



Technische Hochschule Ostwestfalen-Lippe
Fachbereich 2 Medienproduktion



Masterarbeit

„Zwischen Mythos und Messbarkeit: Ist Kunstlicht im Zeitalter von LED noch immer die technisch beste Wahl für natürliche Hauttöne?“

Zur Erlangung des Grades Master of Arts

Ich widme diese Arbeit meinem geliebten Sohn,
Nino Ortlepp

Vorwort & Semantik

Im Verlauf meines Studiums und meiner Arbeit in der Medienproduktion, habe ich diverse Situationen erlebt und in verschiedenen Gewerken gearbeitet. Als Kameramann, als Colorist und schlussendlich und primär als Oberbeleuchter. In allen diesen Gewerken waren Licht, Farbe, Hauttöne und die dahinterliegende Technologie ein präsent und prägnantes Thema. Bei meinen Recherchen stieß ich immer wieder auf namhafte Kameramänner, die trotz zahlreicher Vorteile durch neuere Technologien noch immer mit Wolfram-Halogen-Scheinwerfern arbeiteten. Auch bei meiner eigenen Arbeit als Oberbeleuchter und Beleuchter spielen Kunstlicht-Lampen, beispielsweise DINO-Lights, PAR-Scheinwerfer oder Wolframdraht-Glühbirnen häufig eine Rolle und werden aktiv vom Kameragewerk gewünscht. Da dieser Lampentyp in der Regel komplizierter und unkomfortabler in der Handhabung ist und zudem noch verhältnismäßig viel Leistung benötigt, im Vergleich zu LED-Technologie, habe ich häufig versucht, LED-Licht vorzuschlagen. Die Ablehnung dieses Lampentyps wurde stest mit der Begründung abgelehnt, LED-Lichtquellen würden keine schönen Hauttöne produzieren. Da ich bei anschließenden Recherchen auch auf diese Argumentationskette gestoßen bin, war es mir ein persönliches Anliegen, diesem Thema auf den Grund zu gehen und besagte Aussagen zu überprüfen.

Im Folgenden wird der Begriff "Kunstlicht" für die Beschreibung von Lichtquellen verwendet, die einen Wolfram-Glühdraht als Leuchtmittel verwenden. Sofern nicht anders beschrieben, wird eine Farbtemperatur (CCT) von etwa 3200 Kelvin vorausgesetzt.

Erklärung - Generisches Maskulinum

Zur besseren Lesbarkeit wird in der vorliegenden Arbeit auf die gleichzeitige Verwendung männlicher und weiblicher Sprachformen verzichtet. Es wird das generische Maskulinum verwendet, wobei beide Geschlechter gleichermaßen gemeint sind.

Gliederung

1. Einleitung.....	1
1.1 Hintergrund und Problemstellung.....	3
1.2 Künstlerische Perspektiven.....	3
1.3 Methodik.....	8
2. Qualitative und Quantitative Eigenschaften von Licht.....	8
2.1 Intensität & Helligkeitsempfindung.....	8
2.1.1 Photometrische Größen.....	9
2.2 Lichtfarbe.....	10
2.2.1 Messbares Spektrum.....	15
2.2.2 Sichtbares Spektrum.....	16
2.2.3 CCT & CC.....	16
2.2.4 Delta u'v'.....	19
2.2.5 Weißpunkte (Standard Illuminants).....	20
2.3 Farbwiedergabemetriken.....	22
2.3.1 CRI.....	22
2.3.2 CQS.....	24
2.3.3 TLCI & TLMF.....	25
2.3.4 SSI.....	27
2.3.5 TM30.....	29
2.4 Wahrnehmung von Lichtfarbe und Farbwiedergabe.....	32
2.4.1 Farbvarianz und Metamerie.....	35
3. Leuchtmittel in der Filmproduktion.....	38
3.1 Kohlebogenlampe.....	38
3.2 Kunstlicht - Wolfram-Halogen	41
3.3 HMI - Gasentladungslampen	46
3.4 Leuchtstofflampen.....	48
3.5 LED.....	50
3.5.1 LED Engines & Mischmethoden.....	51
3.5.2 LED 2 Color Engine.....	52
3.5.3 RGB 3 Color Engine.....	53
3.5.4 RGBW(W) / RGBMA 4-5 Color Engines.....	54
3.5.5 Arri SPECTRA (RGBACL) 6 Color Engine.....	55
3.5.6 Aputure BLAIR (BLAIR-CG) 5-7 Color Engine.....	56
3.5.7 Nanlux Nebula C8 (dRRALGCBI) 8 Color Engine	58
3.5.8 Probleme und Lösungen bei Hauttönen.....	59

4. Licht-Wandlungsprozess auf Kamerasensoren.....	65
4.1 Sensortechnologie (ALEV-4 CMOS-Sensor).....	65
4.2 RGB Sensor Filter (Bayer-Pattern).....	66
4.3 Debayering Prozess.....	67
4.4 Apple ProRes Codec / ARRIRAW.....	67
4.5 Einfluss des Weißabgleichs auf die Farbwahrnehmung.....	70
5. Farbe in der Postproduktion.....	71
5.1 Farbmanagement: Farbraum.....	72
5.2 Hauttöne in der Postproduktion.....	75
5.3 Korrekturverfahren und LUTs.....	77
6. Wahrnehmungsexperiment.....	78
6.1 Anfertigung diverser Testaufnahmen.....	78
6.2 Grading und Anfertigung einer Anpassungs-LUT	81
6.3 Befragung: Probanden beurteilen die Natürlichkeit der Hauttöne (3-AFC)....	83
6.4 Auswertung der Ergebnisse zur Wahrnehmung.....	84
6.5 Limitationen und Validität der Ergebnisse.....	92
7. Fazit.....	93
7.1 Einordnung der Ergebnisse.....	93
7.2 Beantwortung der These anhand der Ergebnisse.....	94
7.3 Ausblick auf zukünftige Entwicklungen.....	95
7.4 Glossar.....	97
7.5 Literaturverzeichnis.....	100
7.6 Abbildungsverzeichnis.....	109
7.7 Anhangsverzeichnis.....	113

1. Einleitung

Die visuelle Qualität von emittiertem Licht, das auf Lebewesen, Raum und Objekten reflektiert und absorbiert, ist ein wesentlicher Faktor bei der Gestaltung und Gesamtbewertung der Qualität eines digitalen Bildes. Es kann sowohl Emotionen ausdrücken oder verstärken, Atmosphären schaffen als auch eine Geschichte erzählen. Licht ist in der Filmproduktion so essentiell, dass dessen vollständige Abwesenheit es unmöglich macht, einen Film zu sehen. Ein zentraler Aspekt der Lichtgestaltung ist die akkurate Reproduktion von Hauttönen. Der lebenslang geschulte Blick auf Haut macht das menschliche Auge sehr sensibel für geringe Abweichungen und entlarvt farbliche Anomalien sehr treffsicher. Die spektralen Unterschiede menschlicher Hautfarben sind ein wichtiger Aspekt in der visuellen Forschung. (Lu et al., 2025) Um "natürliches" Licht zu produzieren, galten HMI-Lampen (*Hydrargyrum Medium-arc Iodide*) für tageslichtähnliches Licht (Neudeck, 1999) und Kunstlicht-Lampen mit Wolframdraht und Halogen-Gas gefüllten Leuchtmitteln aufgrund ihres nahezu kontinuierlichen Spektrums lange als etablierter Standard für naturgetreue Farbwiedergabe in der Filmproduktion. (Gloman, 2014) Durch den Vormarsch der LED-Technologie (*Light Emitting Diode*) (FWU Institut für Film und Bild in Wissenschaft und Unterricht gemeinnützige GmbH, o. D.) und die damit einhergehende kontinuierliche Weiterentwicklung der verschiedenen Lichttechnologien, scheint sich diese Perspektive langsam zu verschieben. Neben Vorteilen wie einer hohen Energieeffizienz, einer vergleichsweise geringen Wärmeentwicklung, variablen Farbtemperaturen und Farbmischungen wiesen LED-Lampen früherer Generationen jedoch charakteristische Spektrallücken und Spektralspitzen auf.

Im Wellenlängenbereich auftretende Lücken und Spitzen begünstigen Farbvarianzeffekte, bei denen Hautfarben unter entsprechendem LED-Licht anders wahrgenommen und aufgezeichnet wurden, als beispielsweise unter Tageslicht bei einem bewölktem Himmel und das bei einer identischen Farbtemperatur. (LeGendre et al., 2022)

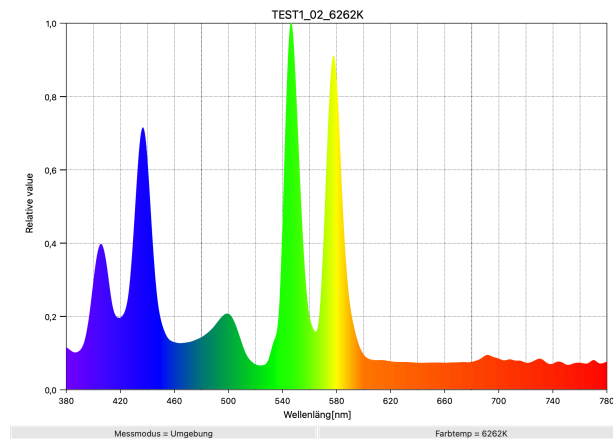


Abbildung 1: LED-Licht mit Lücken und Spitzen im Spektrum (Eigene Abbildung)

Diese Farbvarianzeffekte sind aus technischer und auch aus der Sicht der subjektiven Wahrnehmung kritisch, da sie zu Inkonsistenz und/oder zur falschen Farbwiedergabe von Hauttönen führen kann. (Datacolor, 2024) Die Interpretation von Farbspektren wie beispielsweise in Abbildung 1 führt auf digitalen Kamerasensoren und der Umsetzung in digitaler Farbräume zu genannten Farbvarianzeffekten, welche unter besonderen Bedingungen als schwer oder gar nicht korrigierbar in der digitalen Postproduktion gelten. (Forsythe & Funt, 2024) Moderne LED-Systeme bieten hier neue Ansätze, um vorgenannte Probleme zu vermeiden oder gar zu lösen. Hersteller werben mit beeindruckenden photometrischen Werten der LED-Technologien (siehe Kapitel 3.5). Doch die Frage nach der praktischen Überlegenheit von Kunstlicht gegenüber LED-Licht steht nach wie vor im Raum. Vor diesem Hintergrund zielt diese Arbeit darauf ab, neben dem theoretischen auch den praktischen Vergleich von Kunstlicht und LED-Licht experimentell anzustellen und herauszufinden, ob Unterschiede überhaupt noch wahrnehmbar sind und wenn, wie sie im Sinne der Wahrnehmung bewertet werden. Ziel dieser Arbeit ist es, fundierte Aussagen über die zukünftige Nutzung von Kunstlicht als Lichtquelle an Filmsets zu treffen sowie zu beantworten, ob Kunstlicht wirklich die "natürlichsten" Hauttöne erzeugt. Um die verschiedenen Systeme miteinander zu vergleichen, werden sowohl spektrale Messungen sowie diverse Metriken zu qualitativen und quantitativen Eigenschaften eingesetzt. Zudem wurden Test-Aufnahmen erstellt, um die verschiedenen Systeme in einem subjektiven Wahrnehmungstest miteinander zu vergleichen und die Ergebnisse auszuwerten.

Diese Arbeit soll sowohl praktische Empfehlungen für die Film- und Medienproduktion liefern als auch einen Beitrag zum wissenschaftlichen Diskurs über die Farbwiedergabe von Hauttönen im Kontext moderner LED-Technologien leisten. Insbesondere soll aufgezeigt werden, wie weit die Entwicklung moderner Technologien im Bereich von LED-Licht bereits vorangeschritten ist und den Diskurs starten, ob und welche tradierten Leuchtmittel noch Vorteile gegenüber der modernen Technologie bieten.

1.1 Hintergrund und Problemstellung

Die Frage nach der Wahl der "richtigen" Lampe für einen bestimmten, festgelegten Einsatzzweck ist ein Teil der täglichen Arbeit eines Oberbeleuchters. Häufig spielen jedoch nicht nur technische Anforderungen, sondern auch Erfahrungswerte mit bestimmten Lichteinheiten eine große Rolle bei der Wahl. Ein auftretendes Phänomen zwischen verschiedenen Generationen von Filmschaffenden ist die Zu- oder Abneigung gegenüber der traditionellen und etablierten Technik im Vergleich zu neuartiger moderner Technik. Ein zentraler Diskussionspunkt ist dabei die Entscheidung, ob eine LED-Einheit oder ein Kunstlicht genutzt werden soll. In der Praxis wird diese Annahme teilweise so stark vertreten, dass dabei die praktischen Nachteile dieser Lichtart in den Hintergrund treten.

1.2 Künstlerische Perspektiven

In der internationalen Filmproduktion finden sich Vertreter der These, dass Kunstlicht die "reichsten", "schönsten" und "natürlichsten" Hauttöne produziert. Sowohl bei Filmproduktionen, die mit analoger Technik arbeiten, als auch bei der digitalen Filmproduktion wird von besagten Vertreter Kunstlicht nach wie vor eingesetzt. Ein prominentes Beispiel stellt der Kameramann Roger A. Deakins dar. Für die Beleuchtung von Darstellern nutzte dieser in einigen Produktionen eine Kombination aus "Tweenie 407"-Kunstlichtscheinwerfern, welche er zur Reflektion auf eine ungebleichte Musselin-Stoff-Bespannung richtete. Das reflektierte Licht beleuchtete daraufhin den Darsteller vor der Kamera. (*No Country For Old Men*, 2014)



Abbildung 2: Tommy Lee Jones in “No Country For Old Men” (CineGleaner, 2014)

Im Film “Sicario” nutzte Deakins neben den genannten “Tweenies” beispielsweise auch Kunstlicht-Glühbirnen. In der Szene aus Abbildung 3 verwendete er eine selbstgebaute Schiene mit vier Fassungen als Führungslicht für die Darstellerin Emily Blunt. (*Sicario*, 2014).



Abbildung 3: Darstellerin Emily Blunt in “Sicario, 2015” (CineGleaner, 2014b)

Auch im Film “Prisoners” nutzte Deakins ein selbstgebautes Licht in Ringform besetzt mit circa 20 Kunstlicht-Glühbirnen und nutzte dieses als Führungslicht für die Darsteller. (Blankenship, 2018) Diese Methodik verwendete Deakins auch in weiteren Filmen. Aufnahmen der Produktion zeigen, wie Deakins das von ihm so genannte “Cove-Lighting”, auf Deutsch “Bucht-Licht”, verwendete, um die Darstellerin Judi Dench zu beleuchten. Dabei nutzte er drei an der Decke befestigte Kunstlichtlampen mit dem Namen “Tweenies”, um in die Reflektoren zu leuchten. Diese sind “Bucht-Förmig” um die Darstellerin angeordnet. (Laurent, 2023)



Abbildung 4: Darstellerin Judi Dench am Set in "James Bond 007: Skyfall, 2012"
(CineGleaner, 2016)



Abbildung 5: Darstellerin Judi Dench im Film "James Bond 007: Skyfall, 2012"
(CineGleaner, 2016)

Zusätzlich sind Deakins große Kunstlicht-Konstruktionen ein weiterer Indikator für dessen Zugewandtheit. So entwarf er gemeinsam mit Oberbeleuchter Bill O'Leary für "Bladerunner 2049" eine Konstruktion aus 256 Arri Kunstlicht-Scheinwerfern mit jeweils 300 Watt Leistungsaufnahme. (Maher, 2017b)



Abbildung 6: Kunstlicht-Lichtinstallation für "Blade Runner 2049" (ECG Productions, 2021)

Als weiteres Beispiel für einen Verfechter von Kunstlicht dient der Kameramann John Brawley. In seinem Interview in der "Film and Digital Times" von 2020 beschreibt er seine Vorliebe für Kunstlicht bei der Beleuchtung von Hauttönen und sein Problem bei der Nutzung von LED Licht:

"We used a lot of tungsten lighting fixtures because they look so beautiful for skin tones. LED lights are great, but when it comes to skin tones and beauty, I find they can have a kind of pallidness. I generally prefer to use straight tungsten." - John Brawley (Fauer & John Brawley, 2020)



Abbildung 7: Darstellerin Elle Fanning in "The Great" (Special, 2020)

Weitere und ähnliche Äußerungen dazu lassen sich auch bei Kamerafrau Sade Ndya finden:

“When you’re working with lots of colors, Ndya says in the second part of the series, that it’s a good idea to use a clean tungsten for your key. She will even pair it with saturated top-fill to inject a more subtle yet colorful falloff. By doing this, you’ll get more accurate color in your skin tones while still maintaining the vitality of a scene.”
- Sade Ndya (Academy, 2023)

Kameramann Maher Maleh ist der Ansicht, Hauttöne unter Kunstlicht würden “schöner” wirken, man könne den Effekt jedoch mit Filtern am Set emulieren oder dieselben Ergebnisse durch die Postproduktion erreichen:

“Skin tones appear more beautiful with HMI or tungsten light than they do with LEDs, but that can be fixed with either filters during the shoot or later in color grading.” - Maher Maleh (*All About Light*, 2024)

Mandlakayise Dube und Ndumiso Mnguni schreiben auf “Filmmakers Academy” über die expliziten Vorteile der Nutzung von Kunstlicht bei dunkleren Hautfarben und nehmen in der Begründung auch Bezug auf das breite Lichtspektrum: *“(…)when tungsten interacts with dark skin, it brings about a vibrancy to the desaturated appearance of the surface of the skin because of its warm appearance (3200K) and because skin exists within the warmer part of the spectrum (red-brown/yellow and black-brown) it increases the warmth of the skin creating a more pleasing result.”* (Academy, 2023)

Es scheint also, als wäre der vermeintliche Vorteil von Kunstlicht als Leuchtmittel für die Beleuchtung von Hauttönen grundsätzlich in der Industrie bekannt und vertreten. Wie diese Vorteile in der digitalen Filmproduktion zustande kommen, ob und wie sie wahrnehmbar sind und ob neuere LED-Technologien die Vorteile von Kunstlicht bereits vollständig simulieren können, wird im Folgenden getestet und untersucht.

1.3 Methodik

Diese Arbeit ist in einen theoretischen und einen praktischen Teil untergliedert. Im theoretischen Teil werden vorab Grundlagen erläutert, Prozesse beschrieben und anschließend in den Kontext eingeordnet. Zusätzlich wird im praktischen Teil ein Experiment durchgeführt, welches die Wahrnehmbarkeit der Unterschiede zwischen verschiedenen LED-Technologien und Kunstlicht untersucht. Dazu werden Menschen mit verschiedenen Hauttönen mit unterschiedlichen Lichtquellen beleuchtet. Das Material wird anschließend als 3 AFC-Test (3-Alternative Forced Choice) in eine Umfrage integriert, in der die Probanden das Video auswählen sollen, indem die Hauttöne für sie am natürlichsten wirken. Mit der Auswertung der Ergebnisse des Experiments werden die Ergebnisse gemeinsam mit der theoretischen Vorarbeit in einen Kontext gesetzt, um die Forschungsfrage einzuordnen. Ziel ist es, zu überprüfen, ob die Probanden zwischen den unterschiedlichen Lichtquellen unterscheiden können und welche sie als natürlicher empfinden.

2. Qualitative und Quantitative Eigenschaften von Licht

Eine der wohl wichtigsten Grundlagen dieser Arbeit ist ein umfassendes Verständnis von Licht als physikalische Größe und deren Qualitätsmerkmale sowie Quantifizierungsmöglichkeiten für die Filmproduktion. In diesem Kapitel werden verschiedene Kenngrößen für branchenübliche Quantifizierungsmöglichkeiten vorgestellt. Weiter wird die physikalische Beschaffenheit von Licht sowie deren Einfluss auf die menschliche Wahrnehmung und die Kamerasensorik erläutert.

Im Bereich der digitalen Filmproduktion haben sich verschiedene Farbwiedergabemetriken zur Bewertung von Lichtqualität etabliert. Diese werden vorgestellt und in den Kontext der Forschungsfrage gesetzt.

2.1 Intensität & Helligkeitsempfindung

Bei der Quantifizierung von Helligkeitsempfindung müssen wir zwischen psychophysischer Wahrnehmung, also der menschlichen Wahrnehmung, und photometrischen Messwerten unterscheiden. (*IEC 60050 - International Electrotechnical Vocabulary - Details For IEV Number 845-21-012: „Light“, o. D.*) Für die Messung und Berechnung von Licht finden sich diverse

Qualifizierungsmöglichkeiten. Im Folgenden werden die branchenüblichen Einheiten für die Messung von Lichtintensität in der Filmproduktion vorgestellt. Weiter werden Intensität und Verbrauch in einen Effizienz-Kontext im Sinne der Intensität gestellt.

2.1.1 Photometrische Größen

Der Lichtstrom Φ_v (Luminous Flux) beschreibt die von einer Lichtquelle pro Zeit abgegebene sichtbare Lichtleistung. Grundlage ist die physikalische Strahlungsleistung, die entsprechend der spektralen Empfindlichkeit des menschlichen Auges gewichtet wird. Diese ist als *CIE Standard Photometric Observer* im "CIE System of Physical Photometry" standardisiert. (*IEC 60050 - International Electrotechnical Vocabulary - Details For IEV Number 845-21-036: „CIE Standard Photometric Observer“, o. D.*)

Lichtstrom kann aus der spektralen Strahlungsflussverteilung abgeleitet werden:

$$\Phi_v = K_m \int_0^\infty \Phi_{e,\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda$$

Dabei ist K_m die maximale Lichtausbeute, $\Phi_{e,\lambda}(\lambda)$ der spektrale Strahlungsfluss, $V(\lambda)$ die spektrale Lichtausbeute und λ die Wellenlänge. Das internationale Einheitensystem (SI) benennt den Lichtstrom mit dem Wort Lumen (lm) als Einheitsbezeichnung. (*IEC 60050 - International Electrotechnical Vocabulary - Details For IEV Number 845-21-039: „Luminous Flux“, o. D.*)

Die Beleuchtungsstärke (Lux & Footcandles) beschreibt im metrischen System den auf eine Fläche einfallenden Lichtstrom an einem definierten Punkt oder einer fiktiven Oberfläche. Maßgebend für die Messung ist hierbei der empfangene, nicht der gesendete Lichtstrom.

$$E_v = K_m \int_0^\infty E_{e,\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda$$

Das internationale Einheitensystem (SI) benennt die Beleuchtungsstärke mit dem Wort *Lux* (lx) als Einheitsbezeichnung. (*IEC 60050 - International Electrotechnical Vocabulary - Details For IEV Number 845-21-060: „Illuminance“, o. D.*)

Das imperiale System sieht für die Beleuchtungsstärke das Wort *Footcandles (fc)* als Einheitsbezeichnung vor. Historisch gesehen beschreibt ein "Footcandle" die Beleuchtungsstärke, die eine "Standardkerze" in einem Fuß Entfernung erzeugt. Aufgrund verschiedener Standards in Bezug auf Kerzen änderte sich dieser Wert im Verlauf der Zeit. Ein Footcandle entspricht hierbei 10,763 Lux. (Gyllenbok, 2018)

$$1 \text{ fc} = 1 \text{ lm} / 1 \text{ ft}^2 = 1 \text{ lm} / (0,3048 \text{ m})^2 \approx 10,764 \text{ lx}$$

Dennoch sind in der heutigen Zeit weiterhin Footcandle-Werte in den Photometrie-Angaben von Beleuchtungstechnik-Herstellern wie Aputure zu finden.
(*STORM 1200x* | Aputure, o. D.)

Photometrics			
CCT	Dis.	No Reflector	15° Reflector
2,500K	3m	6,570 lux / 611 fc	74,000 lux / 6,877 fc
2,500K	5m	2,510 lux / 233 fc	25,600 lux / 2,379 fc
3,200K	3m	8,370 lux / 778 fc	94,600 lux / 8,792 fc
3,200K	5m	3,170 lux / 293 fc	30,900 lux / 2,872 fc
4,300K	3m	8,620 lux / 801 fc	97,400 lux / 9,052 fc
4,300K	5m	3,280 lux / 305 fc	33,600 lux / 3,123 fc
5,600K	3m	8,490 lux / 789 fc	96,100 lux / 8,931 fc
5,600K	5m	3,230 lux / 300 fc	33,300 lux / 3,095 fc

Abbildung 8: Photometrie Hersteller Angaben zur Aputure 1200X Lampe (*STORM 1200x* | Aputure, o. D.-b)

2.2 Lichtfarbe

Die Lichtfarbe ist ein komplexes Thema und kann aus verschiedenen Perspektiven betrachtet werden. Zum einen aus der Perspektive der menschlichen Wahrnehmung und zum anderen aus der Perspektive der physikalischen Eigenschaften sowie zusätzlich auf die Wirkweise von Sensortechnologie. Diese Perspektiven werden im Verlauf dieser Arbeit bearbeitet und eingeordnet. Um die folgenden Farbmetriken und Einheiten besser zu verstehen, müssen die zugrunde gelegten wissenschaftlichen Standards und Systeme für die Messung und Wahrnehmung von Farbe erläutert werden.

