt sich ein Kontrastverhältnis von 7812,92:1. Im Datenblatt des Herstellers sind keine Angaben zum Kontrastverhältnis zu finden.

Nun werden die nativen Farben des LED-Screens gemessen. Dazu werden die drei Testbilder für die Primärfarben und das Farbbalken-Testbild benötigt.

Vor Beginn der Messung wird mit dem Auge untersucht, ob dieser LED-Screen tatsächlich seine nativen Farben preisgibt oder ob im Controller ein Farbmanagement implementiert ist, dass Mischfarben ausgibt. Die Untersuchung hat ergeben, dass dieser LED-Screen echte native Farben ausgibt. Bei jeder der Primärfarben geben nur die betroffenen Farbpixel Licht ab und bei jeder der Sekundärfarben geben nur die jeweils zwei betroffenen Farbpixel Licht ab. Die mit dem Messgerät aufgenommenen Spektren der sechs Grundfarben bestätigen dies. Beispielsweise weist das Spektrum, das beim grünen Testbild aufgenommen wurde, nur einen Peak im grünen Spektralbereich auf. Andere Spektralbereiche sind im Spektrum nicht vertreten, was darauf hinweist, dass kein weiterer, nicht benötigter Farbpixel Licht abgibt.

Im folgenden Spektrum ist dies noch einmal zu sehen.

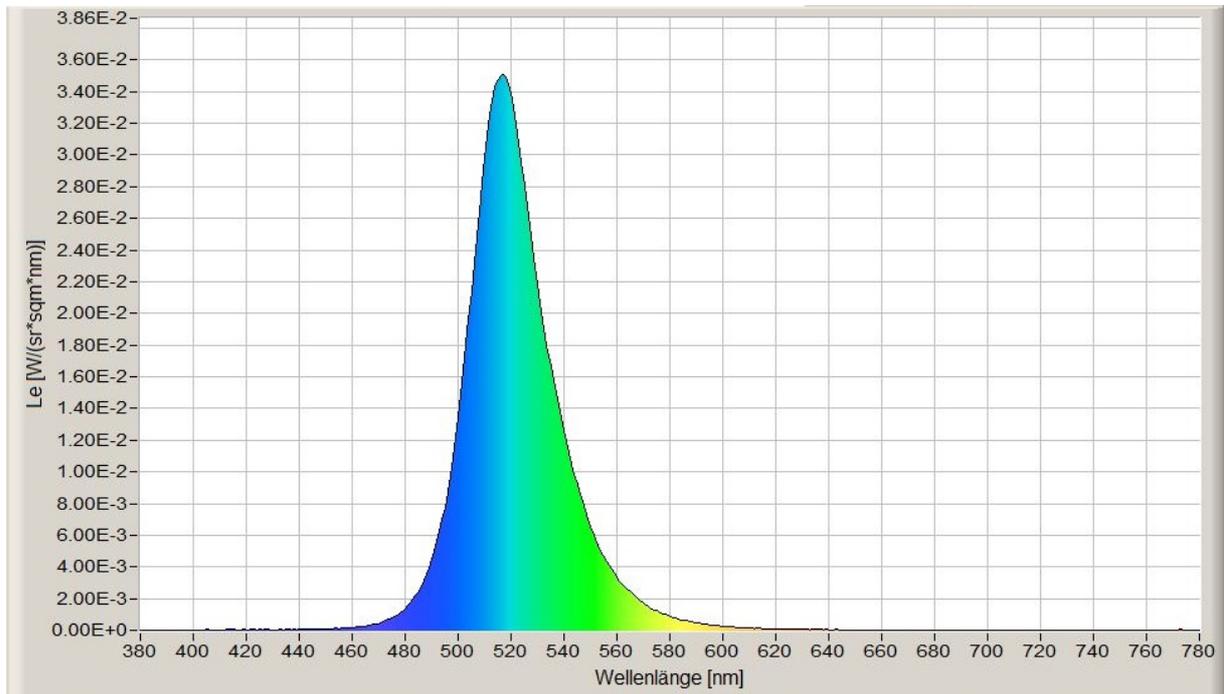


Abbildung 79: Spektrum der nativen LED-Screen-Farbe Grün

Die Spektren der Sekundärfarben weisen dementsprechend nur zwei Peaks in den betroffenen Spektralbereichen auf wie bei der Farbe Magenta.

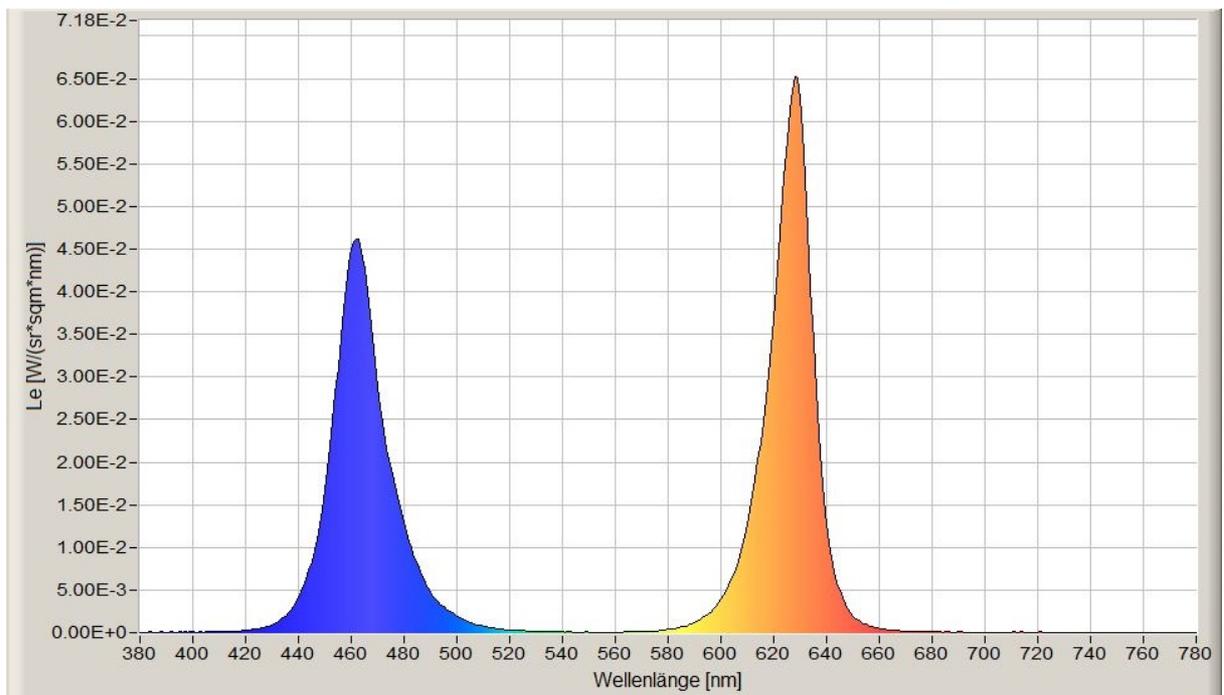


Abbildung 80: Spektrum der nativen LED-Screen-Farbe Magenta

In den folgenden beiden Tabellen sind die xy-Koordinaten und die Leuchtdichtewerte aller nativen gemessenen Farben und die Werte des Zielfarbraumes nach Rec. 709 zu sehen.

Nativ	x	y	Leuchtdichte in cd/m²
Rot	0,6904	0,3092	318,63
Grün	0,1479	0,7169	602,56
Blau	0,1369	0,0512	73,24
Cyan	0,1407	0,2956	650,67
Magenta	0,3620	0,1566	365,59
Gelb	0,4422	0,4963	884,46
Weiß	0,3068	0,3000	948,02

Tabelle 49: Farbwerte und Leuchtdichtewerte der nativen Farben, ROE MC-7H

Rec. 709	x	y	Leuchtdichte in cd/m²
Rot	0,6400	0,3300	196,852718
Grün	0,3000	0,6000	662,225136
Blau	0,1500	0,0600	66,852146
Cyan	0,2250	0,3290	729,077282
Magenta	0,3210	0,1540	263,704864
Gelb	0,4190	0,5050	859,077854
Weiß	0,3127	0,3290	925,93

Tabelle 50: Farbraumes nach Rec. 709 mit den ideal berechneten Leuchtdichtewerten aus dem kalibrierten Weißpunkt, ROE MC-7H

Anhand dieser Tabellen ist zu erkennen, dass sowohl die xy-Koordinaten als auch die Leuchtdichtewerte der gemessenen nativen Farben je nach Farbe mehr oder weniger deutlich von den Zielwerten des Farbraumes nach Rec. 709 abweichen.

Die Leuchtdichtewerte des Zielfarbraums werden mithilfe der Y-Formel für HD-Videosignale berechnet. Die Grundlage für die Berechnung liefert der Leuchtdichtewert des kalibrierten Weißpunktes, der in der Tabelle, die den Farbraum nach Rec. 709 zeigt, bereits aufgeführt wird. Der kalibrierte Weißpunkt wird im Verlauf der Messung und Kalibrierung des LED-Screen in passender Reihenfolge weiter ausgeführt.

Die nächste Grafik zeigt das Farbdreieck der gemessenen nativen Farben und das Farbdreieck des Zielfarbraumes.

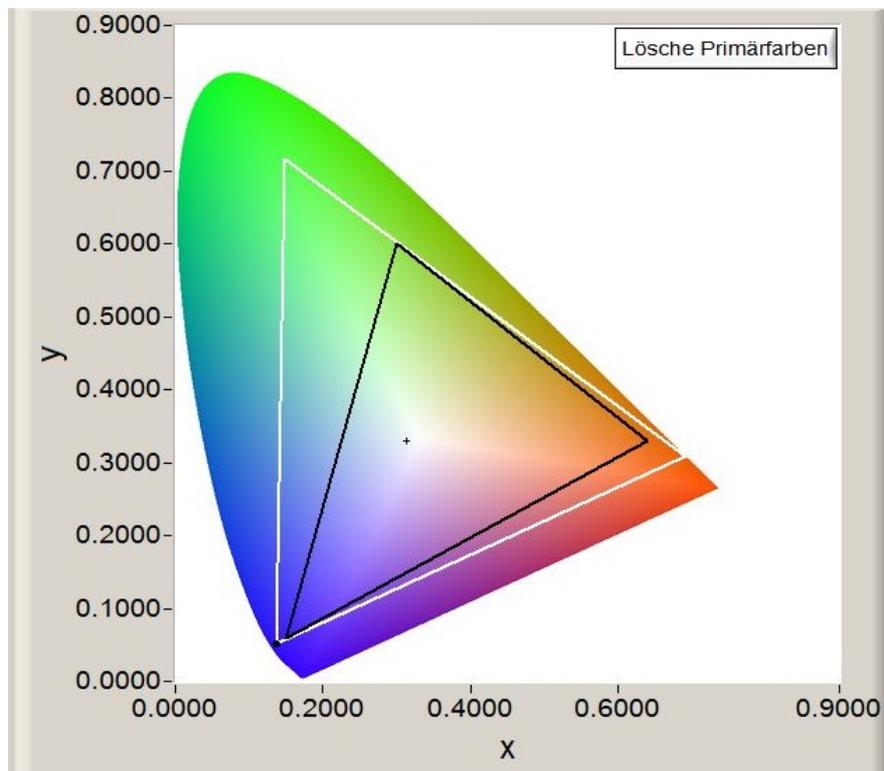


Abbildung 81: Weiß: Farbdreieck der gemessenen nativen Farben des LED-Screens, Schwarz: Farbdreieck des Zielfarbraumes nach Rec. 709

Im Idealfall befindet sich das Farbdreieck des Zielfarbraumes innerhalb der Fläche, die das Farbdreieck der gemessenen nativen Farben umschließt, da durch eine Kalibrierung der Farben nur Farborte innerhalb des nativen Dreiecks erreicht werden können. Alle Farborte, die außerhalb des nativen Farbdreiecks liegen, können auch durch eine Kalibrierung nicht erreicht werden, da das Dreieck den maximal größten Bereich aller erreichbaren Farborte kennzeichnet. Die Zielfarborte von Blau und Grün liegen genau bzw. sehr nahe an den Kanten des nativen Farbdreiecks. Diese Farborte sind theoretisch noch mittels einer Farbkalibrierung zu erreichen.