Eines dieser wissenschaftlichen Grundkonzepte ist das des "planckschen Strahlers", auch "blackbody", auf deutsch "schwarzer Körper" genannt. Dabei handelt es sich um ein theoretisches Objekt, das die gesamte elektromagnetische Strahlung absorbiert. Im so erzeugten thermischen Gleichgewicht sendet der Strahler seinerseits Strahlung aus, deren spektrale Verteilung ausschließlich von seiner Temperatur bestimmt und durch das Plancksche Strahlungsgesetz beschrieben wird. (Spektrum, 2004) Dieses besagt, mit welcher Intensität bei jeder Wellenlänge Strahlung abgegeben wird. Dies ist jedoch ausschließlich abhängig von der Temperatur des Strahlers. (Planck'sches Strahlungsgesetz, 2004).

Um die Möglichkeiten und Grenzen menschlicher Wahrnehmung zu erfassen, legte die Internationale Beleuchtungskommission (CIE) Standards fest, die maßgeblich für die allgemeingültige Quantifizierung von Wahrnehmungsforschung sind. Diese Normierung der Wahrnehmung wird als der "Normalbeobachter" als Grundlage für die menschliche visuelle Wahrnehmung, sowie für die Farb-Messtechnologie genutzt. (datacolor [Gabriele Hiller], 2019)

Der Kleinfeld(2°)-Normalbeobachter (CIE31): Der 1931 von der CIE veröffentlichte Standard bezieht sich auf ein Experiment zum Farbsehen des Menschen zum Zwecke der Definition des Normalbeobachters. Hierbei wurde die durchschnittliche Farbempfindung gemessen und ausgewertet. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Probanden den Farbreiz direkt mit dem Bereich des Auges wahrnehmen, bei dem die wahrgenommene Schärfe am größten ist, da der Mensch dort Farben am exaktesten wahrnehmen kann. Dieser Bereich ist der "gelbe Fleck", oder auch Fovea genannt. Dabei muss die Farbprobe bei einem normalen Betrachtungsabstand etwa 2° von der eigentlichen optischen Achse des Auges abweichen. Daher wurde der Winkel für den Normalbeobachter auf genau diese 2° festgelegt. (datacolor [Gabriele Hiller], 2019)

Der 10° Normalbeobachter (CIE64): Im Jahr 1964 veröffentlichte die CIE jedoch einen neuen Standard. Nachdem die Wissenschaftler Judd und Jacobsen in Experimenten beweisen konnten, dass die zuvor genutzten 2° nicht dem realen Sichtfeld eines Menschen entsprechen, wurde der 10° Normalbeobachter als zusätzlicher Norm-Betrachtungswinkel eingeführt. (datacolor [Gabriele Hiller], 2019)

Das CIE-Normfarbsystem: Um eine Grundlage für die Quantifizierung und die Feststellung der Möglichkeiten des menschlichen Farbsehens festzustellen,

wurde 1931 der CIE31 als Norm-Farbraum für das menschliche Farbsehvermögen festgelegt. Der Farbraum deckt alle grundsätzlich wahrnehmbaren Farben in Korrelation zum Normalbeobachter ab. Durch das Normfarbsystem ist es möglich, den gesamten Bereich menschlich wahrnehmbarer Farbreize numerisch zu quantifizieren. (NIST- National Institute of Standards and Technology & Ohno, 2000)

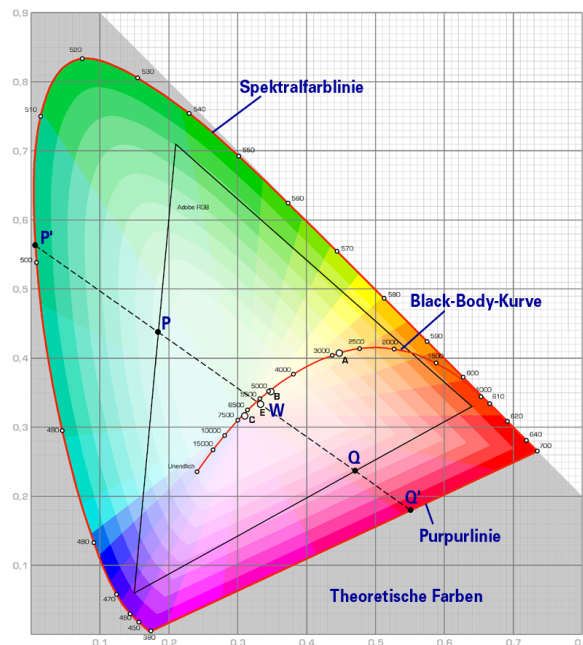


Abbildung 9: Die CIE Normfarbtabelle (Anders, 2005)

Die Werte für die CIE Normfarbtabelle entstehen durch die Umrechnung der gewonnenen Messwerte. Hierbei wurde anhand des Normalbeobachters errechnet, wie sehr ein definiertes reales Lichtspektrum das menschliche Auge reizt. Diese Berechnungen wurden in die sogenannten Farb-Matching-Funktionen $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ übertragen. Die Ergebnisse aus den Experimenten zum 2° Normalbeobachter (CIE 31) wurden in drei Tristimulus-Kurven umgerechnet, die das "normale" menschliche Sehen abbilden, indem sie beschreiben wie sensitiv das menschliche Auge für die jeweilige Wellenlänge ist. Durch eine mathematische Integration ist es so möglich, die Werte in X, Y und Z-Koordinaten (Tristimulus-Werte) umzurechnen. Um die Tristimulus-Werte in einer zweidimensionalen Grafik darstellbar zu machen, wurden diese mithilfe einer Formel umgestellt.

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.2404542 & -1.5371385 & -0.4985314 \\ -0.9692660 & 1.8760108 & 0.0415560 \\ 0.0556434 & -0.2040259 & 1.0572252 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

Abbildung 10: Formel zur Umrechnung von XYZ zu RGB (Mobley, 2021)

Das Ergebnis lässt sich so in ein Chromatizitätsdiagramm, die CIE-Normfarbtafel, überführen und zweidimensional darstellen. Um die Farbräume jedoch in der digitalen Welt nutzen zu können, müssen die Werte in R(ot), G(rün), und B(lau) umgerechnet werden, um den Darstellungsmöglichkeiten von Displaytechnologie zu entsprechen. Hierzu wird über eine farbraumabhängige Matrixtransformation (Primärfarben/Weißpunkt) in lineares RGB überführt. Bei sRGB kommt zusätzlich eine Transferfunktion hinzu. Diese mathematische Operation ist auch rückwärts möglich, um RGB-Werte in XYZ zu überführen. Um eine noch akkuratere Umrechnung zu erreichen, sind Faktoren wie der Farbraum und weitere Aspekte mathematisch zu berücksichtigen. Weiterführend wird dies in Kapitel 5 bearbeitet. (NIST- National Institute of Standards and Technology & Ohno, 2000)

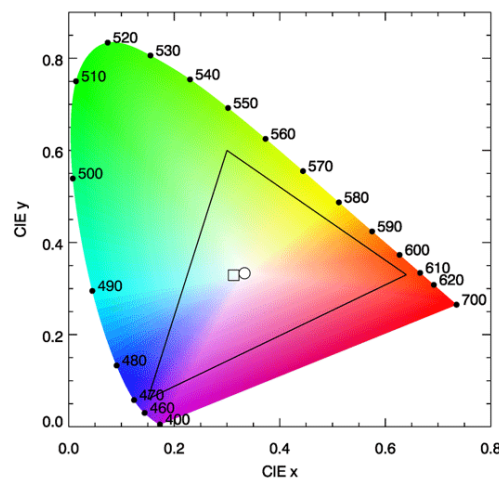


Abbildung 11: sRGB Farbraum (Dreieck) in der CIE Normfarbtafel (Mobley, 2021)

CIE 1960 UCS (uv-Farbraum) & CIE 1976 (u'v'-Farbraum): Der 1960 von der CIE entwickelte UCS (Uniform Chromaticity Scale), oder auch "uv-Farbraum" genannt, lässt sich als Weiterentwicklung von CIE31 verstehen. Der Wissenschaftler John MacAdam konnte durch ein Experiment nachweisen, dass sich im CIE31 Farbtöne befanden, die vom menschlichen Augen nicht zu unterscheiden sind. Diese Bereiche konnte er mit Ellipsen (MacAdam-Ellipsen) innerhalb des CIE31

Farbraums darstellen. Diese Ellipsen beschreiben den Schwellwert, ab dem das menschliche Auge bestimmte Farbwerte voneinander unterscheiden kann.

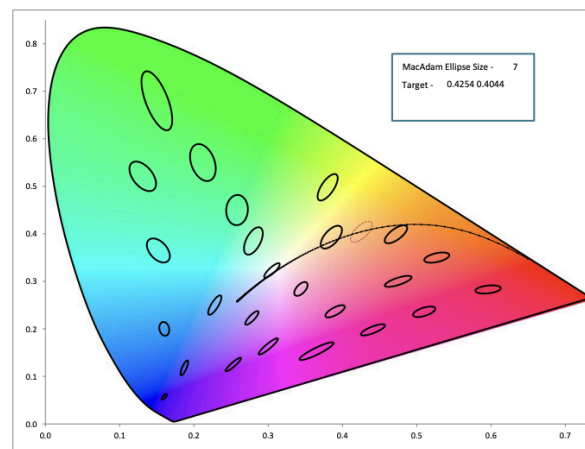


Abbildung 12: MacAdam Ellipsen im CIE31-Farbraum (Wood, 2010)

Durch die anschließende Umrechnung des CIE31 Farbraums entstand so der CIE76 Farbraum, der sich auf die vom menschlichen Auge unterscheidbaren Farbwerte beschränkt und somit auch die Aufteilung der einzelnen Spektralbereiche in anderer Skalierung darstellen kann. Das CIE-1976-u'v'-System stellt eine Transformation des CIE-1931-Farbraums dar, die die Gleichabständigkeit verbessert, so dass Abstände im Diagramm näherungsweise besser die wahrgenommenen Farbunterschiede abbilden. Durch die Umrechnung konnte die v-Achse um 50% skaliert werden, was zu einer anderen Verteilung der Farben führt. Dieses neu geschaffene System nennt sich das u'v'-System (CIELUV-Farbsystem). (NIST- National Institute of Standards and Technology & Ohno, 2000)

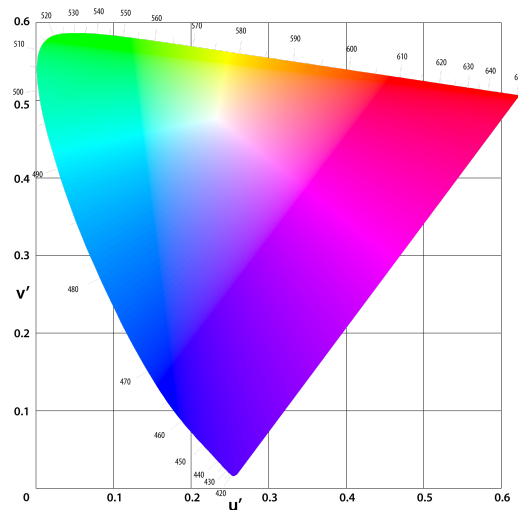


Abbildung 13: CIE1976 Farbraum in Anlehnung an MacAdams (Abbildung X: CIEL U*V*-Farbraum nach CIE 1976 UCS (Wikipedia-Autor „Adoniscik“, 2007)

2.2.1 Messbares Spektrum

Das Wort “Licht” beschreibt umgangssprachlich meist den für das menschliche Auge wahrnehmbaren Abschnitt des elektromagnetischen Spektrums.

Dieses Spektrum umfasst Wellenlängen, deren Längen in metrischen Einheiten wiedergegeben werden. (CIE - International Commission on Illumination, 2020)

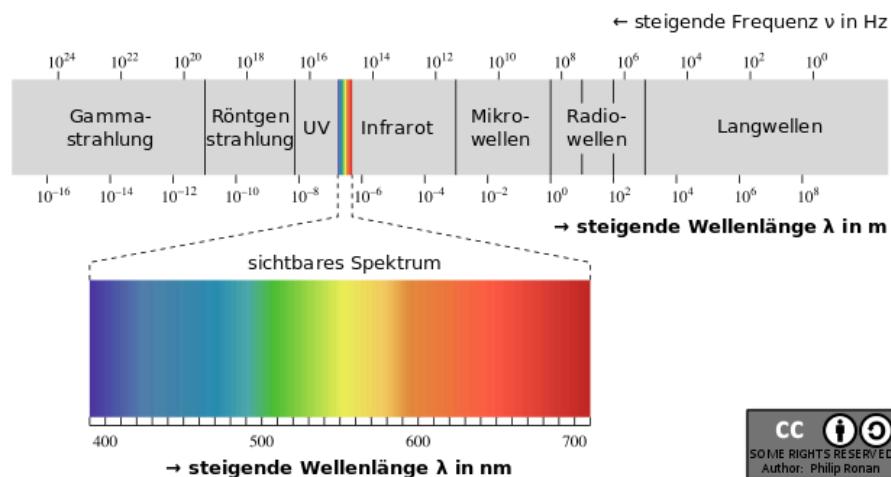


Abbildung 14: Elektromagnetisches und sichtbares Spektrum (Ronan, o. D.)

2.2.2 Sichtbares Spektrum

Für sichtbare Strahlung existieren keine festen spektralen Grenzwerte; je nach Betrachtungsbedingungen wird die Untergrenze häufig zwischen 360–400 nm und die Obergrenze zwischen 760–830 nm angesetzt. (CIE - International Commission on Illumination, 2020) In der Filmproduktion wird jedoch nicht ausschließlich mit den Augen gearbeitet, sondern auch mit Kamera-Sensoren, welche die Strahlung in Informationen umwandeln. Daher sind auch die Bereiche des ultravioletten und des Infrarotspektrums relevant. Kamerasensoren können auch diese Spektren in Informationen umwandeln..

2.2.3 CCT & CC

In der Filmproduktion ist es üblich, farbliche Abweichungen eines Lichts von einem definierten Referenz-Weißpunkt mithilfe der korrelierten Farbtemperatur (CCT) sowie eines Tint- bzw. CC-Wertes anzugeben. CCT steht hierbei für “correlated colour temperature”, was so viel bedeutet wie “korrelierende Farbtemperatur”. Dies bezieht sich auf die gemessene Temperatur einer Lichtquelle in Korrelation zur Temperatur des planckschen Strahlers im Blackbody. So lässt sich beobachten, dass glühende Objekte mit steigender Temperatur die Lichtfarbe von einem anfänglich dunklen Rot über ein neutral wirkendes Weiß bis hin zu Blautönen verändern. Die Farbtemperatur (CCT) bedient sich hierbei der “Kelvin-Skala” und nutzt die SI-Einheit *Kelvin* (*K*). (Hoffmann & Tingwaldt, 1938)

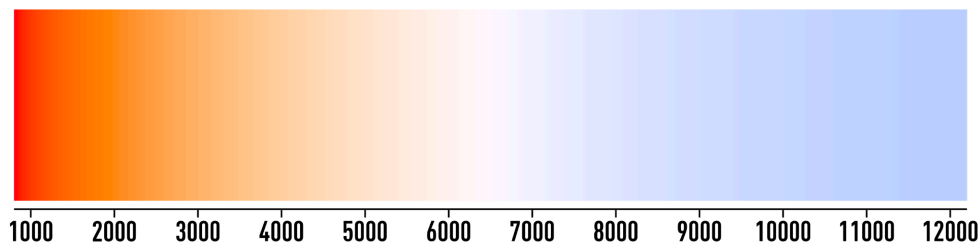


Abbildung 15: Beispielhafte Kelvin-Skala von 1000 Kelvin - 12.000 Kelvin
(Wikipedia-Autoren, 2003)

In der Theorie sind Kelvin-Werte von 0 Kelvin bis zu 25.000 Kelvin und darüber hinaus möglich. Die Filmproduktion bewegt sich jedoch in der Regel zwischen etwa 1.000 Kelvin und 10.000 Kelvin, wobei hier beide Extrempunkte eher als Effekt

genutzt werden. Beispielhaft könnten mit einer Temperatur von 1000 Kelvin bis 2000 Kelvin Feuereffekte imitiert werden.



Abbildung 16: Der “Nachtkönig” aus “Game of Thrones” im Kerzenlicht (Vargas, 2019)

Mit z.B. 8.000 Kelvin bis 10.000 Kelvin können die Farben der “blauen Stunde” während der Abenddämmerung oder auch das kühle nördliche Himmelslicht während eines Schneesturms.



Abbildung 17: “Der Nachtkönig” aus “Game of Thrones” im Schnee (Tobias, 2024)

Farbtemperatur-Korrekturen im Filmbereich werden häufig in Mired (MK^{-1}) statt Kelvin angegeben, da Mired eine annähernd wahrnehmungslineare, also meist auch sichtbare, Beschreibung von Farbverschiebungen entlang der Planckschen Kurve bietet.

Neben der Farbtemperatur gibt es eine weitere relevante farbliche Abweichung, die gemeinsam mit der Farbtemperatur zum Tagewerk der Filmproduktion gehört. “CC” steht für “Color Compensation”, was mit Farbkompensation übersetzt werden könnte. Häufig wird dafür aber der Begriff “Tint” benutzt, was “Farbton” bedeutet. Simplifiziert handelt es sich hierbei um die Farbton-Verschiebung in die Bereiche Grün oder Magenta. (Ebrary, o. D.)

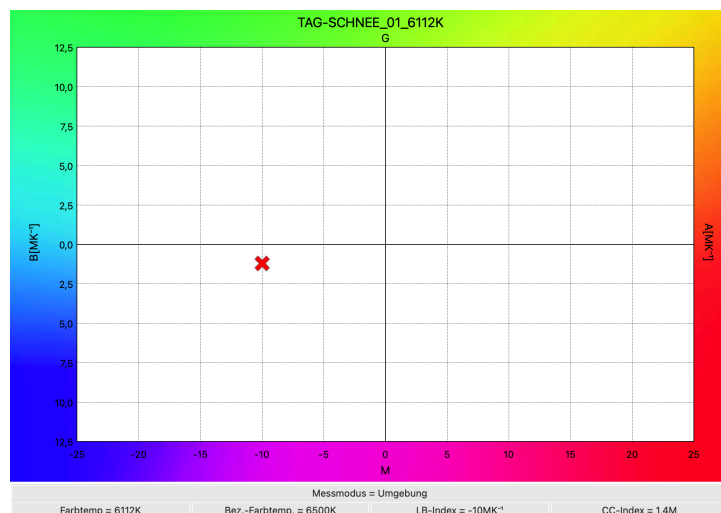


Abbildung 18: Weißabgleich-Messung einer günstigen LED-Lampe (Eigene Abbildung)

In Abbildung 18 ist zu sehen, dass die gemessene Lichtquelle in der Farbtemperatur um 488 Kelvin von der vor der Messung eingestellten Referenztemperatur (6500 Kelvin) abweicht. Diese Abweichung der Messung in CCT wird in der Mired-Skala als -10MK^{-1} ausgedrückt. Das rote Kreuz markiert den Korrekturpunkt entlang der Temperatur-Achse (Amber/Bernstein - Blue/Blau) und zeigt damit an, dass die Lichtquelle um 488 Kelvin wärmer ist als der Referenzpunkt. Entsprechend müsste die Quelle um 488 Kelvin kühler eingestellt werden, um den gewünschten Referenzpunkt zu erreichen. Entlang der Y-Achse ist die Korrekturabweichung für den Bereich Grün und Magenta zu sehen, angegeben als “CC-Index”, mit 1,4M. Das bedeutet, dass eine Korrektur durch das Hinzufügen von 1,4 Magenta CC Einheiten nötig ist, um den Referenzpunkt zu erreichen. (Ebrary, o. D.) Dies ist jedoch eine praxisnahe Methodik für die Messung und das Einstellen von Lampen. Die wissenschaftliche Beschreibung dieser Farbverschiebung wird mit dem Delta $u'v'$ Wert angegeben. (Held, 2022)

2.2.4 Delta $u'v'$

Wissenschaftlich lässt sich diese chromatische Abweichung als Abstand im CIE 1976 $u'v'$ -Chromatizitätsdiagramm (UCS) ausdrücken. Dabei liegt für jede korrelierte Farbtemperatur (CCT) ein Referenzpunkt auf der Planckschen Kurve. Delta $u'v'$ beschreibt den Abstand der gemessenen Chromatizität (u' , v') dieses Leuchtmittels zu diesem Referenzpunkt bzw. zur Planckschen Kurve bei gleicher CCT. Positive oder negative Werte entsprechen einer Verschiebung auf die eine oder andere Seite der Kurve (in der Praxis: „grüner“ oder „magentafarbener“), unabhängig davon, ob die CCT selbst korrekt getroffen wird. Damit ergänzt Delta $u'v'$ die CCT-Angabe um eine zweite, für die Farbwahrnehmung relevante Dimension der Lichtfarbe. Wenn beispielsweise bei der Testquelle mit einer Farbtemperatur von 3200 Kelvin eine Abweichung innerhalb des Farbraums gemessen wird, kann dieser Wert der Abweichung in Delta $u'v' > 0$ oder < 0 angegeben werden. Je größer die Verschiebung vom Normwert, desto höher der Delta $u'v'$ Wert. (Held, 2022)

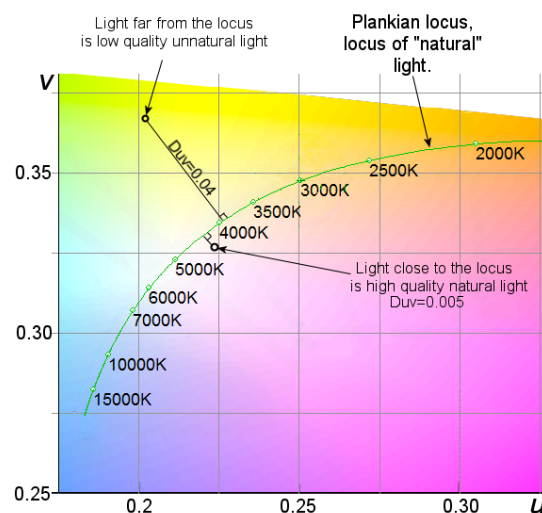


Abbildung 19: Delta $u'v'$ Abweichung im CIE-1976- $u'v'$ -Farbraum (Ransen, 2016)

Entsprechend der Angaben der IESNA (Illuminating Engineering Society of North America) LM 79 08 gilt ein Delta $u'v'$ Wert weniger oder gleich 0,001 als chromatisches Abbild im Bezug auf CCT und CC. (Ransen, 2016) Der Delta $u'v'$ Wert beschreibt den chromatischen Abstand im CIE-1976- $u'v'$ -Farbraum. Da die meisten Lichtquellen jedoch mit einer Farbtemperatur nahe der planckschen Kurve verlaufen, äußert sich eine Verschiebung im positiven Delta $u'v'$ meist als grünliche und im negativen Delta $u'v'$ als magentafarbene Verschiebung. Bei identischer CCT gilt: je geringer der Delta $u'v'$ Unterschied, desto ähnlicher ist die chromatische Lage zweier Lichtquellen im Farbraum. Demnach eignet sich der Delta $u'v'$ Wert nicht, um

die spektrale Leistung in Bezug auf Hauttöne für die Forschungsfrage einschätzen zu können. Zwei Lichtquellen mit demselben Delta $u'v'$ Wert können dennoch wahrnehmbare Farbunterschiede aufgrund unterschiedlicher spektraler Leistungsverteilungen erzeugen. (Royer et al., 2022)

2.2.5 Weißpunkte (Standard Illuminants)

Weißpunkte sind theoretisch festgelegte Normwerte auf Basis von Tageslichtmessungen, die als Referenzpunkte für neutrales Weiß dienen sollen. Die CIE legte dazu gemeinsam mit der ISO (International Organization for Standardization) verschiedene Standard-Weißpunkte anhand verschiedener Szenarien fest. (NIST- National Institute of Standards and Technology & Ohno, 2000)

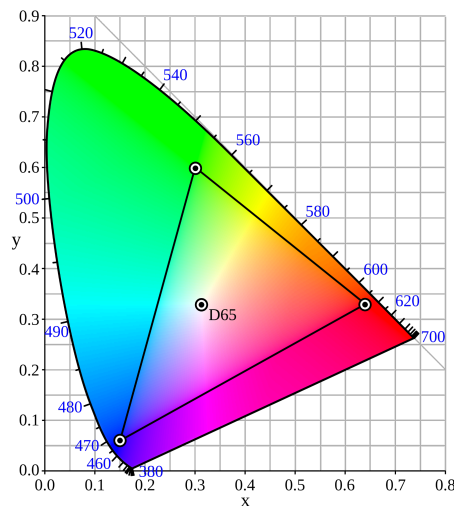


Abbildung 20: Der D65 Weißpunkt im sRGB Farbraum innerhalb des CIE31 Farbraum-Systems. (Wikipedia-Autoren [Mysid], 2005)

Standard "A" ist der Weißpunkt für Wolframlicht und weißglühende Leuchtmittel und wurde auf 2856 Kelvin festgelegt. Standard "B" entspricht dem direkten Sonnenlicht der Mittagssonne bei 4874 Kelvin. "C" steht für das durchschnittliche Tageslicht am Nordhimmel und wurde bei 6774 Kelvin festgelegt. Die Verwendung der Weißpunkte "B" als auch "C" werden von der CIE nicht mehr empfohlen.

Neben dem A-Wolframlicht-Standard ist der Weißpunkt D65 (6500 Kelvin) weit verbreitet und wird in diversen Applikationen genutzt. "D" steht in der Nomenklatur für "Daylight" als Bezeichnung für Tageslicht. D65 repräsentiert das durchschnittliche Mittagslicht. D65 dient beispielsweise als Weißpunkt für den sRGB

Farbraum für Displaytechnologie. Die Zahl steht für die ersten beiden Nummern der Kelvinwerte. Neben D65 werden jedoch auch weitere Weißpunkte genutzt (siehe Abbildung 21). (NIST- National Institute of Standards and Technology & Ohno, 2000)

Name	CIE 1931 2°		CIE 1964 10°		CCT (K)	Note
	x_2°	y_2°	x_{10}°	y_{10}°		
A	0.44758	0.40745	0.45117	0.40594	2856	incandescent / tungsten
B	0.34842	0.35161	0.34980	0.35270	4874	obsolete, direct sunlight at noon
C	0.31006	0.31616	0.31039	0.31905	6774	obsolete, average / North sky daylight NTSC 1953 ^[35] , PAL-M ^{[36][a]}
D50	0.34567	0.35850	0.34773	0.35952	5003	horizon light, ICC profile PCS ^[a]
D55	0.33242	0.34743	0.33411	0.34877	5503	mid-morning / mid-afternoon daylight
D65	0.31272	0.32903	0.31382	0.33100	6504	noon daylight: television, sRGB color space ^[a]
D75	0.29902	0.31485	0.29968	0.31740	7504	North sky daylight

Abbildung 21: Weißpunkttafel im CIE32 / CIE64 System mit Y,X Koordinaten
(Wikipedia contributors, 2025)

Sowohl der Weißpunkt D65 als auch die Plancksche Kurve im Blackbody bei 6500 Kelvin können als Standard für ein neutrales Weiß in der Farbmessung genutzt werden. Diese unterscheiden sich jedoch voneinander. Auf der Suche nach dem "Daylight-Locus", dem Tageslicht-Pendant zur planckschen Strahler, wurden 622 Messpunkte von Tageslicht zu den unterschiedlichen Zeiten in den CIE1931 Farbraum eingetragen und mit der Planckschen-Kurve verglichen. Rechnerisch ergab sich eine Kurve, die mit einem leichten Versatz annähernd parallel zur Planckschen Kurve im grünen Spektralbereich lag. (Wyszecki & Stiles, 2000)

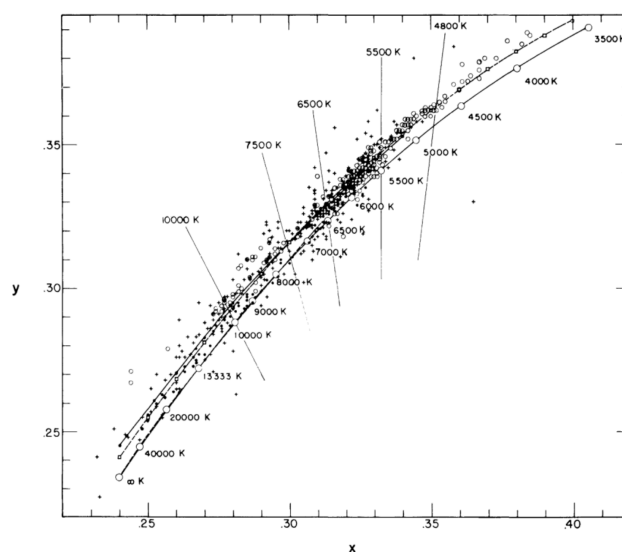


Abbildung 22: 622 Tageslicht-Messpunkte und generierte Tageslicht-Kurve im Vergleich zur Planckschen Kurve im CIE31 Farbraum. (Wyszecki & Stiles, 1982)

2.3 Farbwiedergabemetriken

Da Lichtquellen je nach Anwendungsbereich sehr unterschiedliche Anforderungen an die Farbwiedergabe stellen, existieren verschiedene Metriken zur Bewertung der Lichtqualität. Gerade im filmischen und fotografischen Kontext spielt die Farbwiedergabe eine zentrale Rolle, da sie die Wahrnehmung von Materialien, Oberflächen, Hauttönen und Stimmungen maßgeblich beeinflusst. Gleichzeitig ist Farbwiedergabe ein komplexes Zusammenspiel aus den spektralen Eigenschaften der Lichtquelle, den Eigenschaften der beleuchteten Objekte sowie der Wahrnehmung durch den Betrachter oder ein aufnehmendes System. Farbwiedergabemetriken versuchen diese komplexen Zusammenhänge in möglichst einfache vergleichbare Kennzahlen zu überführen. Dabei existieren unterschiedliche Systeme, die sich sowohl in ihrer Herangehensweise als auch in ihrem jeweiligen Fokus unterscheiden. Die Ausgestaltung der Metriken orientiert sich dabei an unterschiedlichen Anwendungsszenarien und Bewertungskriterien.

Dieses Kapitel widmet sich den wichtigsten Farbwiedergabemetriken und deren normativen Grundlagen. Im Fokus stehen dabei jene Systeme, die in der Film- und Fotoproduktion Anwendung finden. Die vorgestellten Metriken werden miteinander verglichen und im Hinblick auf ihre Aussagekraft sowie ihre Eignung zur Beantwortung der Forschungsfrage eingeordnet.

2.3.1 CRI (Color Rendition Index)

Die Abkürzung CRI steht für "Color Rendition Index", was zu deutsch mit "Farbwiedergabe-Skala" übersetzt werden könnte. Der CRI wurde ursprünglich von der NIST (National Institution of Standards and Technology) und der CIE (International Commission on Illumination) entwickelt, um Leuchtstoff-Lampen in den 1950er Jahren und danach zu messen und zu bewerten. Da die ersten Leuchtstofflampen durch eine sehr schlechte Farbwiedergabe auffielen, war es notwendig, eine Skala zu erschaffen, um potentielle Kunden von den Verbesserungen der Produkte zu überzeugen. (Wood, 2014)

Methode 1: CRI *Ra* (Reference Average/Allgemeiner Referenzindex)



Abbildung 23: CRI Ra und Rg Farbtafeln (GreenLED, 2023)

Bei dieser Methode werden die ersten acht Felder gemessen, sowie deren Durchschnitt ermittelt und in einer Skala von 0-100 angegeben. Der Ra-Wert testet hierbei ausschließlich pastellartige und keine gesättigten Farben. (Schroeder, 2017)

Methode 2: CRI *Re* (Reference Extended/Erweiterter Referenzindex)

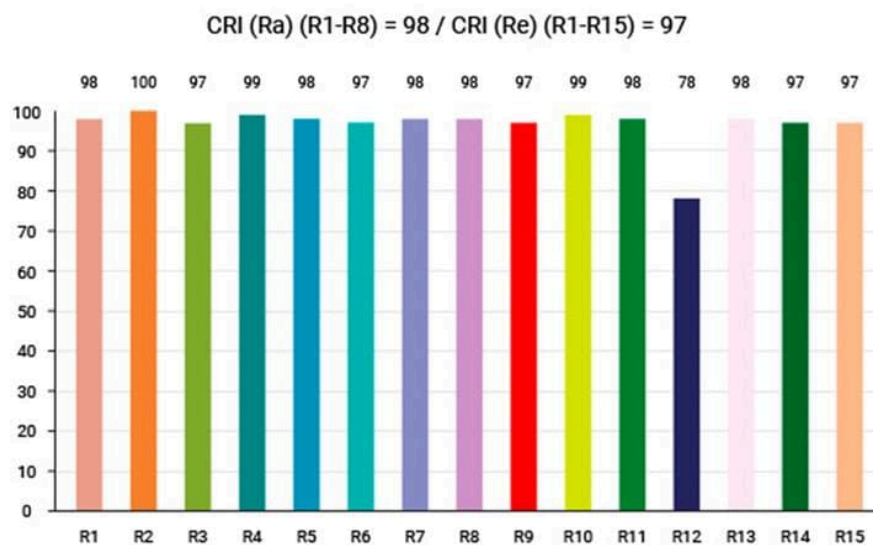


Abbildung 24: Eine Auswertung der CRI-Farbmesswerte einer CRI 97 Lichtquelle (Ko, 2025)

Die wiedergegebenen Farben werden mit denen des je nach korrelierter Farbtemperatur definierten CRI-Referenzlichts (Planckscher Strahler bzw. CIE-Daylight) verglichen und die Abweichungen werden in einer Skala von 0–100 festgehalten. Auf Abbildung 24 ist zu sehen, dass der R1 Wert zu 98% dem Farbton entspricht, den das Normlicht erzeugt hat. Bei dem dunklen Blauton wird ein Wert von 78 erreicht, was bedeutet, dass er deutlich (22%) von dem Blauton abweicht, den das Normlicht erzeugen würde. Dieses Beispiel zeigt recht anschaulich, warum eine Lampe mit einem hohen CRI Wert von 97 dennoch bestimmte Farben anders wiedergibt als das Normlicht. (Wood, 2014)

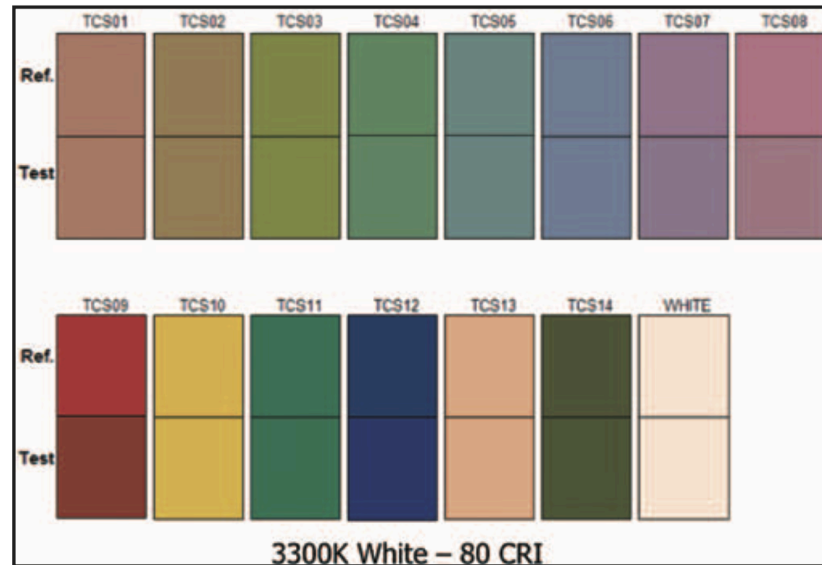


Abbildung 25 CRI-Test Skala mit 15 Farben pro Referenz und Test Leuchtmittel
(Wood, 2014)

Von besonderem Interesse sind bei der Messung vor allem der R9 Wert für die Farbe "Tiefrot", da beispielsweise diverse LED Technologien lange Probleme hatten, diese realitätsnah darzustellen. Ein ebenfalls hervorzuhebender Wert ist der R15, welcher einen Hautton darstellen soll und somit einen Referenzpunkt zur helleren Hautfarben darstellt. R13 stellt einen weiteren wichtigen Wert für Hauttöne dar. Der CRI Score ergibt sich aus dem Durchschnitt aller Farbvergleichswerte und gibt keine Auskunft über die einzelnen Test-Farben. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die CRI Werte ausschließlich Auskunft über die Qualität der Farbwiedergabe der 15 Testfarben geben. (Wood, 2014)

Da eine Lichtquelle mit einem CRI Wert über 90 dennoch auch bei den Hauttönen kritische Ergebnisse liefern kann, eignet sich der CRI Wert nicht für die Bewertung der Forschungsfrage dieser Arbeit.

2.3.2 CQS (Color Quality Scale)

Die Color Quality Scale (CQS) wurde vom National Institute of Standards and Technology (NIST) entwickelt und kann auf Deutsch mit dem Begriff „Farbqualitätsskala“ übersetzt werden. Die CQS gilt als Weiterentwicklung des CRI. Sie nutzt 15 Farbfelder (Q1–Q15), die mit stärker gesättigten Farben arbeiten, statt der überwiegend ungesättigten Testfarben des CRI. Dies erhöht die Sensitivität

gegenüber spektralen Defiziten, so dass Lichtquellen, die bei gesättigten Farben hohe Farbwerte erzielen, in der Regel auch eine gute Wiedergabe weniger gesättigter Farben aufweisen, während umgekehrt hohe CRI Werte dies nicht zwangsläufig garantieren. Die CQS wurde entwickelt, um akkuratere Aussagen über die Farbqualität von Lichtquellen, insbesondere von LEDs, treffen zu können, was der CRI bei LEDs mit schmaler spektraler Abdeckung nur unzureichend leisten konnte. (Woods, o. D.)

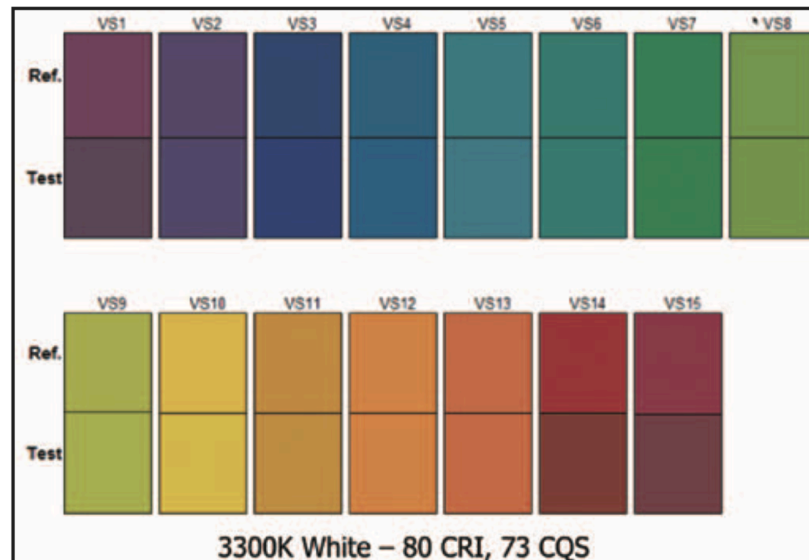


Abbildung 26: CQS Skala derselben LED Einheit von Abbildung 25 (Wood, 2014)

Dennoch macht auch die CQS ausschließlich Aussagen über die getesteten Farbinformationen. Dieses grundlegende Problem teilen sich CRI und CQS weiterhin: Es werden keine Aussagen über den gesamten Farbraum, beziehungsweise die vollständige Bandbreite aller möglichen Objektfarben getroffen. Über- oder Untersättigungen einzelner Farben können daher trotz hoher CRI und CQS Werte auftreten. Zudem besteht die Möglichkeit, dass ungenügende Farbwiedergaben einzelner Farben im Gesamt-Score durch sehr gute Farbwerte anderer Farbfelder kompensiert werden. (Woods, o. D.)

2.3.3 TLCI-2012 & TLMF-2013

Der 2012 von der EBU (The European Broadcasting Union) entwickelte "Television Lighting Consistency Index", kurz "TLCI", nimmt sich den Makeln und Nachteilen des CRI an und entwickelt dieses Grundkonzept weiter. Statt dem "Standard Observer Human", einem Standard für die Sehfähigkeit des menschlichen Auges,

nutzt der TLCI-Wert einen “3-Chip-Broadcastkmerasensor” als Referenzpunkt für die Interpretation der Farbwerte.

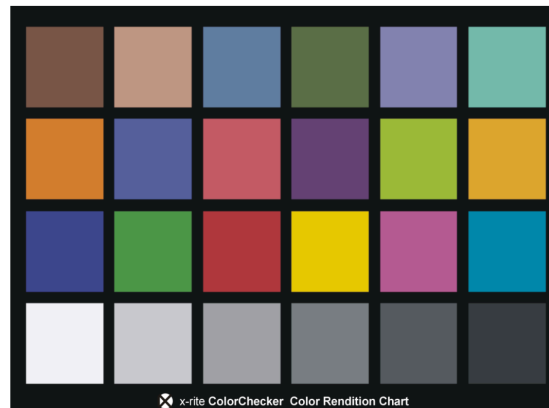


Abbildung 27: “Test-Tafel mit 18 Farben und 6 Graustufe (EBU [TECH 355], 2017)

Der TLCI-Wert nutzt, ähnlich wie der CRI, eine Farbpalette mit 16 verschiedenen definierten Farbwerten, sowie sechs definierte Graustufen als Referenzziel für die Lichtquelle. Zusätzlich zur einfachen Auswertung folgt beim TLCI-Wert eine Zwei-Weg-Evaluation der Ergebnisse für verschiedene Anwendungszwecke.

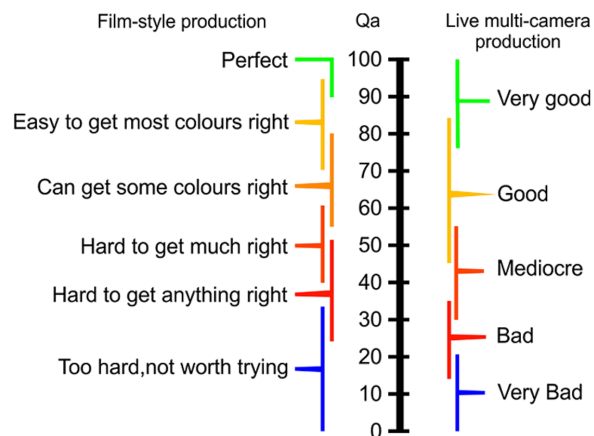


Abbildung 28: Die EBU-TLCI Qa-Skala (Quality-Average auf Deutsch: Durchschnittsqualität) (EBU [TECH 355], 2017)

Die von der EBU entwickelte Skala dient zur Einordnung der Qualitäts-Messergebnisse für jeweils die Film- und die Live-Multikamera-Produktion. Die Skala wurde derart definiert, dass eine übliche Tageslicht-Leuchtstoffröhre auf ihr einen Qa-Wert von etwa 50 erreicht. Es existieren Farbwerte auf den Farbtafel, deren exakter Farbton in einigen Farbräumen nicht abgebildet werden kann. Als Beispiele hierfür dienen R18 (Cyan) und R16 (Gelb). Dies wird jedoch beim TLCI

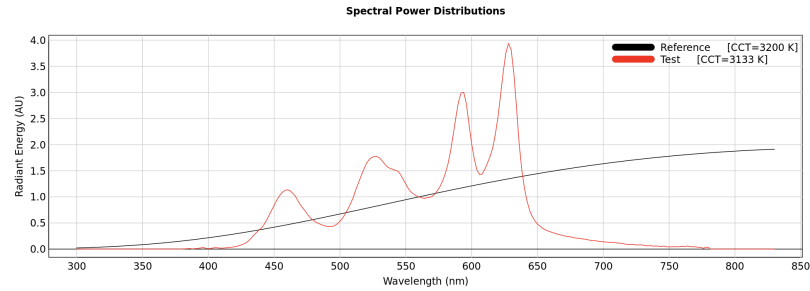
berücksichtigt und führt nicht zu verfälschten Ergebnissen bei der Anwendung und Auswertung. (EBU [TECH 355], 2017)

Ein TLCI-Wert von etwa 75 über höher kann also, je nach Anwendungsbereich, als ein Indikator für eine ausreichende Farbqualität verstanden werden. Wenn verschiedene Lichtquellen im selben Bild genutzt werden sollen, können diese zwar beide für sich stehend hochwertige Farben produzieren, aber dennoch recht unterschiedlich sein. Die ebenfalls von der EBU entwickelte TLMF-2013 kann als Begleit-Metrik für TLCI-2012 verstanden werden. Der "Television Luminair Matching Factor" nutzt als Referenz eine gewählte Lichtquelle und vergleicht die Qualität dieser mit einer jeweils anderen ausgewählten Lichtquelle. (Wood, 2013)

Der TLCI eignet sich also besser als der CRI oder CQS, um die Farbwiedergabe im Bereich TV und Film für bestimmte Farben einschätzen zu können. Wenn es sich also um die Bewertung einer einzelnen im Vergleich zu einer metrisch perfekten Lichtquelle handelt, kann die TLCI-2012 Auswertung durchaus genutzt werden. Wenn es sich aber um einen Vergleich zweier Quellen handelt, ist der TLMF-Wert eine bessere Referenz, um beide miteinander zu vergleichen. (Wood, 2013)

2.3.4 SSI - (Spectral Similarity Index)

Im Vergleich zur CRI-Metrik, die einen "Observer" als Normwert für das menschliche Sehvermögen einsetzt und der TLCI-Metrik, die als Referenzpunkt einen genormten theoretischen Kamerasensor nutzt, bedient sich der Spectral Similarity Index an keinem dieser Systeme. Der SSI wurde von der "*Academy of Motion Pictures Arts and Sciences*" entwickelt. Der Name kann im Deutschen mit "Spektral Vergleichsindex" übersetzt werden. Beim SSI werden die spektralen Differenzen und Gemeinsamkeiten gemessen, dargestellt und in Werte aufgeschlüsselt. Der SSI vergleicht Wellenlängen im Bereich von 300 nm bis maximal 830 nm.



Results

Spectral Similarity Index

SSI[P3200] = 64

Abbildung 29: SSI-Simulation beim Vergleich einer “warmweißen” LED Lampe mit 3200 Kelvin im Vergleich zu einer “perfekten” Lichtquelle mit 3200K. (SSI Calculator, o. D.)

In der spektralen Ansicht des Diagramms werden beide Quellen dargestellt. Zusätzlich wird eine Tabelle in 1 nm Schritten erstellt, die die Differenz zur Referenzquelle jedes Nanometers numerisch darstellen kann.

450	0.83545	450	0.41917
451	0.88591	451	0.42383
452	0.93636	452	0.42851
453	0.97727	453	0.43321
454	1.01818	454	0.43793
455	1.05000	455	0.44267
456	1.08182	456	0.44743
457	1.10000	457	0.45221
458	1.11818	458	0.45701
459	1.12727	459	0.46182
460	1.13636	460	0.46666

Abbildung 30: Die numerische Darstellung des spektralen Vergleichs aus Abbildung 29. (SSI Calculator, o. D.)

Bei einem SSI-Score von 100 ist also zu erwarten, dass sowohl die Testlichtquelle, als auch die Referenzquelle die gleichen Ergebnisse bei der Farbwiedergabe erzielen. Damit kann eine valide Aussage über die Tauglichkeit zweier Lichtquellen im selben Bild oder sogar auf demselben Objekt mit denselben Erwartungen an die Farbwiedergabequalität getroffen werden. Wenn Beispielsweise LED-Lampe A und LED-Lampe B einen SSI-Score von 100 aufweisen, sind sie ein spektrales Abbild voneinander und es können keine wahrnehmbaren Unterschiede bei der Farbwiedergabe entstehen. Der SSI-Score wird numerisch in 0-100 ausgedrückt, wobei 0 für keine Übereinstimmung und 100 für eine perfekte Übereinstimmung

steht. Die Academy of Motion Picture Arts and Science gibt als praktische Richtlinie die folgenden Werte zur Einordnung vor. (Academy of Motion Picture Arts and Sciences, 2020) Um die Eignung einer Lichtquelle für die Farbwiedergabe nach dem SSI-Score zu überprüfen, wird die folgende Skala nahegelegt:

SSI < 60: Bedeutet wahrscheinlich Probleme bei der Farbwiedergabe.

SSI > 90: Farbwiedergabe-Probleme sind eher unwahrscheinlich.

SSI = 100: Es sind keine Farbwiedergabe-Probleme zu erwarten.

(Academy of Motion Picture Arts and Sciences, 2020)

Der SSI-Score bietet sich an, um die Qualität der Farbwiedergabe einer Lichtquelle mit einer anderen auf spektraler Ebene zu vergleichen. Je höher der Score der Testquelle im Vergleich zur Referenz ist, desto wahrscheinlicher sind auch die übereinstimmenden Leistungen bei der Farbwiedergabequalität. Für die Forschungsfrage in dieser Arbeit eignet sich der SSI-Score als Vergleichsmetrik also gut. Dabei sollte jedoch im Auge behalten werden, ob die Abweichungen im Spektrum dabei im für die Hauttöne relevanten Bereich liegen oder nicht. Für eine bessere Einordnung wäre der Vergleich der spektralen Bereiche, die für Hauttöne ausschlaggebend sind, sinnvoll.