Mithilfe der Mess-Software „LiVal“ können noch die dominanten Wellenlängen der nativen Farben des ROE MC-7H LED-Screens gemessen werden. Die Ergebnisse sind in folgender Tabelle zu finden.

Nativ	Dom. Wellenlänge in nm
Rot	619,5
Grün	522,3
Blau	466,5
Cyan	489,2
Magenta	-545,7
Gelb	573,3

Tabelle 51: Dominante Wellenlängen der nativen Farben, ROE MC-7H

Es fällt auf, dass sich die dominante Wellenlänge der Farbe Magenta von allen anderen durch das negative Vorzeichen unterscheidet. Das negative Vorzeichen rührt daher, weil es sich bei der Farbe Magenta nicht um eine Spektralfarbe handelt, weshalb eigentlich keine Wellenlänge angegeben werden kann, da diese Farbe nicht im Spektrum zu finden ist. Das Messgerät kann aber trotzdem mithilfe des negativen Vorzeichens eine Angabe machen. Der angegebene Wert kann vielmehr als Komplementärfarbe angesehen werden. Das negative Vorzeichen kennzeichnet die Angabe als Komplementärfarbe und die angegebene Wellenlänge, die Farbe, die zu Magenta komplementär ist.

Da der Hersteller im Datenblatt keine Wellenlängenangaben zu den verwendeten Farbpixeln macht, können die Messwerte auch nicht verglichen werden. Diese Messung gibt also an, welche Wellenlängen die Farbpixel Rot, Grün und Blau momentan besitzen. Momentan ist hier wichtig, da sich die Wellenlänge der Farbpixel beispielsweise durch Alterung oder Verschmutzung ändern kann.

Anschließend an die Messung der nativen Grundfarben des LED-Screens wird die Messung des unkalibrierten Weißpunkts durchgeführt.

Bereits zu Beginn aller Messungen wurde die ähnlichste Farbtemperatur in der Controller-Software auf 6500K gestellt. Mittels der Messung des unkalibrierten Weißpunkts wird nun überprüft, ob der in der Software eingestellte Wert auch am LED-Screen ausgegeben wird oder ob es Abweichungen gibt.

Wichtige Werte, die bei der Messung aufgenommen werden sind die xy-Koordinaten, die Leuchtdichte, die CCT und das Spektrum.

Mithilfe der xy-Koordinaten und den beiden Formeln 7 und 8 zur Berechnung der ähnlichsten Farbtemperatur aus dem Kapitel 5.4. Messgeräte und Farbtemperatur kann die vom Messgerät angegebene CCT noch einmal nachberechnet werden.

In folgender Tabelle sind die wichtigsten Werte festgehalten.

Weißpunkt	Unkalibriert
xy-Koordinaten	
x	0,3068
y	0,3000
Leuchtdichte in cd/m²	948,02
CCT	
Messgerät	7216
Formel 1	7218
McCamy	7204

Tabelle 52: Messergebnisse des unkalibrierten Weißpunktes, ROE MC-7H

Zum Vergleich weisen die xy-Koordinaten vom Weißpunkt des Zielfarbraumes folgende Werte auf.

x: 0,3127

y: 0,3290

Die Tabelle zeigt, dass die gemessenen xy-Koordinaten relativ weit von den Zielwerten entfernt liegen. Aus diesem Grund weist die angegebene ähnlichste Farbtemperatur auch einen ganz anderen Wert als den Zielwert auf. Die Formeln und das Messgerät geben einen Wert um die 7200K für die ähnlichste Farbtemperatur an. Also lässt sich festhalten, dass der in der Software eingestellte Wert nicht vom LED-Screen wiedergegeben wird. Der Angabe der Controller-Software kann also nicht getraut werden.

Die folgende Grafik zeigt das Spektrum des unkalibrierten Weißpunktes.

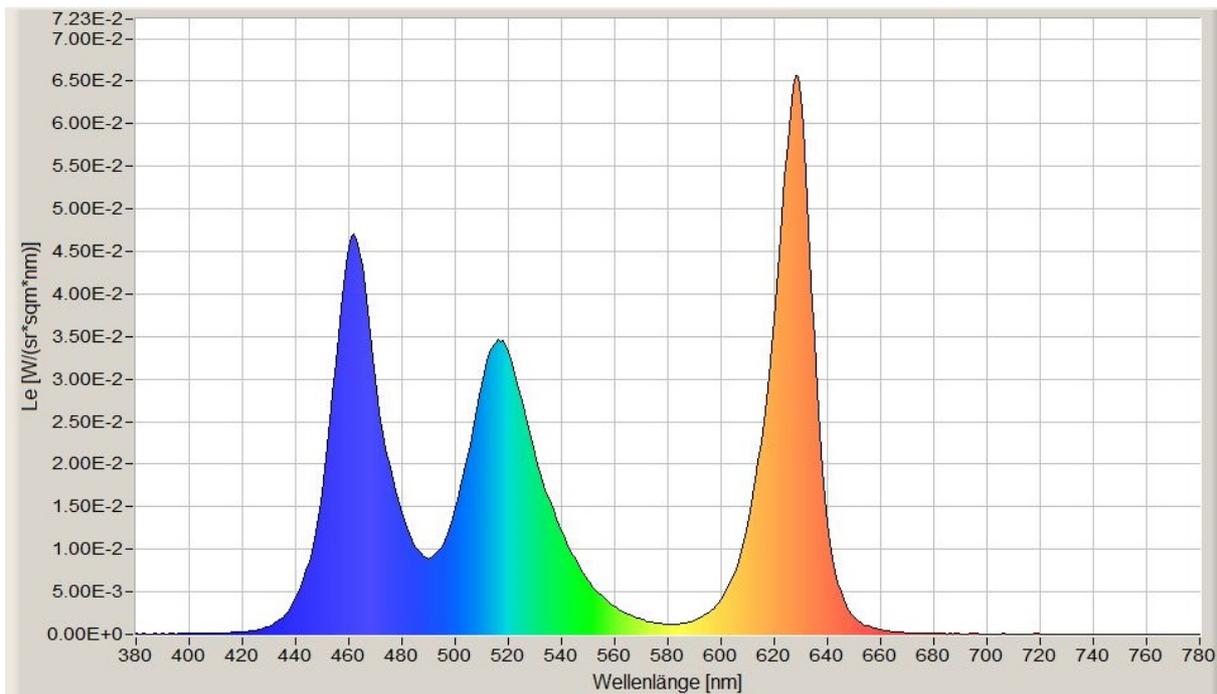


Abbildung 82: Spektrum des unkalibrierten Weißpunktes des ROE MC-7H LED-Screens

Dieses Spektrum zeigt die spektralen Anteile, aus denen das unkalibrierte Weiß mit einer CCT um die 7200K gemischt wird. Es sind drei Peaks zu erkennen von denen einer im blauen Spektralbereich, der andere im grünen Spektralbereich und der letzte im roten Spektralbereich liegt. Diese Peaks rühren von den drei Farbpixeln der SMD-Pixel des LED-Screens her. Anhand der Höhe der Peaks sind die Intensitäten der Farbpixel zu erkennen. Also weist der rote Farbpixel die höchste Intensität auf. Die meisten Helligkeitsinformationen trägt aber der grüne Peak in sich, was daran zu erkennen ist, dass der Videopegel von Grün im Vergleich zu den anderen beiden am höchsten ist.

Dafür, dass es sich um eine eher kühlere ähnlichste Farbtemperatur handelt, ist der Rot-Anteil, anders als erwartet, ziemlich hoch.

Im nächsten Mess-Schritt soll der Gamma-Verlauf und das Verhalten der ähnlichsten Farbtemperatur über die Graustufen des unkalibrierten LED-Screens überprüft werden. Das benötigte Testbild ist das Graustufen-Testbild. Für die Überprüfung des Gamma-Verlaufs werden die Leuchtdichtewerte der einzelnen Graustufen gemessen und für die Überprüfung des Verhaltens der CCT über die Graustufen werden die CCT-Werte des Messgerätes aufgenommen.

Die gemessenen Leuchtdichtewerte der Graustufen werden den berechneten Werten für den idealen Gamma-Verlauf des eingestellten Gamma-Wertes in der Controller-Software von 2,8

gegenübergestellt. Für die Berechnung des idealen Gamma-Verlaufs sind die Formel 9 und die obere und untere Grenze des kalibrierten Weißpunktes bzw. die Leuchtdichtewerte vom kalibrierten Weißpunkt und dem zugehörigen Schwarz nötig. Diese Werte folgen im betreffenden Mess- und Kalibrierschritt.

Die Werte bezüglich des Gamma-Verlaufs sind in folgender Tabelle zu finden.

Videopegel in %	L gemessen in cd/m ² unkalibriert	L ideal in cd/m ²
100	948,02	925,93
92,78	848,62	738,7833677
78,74	678,09	448,4334448
71,52	611,53	333,4821213
28,48	184,99	15,58881752
21,26	130,01	5,012795057
7,22	35,28	0,000235792
0	0	0

Tabelle 53: Gemessene Leuchtdichtewerte der Graustufen im Vergleich zu den Idealwerten, ROE MC-7H

Die gemessenen Leuchtdichtewerte weichen zu den niedrigen Videopegeln hin immer stärker von den ideal berechneten Werten ab. Daraus lässt sich schließen, dass der Gamma-Verlauf des LED-Screens nicht dem Gamma-Verlauf entspricht, der in der Controller-Software eingestellt wurde. Nach der Kalibrierung des Weißpunktes gilt dies noch einmal zu überprüfen. Die ähnlichste Farbtemperatur sollte über die Graustufen im Idealfall einen konstanten Verlauf aufweisen. In der folgenden Tabelle sind die gemessenen Werte den idealen gegenübergestellt.

Videopegel in %	ideale Farbtemperatur in K	gemessene Farbtemperatur in K unkalibriert
100	6504	7189
92,78	6504	7214
78,74	6504	7180
71,52	6504	7186
28,48	6504	7147
21,26	6504	7112
7,22	6504	6879
0	6504	

Tabelle 54: Gemessene CCT-Werte der Graustufen im Vergleich zu den Idealwerten, ROE MC-7H

Für den Videopegel von 0% konnte das Messgerät keinen Wert für die CCT angeben, deshalb ist das betreffende Tabellenfeld frei.

Die gemessenen Werte der ähnlichsten Farbtemperatur liegen alle oberhalb des Zielwertes von 6504K. Der Verlauf ist aber über die meisten Graustufen relativ konstant, da die Schwankungen nicht allzu stark sind. Die größte Abweichung taucht bei dem Videopegel von 7,22% auf. Das Verhalten der ähnlichsten Farbtemperatur ist im Allgemeinen ohne eine Kalibrierung relativ zufriedenstellend.

Nachdem die Messungen des unkalibrierten LED-Screens nun abgeschlossen sind, wird mit der Kalibrierung des LED-Screens fortgefahren. Wie sich bereits feststellen ließ, ist mit vorhandenerm Controller und der zugehörigen Software nur die Kalibrierung des Weißpunktes möglich. Der Farbraum kann nicht kalibriert werden und auch der Gamma-Verlauf und das Verhalten der ähnlichsten Farbtemperatur über die Graustufen können nicht kalibriert werden. Deshalb werden die Farben, der Gamma-Verlauf und die ähnlichste Farbtemperatur über die Graustufen nach der Weißpunktkalibrierung noch einmal überprüft.

Zunächst wird also der Weißpunkt so gut es geht optimiert und an die Zielwerte nach Rec. 709 angepasst. In der Controller-Software werden die RGB-Anteile so lange angepasst und variiert, bis die gemessenen xy-Koordinaten so gut wie möglich an die xy-Koordinaten des Zielfarbraumes nach Rec. 709 angenähert sind. Die Kalibrierung wird mithilfe der xy-Koordinaten durchgeführt, da die Ergebnisse dann genauer sind als mit den Messwerten der CCT. Bereits beim unkalibrierten Weißpunkt hat sich gezeigt, dass die Angabe der CCT je nach verwendeter Formel einen anderen Wert angibt. Außerdem ist die Kalibrierung mit den xy-Koordinaten genauer, da die CCT aus diesen Daten berechnet wird.

Erfahrungsgemäß ist das beste Ergebnis erreicht, sobald die RGB-Balken in der Mess-Software in der Waage liegen.