2.3.5 ANSI/IES TM-30-18 - Technical Memorandum 30 (V. 2018)

Im Jahr 2015 wurde der TM-30-15 von der ANSI (American National Standards Institute) und IES (Illuminating Engineering Society) veröffentlicht und 2018 zu TM-30-18 weiterentwickelt. Der TM-30-18 vereint drei spezifische Kriterien zum Vergleich zweier Lichtquellen, die jedoch auch einzeln referenziert werden können. Bei der Testmethode zum TM-30-18 werden, ähnlich wie beim CRI, Farbtafeln genutzt, die mit der Testlichtquelle beleuchtet und anschließend mit der Farbdarstellung unter einer Referenzlichtquelle verglichen werden. Im Vergleich zum CRI werden jedoch 99 Testfarben für den Vergleich herangezogen. (Royer, 2022)

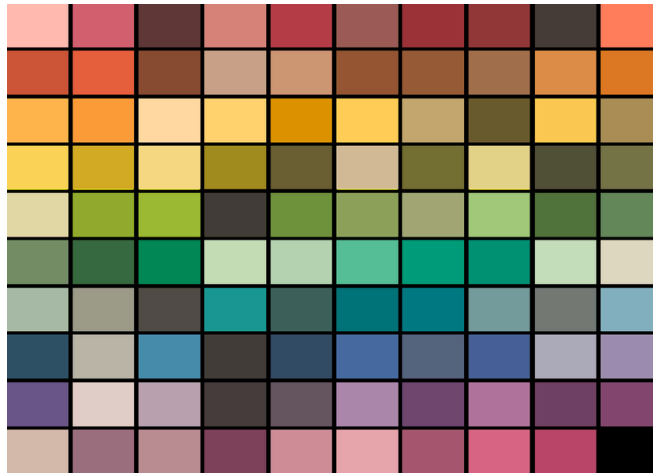


Abbildung 31: TM-30-18 Testkarte mit 99 Farbtafeln (Royer, 2021)

	C	B	A
ANSI/IES TM-30-18 R_f	≥ 70	≥ 74	≥ 78
ANSI/IES TM-30-18 R_g	≥ 89	≥ 92	≥ 95
ANSI/IES TM-30-18 $R_{cs,h1}$	-12% to 23%	-7% to 19%	-1% to 15%

Abbildung 32: Die 3 Spezifikation Kriterien des TM-30-18 Score. (Royer, 2019)

ANSI/IES TM-30-18 R_f steht hierbei für den Wert der Farbwiedergabe (Color fidelity) und wird mit numerischen Werten von 0-100 angegeben. (Royer, 2022)

ANSI/IES TM-30-18 R_g steht für die Sättigungsverhältnisse innerhalb des Farbraums. Der R_g -Wert wird innerhalb einer Skala von 60-140 angegeben. 100 steht hierbei für identische Sättigungswerte der verglichenen Farbwerte.

Werte < 100 stehen dabei für eine geringere Sättigung als bei der Referenzquelle, Werte > 100 für eine höhere Sättigung. (Royer, 2022)

ANSI/IES TM-30-18 $R_{cs,h1}$ - steht für den Wert der Farbverschiebung der Rot-Töne. Dabei gilt 0% als Deckungsgleich mit der Referenzlichtquelle. Dieser Wert betrifft auch die akkurate Farbwiedergabe von Hauttönen. (Royer, 2022)

Für die Evaluierung der Werte werden, ähnlich wie bei vorherigen Metriken, 99 Farbtafeln mit einer Referenz und einer Test-Lichtquelle beleuchtet, sowie die Unterschiede ausgewertet. (Royer, 2019) Zusätzlich zu den globalen Werten wird ein Vergleich der Farbsättigung der Testfarben mit der Referenzlichtquelle durchgeführt, um zu zeigen, welche Farbtöne unter der Testquelle gesättigter, blasser oder unverändert erscheinen. (Royer, 2022)

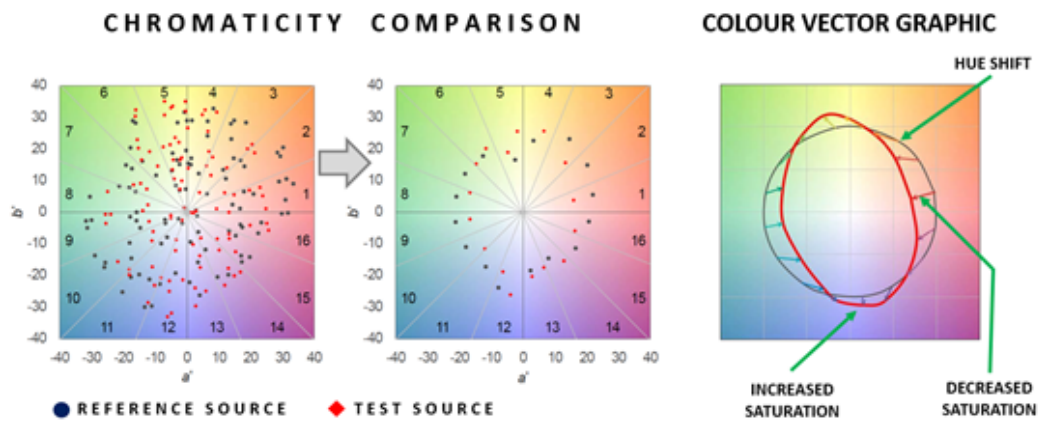


Abbildung 33: Chromatizitätsvergleich im TM-30-18 Vektorskop Vergleich
(Ansell-lighting, o. D.)

Nachfolgend sind Abbildungen zu sehen, die zeigen, wie die Hersteller Aputure, Arri und Nanlux ihre Lampen mit den Ergebnissen des TM-30 Scores bewerben. Dabei fällt auf, dass Nanlux und Aputure die Rf und Rg Werte angeben, Arri hingegen den Durchschnitt dieser Werte.

TM-30 Rf: Average 96
TM-30 Rg: Average 100

Abbildung 34: Herstellerangaben zum TM-30 Rf und Rg der Nanlux Evoke 600C LED-Lampe. (Nanlux, o. D.)

TM-30 RF (Average)	95
TM-30 RG (Average)	100

Abbildung 35: Herstellerangaben zum TM-30 Rf und Rg der Aputure 1200X LED-Lampe. (STORM 1200x | Aputure, o. D.-a)

3.200 to 5.600 K:
CRI Average > 98
TLCI Average > 95
TM-30 Average > 94

Abbildung 36: Herstellerangaben zum TM-30 der Arri Orbiter LED-Lampe. (ARRI, o. D.-f)

Im Jahr 2020 veröffentlicht die IES den TM-30-20, der allerdings kein neues System, sondern eine Weiterentwicklung des TM-30-18 um den Annex F und Annex E darstellt. Diese Abschnitte ergänzen das bestehende System um praxisnahe Spezifikationskriterien (Annex E), die zeigen, wie Farbwiedergabe je nach gewünschtem visuellen Effekt bewertet werden kann. Außerdem um Hintergrundinformationen und wissenschaftliche Begründungen (Annex F), die erklären, warum diese Kriterien gewählt wurden und wie sie mit der subjektiven Farbwahrnehmung zusammenhängen. (Royer, 2022)

2.4 Wahrnehmung von Lichtfarbe und Farbwiedergabe - Psychophysik

Ein zentraler Aspekt der Forschungsfrage bezieht sich auf die Potentiale der Wahrnehmung eines Menschen. Um herauszufinden, ob der Unterschied zwischen modernen LED-Lampen und traditionellen Kunstlichtlampen bei der Farbreproduktion von Hauttönen wahrnehmbar ist, ist es notwendig, die Möglichkeiten und Grenzen der menschlichen Wahrnehmung zu untersuchen. Die Fähigkeit Farben wahrzunehmen, funktioniert indem die S- M- und L- Zapfen im menschlichen Auge den Farbreizen durch Photonen der elektromagnetischen Strahlung ausgesetzt werden und diese im Gehirn in Informationen umwandeln. (Kremers et al., 2016)

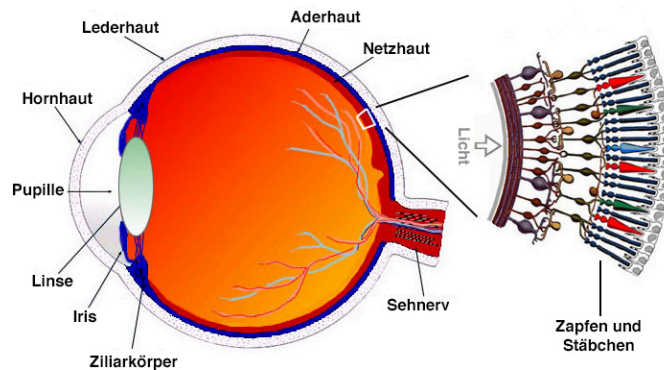


Abbildung 37: Aufbau des menschlichen Auges (BCM Families Foundation, 2025)

S, M und L stehen für Short, Long und Medium und beschreiben, welche Wellenlängen, also Kurz-, Mittel- oder Langwellen, von ihnen aufgenommen werden. Jede Zapfen-Art ist mit einer Maximalsensitivität bei verschiedenen Wellenlängen ausgestattet. S-Zapfen liegen bei einer Maximalsensitivität von etwa 430 nm, M-Zapfen bei etwa 530 nm und L-Zapfen bei etwa 560 nm. Das menschliche Auge kann Farben zwischen etwa 380 nm und 700 nm Wellenlänge wahrnehmen. (Kremers et al., 2016)

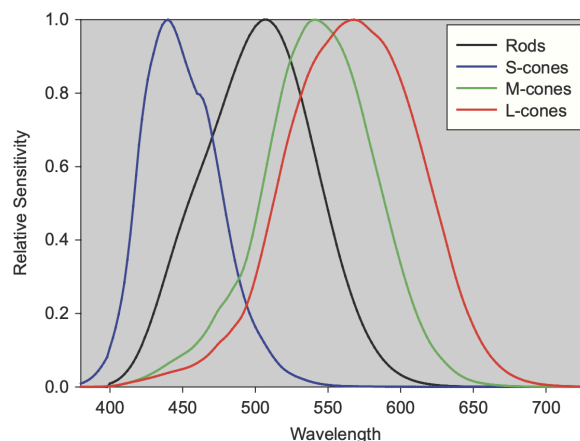


Abbildung 38: Normalisierte Werte der Sensitivität der menschlichen S, M und L Zapfen für die Stimulation an der Pupille. (Kremers, 2016)

Auch die Intensität der Helligkeit von Licht hat einen Einfluss auf die Farbwahrnehmung des Menschen. So wurde erforscht, dass sich das wahrnehmbare Spektrum von Farben bei geringer Helligkeit vom Zentrum des Spektrums in Richtung der Cyan- und Blautöne verschiebt. Das Auge ist also bei

wenig Helligkeit sensitiver für das blaue Spektrum 400 nm und weniger sensitiv für das grüne (ca. 480 nm - 540 nm), gelbe (ca. 560 nm - 600 nm) und auch das rote Spektrum (ca. 600 nm - 700 nm). Besagte Werte wurden von der CIE in den Farbraum CIE 1924 für das menschliche Tagsehen (photopisch) und CIE 1952 für das Nachtsehen (skotopisch) standardisiert. (datacolor [Gabriele Hiller], 2019)

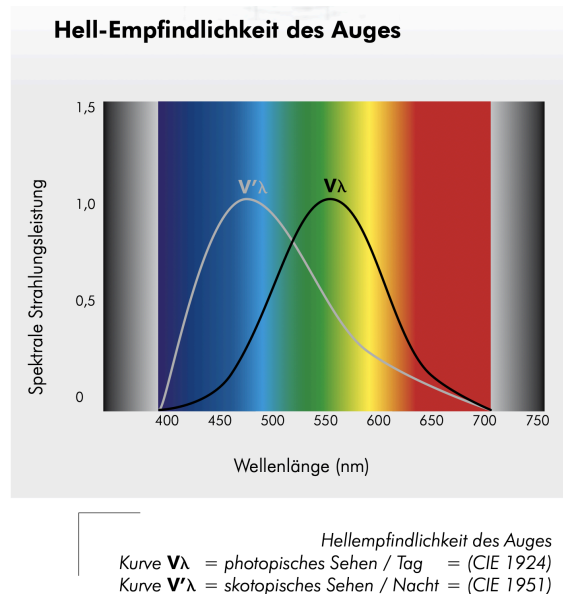


Abbildung 39: Verschiebung der menschlichen Empfindlichkeit nach Tageszeit
(datacolor [Gabriele Hiller], 2019)

Abbildung 39 zeigt, dass die größte Varianz innerhalb eines Farbtons beim Tagsehen im grünen Spektrum liegt. Vereinfacht ausgedrückt kann der Mensch also die meisten farblichen Unterscheidungen innerhalb der grünen Farbtöne treffen. Bei Nacht können besonders im blauen Spektrum hohe Varianzen wahrgenommen werden. (datacolor [Gabriele Hiller], 2019)

Ein für diese Arbeit besonders relevantes Phänomen ist die sogenannte chromatische Adaption des Auges. Chromatische Adaption, welche als "Farbanpassung" bezeichnet werden könnte, beschreibt das Phänomen, dass sich das menschliche Farbsehen während eines bestimmten Zeitintervalls an einen Farbton anpasst und versucht diesen zu neutralisieren. Ein gutes Beispiel dafür ist ein weißes Blatt unter dem Licht eines bewölkten Himmels. Sowohl die Farbtemperatur, als auch die spektrale Zusammensetzung verändert sich fortlaufend. Dennoch nehmen wir das weiße Blatt Papier als Weiß wahr. Auch wer sich über längere Zeit ausschließlich unter Kunstlicht aufhält, kann wahrnehmen,

wie bläulich das Tageslicht im Vergleich zum Kunstlicht wirkt. Wird folglich lange genau in das Tageslicht geschaut, erscheint dieses wieder neutraler und das Kunstlicht besonders warm und gelblich. (Neumeyer, 2024)

Die beschriebenen Unterschiede lassen sich mit modernen Messgeräten sehr akkurat messen und darstellen. Messbare Unterschiede sind jedoch nicht automatisch auch wahrnehmbare Unterschiede. Die Wahrnehmungspsychologie nutzt das Konzept der "JND". JND steht für "Just Noticeable Difference" und beschreibt den Schwellwert, bei dem die Veränderungen zwischen zwei Werten für den Menschen wahrnehmbar sind. Nimmt man beispielsweise die Farbtemperatur, so ist das menschliche Auge sensibler für die Farbtemperaturunterschiede innerhalb der warmen Temperaturen. Dort liegt der JND-Wert für Farbtemperatur bei etwa 100 Kelvin. Die menschliche Wahrnehmung kann also Farbtemperaturunterschiede ab und über 100 Kelvin im wärmeren Spektrum der Temperaturskala wahrnehmen. Im kälteren Spektrum liegt der JND-Bereich dagegen bei etwa 500 Kelvin Unterschied. Der Unterschied zwischen 3000 und 3200 Kelvin ist für den Menschen also eher wahrzunehmen, als der Unterschied zwischen 6000 und 6200 Kelvin. (*Correlated Color Temperature And Kelvin*, 2020)

2.4.1 Farbvarianz und Metamerie

Farbvarianz beschreibt das Phänomen, dass Gegenstände unter verschiedenen Lichtspektren unterschiedliche Farbtöne reflektieren. So kann beispielsweise ein roter Apfel unter Tageslicht ein anderes Rot wiedergeben, als unter einer Leuchtstofflampe.

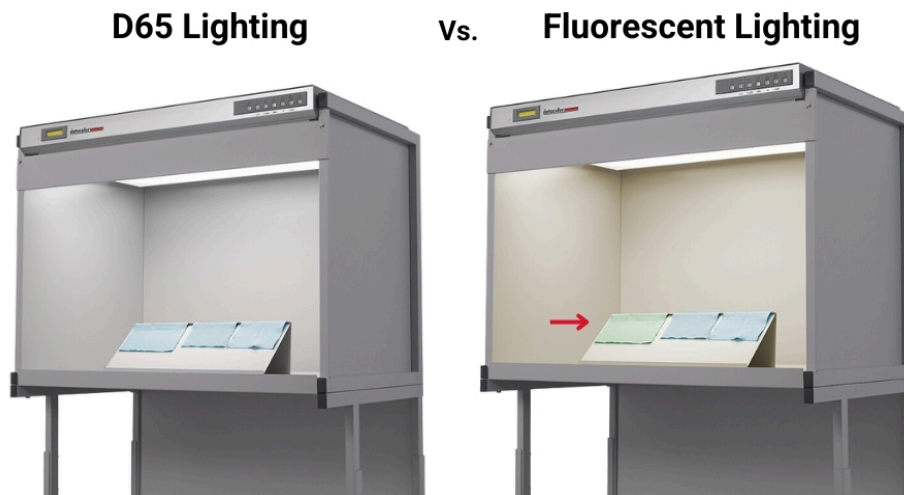


Abbildung 40: Sichtbarer Farbvarianzeffekt von Textilien unter verschiedenen Lichtspektren. (Datacolor, 2024b)

Metamerie bezeichnet hingegen den wahrnehmbaren Zustand, dass zwei Lichtquellen unterschiedlicher Spektren dennoch identische Farben bei der Reflektion auf einem Objekt für das menschliche Auge wiedergeben. Auf Kamerasensoren kann dieser Effekt dann jedoch wieder erlöschen und es werden unterschiedliche Farben dargestellt. Spektralphotometer messen Spektren; Metamerieeffekte können daraus für definierte Beleuchtungs- und Beobachterbedingungen über entsprechende Indizes abgeleitet werden. (Datacolor, 2024) Selbst die metamerischen Effekte an sich können zwischen verschiedenen Rezipienten variieren. So können physiologische Unterschiede der Rezipienten einen Einfluss auf die Wahrnehmung von metamerischen Effekten haben. (Eissfeldt et al., 2021b) Farbvarianz- und Metamerieeffekte können in der Filmproduktion besonderes bei farbkritischen Elementen wie dem Kostüm von hoher Relevanz sein. Auch die chromatische Adaption kann dazu führen, dass Farbvarianz- oder Metamerieeffekte nicht wahrgenommen werden und schlussendlich erst in der Postproduktion auffallen. Auch Hauttöne können von Farbvarianz und Metamerie betroffen sein. (Kadner, 2024)

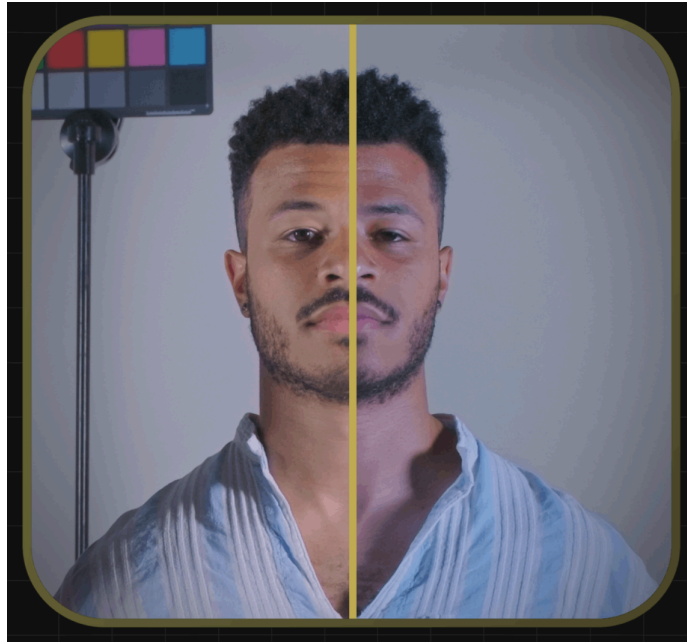


Abbildung 41: Beispielhafte Darstellung von Farbvarianzeffekten auf menschlicher Haut unter Lichtquellen mit verschiedenen Spektren (Kadner, 2024b)

Um Farbvarianzen zu vermeiden, können Spektrometer verwendet werden. Sie werden genutzt, um den spektralen Fußabdruck einer Lampe zu erfassen und Farbverschiebungen zu messen. (Sesay, o. D.)



Abbildung 42: Spektrometer der Marke Sekonic zur Messung von Licht (*SEKONIC SPECTROMETER*, o. D.)

3. Leuchtmittel in der Filmproduktion

In der Geschichte der Filmproduktion wurden im Verlauf bereits viele verschiedene Methoden und Technologien zur Erzeugung von Licht genutzt. Zur Wahrung der Übersichtlichkeit liegt der Fokus dieses Kapitels ausschließlich auf Leuchtmitteln, die für den vorliegenden Kontext relevant sind.

3.1 Kohlebogenlampe

Historisch gesehen gilt die um 1913 entwickelte Kohlebogenlampe als einer der direkten Wegbereiter der Wolfram-Halogen-Scheinwerfer. Bei diesem Leuchtmittel werden zwei Stäbe aus Graphit, oder umgangssprachlich auch "Retortenkohle", an jeweils einen Pol einer Gleichstromquelle mit 45 Volt Spannung angeschlossen. Durch das Zusammenführen und anschließende Auseinanderziehen der Kohlestäbe entsteht ein elektrischer Lichtbogen, dessen Hitzeentwicklung den Kohlestab am Pluspol zum Glühen bringt. Dieser glühende Kohlebogen stellt die eigentliche Lichtquelle dar, die über ein System aus parabolischen Reflektoren gebündelt und in eine Richtung abgestrahlt wird. Die Kohlestäbe brennen mit etwa 8 cm pro Stunde ab, was ein erneutes Justieren des Abstandes von etwa 1 cm zwischen beiden Stäben erfordert. Anfänglich wurde dies noch von Hand nachjustiert, später folgten automatische Systeme. (Fekete, 2014)

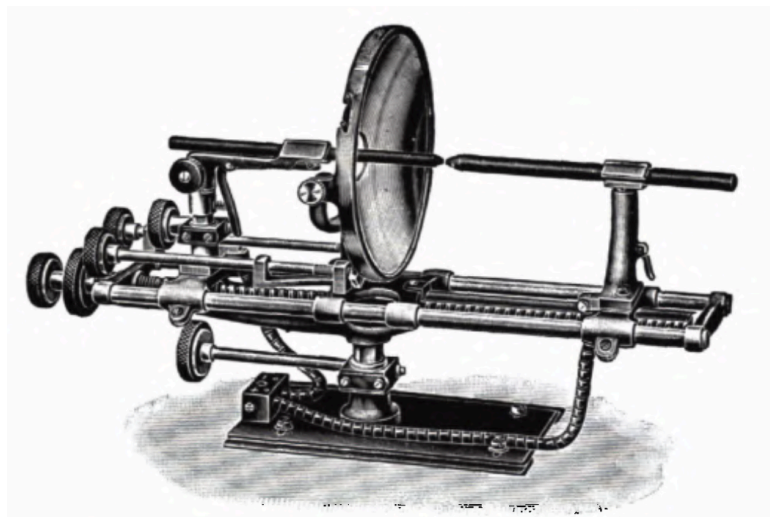



Abbildung 43: Kohlebogenlampe aus dem Firmenprospekt E. Bauer aus der Sammlung G. Sohn, Esslingen von 1914 (Fekete, 2014)

Dieses ursprünglich noch recht einfache System wurde im Verlauf der Zeit durch verschiedene Technologien weiterentwickelt. Das dabei entstandene Licht kommt als gerichteter Strahl aus dem Scheinwerfer. Durch die Justierung der Position des Parabolspiegels kann der Lichtstrahl fokussierter oder gestreuter eingestellt werden. Mole Richardson gilt als einer der populärsten Hersteller für Kohlebogenlampen in den Vereinigten Staaten. Dem Datenblatt der Lampe "255 Ampere Molearc" ist zu entnehmen, dass der Scheinwerfer ein Licht mit 225 Ampere und 115 Volt Direktstrom betrieben wird. Die von Kohlebogenlampen erzeugte Lichtfarbe hängt von den verwendeten Materialien der Kohlestäben ab. Mole Richardson gibt an, dass mit einer "16x22 Super Hi YF" als positiver Pol eine Lichtfarbe von 3400 Kelvin erreicht werden kann. (Co, o. D.)

PAGE 22

225 AMPERE MOLEARC



TYPE 450 HEAD MOUNTED ON
TYPE 450A PEDESTAL
(GRID AND CABLES PART OF HEAD)

FEATURES

Specially designed lens.
2 to 3 times the light output of the Type 170 Molearc with 50% more power.
Ideal photographic illumination at 12" to 48" divergence.
Quiet in operation for sound stages.
Academy Award Winner
A recognized standard in Hollywood Studios.
High brilliance means fewer sources.
Ideal for key light.
Aply known as the "Brite."