In folgender Grafik sind die Ergebnisse der Mess-Software für den kalibrierten Weißpunkt zu sehen.

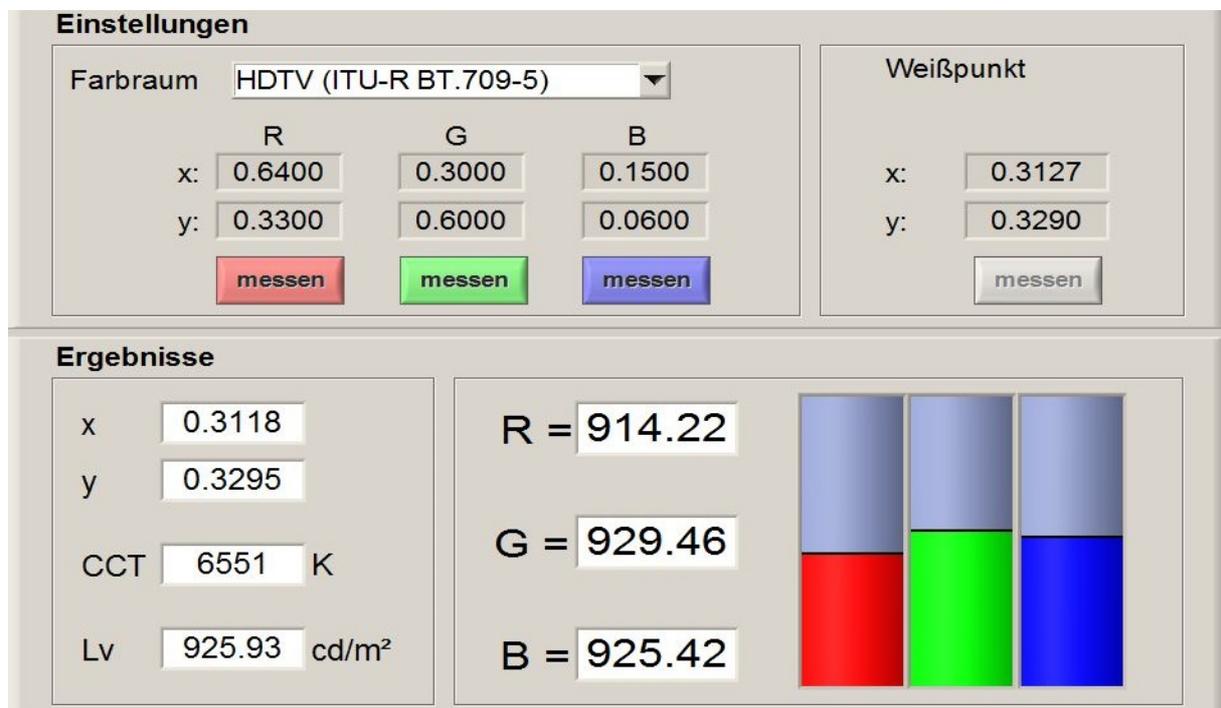


Abbildung 83: Ausgabe der Mess-Software "MoDiCal" für den kalibrierten Weißpunkt des ROE MC-7H LED-Screens

Diese Kalibrierung wird mit den folgenden Einstellungen in der Controller-Software erreicht.

Rot: 245
 Grün: 255
 Blau: 232

Die RGB-Anteile können in 8-bit eingestellt werden. Sie können also Werte zwischen 0 und 255 annehmen.

Die Ergebnisse des kalibrierten Weißpunktes werden in der nachfolgenden Tabelle den Werten des unkalibrierten Weißpunktes gegenübergestellt.

Weißpunkt	Unkalibriert	"Kalibriert"
xy-Koordinaten		
x	0,3068	0,3118
y	0,3000	0,3295
Leuchtdichte in cd/m²	948,02	925,93
CCT		
Messgerät	7216	6551
Formel 1	7218	6545
McCamy	7204	6550

Tabelle 55: Ergebnisse der Weißpunktkalibrierung im Vergleich zum unkalibrierten Zustand, ROE MC-7H

Die xy-Koordinaten des kalibrierten Weißpunktes liegen viel näher an den Zielwerten als die des unkalibrierten Weißpunkts. Die Leuchtdichte hat sich nur etwas verringert und die ähnlichste Farbtemperatur befindet sich auch näher an ihrem Zielwert von 6504K. Die hier aufgeführten Ergebnisse sind die besten, die mit den Kalibrierungsmöglichkeiten der Controller-Software erreicht werden können.

Der Leuchtdichtewert ist für die Berechnung einiger Idealwerte, wie bereits bei einigen Mess-Schritten schon aufgetaucht, wichtig.

Da die Farbraumkalibrierung, die eigentlich vor der Weißpunktkalibrierung durchgeführt werden sollte, mit dem Controller und der Software nicht durchgeführt werden kann, wird der Farbraum des LED-Screens nach der Weißpunktkalibrierung nun noch einmal gemessen, um zu prüfen, ob die Weißpunktkalibrierungen auch Auswirkungen auf den Farbraum hat.

In der folgenden Tabelle sind die Messwerte nach der Weißpunktkalibrierung festgehalten.

"Kalibriert"	x	y	Leuchtdichte in cd/m ²
Rot	0,6908	0,3091	280,93
Grün	0,1468	0,7179	605,63
Blau	0,1369	0,0514	57,32
Cyan	0,1412	0,3381	656,80
Magenta	0,3825	0,1656	328,48
Gelb	0,4266	0,5079	884,95
Weiß	0,3118	0,3295	925,93

Tabelle 56: Farbwerte und Leuchtdichtewerte der Farben nach der Weißpunktkalibrierung, ROE MC-7H

„Kalibriert“ ist in Anführungszeichen geschrieben, da der Farbraum nicht kalibriert wurde, sondern nur der Weißpunkt.

In der folgenden Tabelle sind noch einmal die Vergleichswerte des Zielfarbraumes nach Rec. 709 aufgeführt.

Rec. 709	x	y	Leuchtdichte in cd/m ²
Rot	0,64	0,33	196,852718
Grün	0,3	0,6	662,225136
Blau	0,15	0,06	66,852146
Cyan	0,225	0,329	729,077282
Magenta	0,321	0,154	263,704864
Gelb	0,419	0,505	859,077854
Weiß	0,3127	0,329	925,93

Tabelle 57: Farbraumes nach Rec. 709 mit den ideal berechneten Leuchtdichtewerten aus dem kalibrierten Weißpunkt, ROE MC-7H

Die Leuchtdichtewerte der Farben weichen mal mehr und mal etwas weniger von den berechneten Zielwerten ab. Die Weißpunktkalibrierung konnte also nicht bewirken, dass die Leuchtdichtewerte der Farben sich auf die Idealwerte kalibrieren.

Die xy-Koordinaten weichen auch nach der Weißpunktkalibrierung noch von den Zielwerten ab. Wie sehr sich die Abweichungen verändert haben ist in der folgenden Tabelle zu sehen, die die Abweichungen in Absolutwerten der gemessenen Werte vor und nach der Weißpunktkalibrierung zeigt.

Abweichung	Δx	Δy	Δ Leuchtdichte in cd/m ²
Rot	0,0004	0,0001	37,70
Grün	0,0011	0,0010	3,07
Blau	0,0000	0,0002	15,92
Cyan	0,0005	0,0425	6,13
Magenta	0,0205	0,0090	37,11
Gelb	0,0156	0,0116	0,49
Weiß	0,0050	0,0295	22,09

Tabelle 58: Abweichung der Farb- und Leuchtdichtewerte des LED-Screens nach der Weißpunktkalibrierung, ROE MC-7H

An dieser Tabelle ist zu sehen, dass die Abweichungen ja nach Farbe unterschiedlich groß sind, was daran liegt, dass sich die xy-Koordinaten auf die CIE Farbtafel beziehen, die nicht gleichabständig ist. Einige Farben erlauben größere Toleranzen für die Abweichung als andere. Insgesamt haben sich die xy-Koordinaten aber nicht sehr durch die Weißpunktkalibrierung geändert bzw. hat die Weißpunktkalibrierung nicht bewirkt, dass sich die xy-Koordinaten ihren Zielwerten angenähert haben.

Da die Weißpunktkalibrierung kaum Auswirkungen oder keine hilfreichen Auswirkungen auf den Farbraum des LED-Screens bezüglich der Annäherung auf den Zielfarbraum nach Rec. 709 hat, wäre die Möglichkeit der Farbkalibrierung mithilfe des Controllers eine Notwendigkeit.

In der folgenden Grafik soll nun noch überprüft werden, ob es theoretisch mithilfe dieser Farbkalibrierung möglich wäre, die Farben des Farbraumes nach Rec. 2020 zu erreichen.

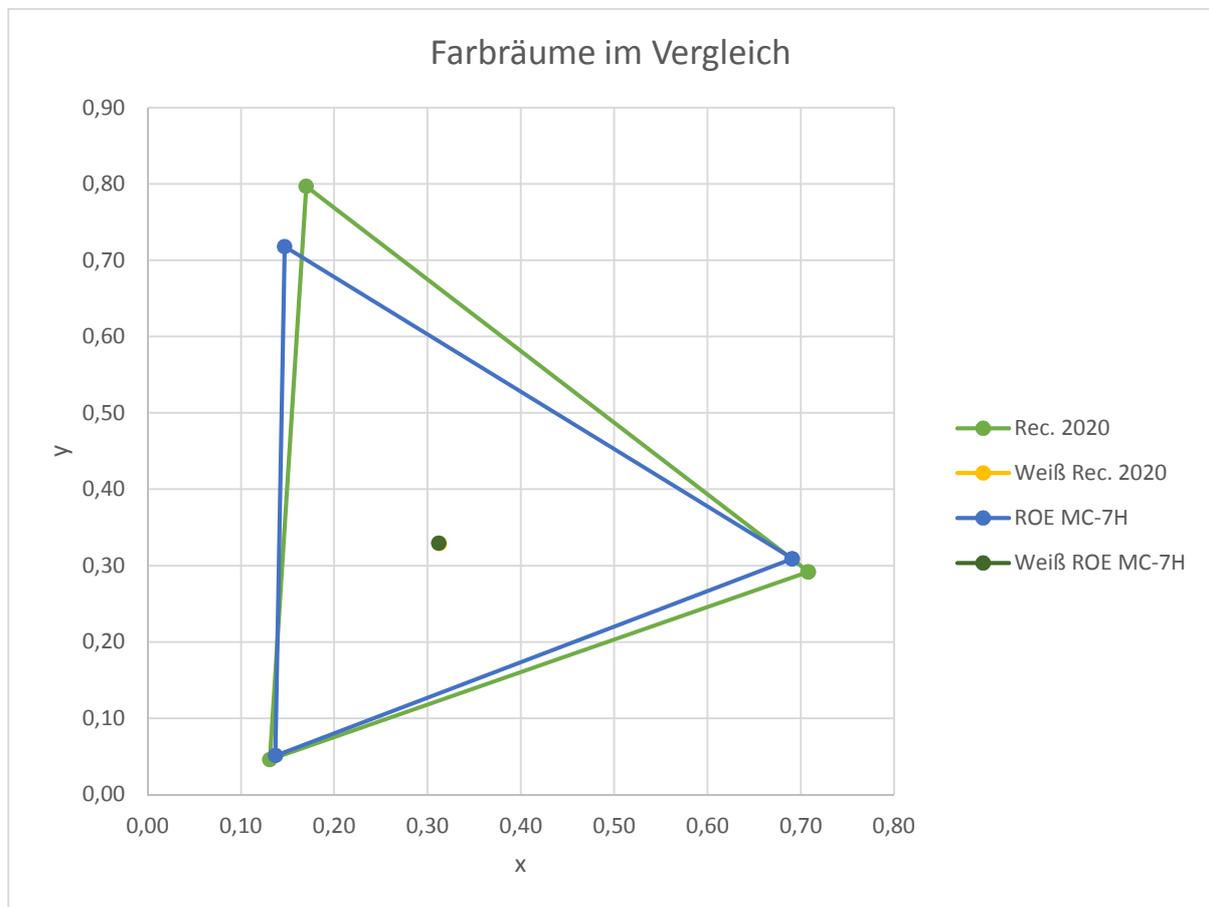


Abbildung 84: Farbdreieck nach Rec. 2020 und des ROE LED-Screens im Vergleich

Diese Grafik zeigt direkt an, dass es mit einer Farbkalibrierung nicht möglich wäre, den UHD Farbraum nach Rec. 2020 zu erreichen, da das Farbdreieck des Farbraumes nach Rec. 2020 um einiges größer ist.

Der Gamma-Verlauf und das Verhalten der ähnlichsten Farbtemperatur über die Graustufen werden nun auch noch einmal überprüft und gemessen. Mithilfe des Graustufentestbildes werden wieder die Leuchtdichtewerte und die CCT-Werte der Graustufen aufgenommen.

In der folgenden Grafik sind dem ideal berechneten Gamma-Verlauf für ein Gamma von 2,8 die Gama-Kurven des LED-Screens vor und nach der Weißpunktcalibrierung gegenübergestellt.

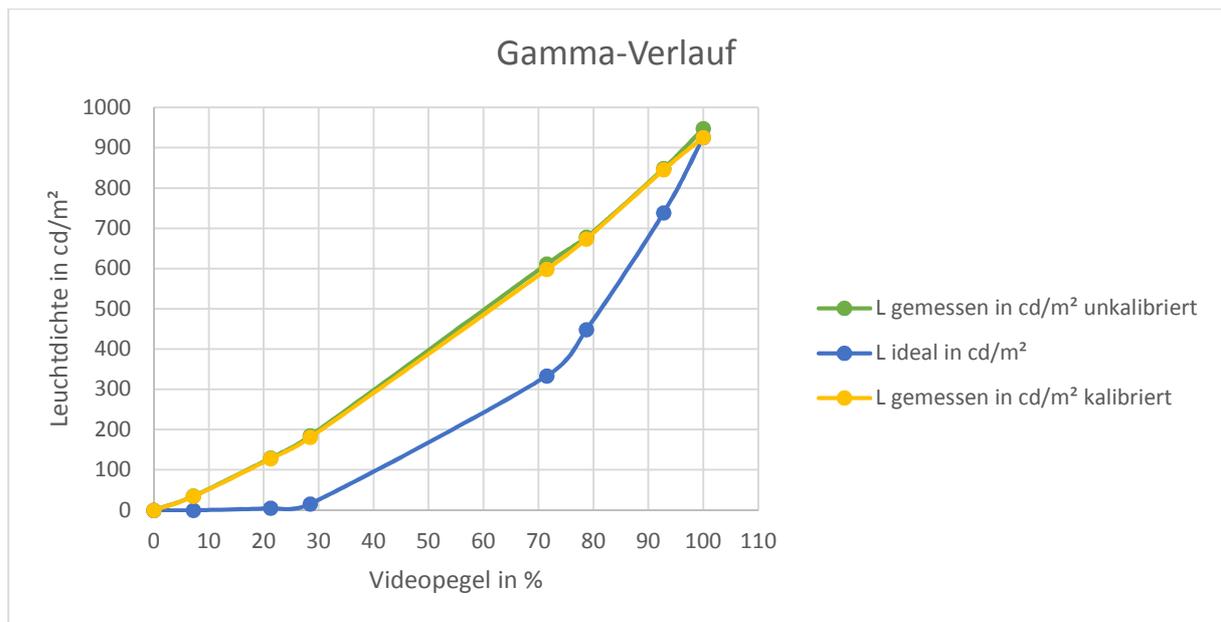


Abbildung 85: Gamma-Verläufe des ROE MC-7H LED-Screens im Vergleich

Diese Grafik zeigt, dass der LED-Screen weder vor noch nach der Weißpunktcalibrierung (grüne und gelbe Kurve) dem ideal berechneten Gamma-Wert des eingestellten Gammas von 2,8 in der Controller-Software folgt. Die Kurven der gemessenen Gamma-Werte weisen eher den Verlauf einer Geraden auf bzw. einen Verlauf von einem Gamma-Wert von 1,0. Es lässt sich also erkennen, dass der LED-Screen nicht den eingestellten Gamma-Wert wiedergibt. Dies ließ bereits bei der Analyse der Controller-Software vermuten, da sich das Graustufen-Testbild bei unterschiedlichen Gamma-Werten nicht verändert hat. Im Allgemeinen funktionierten die Gamma-Einstellung und die Übertragung auf den LED-Screen in diesem System nicht korrekt. Die Kalibrierung auf den hier angegebenen idealen Gamma-Verlauf würde nicht sinnvoll sein, da nicht klar ist, wie das Bild auf dem LED-Screen mit einem Gamma von 2,8 tatsächlich aussehen würde. Eine solche Kalibrierung wäre blind. Trotzdem sollte es die Möglichkeit geben, den Gamma-Verlauf des LED-Screens kalibrieren zu können, allerdings unter anderen Bedingungen. Die wichtigste Bedingung ist, dass sich das Gamma tatsächlich über den Controller einstellen lässt und je nach Einstellungen Veränderungen auf dem LED-Screen zu sehen sind.

In der nächsten Grafik ist das Verhalten der ähnlichsten Farbtemperatur über die Graustufen aufgetragen. Das Verhalten vor und nach der Weißpunkt kalibrierung und das ideale Verhalten könne miteinander verglichen werden.

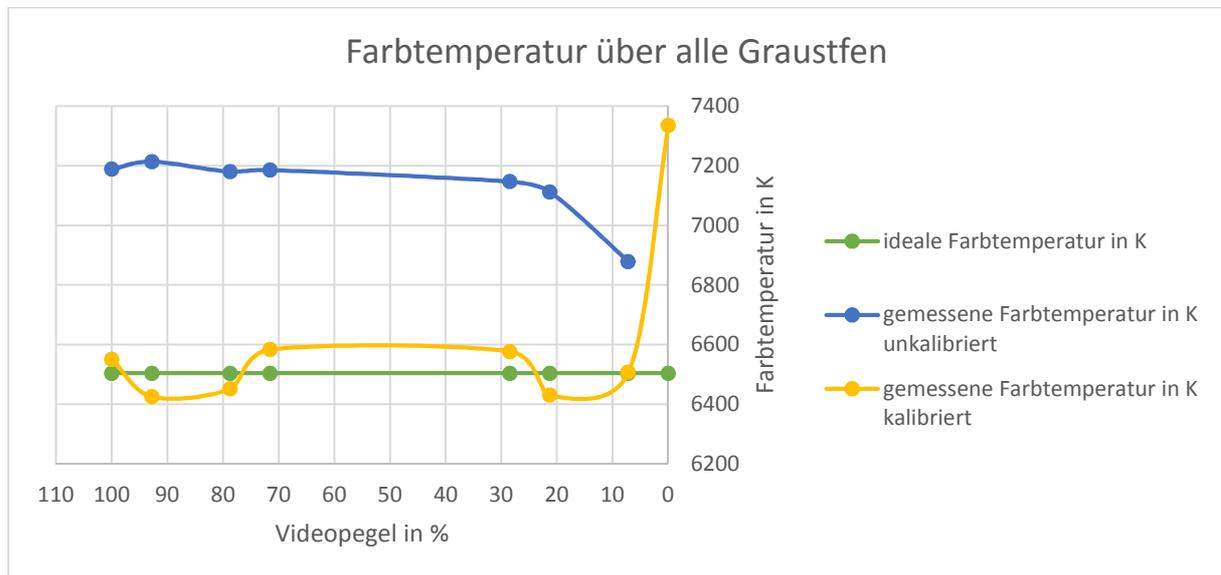


Abbildung 86: Vergleich der Änderung der CCT über die Graustufen, ROE MC-7H LED-Screen

Die grüne Kurve zeigt den idealen Verlauf der CCT über die Graustufen. Dieser Verlauf ist konstant, das heißt, dass sich die ähnlichste Farbtemperatur über die Graustufen nicht verändern sollte. Die blaue Kurve zeigt das Verhalten der CCT vor der Weißpunkt kalibrierung und gelbe zeigt das Verhalten danach. Vor der Weißpunkt kalibrierung wies die ähnlichste Farbtemperatur über die Graustufen weniger Schwankungen auf als danach. Woran dies liegt ist nicht klar. Für den Videopiegel von 0% konnte das Messgerät bei der Messung vor der Weißpunkt kalibrierung keinen Wert angeben.

Durch die Weißpunkt kalibrierung wurde die ähnlichste Farbtemperatur im Allgemeinen an den Zielwert angenähert, aber der Verlauf über die Graustufen ist nicht besser, sondern eher schlechter geworden. Aus diesem Grund würde die Kalibrierung der CCT über die Graustufen Sinn machen, allerdings erlaubt die vorhandene Software dies nicht.

Auch die Kontrastmessung wird nach der Kalibrierung des Weißpunktes noch einmal durchgeführt. Weiß hat nun einen Leuchtdichtewert von 882,03cd/m² und Schwarz hat einen Wert von 0,09cd/m². Daraus ergibt sich ein Kontrastverhältnis von 9800,33:1. Das Kontrastverhältnis hat sich also nach der Weißpunkt kalibrierung noch einmal erhöht. Dies könnte an dem besseren bzw. niedrigeren Schwarzwert liegen. Wie bereits erwähnt gibt es vom Hersteller keine Angaben zum Kontrastverhältnis.

Auch die Betrachtungswinkelabhängigkeit wird noch untersucht, auch wenn diese nicht gemessen wird, sondern mit dem Auge beurteilt wird. Am besten eignet sich dafür ein komplett weißes Testbild, da bei Weiß alle drei Farbpixel Licht abgeben.

Die Winkel, unter denen der Screen betrachtet wurde, können hier nicht angegeben werden, deshalb werden die Richtungen angegeben, aus denen die Betrachtung dann relativ steil war. Der Screen wurde von oben, von unten und von links und rechts betrachtet. Die Ergebnisse sind in folgender Tabelle eingetragen.

Betrachtungsrichtung	Wirkung
Oben	Gelblich bis rötliche Verfärbung je steiler der Winkel wird
Unten	Hellblaue bis blaue Verfärbung je steiler der Winkel wird
Links	Nach oben hin verfärbt sich der Screen blau und nach unten hin rot
Rechts	Nach oben hin verfärbt sich der Screen blau und nach unten hin rot

Tabelle 59: Beschreibung der Betrachtungswinkelabhängigkeit, ROE MC-7H

Die Verfärbungen in Abhängigkeit zum Betrachtungswinkel bzw. zur Betrachtungsrichtung sind bedingt durch die Anordnung der Farbpixel in den SMD-Pixeln. Bei diesem Screen befinden sich die Farbpixel untereinander. Der oberste Farbpixel ist rot, gefolgt von einem grünen Pixel und abschließend kommt der blaue Pixel. Wird der LED-Screen also von oben betrachtet, so werden die roten Pixel verdeckt, weshalb die Mischfarbe Cyan entsteht. Wenn der Winkel steiler wird, so wird auch der grüne Farbpixel mit verdeckt und der Screen färbt sich blau, da nur doch dieser Farbpixel zu sehen ist. Bei der Betrachtung von unten werden also die grünen Farbpixel verdeckt. Die blauen Farbpixel des benachbarten SMD-Pixels werden nicht ganz so stark verdeckt, weshalb sich der LED-Screen dann ins Magenta verfärbt. Bei zunehmender Steilheit werden dann auch die blauen Pixel verdeckt und der Screen ist rötlich. Eine grünliche Verfärbung tritt in keiner Richtung auf, was wohl daran liegt, dass sich der grüne Farbpixel in der Mitte der anderen beiden Farbpixel befindet.

Die Beurteilung der Winkelabhängigkeit wurde in einem sehr geringen Abstand zum LED-Screen vorgenommen. Es gilt umso geringer der Betrachtungsabstand zum Screen, desto stärker ist die Winkelabhängigkeit.

Auf dem beigefügten Datenträger befindet sich das Hersteller Datenblatt zu diesem LED-Screen.

11.2. Gegenüberstellung der LED-Screens

Gemessen wurden vier LED-Screens, von denen jeweils zwei Screens mit ähnlichem Pixel Pitch gegenübergestellt werden. Es handelt sich dabei immer um ein teures Produkt und um ein günstigeres. Anhand der Messungen sollte festgestellt werden, ob die teuren Produkte auch die besseren Ergebnisse liefern. Der Lighthouse X3 LED-Screen wird mit dem Unilumin RT3.9 gegenübergestellt und der Hibino 6mm wird dem ROE MC-7H gegenübergestellt.