ACCESSORIES

Type 450260 2-Leaf Barn Door	32
Type 450267 4-Leaf Barn Door	32
Type 450481A Diffuser Frame	32
Type 450515 Single Lamp Scrim	32
Type 4505125 Half Single Lamp Scrim	32
Type 4505110 Double Lamp Scrim	32
Type 4505120 Half Double Lamp Scrim	32
Type 518 Shutter	33

PEDESTAL SUBSTITUTION
FOR A POWER-DRIVEN PEDESTAL.
SEE THE MOLEATOR, PAGE 33

SPECIFICATIONS

Current: 225 amperes, 115 volts, direct current only.
Carbons: Positive: 16mm x 22" super high intensity MP pregraphitized.
Negative: 17/32" x 9" heavy duty Croloy.
For 3400°K color use 16x22 Super Hi YF Positive.
Optics: 24" diameter curved Fresnel lens of Pyrex glass.
Are Mechanism: Control compartment and carbon burning element joined for ease in removal for servicing.
Control Compartment: Mounted on rear of housing for minimum operating temperatures, and containing:
Meter: Specially designed and mounted for quiet operation.
Switch: Double-throw, heavy-duty, snap-action of M-R design with male pin-plug receptacles.
Control: Shutter arm, manual control knobs for positive and negative carbons, rheostat for carbon feed rate, and sliding clamp handle, all marked as to operation.
Polarity Indicator
Carbon Burning Element: Positive carbon rotates at correct speed for the formation of a symmetrical crater; both positive and negative carbons feed continuously and nonintermittently; all metal insulation, and bearing materials selected for the special application required by high operating temperatures.

Housing: Cast aluminum frame, sheet steel sides; one large door on the side for operation; one door in the bottom for clean-out; 5 pump holes with arc viewing glass; lowered top for ventilation; asbestos insulation with perforated sheet metal liner for sound and heat insulation.
Yoke: U-shaped of steel tubing and brass fittings.
Grid (Ballast Resistance): Separate unit; ample ventilation; male pin-plug receptacles for lamp and power supply connections; provision for mounting on pedestal for transportation and storage.
Cables: Power supply, two single-conductor rubber-covered 25-foot lengths with female plug on one end for connection to grid and lug on other end for connection to power supply. Leads from grid to lamp head, two asbestos-covered extra-flexible copper 15-foot lengths with female plugs on both ends.
Pedestal: Braided steel-tubing tripod; crank-operated mechanical extension, ball-bearing, rubber-lined casters. Measurements: Low, 50 inches; high, 83 inches; pedestal top to lens center, 30 inches. Single extension.
Finish: Maroon, and natural aluminum.
Weight: Lamp Head 225 pounds
Pedestal 80 "
Grid 67 "
Power supply cables 30 "
Asbestos grid leads 18 "
Total 420 "

THE MOST COMPLETE LINE OF SPECIALIZED LIGHTING EQUIPMENT EVER OFFERED BY ONE MANUFACTURER

TELEPHONE
OLDFIELD 4-3648

MOLE-RICHARDSON CO.
137 N. STACAMORE AVENUE
HOLLYWOOD 38, CALIF.
Distribution Around The World

CABLE ADDRESS
MORING

Abbildung 44: Katalogauszug der "255 Ampere Molearc" von Mole Richardson (Co, o. D.)

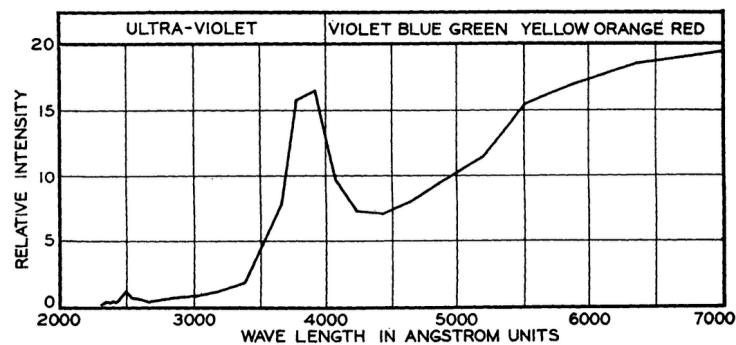


Abbildung 45: Lichtspektrum einer ("einfachen") Karbonbogenlampe (Kalb, 1934)

Durch die Verwendung von veredelten Kohlen mit einem Kern aus gemischten Metallen wie Eisen, Nickel oder Aluminium können andere spektrale Effekte erreicht werden.

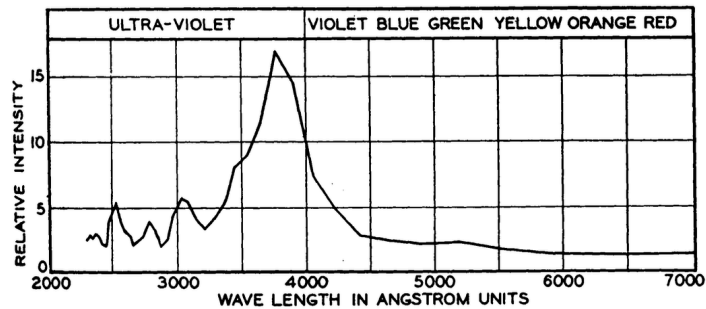


Abbildung 46: Lichtspektrum einer Karbonbogenlampe mit gemischtem Metallkern
(Kalb, 1934)

Eine weitere Variante bieten besondere Kohlen mit Strontium-Kern. Hier fällt besonders auf, dass die ultraviolette Strahlung deutlich geringer ausfällt, was eine höhere Verträglichkeit mit der menschlichen Haut und somit ein geringeres Gesundheitsrisiko für Darsteller und Beleuchtungstechniker birgt. (*Lasers And Optical Radiation (EHC 23, 1982)*, o. D.)

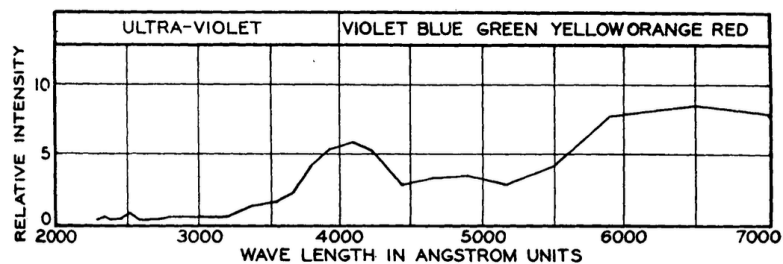


Abbildung 47: Lichtspektrum einer Karbonbogenlampe mit Strontiumkern (Kalb, 1934)

Eine der zentralen Eigenschaften der Kohlebogenlampe ist ihre spektrale Nähe zum natürlichen Sonnenlicht. In der folgenden Abbildung ist diese spektrale Nähe dargestellt.

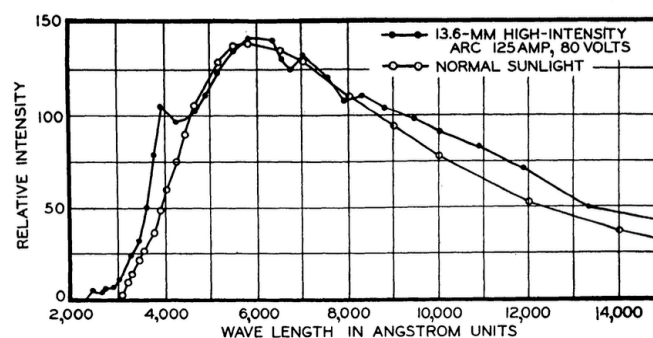


Abbildung 48: Lichtspektrum einer Karbonbogenlampe im Vergleich zum Sonnenlicht (Kalb, 1934)

3.2 Kunstlicht - Wolfram-Halogen

Die Geschichte der Wolfram-Halogen Kunstlichtlampe lässt sich gut in zwei Abschnitte aufteilen. Die Entwicklung dieser Technologie begann in den frühen Anfängen des 18. Jahrhunderts mit den ersten groben Vorgängern der Glühbirne. Später begann ein erbitterter industrieller Kampf um die effizientesten und hellsten Technologien und deren Patentierungen. Bereits 1879 entwarf der britische Chemiker Joseph Swan eine Glühbirne, die den modernsten Modellen prinzipiell und optisch ähnelt. (Furfari et al., 2001)

Um die Übersichtlichkeit zu gewährleisten und den Fokus auf die Filmindustrie zu legen, beginnt die historische Einordnung mit der Erfindung der „MAZDA“-Glühbirne. Entwickelt und patentiert wurde sie von Thomas A. Edison, dem Gründer des Unternehmens „General Electrics“ in den Vereinigten Staaten von Amerika. Die letzte Entwicklungsstufe des Leuchtmittels der Mazda-Glühbirne besteht aus einem zur Spirale gedrehten Wolframdraht, dessen Enden jeweils mit einem Plus- und einem Minuspol verbunden werden. Durch die Reibung der Elektronen entsteht Hitze und Licht. Frühe Vorstufen der Mazda-Glühbirne waren innerhalb des Glaskörpers mit einem Vakuum gefüllt, um die Verbindung des Wolframdrahtes mit Sauerstoffmolekülen zu verhindern. Irving Langmuir, ein Mitarbeiter von General Electrics, fand heraus, dass gedrehte Wolframdrähte und eine Gasfüllung statt eines Vakuums zu einer längeren Haltbarkeit des Leuchtmittels führten. Das Gas, meist Stickstoff, Argon oder eine Kombination daraus, schützt den Wolframdraht vor der Verbindung mit Sauerstoffmolekülen. (Furfari et al., 2001)

General Electrics gilt zu dieser Zeit als Marktführer für Haushalts-Leuchtmittel. Diese galten als Symbol für die Einfachheit von Elektronik im alltäglichen Leben. Dennoch hatten auch die weiterentwickelten Mazdas-Glühbirnen noch Probleme mit der Laufzeit und dem „Lampenschwärzen“ im Verlauf der Nutzungszeit. Dabei setzte sich verdampftes Material an der Innenseite des Leuchtmittels ab und verfärbte dieses. Dies führte im Verlauf der Nutzung zu einer immer geringer werdenden Lichtleistung. (Sulzberger, 2006)



Abbildung 49: Produktwerbung der Mazda Glühbirne (L) (Mazda Glühbirne 1917, 2009) und Foto einer realen Mazda Glühbirne (R) (Furfari et al., 2001)

Als die Filmindustrie im Jahr 1927 vom Stumm- auf den Tonfilm umstellte, wurden die bisher als Standard genutzten Kohlebogenlampen, aufgrund ihrer Betriebslautstärke, zu einem Problem woraufhin die Industrie auf Kunstlichtscheinwerfer umstellte. Ebenfalls im Jahr 1927 wurde der panchromatische Film entwickelt, der erstmals sensitiv für das volle Spektrum war und somit durch den hohen Rotanteil von Kunstlichtquellen im Vergleich zu Kohlebogenlampen profitierte. Vorher verwendete Filme haben diesen Strahlungsbereich als "Schwarz" abgebildet. (Manvell, 2025) Peter Mole, Gründer der Firma "Mole Richardson", einer der Marktführer für Kohlebogenlampen zu dieser Zeit, entwickelte um 1927 die ersten Mole-Scheinwerfer auf Wolfram-Halogen-Basis. (About Us | Mole Richardson Co., o. D.)

Die deutsche Firma Arri, die 1917 von August Arnold und Robert Richter gegründet wurde, entwickelte bereits 1924 Kunstlichtscheinwerfer mit facettierten Spiegelreflektoren. (*The History Of ARRI in A Century Of Cinema*, o. D.)

Das Konzept der Glühbirne und das von Kunstlicht-Scheinwerfern ist im Grundkern analog. Zusätzlich nutzten Kunstlichtscheinwerfer in der Regel einen Spiegel, um das Licht in eine Richtung zu bündeln. Dieser Scheinwerfer-Typ wird "Open-Face" genannt (cinelight, o. D.).



Abbildung 50: ARRI "Open-Face" -Scheinwerfer (ARRI, o. D.-a)

Ein von der Bauart ähnlicher Typ ist der "PAR-Scheinwerfer", der mit einem Parabolspiegel ausgerüstet ist und ein eher fokussiertes Licht abstrahlt. (cinelight, o. D.)



Abbildung 51: Altman PAR 64 Scheinwerfer (L) (Altman Par Can 64 Light - Liman Video Rental Inc., 2023) und PAR Leuchtmittel im Parabolspiegel (PAR Scheinwerfer, 2018)

Die 1934 entwickelten Fresnel-Scheinwerfer gehen noch einen Schritt weiter und bewegen das Leuchtmittel innerhalb des Lampengehäuses zwischen Spiegel und Fresnel-Linse hin und her, um den Abstrahlwinkel zu modifizieren. (Brown, 2016)

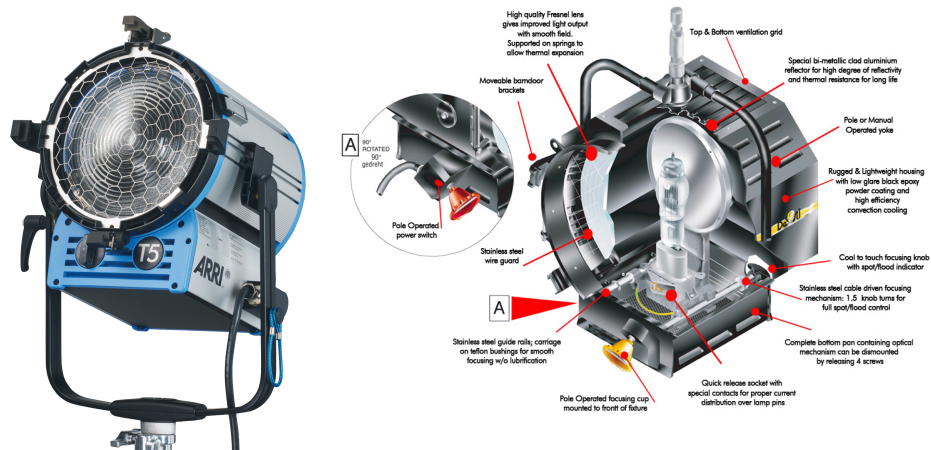


Abbildung 52: Arri "True Blue" 5KW Fresnel (L) (T5 | True Blue T | Lighting | ARRI, o. D.) und der Fresnel-Mechanismus des Herstellers Desisti. (Iori, 2022)

Um den Begriff "Vollspektrum" zu visualisieren, sind im Folgenden zwei spektrale Messungen abgebildet. In diesen ist zu sehen, dass keine Lücken oder Spitzen vorkommen und der Verlauf der elektromagnetischen Strahlung fast linear verläuft. Dabei ist zu beobachten, dass die Strahlung im ultravioletten Bereich am geringsten und im Infrarotbereich am höchsten ist.

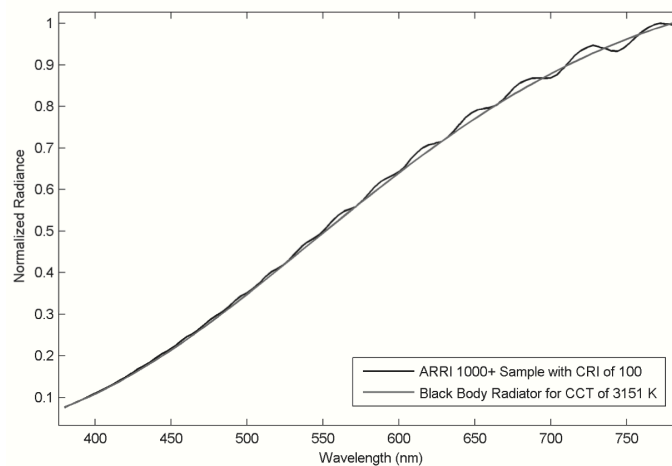


Abbildung 53: Spektrale Analyse einer Arri 1000W Leuchte im Vergleich zum Blackbody bei 3151 Kelvin Farbtemperatur (Karge et al., 2021)

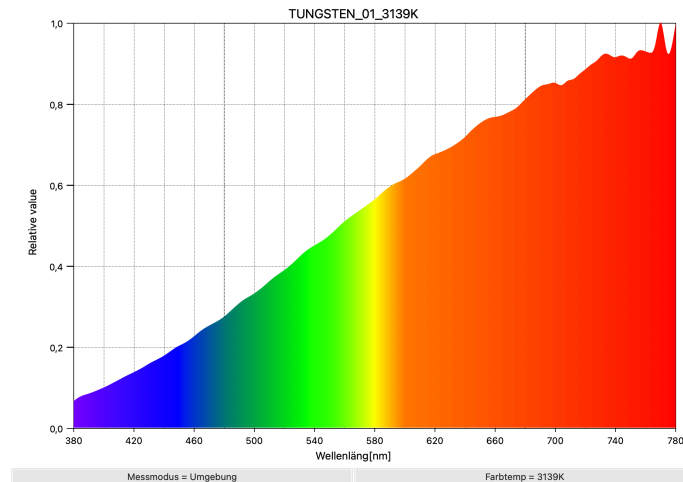


Abbildung 54: Spektrale Analyse eines Kunstlichtscheinwerfers (Eigene Abbildung)

Besonders die starke Strahlung im Infrarotbereich ist charakteristisch für das Kunstlicht. Sie birgt jedoch auch unerwünschte Effekte wie beispielsweise die Infrarot Verschmutzung (IR-Pollution), die durch häufig genutzte Filter-Systeme wie den Neutralsdichte-Filter zur Verringerung der in die Optik eintretenden Lichtintensität, auftreten oder verstärkt werden können. (The Tiffen Company, o. D.) Die Infrarotverschmutzung von Kunst- oder Tageslicht, wird häufig durch IR-ND, also Infrarot-Neutralsdichtefilter behoben, die vor der Kameralinse installiert werden. (TechNexion, 2025)

Moderne Filmkameras wie die Arri Alexa Mini 35 nutzen häufig OLPF-Filter für die Infrarotfiltration. OLPF steht für "Optical Low Pass Filter", also für einen optischen Tiefpassfilter, der vor dem Kamerasensor installiert wird und unter anderem Infrarot Verschmutzung unabhängig von der Filterung oder dem Objektiv und der genutzten Lichtquelle verhindern kann. (ARRI, o. D.-d)



Abbildung 55: ND Filter und sichtbarer IR-Verschmutzung (dunkle Textilien) neben demselben Szenario während der Nutzung eines IR-Cut-Filters. (Gaddis, o. D.)

Der Film "Broadway" gilt als erster ausschließlich mit Kunstlicht produzierte Film. Nachdem die Kunstlicht-Scheinwerfer durch eine höhere Effizienz, günstigere Herstellungskosten und bessere Nutzbarkeit für den panchromatischen Film zum Branchen-Standard wurden, entwickelte sich mit der HMI-Gasentladungslampe eine Technologie, die dem Kunstlicht-Scheinwerfer ein Konkurrent werden sollte. (Brown, 2019)

3.3 HMI - Gasentladungslampen

Die Abkürzung HMI steht für "Hydrargyrum Medium arc iodide", was auf Deutsch mit "Metallhalogenid-Gasentladungslampen" übersetzt werden könnte. Es handelt sich dabei um den Markennamen des deutschen Lampen- und Leuchtmittelherstellers Osram. Osram ist in etwa analog zum Markennamen "Tempo", wenn das Produkt "Taschentuch" gemeint ist. (Neudeck, 1999)

Zur Vereinfachung wird der Begriff "HMI" folgend analog zur Metallhalogenid-Gasentladungslampen verwendet. HMI-Lampen bestehen aus einem Quarzglaskolben, der mit einer Mischung aus Quecksilberdampf und Metallhalogeniden gefüllt ist. Zwischen zwei Wolframelektroden entsteht durch eine elektrische "Zündung" im Vorschaltgerät das Licht. Die Elektroden haben dabei, ähnlich der Kohlebogenlampe, einen kleinen Abstand zueinander, in dem der Lichtbogen entsteht. HMI-Lampen sind in verschiedenen Leistungsklassen und Größen, sowie als Fresnel-Stufenlinse oder als Ausführung mit Parabol-Reflektor erhältlich und werden aufgrund ihrer Eigenschaften häufig als bevorzugte Lichtquelle eingesetzt. (Gloman, 2014)



Abbildung 56: 6/9 KW HMI-Fresnel (L) (Filmgear, o. D.-a) und ein 6/9 KW HMI-Vorschaltgerät des Herstellers Filmgear (Filmgear, o. D.)

Osram-Leuchtmittel in HMLs haben in der Regel eine Farbtemperatur von etwa 6000 bis 6900 Kelvin und gehören so in die Kategorie der Tageslichtlampen. (OSRAM, 2024) Zu Beginn der Nutzung tendieren die Leuchtmittel eher zu kälteren Farbtemperaturen, nutzen sich aber mit der Zeit ab. Dabei brennen die Elektroden in der Lampe ab, was die Farbtemperatur in die rote, wärmere Richtung verschiebt. In der Regel werden HMLs mit Vorschaltgeräten betrieben, da Gasentladungslampen ihre Stromaufnahme von selbst nicht begrenzen können. Das Vorschaltgerät ist auch für die Zündung sowie die Abschaltung des Lichtbogens zwischen den Polen verantwortlich. Ein weiteres Merkmal von HMI-Lampen ist ihre Lichtfrequenz. Das Licht zwischen den Elektroden wird mit bis zu 120 Hz, also 120 mal pro Sekunde, erzeugt. Diese Intervalle werden zwar vom menschlichen Auge, jedoch nicht automatisch auch von Kamerasensoren als nahtlos wahrgenommen. Vorschaltgeräte sind in der Lage, die Lichtfrequenz auf beispielsweise 1000 Hz zu erhöhen, um ein Flackern auf dem Kamerabild zu verhindern. HMLs werden in der Filmindustrie für ihren vergleichsweise hohen Wirkungsgrad von etwa 85 - 105lm/w für Situationen genutzt, in denen eine hohe Intensität notwendig ist. Außerdem werden HMLs aufgrund von hohen CRI Werten geschätzt. (Gloman, 2014)

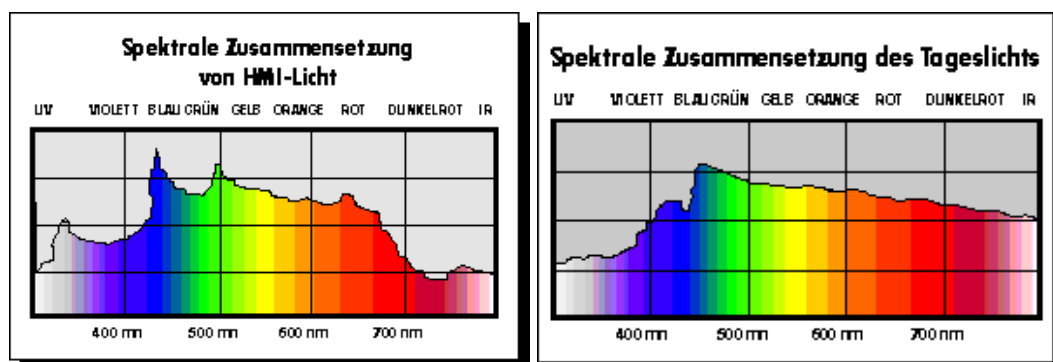


Abbildung 57: L Spektrum einer HMI. R: Spektrum von Tageslicht) (Neudeck, 1999)

Neben den Vorteilen der HMLs, wie der spektralen Nähe zum Tageslicht und dem vergleichsweise hohen Wirkungsgrad, bringt diese Technologie jedoch auch Schwierigkeiten und Besonderheiten mit sich, wie zum Beispiel die hohe UV-Strahlung. Diese wird zwar in der Regel durch einen herstellerseitigen UV-Filter vor dem Leuchtmittel um den schädlichen Anteil verringert, jedoch besteht die Gefahr, dass bei einer Beschädigung dieser Schicht schädliche Strahlung zu Verbrennungen führen kann. (Center for Devices and Radiological Health, 2018)

Der Leuchtmittelhersteller Osram schreibt dazu auf der Produktseite:

“Wegen ihrer hohen Leuchtdichte, der abgegebenen UV-Strahlung und des hohen Lampeninnendruckes während des Betriebs dürfen HMI-Lampen nur in geschlossenen und eigens dafür konstruierten Gehäusen betrieben werden. Durch passende Filter muss sichergestellt werden, dass die UV-Strahlung auf ein akzeptables Niveau verringert wird. Im Falle des Platzens einer Lampe wird Quecksilber freigesetzt. Es sind besondere Sicherheitsregeln zu beachten.”
(HMI Single End Lampen (Andere) | OSRAM PIA, o. D.)

Bezüglich der Langlebigkeit der Leuchtmittel, haben HMIs nicht den besten Stand im Vergleich zu anderen Technologien. Die Angaben zu der Laufzeit der Leuchtmittel variieren. Osram selbst gibt für seine 4000W HMI Leuchtmittel eine ungefähre Laufzeit von 500 Stunden an. (OSRAM, o. D.) Chuck Gloman berichtet in seinem Artikel aber von Einheiten mit einer Laufzeit von nur 200 Stunden. Ein weiteres HMI-Typisches Thema ist die Vorlaufzeit ab der Zündung. Die Lampen müssen nach der Zündung durch das Vorschaltgerät erst einige Minuten laufen, um die volle Lichtkraft und die angegebene Farbtemperatur zu erreichen. (Gloman, 2014) Zusätzlich erzeugt die HMI-Lampe, ähnlich der Wolfram-Halogen, neben Licht- auch Wärmeenergie. Durch die Kombination aus Scheinwerfer und Vorschaltgerät ist auch das Packmaß einer HMI zu beachten. (Arnold & Richter Cine Technik GmbH & Co. Betriebs KG, 2018)

3.4 Leuchtstofflampen

Leuchtstofflampen oder auch Fluoreszenzlampen gehören, ebenso wie HMIs, zu den Gasentladungslampen. Diese Quecksilber-Gasentladungslampen emittieren in erster Instanz kurzwelliges Licht mit einer Wellenlänge von etwa 185,0 und 253,7 nm. Die Leuchtstofflampen, meist röhrenartiger Form, sind im Inneren der Röhre mit Leuchtstoffen beschichtet, die das emittierte kurzwellige Licht in andere Wellenlängen umwandelt und es für den Menschen sowie für Kameras sichtbar macht. Als Leuchtstoffe werden Pigmente bezeichnet, die selbst elektromagnetische Strahlung aussendet, wenn sie durch bestimmte Strahlen des elektromagnetischen Spektrums (beispielsweise UV-Strahlung) angeregt werden. (Jüstel & Schwung, o. D.)

In der Filmproduktion haben sich im Verlauf der Zeit unter anderem Leuchtstoffröhren der Firma “KINOFLO Lighting Systems” durchgesetzt. Diese

Leuchtstoffröhren wurden beispielsweise mit einer festen Farbtemperatur von 3200 Kelvin als Kunstlicht-Leuchtmittel genutzt, ebenfalls Röhren mit einer Farbtemperatur von 5500 Kelvin als Tageslicht-Leuchtmittel. (About Kino FLO Lighting System, 2022)



Abbildung 58: KinoFlo 4 Bank - Lampe mit 5500K Leuchtstoffröhren (JP Film & Television Services Ltd trading as Film & TV Services (FTVS), 2024)

Auf der spektralen Ebene erzeugen Leuchtstoffröhren, je nach Fabrikat und Auswahl der Leuchtstoffe, häufig sogenannte "Spikes", also Spitzen im Spektrum. Diese können vor allem im blauen und grünen Bereich zu einer unnatürlichen Farbwiedergabe führen. Zudem müssen Leuchtstoffröhren in der Regel einige Zeit eingeschaltet sein, bis sich ihre Farbtemperatur stabilisiert. (Neudeck, 2012)

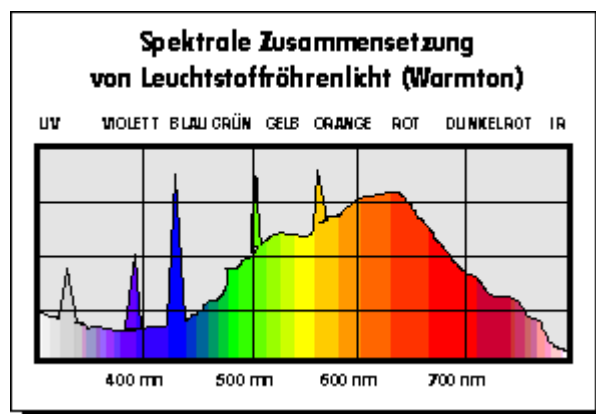


Abbildung 59: Spektrum einer Warmton-Leuchtstoffröhre (Datenblattsammlung Film/Video - Leuchtstofflampen, 2012)

Leuchtstoffröhren wie die von KinoFlo zeichnen sich durch eine hohe Effizienz von etwa 100 lm/w, eine geringe Wärmeentwicklung und wenig Gewicht aus. Sie erzeugen ein gleichmäßiges, tendenziell eher weiches Licht. (Knudsen, 2022)

Aufgrund der gesundheitlichen Gefahren bei der Freisetzung von Quecksilber wurde diese Technologie innerhalb der Europäischen Union im Jahr 2011 durch die "RoHS-Richtlinie" verboten. (BG-ETEM, 2016)

3.5 LED

"Light Emitting Diode" oder auf Deutsch, "Lichtemittierende Diode", ist das Wort, das sich hinter der Abkürzung LED verbirgt. Sie zählt zu den Halbleiter-Bauelementen und entspricht in ihrer elektronischen Eigenschaft einer Diode. Sie lässt den anliegenden Strom also in eine Richtung passieren und sperrt die jeweils andere. Sobald der Strom die Diode in Durchlassrichtung durchfließt, emittiert diese Strahlung. Welche Wellenlängen dabei emittiert werden, hängt vom Halbleitermaterial und der Dotierung ab. Bei der Dotierung bestimmt die atomare Zusammensetzung der verbauten Materialien die emittierte Wellenlänge. (FWU Institut für Film und Bild in Wissenschaft und Unterricht gemeinnützige GmbH, o. D.)

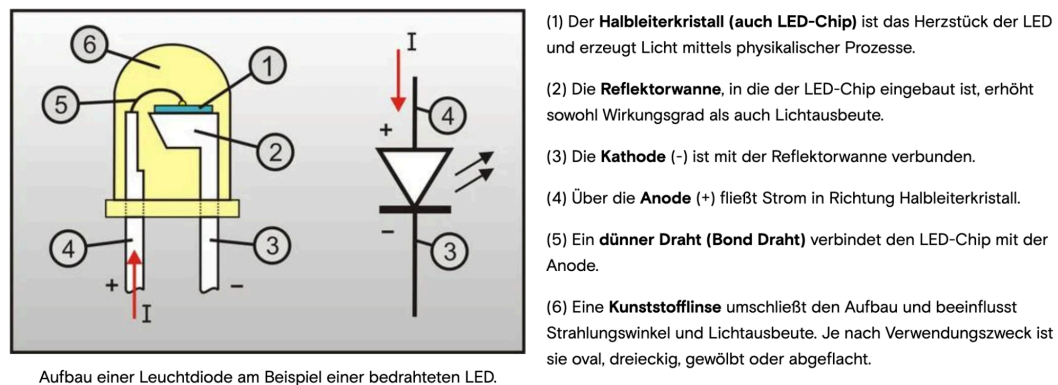


Abbildung 60: Aufbau einer LED-Diode (*LED » die Leuchtdiode Einfach Erklärt, 2022*)

Vor dem Jahr 1990 wurden LEDs in der Regel aufgrund ihrer Helligkeitseigenschaften und Energieeffizienz vorrangig in der Anzeigeelektronik verwendet. Mit ihrer stetigen Weiterentwicklung wurde jedoch die Eignung für viele andere Bereiche immer deutlicher. LED-Technologie übertrifft traditionelle Leuchtmittel, was die Energieeffizienz (lm/w), die Lebensdauer (ca. 50,000-100,000

Stunden), die physikalische Größe der Leuchtmittel, die perfekte Responsivität beim An- und Abschalten, die verhältnismäßig geringe Wärmeentwicklung und einen breiten Betriebstemperaturbereich von ca. 20-950°C betrifft. Typischerweise ist durch LED emittiertes Licht außerdem durch die geringen UV- und IR-Anteile weniger schädlich für die menschliche Haut oder Augen. (Kiyak et al., 2021)

3.5.1 LED Engines & Mischmethoden

Da einzelne LEDs monochromatisches Licht emittieren, können für die Erzeugung unterschiedlicher Lichtfarben oder Temperaturen, unterschiedlich farbige LEDs hergestellt und im selben Leuchtmittel-Gehäuse kombiniert werden. Beispielsweise können LEDs mit einer Farbtemperatur von 6000 Kelvin mit LEDs einer Farbtemperatur von 2000 Kelvin zusammen in einem Leuchtmittel genutzt werden, um eine Temperatur zwischen 2000 Kelvin und 6000 Kelvin zu generieren. (Lee et al., 2015)

Um alle Bedarfe des Spektrums für diverse Einsatzbereiche abzudecken, ist es also notwendig, die verschiedensten LEDs miteinander zu kombinieren, zu dimmen und zu steuern. Die Verwirklichung dieser Methode nennt sich "COB-Light". COB steht, je nach Quelle, für "Chip on Board" und beschreibt eine Matrix aus LEDs, die sich auf verschiedenste Art kontrollieren lassen. (Kiyak et al., 2021)

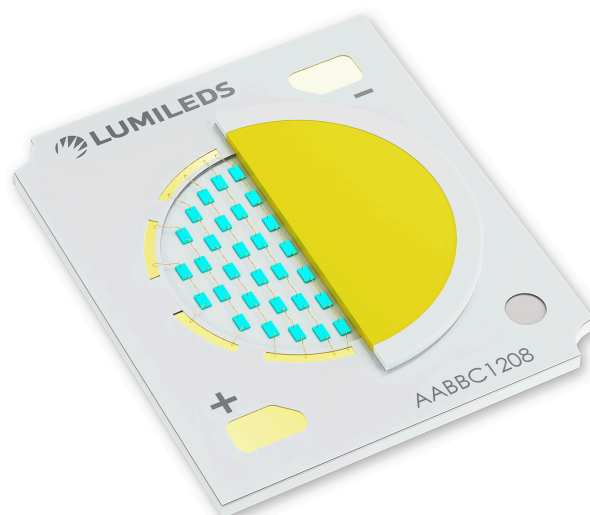


Abbildung 61: Beispielhafte Darstellung eines COB LED Chip mit Phosphorbeschichtung. (Lumileds, 2024)

Neben genannter Mischmethode ist auch die Nutzung von blauen LEDs in Kombination mit einer Phosphorbeschichtung, welche die blaue Farbe der LEDs in ein neutrales Weiß konvertiert. Diese Technologie ist auch in der Filmindustrie vertreten. Ein prominentes Beispiel wäre das "ARRI SKYPANEL RP". "RP" steht hierbei für "Remote Phosphor". Mit dieser Technologie konnte eine höhere Leuchtstärke erreicht werden als mit anderen Modellen, die mit Farbmischung arbeiteten, da die blauen LEDs die höchste Leuchtdichte-Leistungseffizienz erreichen. (Zhao & Lee, 2012) Die "RP"-Reihe wurde jedoch bereits durch andere Technologien abgelöst und die Produktion von Arri nicht weiter fortgesetzt.

(S60-RP | C Series | SkyPanel | Lighting | ARRI, o. D.)



Abbildung 62: Das Arri Skypanel RP, der "Remote Phosphor" Variante des Arri Skypanek LED-Panels. (S60-RP | ARRI, o. D.)

Der Begriff "Engine" zu deutsch "Motor", beschreibt die digitale Steuereinheit hinter der LED-Matrix, die für die Steuerung, thermische Überwachung und alle weiteren Funktionen der einzelnen Dioden zuständig ist. (Mehr et al., 2015)

3.5.2 LED 2 Color Engine

Neben der Methode, bauartbedingt eine feste Lichttemperatur mit einem Leuchtmittel zu erreichen, können besagte LEDs auch unabhängig voneinander gedimmt werden. So kann beispielsweise eine 2000 Kelvin LED auf 20% der Leistung herunterreguliert werden und erzeugt somit weniger Leistung und weniger warmes Licht für die Mischung und steuert im Endergebnis emittiert ein kühleres Licht bei.

Besagte Leuchtmittel werden als WW-LEDs vermarktet. Dabei beschreibt das “W” die die “White”-LED. Das Kürzel WW wirkt eingesetzt, um zu beschreiben, dass ein Leuchtmittel mit “White-White” LEDs ausgestattet ist. Damit ist in der Regel eine warm-weiße und kalt-weiße LED gemeint. Unter anderem werden Leuchtmittel mit dieser Technologie auch als “Bi-Color-LED” vermarktet. (Lee et al., 2015)

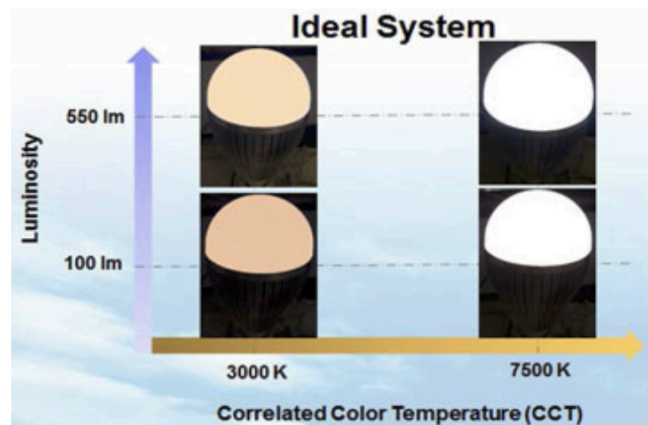


Abbildung 63: Die theoretische Farbmischung eines WW-LED Systems mit der Funktion einer variablen Farbtemperatur (Lee et al., 2015)

3.5.3 RGB 3 Color Engine

Wenn eine Engine mit variabler Farbtemperatur von weißem Licht nicht dem Anwendungszweck entspricht, kann auf eine RGB-Engine aus 3 farbigen LED zurückgegriffen werden. Der Vorteil einer RGB-Engine ist, dass neben den Primärfarben und deren Mischungen, auch durch additive Farbmischung weißes Licht synthetisiert werden kann. Um mit Hilfe dieser Farbmischung diverse Farbtemperaturen herzustellen, sind Algorithmen entwickelt worden, mit denen man die Light Engine die R, G und B Dioden im richtigen Verhältnis unter Berücksichtigung aller relevanter Parameter einstellen kann. (Zhao & Lee, 2012)

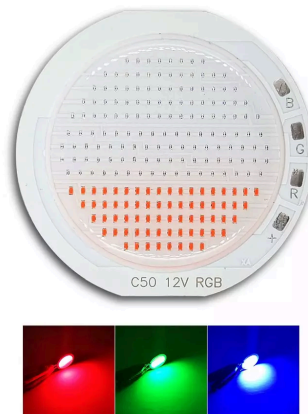


Abbildung 64: RGB COB Chipset der Marke “Shining Easy” (RGB COB LED Multi-Color Array - ShiningEasy, 2023)

3.5.4 RGBW(W) / RGBMA 4-5 Color Engines

Ein weiterer Schritt in der Entwicklung von Color-Engines und COB LEDs sind RGB WW Chipsätze, denen zusätzlich zur R-, G- und B-Dioden Warm-Weiß und Kalt-Weiß Dioden beigefügt sind. Diese Technologie implementiert die 2-Color-WW-Engine mit der 3-Color-RGB-Engine, um sowohl die Lichtausbeute im Bereich des weißen Lichts unter Berücksichtigung variabler CCTs als auch die Nutzung des RGB-Farb- und Mischspektrums ineinander zu vereinen. Im direkten Vergleich können so höhere Lichtausbeuten im CCT Bereich und bessere Farbwiedergabe-Werte erzielt werden, als beim synthetisierten weißen Licht durch RGB-Mischung. (Rybalochka et al., 2022)



Abbildung 65: RGBW COB Chipset der Marke “Shining Easy” (RGB COB LED Multi-Color Array - ShiningEasy, 2023)

Einen anderen Ansatz verfolgt beispielsweise die “Astera Titan LED Engine”, welche Dioden der Farben “Mint” und “Amber” also Mint- und Bernsteinfarbene LEDs beinhalten. Mit dieser Technologie ist es bereits möglich, CCT-Weißtöne von 1750 Kelvin bis 20.000 Kelvin darzustellen. Auch die Farbwiedergabemetriken dieser Engine hebt sich bereits von den RGB und RGBWW Vorgängern ab. (*Industry-leading LED Engine By Astera, o. D.*)

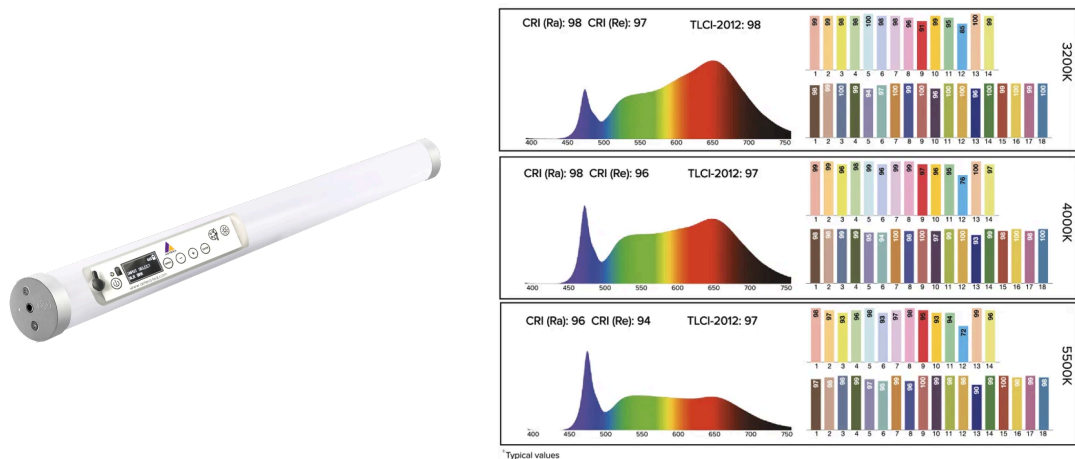


Abbildung 66: Astera Helios RGBMA-LED-Röhre (*Ultra-portable Kabellose LED-Röhre By Astera, o. D.*) und Spektralanalyse, CRI und TLCI Werte der “Astera Titan LED Engine” (*Industry-leading LED Engine By Astera, o. D.*)

3.5.5 Arri SPECTRA (RGBACL) 6 Color Engine

Im September 2019 kündigte die Firma Arri den “Arri Orbiter” an. Dieses LED-Filmlicht wurde mit einer neuen LED-Engine, der “Arri SPECTRA - Light Engine”. Diese besteht aus einem COB-LED-Satz aus R,G,B, sowie A(mber), C(Cyan) und L(ime). Damit erweitert die Engine die bereits entwickelte “5-Color Engine” um eine weitere Farbe und setzt dabei auf ein anderes Mischverhältnis und Grundfarben. Weiter bewirbt der Hersteller, dass seine LED Color Engine für den Einsatz mit den hauseigenen Kameras (Arri Alexa 35) und deren Farbtechnologie ausgelegt ist. (*Light Engine & Colors | Orbiter | Lighting | ARRI, o. D.*)

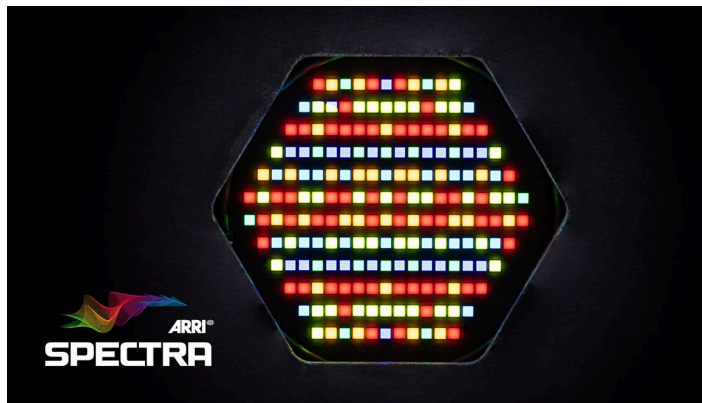


Abbildung 67: Arri Orbiter COB Chip mit RGBACL-LED Chipsatz (*Light Engine & Colors | ARRI, o. D.*)



Abbildung 68: Der Arri Orbiter mit einer Fresnel-Linse. (*Product Pictures & Images | Orbiter | Lighting | ARRI, o. D.*)

3.5.6 Aputure BLAIR (BLAIR-CG) 5-7 Color Engine

Mit der Veröffentlichung der "Strom"-Produktreihe des Herstellers Aputure stellte dieser auch die neue Lampe "Aputure Storm 1200X" mit der von Aputure entwickelten BLAIR-Engine vor. BLAIR steht für die einzelnen LED-Farben auf dem COB-Chipsatz. Anders als zuvor, setzt der Hersteller nicht auf R, G und B sondern auf B(lue), L(ime), A(mber), I(ndigo) und R(ed).

Besonders hervorzuheben sind hierbei die Indigo-Dioden zum Emittieren von elektromagnetischer Strahlung im UV-Bereich von 405 nm bis 450 nm. Da diese Spektren im Tageslicht, sowie auch in Tungsten-Halogen vorkommen, bewirbt der Hersteller seine LED-Engine als Tageslicht-nah und verweist auch auf einen hohen SSI-Score im Vergleich zu einer Wolfram-Halogen-Quelle.

Der Hersteller implementiert zudem eine Einstellmöglichkeit für “White-Light” mit einer Konfigurationsoption “CIE” und einer für “Blackbody”. (STORM 1200x | Aputure, o. D.)



Abbildung 69: Aputure 1200X LED mit BLAIR Engine (STORM 1200x | Aputure, o. D.-b)

Mit der BLAIR-CG Engine bewegt sich der Hersteller noch einen Schritt weiter und fügt COB-Lampen wie der “Aputure Storm 1000C” weitere Emitter der Farben (C)yan und (G)rün hinzu und erhöht damit die Möglichkeiten für die Farbwiedergabe im Bereich von buntem Licht. (Aputure, o. D.)



Abbildung 70: Aputure Storm 1000C mit BLAIR-CG Engine (STORM 1000C | Aputure, o. D.)

3.5.7 Nanlux NEBULA C8 (dRRALGCBI) 8 Color Engine

Im September 2025 veröffentlichte ein weiterer Hersteller für Filmlicht, die Firma Nanlux, eine neue Produktreihe mit einer neuen LED-Engine. Die "Nebula C8 Engine" von Nanlux entwickelt die "Nebula C4" und Nebula C6)



Abbildung 71: Nanlux COB-Chipset mit 8 den verschiedenen LEDs der Nebula C8 Engine. (NANLUX, o. D.)

Das Hauptmerkmal der neuen Engine liegt neben der in anderen COB-Chipsätzen bereits etablierten Indigo-LED, bei einer dR-deep Red-LED im Spektralbereich von 665 nm. Diese zusätzliche LED soll laut des Herstellers gerade für die Farbwiedergabe von Hauttönen eine zentrale Rolle spielen. Es sollen andere LED Lampen spektral dazu neigen, Hauttöne eher orangefarben wiederzugeben. Mit der dR-LED sollen Hauttöne reicher, gesünder und mit einer natürlichen Lebendigkeit wiedergegeben werden. Im Gegensatz zu Herstellern wie der Marke Aputure wirbt Nanlux mit der UV-Freiheit ihrer Engine und verweist auf Schäden für das menschliche Auge und die Haut bei UV-Strahlung unter 400 nm. (Nanlux, o. D.)

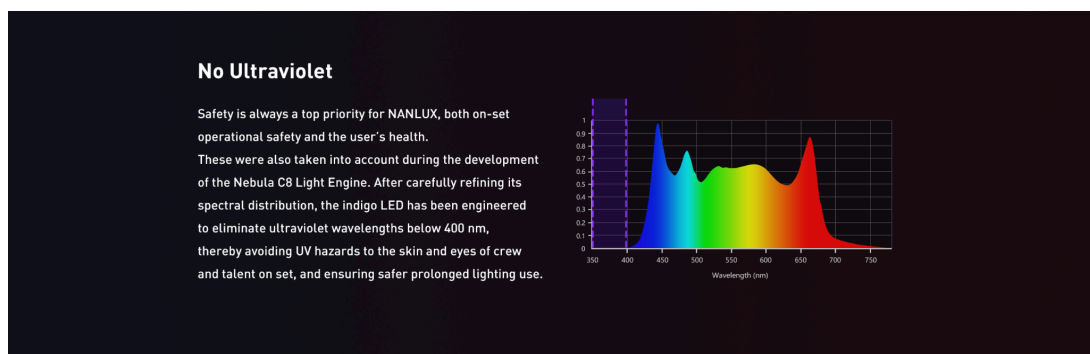


Abbildung 72: Nanlux wirbt mit UV-Freiheit im Spektrum (NANLUX, o. D.)



Abbildung 73: Nanlux Evoke 600C COB LED Licht mit Nebula C8 Engine (NANLUX, o. D.)

3.5.8 Probleme und Lösungen bei menschlichen Hauttönen

Um einen Zusammenhang zwischen den verschiedenen Lichtspektren unterschiedlicher Erzeuger und der Farbwiedergabe von menschlicher Haut zu verstehen, ist es sinnvoll, sich die menschliche Haut als Objekt mit ihren Eigenschaften und der Korrelation zum Lichtspektrum genauer anzuschauen.