Alle vier LED-Screens haben gemeinsam, dass keine vollständige Kalibrierung des Screens mit Weißpunkt-Kalibrierung, Farbkalibrierung, Kalibrierung des Gamma-Verlaufs und die Kalibrierung der Farbtemperatur über die Graustufen durchgeführt werden konnte. Bei allen konnte nur die Kalibrierung des Weißpunktes also der Weißabgleich vorgenommen werden und es wurde dann überprüft, ob der Weißabgleich auch weitere (positive) Auswirkungen beispielsweise auf den Farbraum oder den Gamma-Verlauf hat.

Lighthouse X3 und UNilumin RT3.9:

Die optische Untersuchung des Betrachtungswinkels hat ergeben, dass der Lighthouse LED-Screen wesentlich winkelabhängiger ist als der Unilumin Screen, obwohl im Hersteller-Datenblatt des Lighthouse Screens größere Betrachtungswinkel als bei dem Unilumin Screen angegeben sind.

Im unkalibrierten Zustand macht der Unilumin Screen optisch einen schlechteren Eindruck, da ein relativ starker Farbstich über dem gesamten Screen vorliegt. Nach der Kalibrierung beider LED-Screens macht der Unilumin Screen dann aber einen besseren optischen Eindruck, sogar einen besseren als der Lighthouse Screen. Das liegt daran, dass der Unilumin Screen alle Graustufen gut darstellen kann, sodass alle Graustufen gut voneinander unterschieden werden können. Der Lighthouse Screen hingegen kann nicht alle Graustufen darstellen, da einige der Graustufen besonders im hellen Bereich nicht voneinander zu unterscheiden sind. Ein weiterer Unterschied liegt darin, dass der Unilumin Screen im Gegensatz zum Lighthouse Screen seine tatsächlich nativen Farben anzeigt. Im Lighthouse Produkt ist ein Farbmanagement implementiert, welches aber nicht im Datenblatt kundgetan wird. Der Lighthouse Screen besitzt ein besseres Farbdreieck als der Unilumin Screen, denn das Farbdreieck ist so groß und gut auf der CIE Farbtabelle gelegen, dass der Zielfarbraum vollends umschlossen wird. Dies könnte vermutlich an dem Farbmanagement liegen. Das Farbdreieck des Unilumin Screens schneidet das Farbdreieck des Zielfarbraumes, weshalb einige Farborte im Blauen auch durch eine Farbkalibrierung nicht erreicht werden können.

Durch das interne Farbmanagement des Lighthouse Screens können zwar die nativen Farben nicht preisgegeben werden aber es wird ein besserer Farbraum erzielt.

Auch im Gamma-Verlauf unterscheiden sich diese beiden LED-Screens voneinander. Der Lighthouse Screen gibt in etwa den Gamma-Verlauf des Gamma-Wertes, der in der Software

eingestellt wurde, wieder. Die Gamma-Verläufe vor und nach der Kalibrierung des Unilumin Screens stimmen beide ungefähr überein aber nicht mit dem des eingestellten Gama-Wertes. Die Übertragung des Gamma-Wertes zwischen Controller und LED-Screen funktioniert bei dem Unilumin Screen also nicht 1:1.

Die Controller-Softwares beider Screens sind in etwa gleichwertig, da es bei beiden ungefähr dieselben Einstellmöglichkeiten gibt.

Was den Farbraum und den Gamma-Verlauf betrifft liefert das hochwertige Produkt der Lighthouse X3 LED-Screen bessere Ergebnisse, allerdings ist der optische Eindruck des günstigeren Produktes dem Unilumin RT3.9 besser. Für eine Entscheidung zwischen diesen beiden LED-Screen muss aufgrund der Anwendung abgeschätzt werden welcher Screen sich besser eignet. Dem ist hinzuzufügen, dass der optische Eindruck aber eine höhere Priorität hat und haben sollte als die Ergebnisse einer Messung.

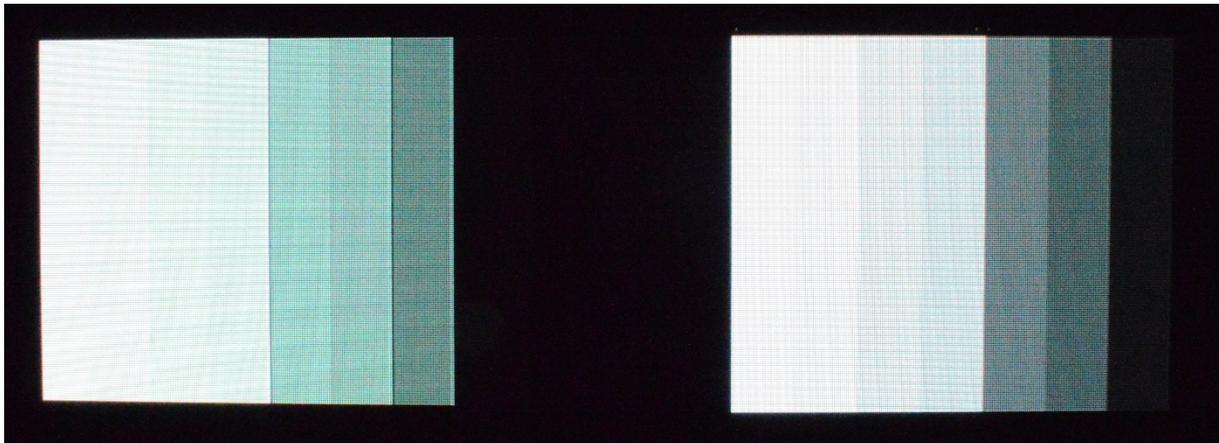


Abbildung 87: Foto beider LED-Screens nach der Kalibrierung, Links: Lighthouse X3, Rechts: Unilumin RT3.9

Hibino 6mm und ROE MC-7H:

Diese beiden LED-Screens weisen ein ähnliches Verhalten in ihrer Winkelabhängigkeit auf. Es ist schwer bis gar nicht auszumachen, welcher der beiden Screens stärker winkelabhängig ist.

Auch der weitere optische Eindruck der beiden Screens ist sehr ähnlich, da beide Screens das Graustufen-Testbild nicht zufriedenstellen darstellen. Beide Screens haben besonders bei der Wiedergabe der hellen Graustufen Probleme, da sich diese kaum voneinander unterscheiden lassen.

Bei LED-Screens zeigen ihre nativen Farben an. Das Farbdreieck des Hibino Screens schneidet das Farbdreieck des Zielfarbraumes leicht im blauen Bereich. Einige blaue Farben könnten dadurch bei einer Farbkalibrierung schwieriger zu erreichen sein. Das Farbdreieck des ROE Screens ist etwas größer, weshalb das Farbdreieck des Zielfarbraumes gerade so innerhalb der Grenzen liegt.

Ebenfalls haben beide Screens Probleme bei der Wiedergabe des eingestellten Gamma-Wertes. Die Gamma-Verläufe beider Screens entsprechen nicht dem Verlauf der eingestellten Werte. Bei dem Hibino Screen könnte man sagen, dass der Gamma-Verlauf eher einem linearen Verlauf nahekommt und bei dem ROE Screen sind tatsächlich fast Geraden vorhanden, die zu einem Gamma-Wert von 1.0 passen würden.

Insgesamt sind diese beiden LED-Screens in etwa gleich zu bewerten. Der Hibino LED-Screen ist aber aufgrund seines Controllers und der zugehörigen Software etwas besser als der ROE MC-7H, da viel mehr Einstellmöglichkeiten geboten werden und da der Controller-Software des ROE Screens einige wesentliche Einstellmöglichkeiten fehlen.

Die Messung zeigt, dass nicht unbedingt die teuersten Produkte auch diejenigen sind, mit denen ein besseres Bild erreicht wird oder bessere Einstellungen vorgenommen werden können. Einige günstigere Produkte liefern ebenso gute optische Ergebnisse und können auch über eine Anzahl von Einstellreglern verfügen.

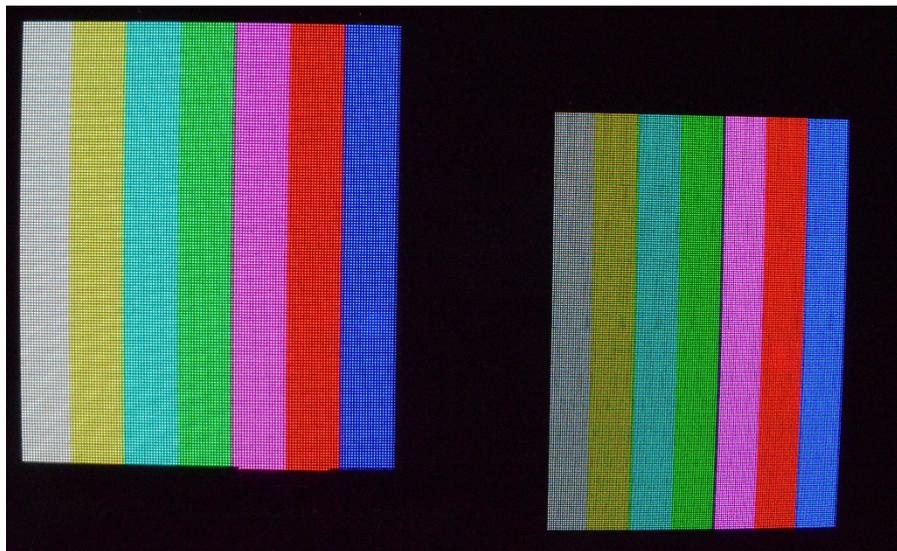


Abbildung 88: Foto beider LED-Screens nach der Kalibrierung, Links: ROE MC-7H, Rechts: Hibino 6mm

12. Fazit

Die Messungen der vier LED-Screen waren besonders wegen der Controller und der Controller-Softwares für das Farbmanagement von LED-Screens interessant.

Es konnte festgestellt werden, dass einiger Controller ein internes Farbmanagement besitzen müssen, da der Farbraum mithilfe von Farbmischung angepasst wurde. Aber es gibt genauso Controller, die kein automatisches oder verdecktes Farbmanagement eingebaut haben. Je nachdem welche Einstellmöglichkeiten vorliegen, kann überhaupt von einem Farbmanagement gesprochen werden. Einige Controller besitzen viele Einstellmöglichkeiten mit denen beispielsweise der Weißpunkt angepasst werden und Farben verändert werden können. Das Vorhandensein kann aber nicht mit Funktionalität gleichgestellt werden, denn einige Controller bieten scheinbar Einstellmöglichkeiten an, die nicht verwendet werden können oder die nicht so funktionieren, wie sie sollten.

Insgesamt hat sich herausgestellt, dass ein vollwertiges manuelles Farbmanagement nicht mit den verwendeten Controllern realisiert werden kann. Im Vergleich zu einigen Consumer TV-Geräten oder Smart TVs sind die LED-Screens mit ihren Controllern unterlegen. Bei TV-Geräten sind die Einstellungen der Helligkeit, des Kontrasts, der Sättigung und des Gammas Standard. Bei einigen LED-Controllern liegen nicht alle dieser Einstellmöglichkeiten vor. Zusätzlich zu diesen Standard-Einstellungen ist es möglich die Displays tatsächlich zu kalibrieren, da ein Farbmanagement vorhanden ist. Meistens kann die Entscheidung getroffen werden, ob das Farbmanagement automatisch ablaufen soll, nach einigen Voreinstellungen oder manuell. Wenn sich für manuell entschieden wird können ein Weißabgleich und Farbanpassungen durchgeführt werden. Teilweise wird auch die Möglichkeit geboten den Weißabgleich für mehrere Grauwerte durchzuführen.

In der heutigen Praxis wird sich mit einem externen Gerät Abhilfe verschaffen. Bei diesem Gerät handelt es sich um einen „Color Corrector“, also um ein Gerät, mit dem die Farben angepasst werden können. Ein Beispiel für solch ein Gerät stellt der „HD/SD Advanced Color Corrector“ von FOR-A dar, der beim NDR seine Verwendung findet. Aussehen tut dieses Gerät so ähnlich wie einige LED-Controller und es besitzt ebenfalls eine Software zur Ansteuerung.