Da Menschen mit den Farben der Haut sehr vertraut sind, ist ihre akkurate Reproduktion in Anwendungszwecken wie Film oder Fotografie sehr wichtig, damit Farbverschiebungen oder andere Unstimmigkeiten schnell wahrgenommen werden. (Lu et al., 2025)



Abbildung 74: Hauttöne unter verschiedenen Lichtspektren mit unterschiedlicher Farbwiedergabequalitäten von Hauttönen (Locke, 2025)

Wenn von menschlicher Haut gesprochen wird, sind grundsätzlich alle existenten farblichen Unterscheidungen und Nuancen gemeint. Das Reflektionsverhalten der menschlichen Haut wird maßgeblich durch ihren Wasseranteil und die vorhandene Menge an Melanin in der Epidermis und Hämoglobin im Blut beeinflusst. (*Reflectance Measurements Of Human Skin* | NIST, 2025)

Die spektrale Zusammensetzung der Haut bestimmt auch die Farbwiedergabe durch ihr Absorptions- und Reflektionsverhalten. (Lu et al., 2025) Treffen Photonen auf die menschliche Haut, so wird ein Teil dieser absorbiert und ein weiterer reflektiert. Das von der Haut reflektierte Lichtspektrum ist messbar. So können Aussagen über die Reflektanz verschiedener Hauttöne getroffen werden. (Angelopoulou, 1999b)

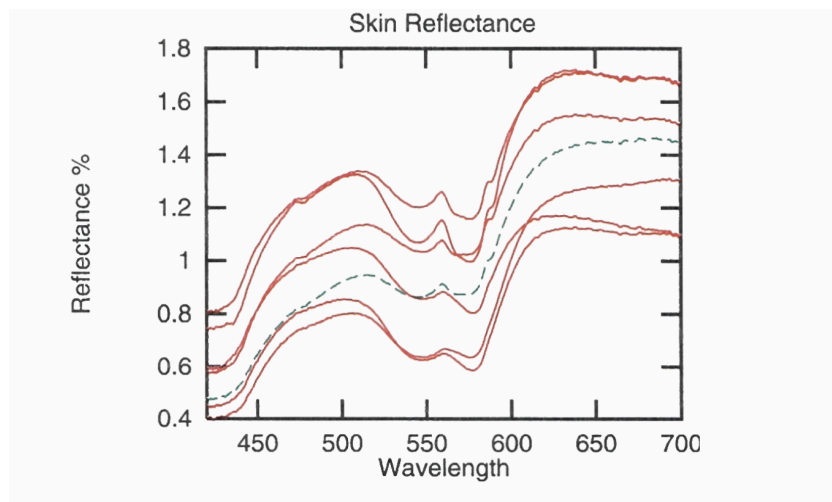


Abbildung 75: Auswertung der spektralen Messung der Hautreflektanz eines Handrückens. (Angelopoulou, 1999)

Um eine spektrale Annäherung zum “Vollspektrum-Licht” von Kunstlicht oder Tageslicht zu generieren, haben Hersteller wie Aputure oder Nanlux, LED-Emitter für die kurzwelligen und langwelligen Spektralbereiche in ihren neuesten Lampen-Modellen verbaut. Die sicht- und messbaren Ergebnisse dieser Emitter sind in den folgenden Abbildungen dargestellt und hervorgehoben. Auffällig ist dabei, dass die Nanlux Evoke 600C eine ausgeprägte Spitze im Tieftrot (dR) aufweist, während die Aputure 1200X im Indigobereich (UV) heraussticht.

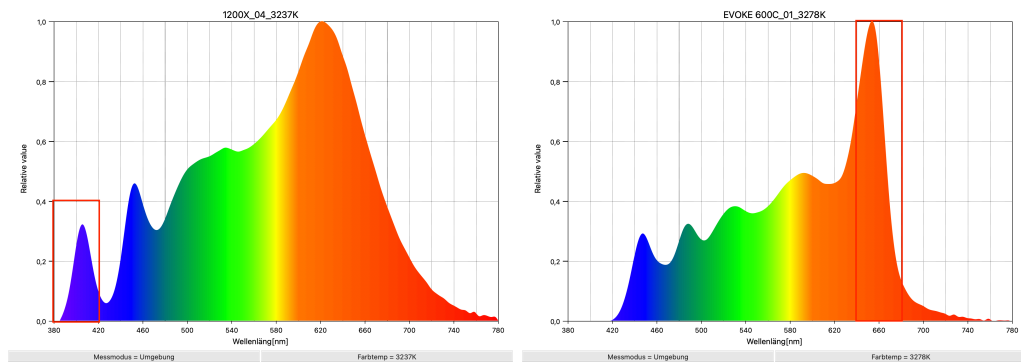


Abbildung 76: Aputure 1200X (L) Spektrum mit LED für UV-Licht und Nanlux Evoke 600C mit LED für das tiefroter Spektrum. (Eigene Abbildung)

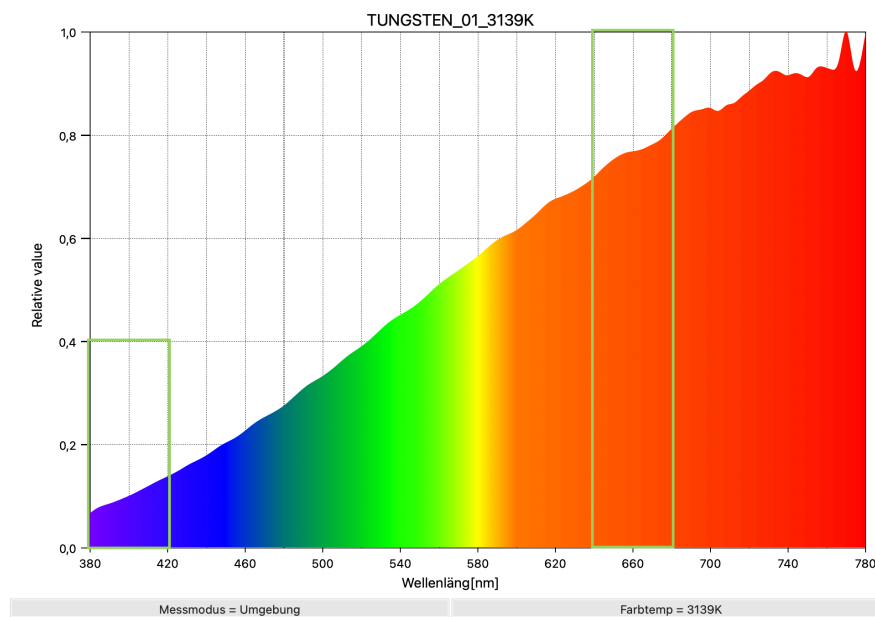


Abbildung 77: Kunstlichtspektrum im Vergleich zu vorigen Abbildungen. (Eigene Abbildung)

Im Folgenden ist der Unterschied zwischen den spektralen Unterschieden von Kunstlicht, dem Arri Orbiter und der Nanlux Evoke 600C, am Beispiel von “heller Haut” dargestellt. Alle Messungen und weiteres Material mit verschiedenen Hauttönen findet sich im Anhang zu dieser Arbeit.

Hauttyp A (Hell) & Spektrum: Kunstlicht

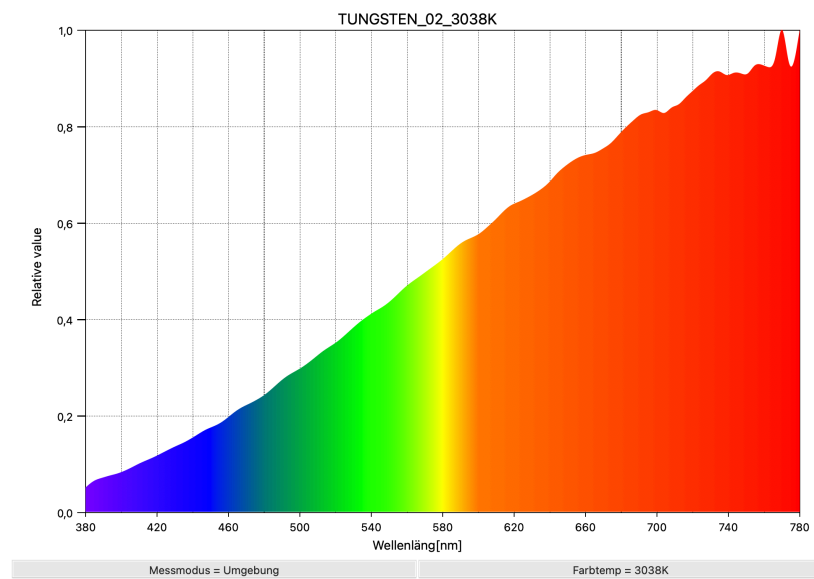


Abbildung 78: Kunstlichtspektrum 1KW mit WD216 Folie (Eigene Abbildung)



Abbildung 79: Helle Haut unter 1KW Kunstlicht mit WD216 Folie (Eigene Abbildung)

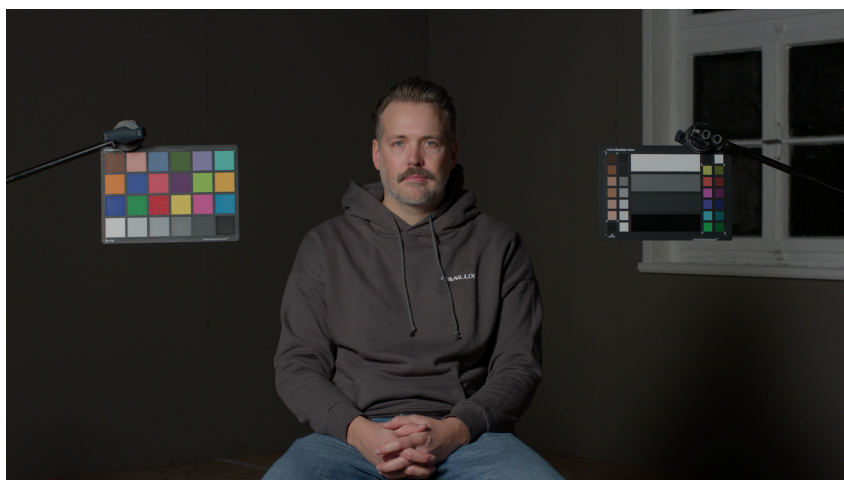


Abbildung 80: Helle Haut unter 1KW Kunstlicht mit WD216 Folie (Eigene Abbildung)

Hauttyp A (Hell) & Spektrum: Arri Orbiter - RGBACL LED

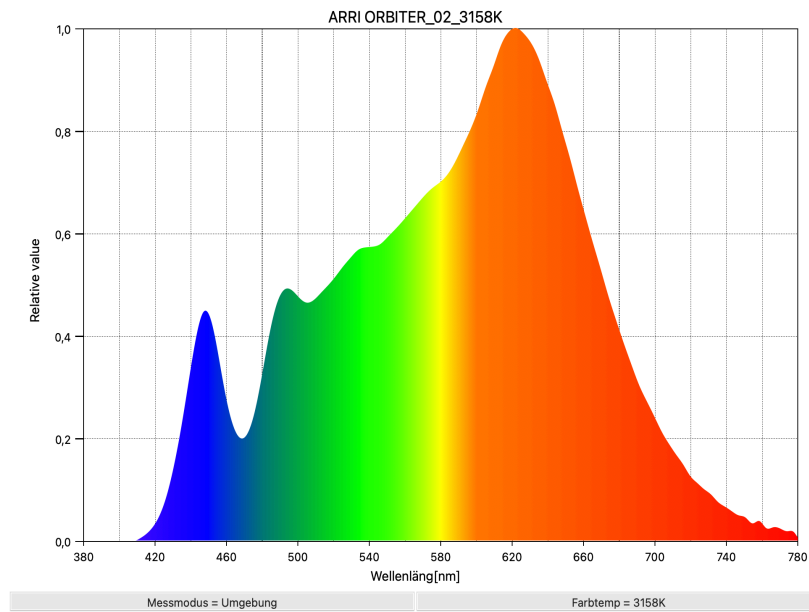


Abbildung 81: Arri Orbiter Spektrum mit WD216 Folie (Eigene Abbildung)



Abbildung 82: Helle Haut unter Orbiter LED mit WD216 Folie (Eigene Abbildung)

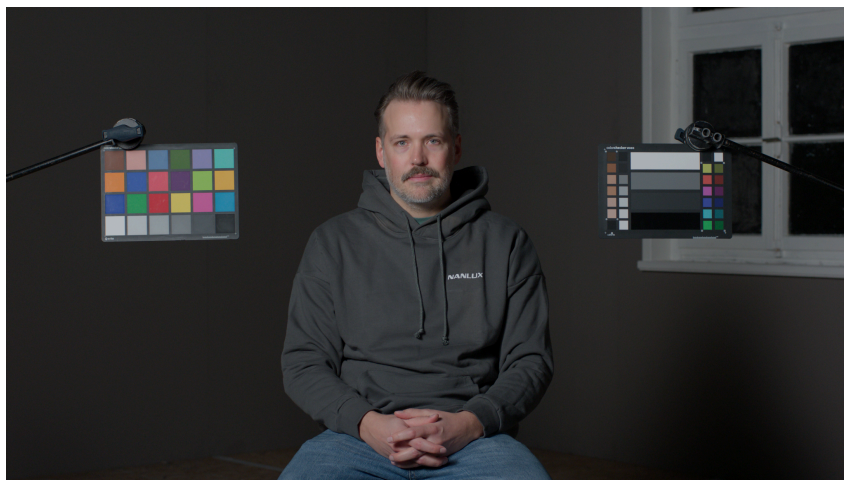


Abbildung 83: Helle Haut unter Orbiter LED mit WD216 Folie (Eigene Abbildung)

Hauttyp A (Hell) & Spektrum: Nanlux Evoke 600C - dRRALGCBI LED

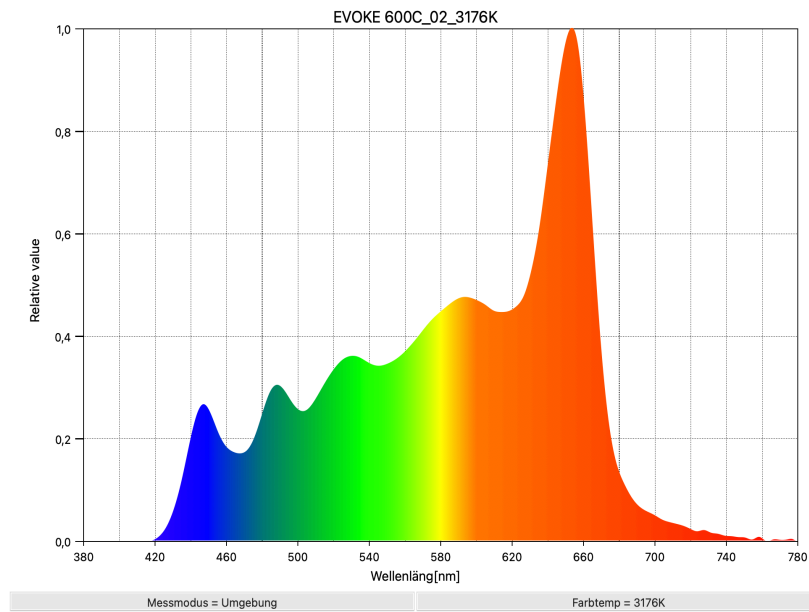


Abbildung 84: Nanlux Evoke 600C Spektrum mit WD216 Folie (Eigene Abbildung)



Abbildung 85: Helle Haut unter Evoke LED mit WD216 Folie (Eigene Abbildung)

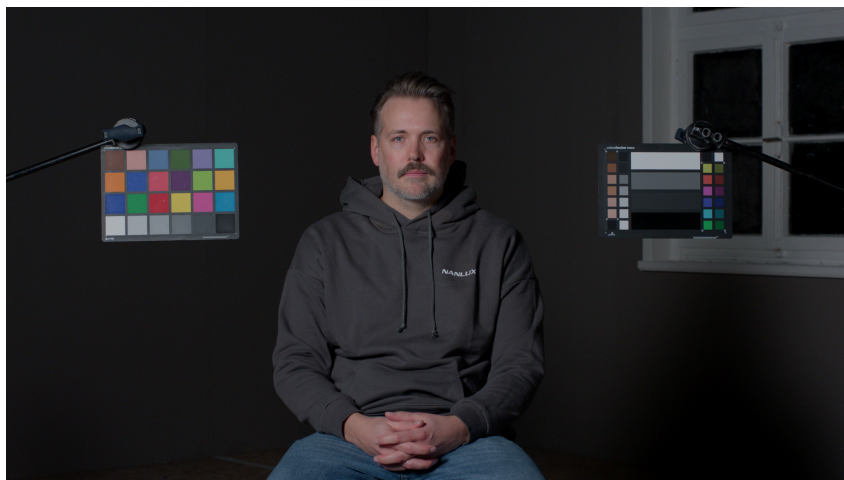


Abbildung 86: Helle Haut unter Evoke LED mit WD216 Folie (Eigene Abbildung)

4. Licht-Wandlungsprozess auf Kamerasensoren

Um zu verstehen, was mit einem beleuchteten Objekt passiert, sobald eine Kamera es aufzeichnet und verarbeitet, ist es sinnvoll, sich diesen Prozess genauer anzuschauen und auf die Forschungsfrage hin zu deuten. Um die Übersichtlichkeit der Arbeit zu erhalten, konzentriert sich das folgende Kapitel auf die CMOS-Sensor Technologie der ARRI Alexa 35 Kamera, mit der die Testaufnahmen für das Experiment zu dieser Arbeit erstellt wurden. Die Arri Alexa 35 verwendet den "Alev 4" CMOS Bayer Sensor der Firma "ARRI" und wurde am 31.5.2022 vom Unternehmen veröffentlicht. Der 27.99 mm × 19.22 mm große Sensor entspricht dem digitalen und analogen Filmformat mit dem Namen "Super 35" und verfügt über 6560 Sensor-Pixel in der Breite und 3100 Sensor-Pixel in der Höhe. (Arri, o. D.)

4.1 Sensortechnologie (ALEV-4 CMOS-Sensor)

Die Abkürzung CMOS steht für: "Complementary Metal-Oxide Semiconductor", was auf Deutsch mit "komplementärer Metall-Oxid-Halbleiter" zu übersetzen ist. "CMOS" beschreibt den Aufbau des Schaltplans hinter der Sensortechnologie bestehend aus Fotodioden, Transistoren, Analog-Digital Wandlern und anderen elektrotechnischen Bauteilen. (Wright & Sheldon, 2024)



Abbildung 87: Arri Alexa 35 mit ALEV-4 CMOS Sensor (ARRI, o. D.-a)

Ein Kamerasensor überführt elektromagnetische Strahlung in Form von Photonen in digitale Informationen, die über verschiedene Prozesse in ein digitales Bild umgewandelt werden. Ein Kamerasensor ist in der Regel mit einer Matrix aus Fotodioden besetzt, von denen jeder einzelne als Lichtsensor dient. Bei der

Belichtung des Sensors durch elektromagnetische Strahlung in Form von Photonen werden diese von den Fotodioden in Elektronen umgewandelt. Die Menge der Elektronen wird als Spannung akkumuliert und gemessen. Die gemessene Spannung wird anschließend in einen digitalen Wert für Intensität von Helligkeit umgewandelt. Dabei hat jede Fotodiode eine minimale und maximale Spannung. (ARRI, 2022)

4.2 RGB Sensor Filter (Bayer-Pattern)

Erfunden und patentiert wurde die Bayer Matrix 1975 von Bryce E. Bayer, der bis zu seinem Ruhestand bei dem Unternehmen Kodak arbeitete. Um die vom Sensor erfassten Helligkeitswerte in die jeweiligen Farben umzurechnen, besteht die Sensormatrix eines CMOS-Bayer Sensors aus einem Arrangement aus R-,G-und B-Farbfilttern, die vor den Helligkeits-Fotodioden verbaut sind. (Kannenberg, 2012) Die Architektur der Bayer-Matrix richtet sich nach dem spektralen Helligkeits-Sehvermögen des Menschen. Da der Mensch Helligkeitsunterschiede innerhalb der verschiedenen Farbtöne des Spektrums unterschiedlich gut wahrnehmen kann, wurde bei der Architektur der Bayer-Matrix eine zusätzliche Fotodiode mit grünem Farbfiler verbaut. Der grüne Spektralbereich deckt etwa 70% der menschlichen Helligkeitswahrnehmung ab. Rot macht 20-22% und Blau die restlichen 8-10% der Helligkeitswahrnehmung aus. (Kidd, 2024)

B	G	B	G	B	G	B	G
G	R	G	R	G	R	G	R
B	G	B	G	B	G	B	G
G	R	G	R	G	R	G	R
B	G	B	G	B	G	B	G
G	R	G	R	G	R	G	R

Abbildung 88: ARRI AREV 4 - Bayer-Pattern (ARRI, o. D.-a)

4.3 Debayering Prozess

Aus dem Quartett von B-,G-,G-,R-Signalen, die als einzelner Luminanz-Kanal mit Farbkodierung gespeichert wird, wird nun im "Debayering" mit einem Algorithmus ein einzelner Pixel aus den Informationen der 4 Fotodioden rekonstruiert und beispielsweise in R-, G-, B- Kanäle konvertiert. Zusätzlich kann aus den Helligkeits-Informationen der einzelnen Kanäle ein Y-Kanal für die Helligkeitsinformationen interpoliert werden.

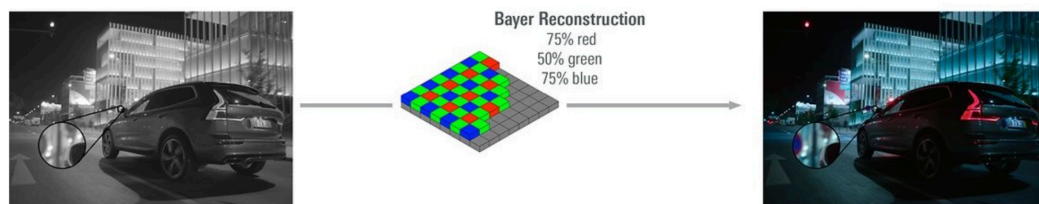


Abbildung 89: Debayering Rekonstruktionsprozess des ARRI ALEV Sensors (ARRI, o. D.-b)

Die Qualität der rekonstruierten Farben hängt also stark von dem genutzten Algorithmus zusammen. Arri nutzt für die "Arri Alexa 35" den "ADA-4"- Algorithmus für das Debayering der Daten auf Basis des "ALEV-4 Sensors". ADA steht dabei für "ARRI Debayer Algorithm" und die Nummer bezieht sich auf die Seriennummer des Alev-Sensors. (ARRI, o. D.)

4.4 Apple ProRes Codec / ARRIRAW

Die beschriebene Pipeline für das bildgebende Verfahren bezieht sich auf die Aufzeichnung und Verarbeitung des direkten, unkomprimierten Kamera-Rohsignals. Dabei wird die gesamte Menge vorhandener Daten genutzt, gespeichert und in der Postproduktion verarbeitet. Zusätzlich zu dieser verhältnismäßig speicherintensiven Methode, können die Daten in Kameras wie der "Arri Alexa 35", auch direkt in der Kamera komprimiert und auf bestimmte Informationen reduziert werden.

Bei der Nutzung eines "Codecs" kann das RAW-Signal direkt in der Kamera durch Prozesse wie Kompression oder Farbrunterabtastung auf einen Teil der Gesamtinformationen reduziert werden, um weniger speicherintensive Daten aufzuzeichnen. (ARRI, o. D.-c)

Kompression am Beispiel des ProRes 422 HQ Codec von Apple:

Apple ProRes ist eine Familie von hochqualitativen, aber dennoch komprimierten, also visuell-verlustbehafteten, Codecs für die Aufzeichnung und Nachbearbeitung von Videodaten. ProRes nutzt zur Verringerung der Datenmenge die Methode der Intraframe-Kompression, bei der jedes Einzelbild unabhängig vom vorherigen und nachfolgenden Bild in der Zeitachse komprimiert wird. Um die Datenmenge zu reduzieren, werden verschiedene Verfahren angewandt. (Apple, 2017b)

Im direkten Vergleich der Datenraten, ist die Kompression deutlich zu erkennen:

ARRIRAW (ALEXA 35): Bei einer Auflösung von 4096 X 2304 Pixeln und 24 Bildern pro Sekunde entspricht dieser einer Datenrate von **2891 Mbit/s** (Megabit pro Sekunde). (Berkl, o. D.)

ProRes 422 HQ (ALEXA 35): Bei einer Auflösung von 4096 X 2304 Pixeln und 24 Bildern pro Sekunde entspricht dieser einer Datenrate von **799 Mbit/s** (Megabit pro Sekunde). (Berkl, o. D.)

Durch die Nutzung von ProRes422 HQ anstelle von ARRIRAW werden also Daten ungefähr im Faktor 3,6 komprimiert. So können auf einem Speichermedium mit einem Terabyte Speicherplatz, statt einer Aufnahmezeit von etwa 43 Minuten in ARRIRAW, etwa 2 Stunden und 36 Minuten Aufnahmezeit erreicht werden. (Berkl, o. D.)