Abbildung 89: Color Corrector von FOR-A

Es gibt noch einige Zusatzgerät mit diversen Drehreglern.

Mit diesem Gerät ist es möglich 12 Farben anzupassen. Außerdem kann der Schwarzwert angepasst werden und es kann zwischen drei verschiedenen Korrektur-Modi gewählt werden: Balance, Differential, Sepia. Im „Balance“-Modus kann der Weißabgleich durch die Anpassung der RGB-Anteile durchgeführt werden. Der „Differential“-Modus liefert die Möglichkeit Farbe anzupassen und zu korrigieren, ohne dass sich der Weißabgleich ändert. Und der „Sepia“-Modus erlaubt einfarbige Effekte.

Des Weiteren sind ein Vectorskop und ein Waveform-Monitor zur Messung des anliegenden Videosignals implementiert, die eine Farbkalibrierung vereinfachen.

Mit solch einem Zusatzgerät kann bei den meisten LED-Screens erst von einem Farbmanagement gesprochen werden.

Es entsteht die Idee die Funktionalität der vorhandenen LED-Controller zu überdenken und Die Controller in gewisser Weise zu vereinheitlichen. Vom Prinzip können LED-Screen mit TV-Geräten, Displays und Projektionen gleichgestellt werden, da alle den Zweck besitzen Videodaten wiederzugeben. Aus diesem Grund könnten die LED-Controller ähnlich wie TV-Geräte funktionieren. Es sollten alle Einstellmöglichkeiten vorhanden sein und es könnte ein Kalibrierungsmenü als Auswahloption implementiert werden. Durch dieses Kalibrierungsmenü soll der Benutzer Schritt für Schritt durch die verschiedenen Bildeinstellungen und Kalibrierungen geführt werden. Zu jedem Schritt sollen geeignete Testbilder zur Verfügung stehen mit dessen Hilfe die optimalen Anpassungen vorgenommen werden können.

Bei der Recherche zu dieser Arbeit ist aufgefallen, dass in keiner Fachzeitschrift der Veranstaltungsbranche Testberichte über LED-Screen zu finden waren. Diese Zeitschriften enthielte aber in jeder Ausgabe etliche Testberichte zu Lautsprechern, Endstufen, Equalizern etc. Im Audiobereich scheinen Testberichte und Messungen also Standard zu sein.

Weshalb das im Videobereich nicht so ist, ist nicht ganz klar. Man könnte vermuten, dass es an der geringeren Auflösung des Auges im Vergleich zu dem hochauflösenden Gehör liegen könnte. Vielleicht liegt es auch daran, dass die Nachfrage nicht da ist. Allerdings könnten solche Testberichte sehr hilfreich sein, um eine Kauf- oder Leihentscheidung zu treffen. Denn wie die Messungen und Analysen der Controller zeigen, sind die wichtigen und interessante Angaben nicht im Herstellerdatenblatt zu finden. Wie sonst, wenn nicht mit Testberichten, sollten die Nutzer solche Informationen erhalten können.

13. Ausblick

In der gängigen Praxis wird die Kalibrierung von LED-Screens auch im Zusammenspiel mit anderen Anzeigemedien optisch über das menschliche Auge vorgenommen. Da die Messtechnik viel genauer ist und sich nicht wie das menschliche Auge adaptieren kann, ist zu überlegen, ob in Zukunft Kalibrierungen mithilfe von Messtechnik und speziellen Geräten autonom durchgeführt werden. Dies hätte auch zum Vorteil, dass nicht nur eine Hand voll Experten in der Lage ist LED-Screens gut und in kurzer Zeit zu kalibrieren, sondern dass eine Vielzahl von geeignetem Fachpersonal in der Lage wäre, nur durch die Bedienung der Geräte, exakte Kalibrierungen durchzuführen.

Die Entwicklung eines solchen Gerätes, das autonom diverse Messungen und anschließend Kalibrierungen durchführt, würde eine wesentliche Vereinfachung und Erleichterung und auch Reproduzierbarkeit zur heutigen Praxis darstellen.

Auch der Alterungsprozess der LEDs könnte in so ein Gerät mit einbezogen werden. Aufgrund von Alterung kann es zu Weißpunkt und Farbverschiebungen kommen, was an dem Helligkeitsverlust liegt. Besonders blaue LEDs verlieren im Vergleich zu den grünen und roten am schnellsten an Helligkeit. Genau dies könnte in dem Gerät implementiert sein, wodurch auf solch ein Verhalten des LED-Screens gut reagiert werden kann.

14. Eigenständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Bachelor-Thesis mit dem Titel „Farbmanagement von LED-Screens“ selbstständig 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 Angaben der Quelle kenntlich gemacht.

Tina Trömmel

15. Danksagung

Zunächst möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Roland Greule für die Unterstützung bedanken und dafür, dass er sich als Erstprüfer zur Verfügung gestellt hat. Des Weiteren möchte ich mich auch bei meinem Zweitprüfer Herrn Dipl.-Ing. Matthias Wilkens für seine Unterstützung, seine Zeit und den regelmäßigen Austausch bedanken.

Bei Herrn Olaf Böhme, Herrn Leif-Bendix Botte und Herrn Alex Fischer der Firma PRG möchte ich mich für das Ermöglichen einer mehrtägigen LED-Screen Messung und die tatkräftige Unterstützung dabei bedanken.

Auch bei Herrn Nils Stüvecke der Firma Neumann&Müller möchte ich mich für das Möglichmachen einer LED-Screen Messung bedanken.

Außerdem bedanke ich mich bei Herrn Wilfried Kresiment für interessante Informationen zur Praxis und für die Kontaktvermittlung.

Herrn Frank Foerster und Herrn Christian Tesche der Firma TFN danke ich für weitere Informationen und ihre Unterstützung.

Zu guter Letzt bedanke ich mich bei meinen Eltern Anja Trömmel und Nico Trömmel, die mich in der gesamten Zeit meines Studiums sehr unterstützt haben.

16. Literaturverzeichnis

- DIN 5032 Teil 9 – Lichtmessung. Messung der lichttechnischen Größen von inkohärent strahlenden Halbleiterlichtquellen, 2005
- DIN 5033 Teil 8 – Farbmessung. Messbedingungen für Lichtquellen, 1982
- EBU-Tech 3320: User requirements for Video Monitors in Television Production, Version 3.0, Oktober 2014
- EBU-Tech 3321: EBU guidelines for Consumer Flat Panel Displays (FPDs), September 2007
- EBU-Tech 3325: Methods for the Measurement of the performance of Studio Monitors, September 2008
- Fluch, Detlef: Technische Grundlagen für Mediengestalter, Handbuch der Audio- und Videotechnik, Asept Verlag, 4., erweiterte Auflage, 2010
- Greule, Roland: Licht und Beleuchtung im Medienbereich, Carl Hanser Verlag, 2015
- Heinz, Roland (Philips Lighting Academy): Grundlagen von Licht und Beleuchtung, 2009
- Marchesi, Jost J.: Handbuch der Fotografie, Band 3, Farbtheorie und Farbmetrik; Farbumkehrtechnik, Negativ-Positiv- und Direkt-Positivtechnik; Digitale Fotografie, Verlag Photographie, 1. Auflage, 1998
- Recommendation ITU-R BT.1886: Reference electro-optical transfer function for flat panel displays used in HDTV studio production, 2011
- Recommendation ITU-R BT.2020-2: Parameter values for ultra-high definition television systems for production and international programme exchange, 2015
- Recommendation ITU-R BT.709-6: Parameter values for the HDTV standards for production and international programme exchange, 2015
- Ris, Hans Rudolf: Beleuchtungstechnik für Praktiker, VDE Verlag GmbH, 5., überarbeitete und erweiterte Auflage, 2015
- Schmidt, Ulrich: Digitale Film- und Videotechnik, Carl Hanser Verlag, 3., erweiterte Auflage, 2011
- Schmidt, Ulrich: Professionelle Videotechnik. Grundlagen, Filmtechnik, Fernsehtechnik, Geräte- und Studioteknik in SD, HD, DI, 3D, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 6. Auflage, 2013
- Wilkens, Matthias: Vorlesungsunterlagen Videotechnik, MT3, 2013
- Witting, Walter: Licht. Sehen. Gestalten, Lichttechnische und wahrnehmungspsychologische Grundlagen für Architekten und Lichtdesigner, 2014

Internetquellen:

Binning garantiert konstante Lichtqualität: Pfad: <http://www.licht.de/de/trends-wissen/licht-specials/modern-und-effizient-leds/qualitaetsmerkmale-von-leds/leds-binning-und-macadams/> (abgerufen am 02.06.16)

Color temperature, Pfad: https://en.wikipedia.org/wiki/Color_temperature (abgerufen am 26.06.16)

Display Port, Pfad: <http://www.elektronik-kompodium.de/sites/com/1205051.htm> (abgerufen am 28.06.16)

Dörsan, E.: Praktische Farbmessung, Vorlesung im SS 2011 Technische Universität Darmstadt, 8. Farbmessgeräte, Pfad: http://www.idd.tu-darmstadt.de/media/fachgebiet_idd/studium_und_lehre/vorlesungen_4/praktische_farbmessung/ss2011_2/prfm_08_farbmessgerate_070611_v2.pdf (abgerufen am 18.06.16)

Franz, Holger: Display Port – was ist das?, 2015, Pfad: <http://www.comptech-info.de/component/content/article/46-computer-infos/220-display-port-was-ist-das?directory=105> (abgerufen am 28.06.16)

High Definition Multimedia Interface, Pfad:

https://de.wikipedia.org/wiki/High_Definition_Multimedia_Interface (abgerufen am 30.05.16)

<http://pixelflexled.com/> (abgerufen am 10.07.16)

<http://www.absen.com/> (abgerufen am 10.07.16)

<http://www.aoto.com/> (abgerufen am 10.07.16)

<http://www.burosch.de/> (abgerufen am 06.08.16)

<http://www.createled.com/> (abgerufen am 10.07.16)

<http://www.eyervis.de/> (abgerufen am 10.07.16)

<http://www.hibino.co.jp/chromatekdiv/en/> (abgerufen am 10.07.16)

<http://www.ledcon.de/> (abgerufen am 10.07.16)

<http://www.leditgo.de/> (abgerufen am 10.07.16)

<http://www.ledium.de/> (abgerufen am 10.07.16)

<http://www.ledshift.com/Bauformen%20German.html> (abgerufen am 13.05.16)

<http://www.leyard.com/en/> (abgerufen am 10.07.16)

<http://www.lighthouse-tech.com/> (abgerufen am 10.07.16)

<http://www.roevisual.com/> (abgerufen am 10.07.16)

<http://www.silicon-core.com/> (abgerufen am 10.07.16)

<http://www.vled.de/> (abgerufen am 10.07.16)

<https://www.barco.com/de/> (abgerufen am 10.07.16)

https://www.for-a.com/products/dcc7000/professional_corrector_p.html#Tab0 (abgerufen am 19.08.16)

<https://www.konicaminolta.eu/de/messgeraete/produkte/lichtmesstechnik/spektralradiometer/cs-2000a/einfuehrung.html> (abgerufen am 19.08.16)

Marx, Peter: Lichttechnische Grundlagen für die Praxis, Pfad: http://www.mx-electronic.com/pdf/Mai_12_ELEKTRONIK-Vortrag_Lichttechnische-Grundlagen-fuer-die-Praxis.pdf (angerufen am 18.06.16)

Reichert, Tom: MacAdam Ellipsen (SDCM) und seine Tücken, 2016, Pfad: <https://www.ledclusive.de/blog/macadam-ellipsen-messen/> (abgerufen am 18.06.16)

Rotscholl, Ingo, Neumann, Cornelius (Lichttechnisches Institut Karlsruhe): Die Farbtemperatur in der Lichttechnik, 2015, Pfad: https://www.tu-ilmenau.de/fileadmin/public/lichttechnik/Lux_junior/Vortraege_2015/Rotscholl_Lux_junior_2015.pdf (abgerufen am 18.06.16)

Serial Digital Interface, Pfad: https://de.wikipedia.org/wiki/Serial_Digital_Interface (abgerufen am 29.05.16)

Waldmann, Nils: Wissen: DVI, HDMI und DisplayPort, 2014, Pfad: <http://www.allround-pc.com/artikel/wissen/2014/wissen-dvi-hdmi-und-displayport> (abgerufen am 28.06.16)

17. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Sichtbares Lichtspektrum mit Wellenlängen.....	7
Quelle: https://de.wikipedia.org/wiki/Licht (abgerufen am 14.05.16)	
Abbildung 2: Spektren unterschiedlicher Lichtquellen - von kontinuierlichen Spektren bis Linienspektren.....	8
Quelle: http://tiny-houses.de/wp-content/uploads/farbspektrum.jpg (abgerufen am 14.05.16)	
Abbildung 3: Hellempfindlichkeitskurve des menschlichen Auges, blau: bei Nacht, rot: Tagsehen	8
Quelle: http://fastvoice.net/wp-content/uploads/2013/02/v-lambda-kurve.jpg (abgerufen am 14.05.16)	
Abbildung 4: Psychometrische Helligkeitsfunktion	11
Erhalten von Dipl.-Ing. (FH) Matthias Wilkens	
Abbildung 5: RGB-Würfel des RGB-Farbraumes.....	14
Quelle: https://homepages.thm.de/~hg10013/Lehre/MMS/SS01_WS0102/Farbmodelle/Bilder/rgbcube.jpg (Abgerufen am 14.05.16)	
Abbildung 6: Spektralwertkurven der spektralen Primärvalenzen	14
Quelle: Schmidt, Ulrich: Professionelle Videotechnik. Grundlagen, Filmtechnik, Fernsehtechnik, Geräte- und Studioteknik in SD, HD, DI, 3D, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 6. Auflage, 2013, S.72	
Abbildung 7: Normspektralwertkurven der Normfarbwerte XYZ.....	15
Quelle: Schmidt, Ulrich: Professionelle Videotechnik. Grundlagen, Filmtechnik, Fernsehtechnik, Geräte- und Studioteknik in SD, HD, DI, 3D, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 6. Auflage, 2013, S. 75	
Abbildung 8: CIE Normfarbtafel	16
Quelle: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/0/02/CIExy1931.svg/2000px-CIExy1931.svg.png (abgerufen am 14.05.16)	
Abbildung 9: Schematische Darstellung des Planck'schen Strahlers.....	18
Quelle: Greule, Roland: Licht und Beleuchtung im Medienbereich, Carl Hanser Verlag, 2015, 28	
Abbildung 10: CIE Normfarbtafel mit Planck'schem Kurvenzug	19
Quelle: http://www.stromsparlampen.eu/images/Chromatisches_Diagramm.jpg (abgerufen am 15.05.16)	

Abbildung 11: McAdam-Ellipsen in der CIE Normfarbtafel.....	21
Quelle:	
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/f/f4/CIExy1931_MacAdam.png/440px-CIExy1931_MacAdam.png (abgerufen am 03.06.16)	
Abbildung 12: 1- bis 7-Step MacAdam (SDCM).....	22
Quelle: http://www.ledclusive.de/blog/macadam-ellipsen-messen/ (abgerufen am 02.06.16)	
Abbildung 13: Links: Rec. 709 Farbdreieck im CIE Farbraum (1931), Rechts: Rec. 2020 Farbdreieck im CIE Farbraum (1931)	23
Quellen: https://en.wikipedia.org/wiki/Rec._709 (abgerufen am 14.05.16)	
https://en.wikipedia.org/wiki/Rec._2020 (abgerufen am 14.05.16)	
Abbildung 14: Gamma Zusammenhänge und Kennlinien	25
Erhalten von Dipl.-Ing. (FH) Matthias Wilkens	
Abbildung 15: Abtaststrukturen im Vergleich	31
Quelle: Schmidt, Ulrich: Professionelle Videotechnik. Grundlagen, Filmtechnik, Fernsehtechnik, Geräte- und Studioteknik in SD, HD, DI, 3D, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 6. Auflage, 2013, S. 140	
Abbildung 16: Schematischer Aufbau eines Dreibereichs-Messgerätes, hier mit der Messung von Objektfarbe (Apfel).....	37
Quelle: Greule, Roland: Licht und Beleuchtung im Medienbereich, Carl Hanser Verlag, 2015, S. 99	
Abbildung 17: Schematischer Aufbau eines Spektralradiometers, hier mit der Messung von Objektfarbe (Apfel)	38
Quelle: Greule, Roland: Licht und Beleuchtung im Medienbereich, Carl Hanser Verlag, 2015, S. 100	
Abbildung 18: Jeti Spektralradiometer Jeti specbos 1211.....	40
Quelle: http://www.opteema.com/files/specbos1211-1080beigese.jpg (abgerufen am 19.08.16)	
Abbildung 19: Eine Anzeigemöglichkeit der Mess-Software "LiVal" des Jeti Messgerätes....	41
Abbildung 20: Menüpunkt „Messwerte“ der Mess-Software "MoDiCall" des Jeti Messgerätes	42
Abbildung 21: Menüpunkt „Grafik“ der Mess-Software "MoDiCall" des Jeti Messgerätes	43
Abbildung 22: Menüpunkt „Spektrum“ der Mess-Software "MoDiCall" des Jeti Messgerätes	44
Abbildung 23: Konica Minolta CS-2000A.....	44
Quelle: https://www.konicaminolta.eu/de/messgeraete/produkte/licht-messtechnik/spektralradiometer/cs-2000a/zubehoer.html (abgerufen am 19.08.16)	

Abbildung 24: Software des Konica Minolta CS-2000A	45
Quelle:	
http://www.konicaminolta.com/instruments/download/catalog/display/pdf/cs2000_catalog_eng.pdf , S.5 (abgerufen am 19.08.16)	
Abbildung 25: Periodensystem der Elemente	48
Quelle: http://www.innorat.ch/daten/image/Periodensystem.png (abgerufen am 01.06.16)	
Abbildung 26: Schematischer Aufbau einer Licht emittierenden Diode	49
Quelle: http://www.nullohm.de/berichte/gifs/LED_Kristall_Aufbau.jpg (abgerufen am 14.05.16)	
Abbildung 27: Relative Spektrale Verteilung von verschiedenen farbigen LEDs	50
Quelle: http://www.osram.de/osram_de/news-und-wissen/led-home/professionelles-wissen/led-grundlagen/lichtfarben/index.jsp (abgerufen am 02.06.16)	
Abbildung 28: Aufbau einer bedrahteten LED	51
Quelle: http://www.matuli-gmbh.com/tl_files/matuli/elements/led-aufbau4.jpg (abgerufen am 14.05.16)	
Abbildung 29: Beispiel für eine Superflux LED	51
Quelle: http://www.futurlec.com/Pictures/LED5MMFLUXWW.jpg (abgerufen am 14.05.16)	
Abbildung 30: Beispiel für eine COD LED	52
Quelle:	
http://www.ledsmagazine.com/content/dam/leds/migrated/objects/news/10/1/15/Sharp_Zenigataarray.jpg (abgerufen am 14.05.16)	
Abbildung 31: Beispiel für eine SMD LED	52
Quelle: https://www.puhy.cz/images/c_86379.jpg (abgerufen am 14.05.16)	
Abbildung 32: LED-Screen-Controller von Barco, TransForm ECU-110	56
Quelle: https://www.barco.com/en/Products-Solutions/Video-walls/Video-wall-controllers/Controllers-for-single-video-walls/Preconfigured-and-easy-to-use-high-res-video-wall-controller.aspx (abgerufen am 19.08.16)	
Abbildung 33: Links: Indoor LED-Screen von Lighthouse, Rechts: Outdoor LED-Screen von ROE	58
Quellen: http://www.lighthouse-tech.com/ProductDetail.aspx?p=X3 (abgerufen am 19.08.16)	
http://www.roevisual.com/led-display-screen-1618.html (abgerufen am 19.08.16)	
Abbildung 34: Skizze des Messaufbaus	70
Abbildung 35: Graustufen-Testbild	72
Abbildung 36: Farbbalken-Testbild (100 / 100)	73
Abbildung 37: Testbild zur Kontrastmessung	73
Abbildung 38: Testbilder für die drei Primärfarben	75
Abbildung 39: Schematische Darstellung des Messaufbaus für die vier Messungen	85

Abbildung 40: Foto des Messaufbaus vor Ort.....	86
Abbildung 41: Bild des LED-Controllers zu dem Lighthouse X3 LED-Screen	89
Quelle: http://www.gearsourcecdn.com/gearsource/v5/catalog/stockitem/normal/e8d0db90-e467-4457-b91e-e862f08fd11d.jpg (abgerufen am 20.08.16)	
Abbildung 42: Controller-Software, Menüpunkt 1.....	89
Abbildung 43: Controller-Software, Menüpunkt 2.....	90
Abbildung 44: Foto von den Farbpixeln bei der Messung des unkalibrierten Rotes	92
Abbildung 45: Spektrum des unkalibrierten Grüns.....	93
Abbildung 46: Weiß: unkalibrierte Primärfarben, Schwarz: Farbdreieck nach Rec. 709.....	94
Abbildung 47: Spektrum des unkalibrierten Weißpunktes.....	97
Abbildung 48: Farbdreieck nach Rec. 2020 und des Lighthouse LED-Screens im Vergleich	103
Abbildung 49: Gamma-Verläufe im Vergleich	104
Abbildung 50: Vergleich der Änderung der CCT über die Graustufen.....	105
Abbildung 51: Schematische Darstellung des LED-Controllers "SD600E)	109
Quelle: Firma PRG: Unilumin R3 Quick Star Guide, Hardware, Software, S.9	
Abbildung 52: Menüpunkt "Brightness Adjustment" der Controller-Software NovaStar NovaLCT-Mars	110
Abbildung 53: Menüpunkt "Advanced Color Configuration" der Controller-Software NovaStar NovaLCT-Mars, RGB-Einstellungen	111
Abbildung 54: Menüpunkt "Advanced Color Configuration" der Controller-Software NovaStar NovaLCT-Mars, Farbraum-Konfiguration.....	112
Abbildung 55: Menüpunkt "Advanced Color Configuration" der Controller-Software NovaStar NovaLCT-Mars, (ähnlichste) Farbtemperatur-Tabelle.....	113
Abbildung 56: Menüpunkt "Screen Calibration" zur Anpassung und Kalibrierung einzelner Module	114
Abbildung 57: Spektrum der Messung der nativen LED-Screen-Farbe Blau.....	115
Abbildung 58: Weiß: Natives Primärfarben-Dreieck, Schwarz: Farbdreieck nach Rec. 709	118
Abbildung 59: Spektrum des unkalibrierten Weißpunktes des Unilumin LED-Screens.....	120
Abbildung 60: Ausgabe der Mess-Software für den kalibrierten Weißpunkt.....	123
Abbildung 61: Ausgabe der Mess-Software, Weißpunkt auf der CIE Farbtafel	124
Abbildung 62: Farbdreieck nach Rec. 2020 und des Unilumin LED-Screens im Vergleich	127
Abbildung 63: Gamma-Verläufe des Unilumin-Screens im Vergleich.....	128
Abbildung 64: Vergleich der Änderung der CCT über die Graustufen, Unilumin LED-Screen	129
Abbildung 65: Bild des LED-Controllers zu dem Hibino 6mm LED-Screen	133
Abbildung 66: Menüpunkt "Output setting"	134

Abbildung 67: Menüpunkt "Color adjustment"	135
Abbildung 68: Spektrum der Messung der nativen LED-Screen-Farbe Rot	137
Abbildung 69: Spektrum der Messung der nativen LED-Screen-Farbe Cyan.....	137
Abbildung 70: Weiß: Natives Primärfarben-Dreieck, Schwarz: Farbdreieck nach Rec. 709	139
Abbildung 71: Spektrum des unkalibrierten Weißpunktes des Hibino LED-Screens	142
Abbildung 72: Ausgabe der Mess-Software "MoDiCal" für den kalibrierten Weißpunkt des Hibino LED-Screens	144
Abbildung 73: Farbdreieck nach Rec. 2020 und des Hibino LED-Screens im Vergleich	148
Abbildung 74: Gamma-Verläufe des Hibino LED-Screens im Vergleich	149
Abbildung 75: Vergleich der Änderung der CCT über die Graustufen, Hibino LED-Screen..	150
Abbildung 76: Bild des LED-Controllers zu dem ROE MC-7H LED-Screen	153
Abbildung 77: Menüpunkt "LED Display Setup" der Controller-Software des ROE MC-7H LED-Screens	154
Abbildung 78: Menüpunkt "Testing and Adjusting" der Controller-Software des ROE MC-7H LED-Controllers.....	155
Abbildung 79: Spektrum der nativen LED-Screen-Farbe Grün	157
Abbildung 80: Spektrum der nativen LED-Screen-Farbe Magenta	157
Abbildung 81: Weiß: Farbdreieck der gemessenen nativen Farben des LED-Screens, Schwarz: Farbdreieck des Zielfarbraumes nach Rec. 709.....	159
Abbildung 82: Spektrum des unkalibrierten Weißpunktes des ROE MC-7H LED-Screens .	162
Abbildung 83: Ausgabe der Mess-Software "MoDiCal" für den kalibrierten Weißpunkt des ROE MC-7H LED-Screens.....	165
Abbildung 84: Farbdreieck nach Rec. 2020 und des ROE LED-Screens im Vergleich	169
Abbildung 85: Gamma-Verläufe des ROE MC-7H LED-Screens im Vergleich.....	170
Abbildung 86: Vergleich der Änderung der CCT über die Graustufen, ROE MC-7H LED-Screen	171
Abbildung 87: Foto beider LED-Screens nach der Kalibrierung, Links: Lighthouse X3, Rechts: Unilumin RT3.9.....	174
Abbildung 88: Foto beider LED-Screens nach der Kalibrierung, Links: ROE MC-7H, Rechts: Hibino 6mm	175
Abbildung 89: Color Corrector von FOR-A.....	176
Quelle: https://www.for-a.com/products/dcc7000/professional_corrector_p.html#Tab0 (abgerufen am 19.08.16)	

18. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Wellenlängenbereiche der Spektralfarben	6
Quelle: https://de.wikipedia.org/wiki/Spektralfarbe (abgerufen am 06.05.16)	
Tabelle 2: Sprachliche Beschreibung der Farbtemperatur	19
Quelle: Greule, Roland: Licht und Beleuchtung im Medienbereich, Carl Hanser Verlag, 2015, S. 29	
Tabelle 3: Definition der Farbqualität mithilfe der McAdam-Ellipsen	21
Quelle: Ris, Hans Rudolf: Beleuchtungstechnik für Praktiker, VDE Verlag GmbH, 5., überarbeitete und erweiterte Auflage, 2015, S. 158	
Tabelle 4: Farbräume nach Rec. 709 und nach Rec. 2020 im Vergleich	23
Quellen: Recommendation ITU-R BT.709-6 (06/2015), S.3; Recommendation ITU-R BT.2020-2 (10/2015), S.3	
Tabelle 5: Definition der Digitalkomponenten für SD, HD und UHD	29
Tabelle 6: Gegenüberstellung der SDI-Schnittstellen	33
Quelle: https://de.wikipedia.org/wiki/Serial_Digital_Interface (abgerufen am 29.05.16)	
Tabelle 7: Gegenüberstellung der HDMI Generationen	34
Quelle: Professional System Magazin für AV-Systemintegration 06/2015, S.31	
Tabelle 8: Display Port Schnittstellen im Vergleich zu HDMI	34
Quelle: http://www.allround-pc.com/artikel/wissen/2014/wissen-dvi-hdmi-und-displayport (abgerufen am 28.06.16)	
Tabelle 9: Anwendungsbereiche für Indoor und Outdoor LED-Screens.....	57
Tabelle 10: Überblick über LED-Screen Hersteller	60
Tabelle 11: Definition des Farbraumes nach Rec. 709 mit allen sechs Grundfarben und den Leuchtdichtezusammenhängen.....	79
Quelle: http://www.cine4home.de/knowhow/Farbluminanzen/Farblumnanzen.htm (abgerufen am 18.07.16)	
Tabelle 12: Überblick der zu messenden LED-Screens.....	83
Tabelle 13: Angaben aus dem Hersteller Datenblatt zum Lighthouse X3 Screen	88
Tabelle 14: Farbwerte und Leuchtdichtewerte der unkalibrierten Farben, Lighthouse X3	95
Tabelle 15: Dominante Wellenlängen der unkalibrierten Farben, Lighthouse X3	95
Tabelle 16: Messergebnisse des unkalibrierten Weißpunktes, Lighthouse X3.....	96
Tabelle 17: Zuordnung der Videopegel zu den Graustufen des Testbildes	97
Tabelle 18: Gemessene Leuchtdichtewerte der Graustufen im Vergleich zu den Idealwerten, Lighthouse X3	98
Tabelle 19: Gemessene CCT-Werte der Graustufen im Vergleich zu den Idealwerten, Lighthouse X3	98
Tabelle 20: Ergebnisse der Weißpunkt kalibrierung, Lighthouse X3	100

Tabelle 21: Farbraumes nach Rec. 709 mit den ideal berechneten Leuchtdichtewerten aus dem kalibrierten Weißpunkt, Lighthouse X3	101
Tabelle 22: Farbwerte und Leuchtdichtewerte der Farben nach der Weißpunktkalibrierung, Lighthouse X3	101
Tabelle 23: Abweichung der Farb- und Leuchtdichtewerte des LED-Screens nach der Weißpunktkalibrierung, Lighthouse X3	102
Tabelle 24: Beschreibung der Betrachtungswinkelabhängigkeit, Lighthouse X3.....	106
Tabelle 25: Angaben aus dem Hersteller Datenblatt zum Unilumin Rt3.9 Screen.....	108
Tabelle 26: Vergleich der gemessenen Farb- und Leuchtdichtewerten mit den Angaben der Controller-Software, Unilumin Rt3.9	116
Tabelle 27: Vergleich der gemessenen dominanten Wellenlängen mit den Herstellerangaben, Unilumin Rt3.9.....	117
Tabelle 28: Gemessene dominante Wellenlängen der Sekundärfarben, Unilumin Rt3.9	117
Tabelle 29: Messergebnisse des unkalibrierten Weißpunktes, Unilumin Rt3.9	119
Tabelle 30: Gemessene Leuchtdichtewerte der Graustufen im Vergleich zu den Idealwerten, Unilumin Rt3.9.....	121
Tabelle 31: Gemessene CCT-Werte der Graustufen im Vergleich zu den Idealwerten, Unilumin Rt3.9	122
Tabelle 32: Farbraumes nach Rec. 709 mit den ideal berechneten Leuchtdichtewerten aus dem kalibrierten Weißpunkt, Unilumin Rt3.9.....	125
Tabelle 33: Farbwerte und Leuchtdichtewerte der Farben nach der Weißpunktkalibrierung, Unilumin Rt3.9.....	125
Tabelle 34: Abweichung der Farb- und Leuchtdichtewerte des LED-Screens nach der Weißpunktkalibrierung, Unilumin Rt3.9.....	126
Tabelle 35: Beschreibung der Betrachtungswinkelabhängigkeit, Unilumin Rt3.9	130
Tabelle 36: Angaben aus dem Hersteller Datenblatt zum Hibino 6mm Screen	132
Tabelle 37: Farbwerte und Leuchtdichtewerte der nativen Farben, Hibino 6mm.....	138
Tabelle 38: Farbraumes nach Rec. 709 mit den ideal berechneten Leuchtdichtewerten aus dem kalibrierten Weißpunkt, Hibino 6mm	138
Tabelle 39: Dominante Wellenlängen der nativen Farben, Hibino 6mm.....	140
Tabelle 40: Messergebnisse des unkalibrierten Weißpunktes, Hibino 6mm.....	141
Tabelle 41: Gemessene Leuchtdichtewerte der Graustufen im Vergleich zu den Idealwerten, Hibino 6mm	143
Tabelle 42: Gemessene CCT-Werte der Graustufen im Vergleich zu den Idealwerten, Hibino 6mm	143
Tabelle 43: Ergebnisse der Weißpunktkalibrierung im Vergleich zum unkalibrierten Zustand, Hibino 6mm.....	145

Tabelle 44: Farbwerte und Leuchtdichtewerte der Farben nach der Weißpunktkalibrierung, Hibino 6mm	146
Tabelle 45: Farbraumes nach Rec. 709 mit den ideal berechneten Leuchtdichtewerten aus dem kalibrierten Weißpunkt, Hibino 6mm	146
Tabelle 46: Abweichung der Farb- und Leuchtdichtewerte des LED-Screens nach der Weißpunktkalibrierung, Hibino 6mm	147
Tabelle 47: Beschreibung der Betrachtungswinkelabhängigkeit, Hibino 6mm	151
Tabelle 48: Angaben aus dem Hersteller Datenblatt zum ROE MC-7H Screen	153
Tabelle 49: Farbwerte und Leuchtdichtewerte der nativen Farben, ROE MC-7H.....	158
Tabelle 50: Farbraumes nach Rec. 709 mit den ideal berechneten Leuchtdichtewerten aus dem kalibrierten Weißpunkt, ROE MC-7H	158
Tabelle 51: Dominante Wellenlängen der nativen Farben, ROE MC-7H.....	160
Tabelle 52: Messergebnisse des unkalibrierten Weißpunktes, ROE MC-7H.....	161
Tabelle 53: Gemessene Leuchtdichtewerte der Graustufen im Vergleich zu den Idealwerten, ROE MC-7H	163
Tabelle 54: Gemessene CCT-Werte der Graustufen im Vergleich zu den Idealwerten, ROE MC-7H.....	163
Tabelle 55: Ergebnisse der Weißpunktkalibrierung im Vergleich zum unkalibrierten Zustand, ROE MC-7H	166
Tabelle 56: Farbwerte und Leuchtdichtewerte der Farben nach der Weißpunktkalibrierung, ROE MC-7H	167
Tabelle 57: Farbraumes nach Rec. 709 mit den ideal berechneten Leuchtdichtewerten aus dem kalibrierten Weißpunkt, ROE MC-7H	167
Tabelle 58: Abweichung der Farb- und Leuchtdichtewerte des LED-Screens nach der Weißpunktkalibrierung, ROE MC-7H	168
Tabelle 59: Beschreibung der Betrachtungswinkelabhängigkeit, ROE MC-7H	172

19. Formelverzeichnis

Formel 1: Berechnung der Leuchtdichte	10
Quelle: Greule, Roland: Licht und Beleuchtung im Medienbereich, Carl Hanser Verlag, 2015, S. 43	
Formel 2: Formeln für die Normfarbwerte X, Y und Z	15
Quelle: Schmidt, Ulrich: Professionelle Videotechnik. Grundlagen, Filmtechnik, Fernsehtechnik, Geräte- und Studioteknik in SD, HD, DI, 3D, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 6. Auflage, 2013, S. 74	
Formel 3: Zusammenhang des Wiedergabe-Gammas	24
Quelle: Schmidt, Ulrich: Professionelle Videotechnik. Grundlagen, Filmtechnik, Fernsehtechnik, Geräte- und Studioteknik in SD, HD, Di, 3D, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 6. Auflage, 2013, S. 42	
Formel 4: Gamma Zusammenhänge	24
Formel 5: Farbreizfunktion von Selbstleuchtern.....	37
Abgeleitet aus: Greule, Roland: Licht und Beleuchtung im Medienbereich, Carl Hanser Verlag, 2015, S. 101	
Formel 6: Berechnung des Normspektralwertes Y	38
Abgeleitet aus: Greule, Roland: Licht und Beleuchtung im Medienbereich, Carl Hanser Verlag, 2015, S. 101	
Formel 7: Formel 1 zur Berechnung der CCT aus den xy-Koordinaten.....	46
Quelle: http://www.mx-electronic.com/pdf/Mai_12_ELEKTRONIK-Vortrag_Lichttechnische-Grundlagen-fuer-die-Praxis.pdf (abgerufen am 18.06.16)	
Formel 8: Formel nach McCamy zur Berechnung der CCT aus den xy-Koordinaten	47
Quelle: https://en.wikipedia.org/wiki/Color_temperature (abgerufen am 26.06.16)	
Formel 9: ITU-R Richtlinie Recommendation ITU-R BT.1886 „Reference electro-optical transfer function for flat panel displays used in HDTV studio production”.....	77
Quelle: ITU-R Richtlinie Recommendation ITU-R BT.1886 „Reference electro-optical transfer function for flat panel displays used in HDTV studio production”. S.2	