Jedes Einzelbild wird mittels einer DCT-ähnlichen Transformation (diskreten Kosinustransformation) von einer Pixeldarstellung in Frequenzanteile umgewandelt und Bildinformationen werden nach ihrer visuellen Relevanz geordnet. ProRes 422 HQ ist ein Codec mit variabler Bitrate (VBR), der die Datenrate automatisch unter Berücksichtigung der Zeit (Frames) an die Komplexität des Bildes anpasst. (Apple, 2017b)

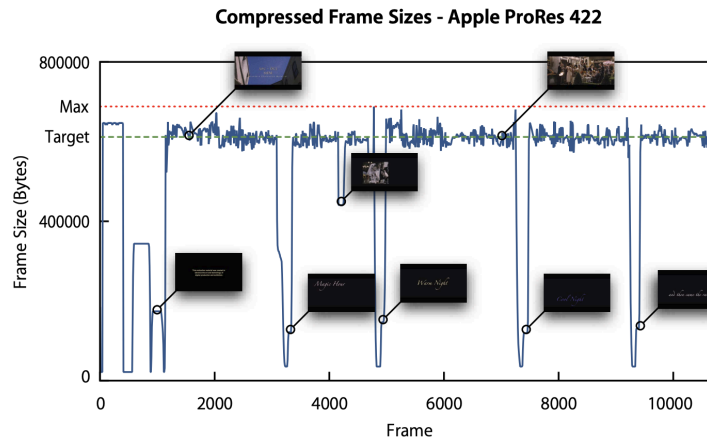


Abbildung 90: Beispielhaftes Kompressionsdiagramm für ProRes 422 mit variabler Bitrate (Apple, 2017)

Bei der anschließenden Quantisierung wird das Bild in kleinere Blöcke unterteilt (beispielsweise 8x8 Pixel, dazu wurden keine genauen Angaben seitens Apple veröffentlicht) und die DCT-Werte jedes Bildblocks vereinfacht: Werte, die feine Details repräsentieren (hohe Frequenzen), werden stärker gerundet, während die für den Gesamteindruck wichtigen niedrigen Frequenzen weitgehend erhalten bleiben. Dadurch lassen sich die Daten stark reduzieren, ohne dass die visuelle Qualität des Bildes erheblich leidet. (Apple, 2017b)

Ein weiterer Aspekt der Kompression ist der Umgang mit der Farbtiefe der aufgenommenen Daten. ARRIRAW zeichnet die Signale vom Sensor mit einer Farbtiefe von 13 BIT auf. Das bedeutet, dass theoretisch etwa 549,76 Milliarden Farbtönen erzeugt werden können. ProRes 422 HQ reduziert die Farbtiefe dabei auf 10 BIT, was etwa 1,07 Milliarden Farben entspricht. Dies führt zu einer vergleichsweise verringerten Abstufung zwischen den einzelnen Farbtönen. (Apple, 2017b)

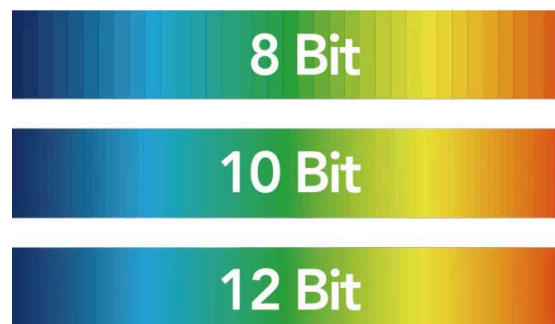


Abbildung 91: Farbverläufe mit unterschiedlichen Farbtiefen (ViboRuby, 2025)

Ein weiteres Verfahren zur Reduktion von Datenmengen ist die Farbrunterabtastung (Color Subsampling). Dabei wird das Bild zunächst in das YCbCr-Farbmodell konvertiert und in drei Kanäle aufgeteilt: Y für die Helligkeitsinformationen (Luminanz), Cb für die Differenz zwischen Blau und Luminanz und Cr für die Differenz zwischen Rot und Luminanz. Die Bezeichnung „422“ beschreibt das Verhältnis der Detailgenauigkeit dieser Kanäle. Die Luminanzinformationen (Y) werden für jedes Pixel vollständig gespeichert, während die Farbinformationen (Cb und Cr) nur für jedes zweite Pixel entlang einer Bildzeile gespeichert werden. Das bedeutet, dass die Farbinformation horizontal nur halb so fein aufgelöst ist wie die Helligkeitsinformationen. Durch diese Reduktion der Farbinformationen können die Datenmengen deutlich verringert werden, dies bedeutet aber auch den Verlust von Farbinformationen. (Apple, 2017b)

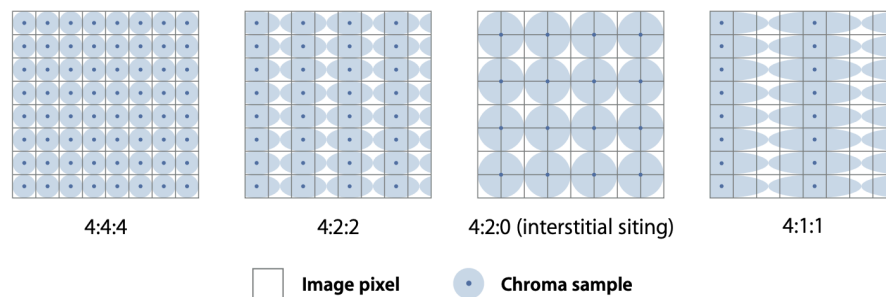


Abbildung 92: Farbrunterabtastung in verschiedenen Auflösungen (Apple, 2017)

Zusätzlich wendet ProRes nach der DCT-Transformation und Quantisierung noch leichte Optimierungen an, wie z. B. “Rounding” oder “Byte-Alignment”, um die Datenstruktur effizienter zu gestalten. Diese Schritte dienen zwar der weiteren Datenreduktion, sind für den praktischen Gebrauch aber meist von sekundärer Bedeutung. (Apple, 2017b)

4.5 Einfluss des Weißabgleichs auf die Farbwahrnehmung

Kameras wie die Arri Alexa 35 haben die Möglichkeit den kamerainternen Weißabgleich einzustellen, um den Weißpunkt der Kamera mit einer verwendeten Lichtquelle zu synchronisieren und ein optisch “neutrales” Weiß zu erhalten. Die Farbtemperatur des Weißabgleichs wird hierbei in Kelvin angegeben und korreliert mit der Farbtemperatur des Planckschen Strahlers im Blackbody. (Calcsimpler, o. D.) Abhängig von der Wahl des Aufnahmeformats ist der angegebene Kelvin-Wert im Material entweder bei einem Codec wie ProRes 422 HQ mit der Codierung des

Materials festgelegt, oder wird bei einer ARRIRAW Aufnahme in den Metadaten der Kamera gespeichert und kann nachträglich im Debayering-Prozess in einer Software verändert werden. (Bailey, 2023)



Abbildung 93: Kunstlicht-Set (3200 Kelvin - Leuchtmittel) mit verschiedenen Kamera-Weißabgleich Einstellungen (Eigene Aufnahme)

Wenn in einem leeren Raum in absoluter Dunkelheit beispielsweise eine Kunstlichtlampe mit einer Farbtemperatur von 3200 Kelvin brennt (siehe Abbildung 91), die ein weißes Blatt Papier beleuchtet, so erscheint das Blatt erst in neutralem Weiß, wenn die Kamera auf einen Weißabgleich von 3200 Kelvin eingestellt ist. (Afifi et al., 2020)



Abbildung 94: Tageslicht-Set (5600 Kelvin - Leuchtmittel) mit verschiedenen Kamera-Weißabgleich Einstellungen (Eigene Aufnahme)

5. Farbe in der Postproduktion

Um die weitere Verarbeitung der Kamera-Rohdaten durch die in der Postproduktion verwendete Software nachvollziehen zu können, müssen die Grundlagen von Farbräumen, Gammakurven und Displaytechnologie zugrunde liegen. Im vorigen Kapitel wurde die Aufnahme von RAW-Formaten und Codecs grundlegend erklärt. Im folgenden Kapitel werden die Grundlagen für die Interpretation von Kamera-Rohmaterial und deren Einfluss auf Hauttöne erklärt und dargestellt. Zu

diesem Zweck wird, sowohl für die Bearbeitung der Testaufnahmen des Experiments, als auch für den theoretischen Hintergrund, die Software "DaVinci Resolve 20" in der Version "von der Firma "Blackmagic" verwendet. Um die Übersichtlichkeit beizubehalten, fokussiert sich diese Arbeit auf den Display-Farbraum "Rec709" oder "BT.709" und die "Gammakurve 2.4", da dieser für die Anfertigung und Wiedergabe im Experiment genutzt wurde.

5.1 Farbmanagement: Farbraum

Um eine akkurate Verarbeitung des Materials gewährleisten zu können, sollte das Zielmedium (beispielsweise Kinoleinwand, TV-Geräte oder Handydisplays) vorab bekannt sein. Im Verlauf der Zeit wurden mehrere Standards für verschiedene Zwecke eingeführt und etabliert. Der in der Video- und Filmproduktion für den "Heimgebrauch" wohl gängigste ist der Farbraum BT.709, oder vollständig: "ITU-R Recommendation 709". Der von dem ITU der "International Television Unit" festgelegte Farbraum umfasst deutlich weniger Farbinformationen, als die von der CIE als wahrnehmbar definierten in CIE31 und CIE76. (Sharma, 2019)

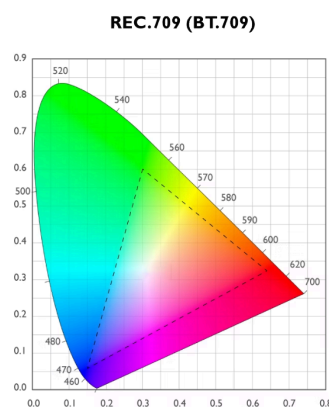


Abbildung 95: BT.709 Farbraum innerhalb der CIE31 Normfarbtabelle

Dies hängt mit der damaligen, teils aktuellen, Display-Technologien zusammen. Der BT.709 Farbraum und der sRGB Farbraum, der als absoluter Standard für Computerbildschirme gilt, sind nahezu identisch. Sie unterscheiden sich jedoch in der Gammakurve. Rec709 impliziert eine Gammakurve von 2.2. (Rhodes, 2023) Die Gammakurve von sRGB ist nonlinear und ist nicht durch einen einzelnen numerischen Wert zu beschreiben. Die Gammakurve verläuft im linearen Teil der Kurve im Schwarzbereich bei einem Gamma von etwa 1 und um den nonlinearen Teil in einem ungefähren Bereich von 1 und 2.3. (wisotop, 2017)

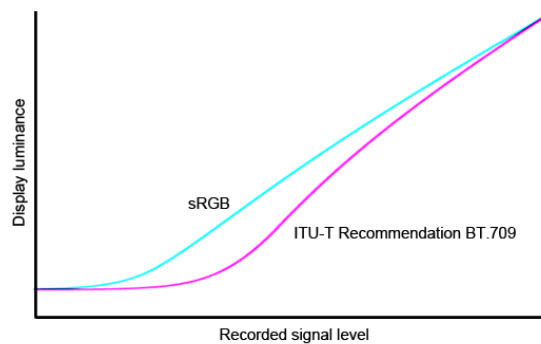


Abbildung 96: BT.709 und sRGB Gammakurven im Vergleich (Rhodes, 2023b)

Um ein akkurates Farbmanagement zu gewährleisten, müssen die Kamera Rohdaten in einen Farbraum umgewandelt werden, der auf dem Ziel-Display im Idealfall zu 100% wiedergegeben werden kann. Um dennoch auf die Daten des “breiten” Farbraums mit mehr Informationen zurückgreifen zu können, werden die Daten zuerst jedoch in einen “Arbeitsfarbraum” konvertiert. Hierzu wird das Material mit einer sogenannten "IDT", was für “Input Device Transform” steht, vom Quell-Farbraum des Materials in den Arbeitsfarbraum konvertiert. Dies geschieht mit einer “Color Space Transform” -Operation in DaVinci Resolve.

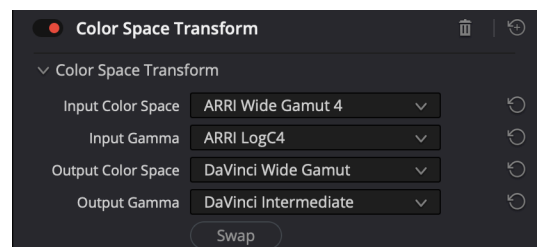


Abbildung 97 (L) : IDT von ARRI WG/Log C4 Gamma zu DaVinci Wide Gamut/Intermediate Gamma (Eigene Abbildung)

Im Rahmen dieser Arbeit wurde als Arbeitsfarbraum vom bearbeitenden Coloristen Johannes Feltkamp der “DaVinci Wide Gamut” gewählt. In der folgenden Abbildung ist zu erkennen, dass die Farben des Quellmaterials auch in diesem Farbraum noch über die Grenzen von BT.709 hinausgehen.

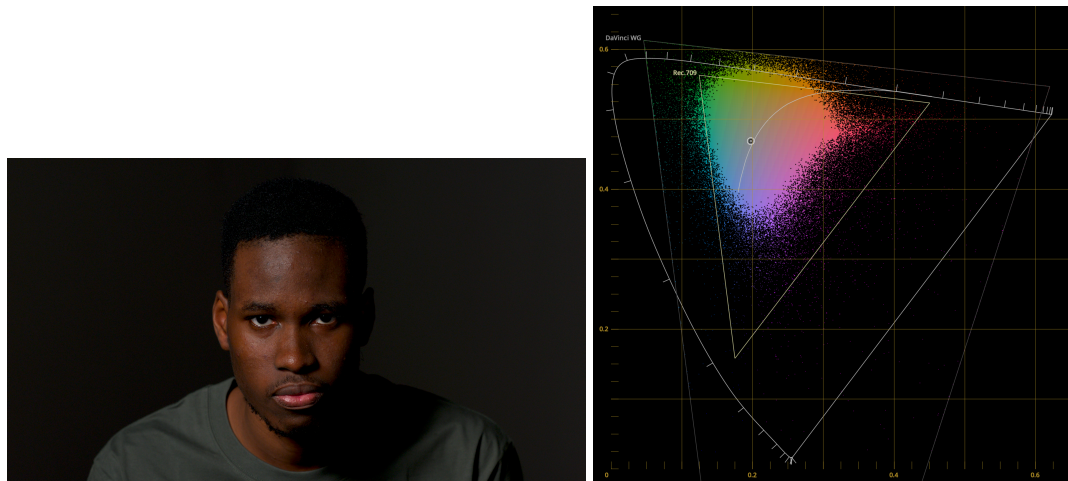


Abbildung 98: Testbild im DaVinci Wide Gamut/Intermediate Gamma (Eigene Abbildung)

Um schon bei der Bearbeitung eine visuelle Repräsentation des Ziel-Farbraums zu sehen, wird mit einem “ODT”, einem “Output Device Transform” gearbeitet. Diese Operation konvertiert die Farben vom "Arbeitsfarbraum" in den "Ausgangsfarbraum".

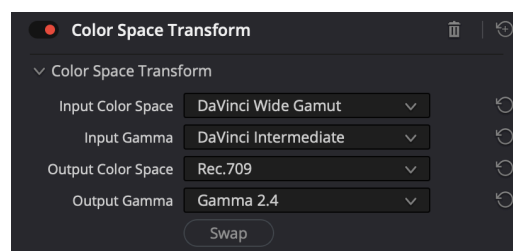


Abbildung 99 (R) : ODT von DaVinci Wide Gamut / Intermediate Gamma zu Rec709 / Gamma 2.4 (Eigene Abbildung)

Anschließend ist es einem Coloristen möglich, seine Operationen zur Manipulation von Farben zwischen diesen beiden Transformationen durchzuführen. So ist der Zugriff auf alle Farbinformationen (DaVinci Wide Gamut / Intermediate Gamma) möglich und gleichzeitig eine automatisch nachgeschaltete Übersetzung in den Zielfarbraum (Rec 709 / Gamma 2.4) möglich. In der folgenden Grafik ist dasselbe Bild wie zuvor zu sehen, jedoch nach der ODT in den BT.709 Farbraum. Im Vergleich wird deutlich, dass Informationen fehlen und verändert interpretiert werden.

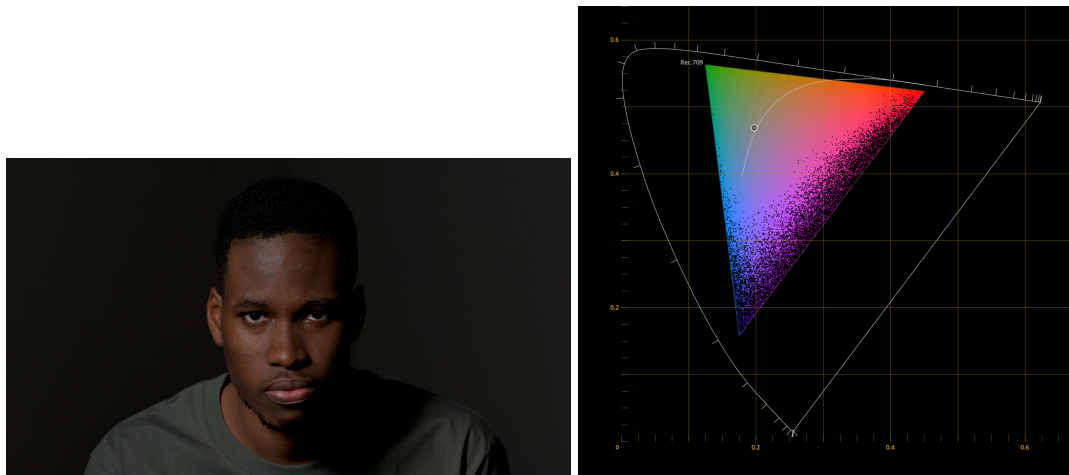


Abbildung 100: Testbild im Rec709 Farbraum mit Gamma 2.4 (Eigene Abbildung)

Mit diesem Prozess ist sichergestellt, dass alle Farbinformationen des Quell-Materials für die Bearbeitung zur Verfügung stehen und der Colorist parallel genau das sieht, was die Probanden im Experiment, oder im Beispiel einer Filmproduktion, die Rezipienten des Films auf Basis des Farbraums sehen können. Im anschließenden Prozess können dann bereits beschriebene Prozesse wie das Debayering des Quell-Materials und weitere Operationen vorgenommen werden.

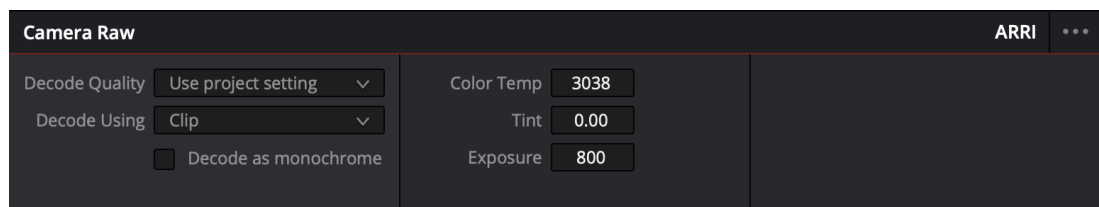


Abbildung 101: Debayering von Quellmaterial der Arri Alexa 35 (Eigene Abbildung)

Das beschriebene Prozedere kann analog für andere Farbräume und Gammakurven angewendet werden.

5.2 Hauttöne in der Postproduktion

Um Hauttöne in der Postproduktion zu bewerten, gibt es verschiedene Vorgehensweisen. Ein Beispiel dafür ist die Isolation von Hauttönen vom Rest des Bildmaterials. Diese Operation ist mit dem "Qualifier"-Werkzeug in DaVinci Resolve möglich. Dabei werden nur Pixel mit ausgewählte Farbtönen, Luminanzen und Sättigungswerten von den nicht ausgewählten isoliert.

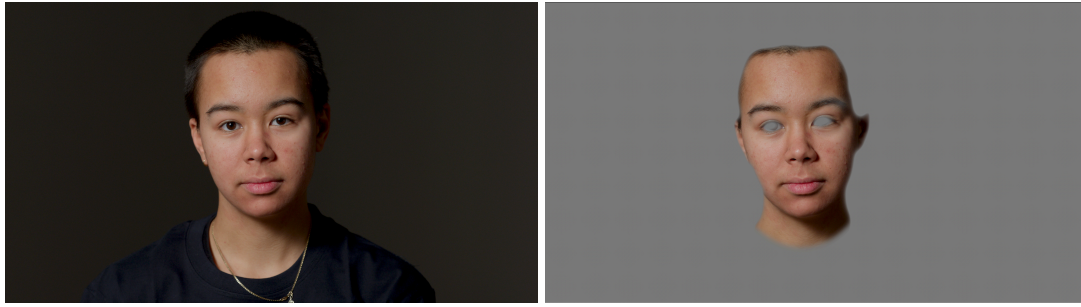


Abbildung 102: Referenzbild vor (L) und nach (R) der Separation der Hauttöne.
(Eigene Abbildung)

Eine weitere Methode zur Bewertung und Bearbeitung von Hauttönen ist die „Skintone Indicator Line“, eine Referenzlinie für „korrekt dargestellte“ Hauttöne innerhalb des „Vektorskops“ in DaVinci Resolve. Das Vektorskop ist ein kreisförmiges Messinstrument. Es visualisiert Farbe (Farbton) durch die Richtung und Sättigung durch den Abstand der Signale von der Mitte. Das Hauptziel dieses Werkzeugs ist die präzise Korrektur von Farbstichen und die Gewährleistung einer natürlichen Darstellung von Hauttönen mithilfe der integrierten „Skin Tone Line“. (Tektronix, o. D.)

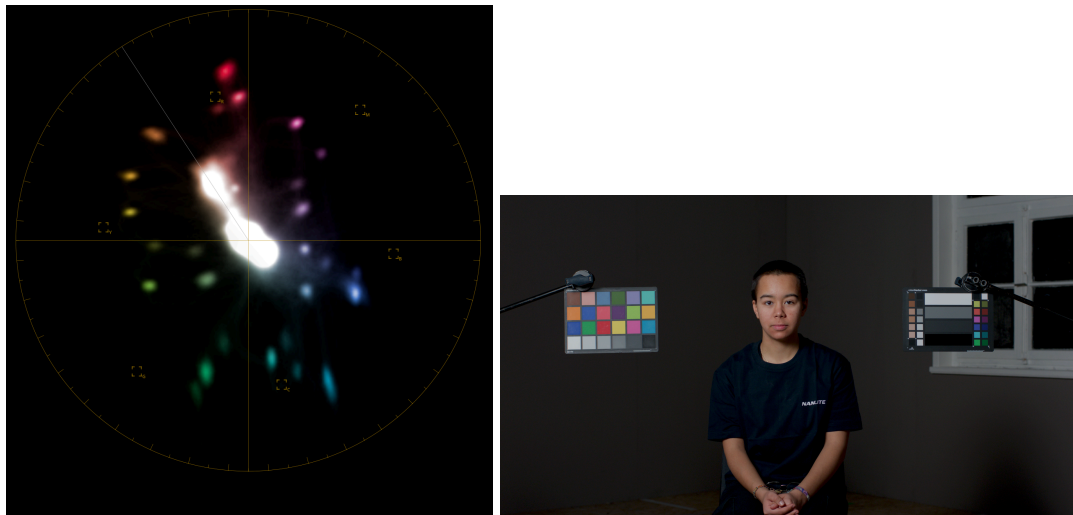


Abbildung 103: 2-Fach Vergrößerte vektorskopische Darstellung (L) des Referenzbildes (R) (Eigene Abbildung)

Wenden wir nun sowohl die Haut-Separation als auch das Vektorskop auf das Testbild aus Abbildung 102 an, können wir sehen, wie (ausschließlich Hauttöne) entlang der „Skin Tone Indicator“ Linie (Rot markiert) verlaufen.

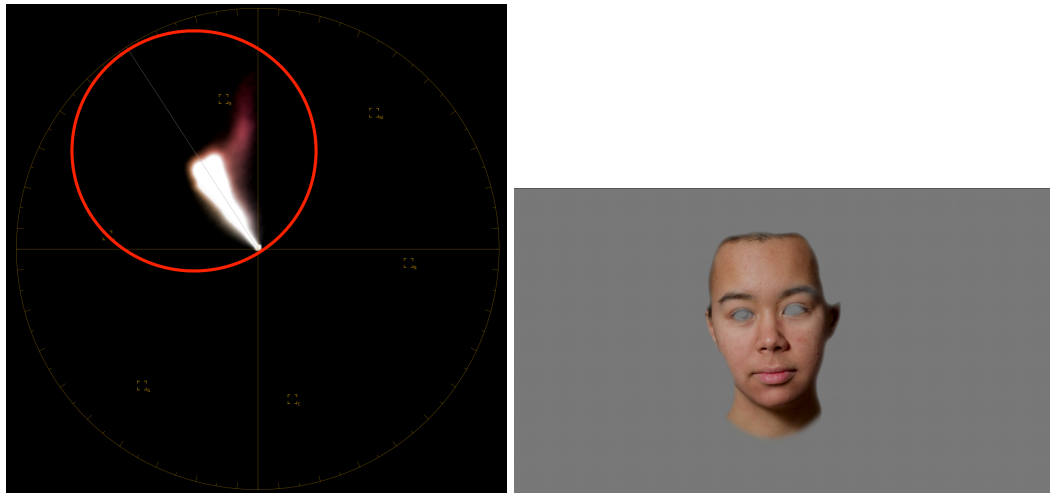


Abbildung 104: Isolierte Hauttöne innerhalb des Vektorskops (Eigene Abbildung)

5.3 Korrekturverfahren und LUTs

Grundsätzlich gibt es wenig Grenzen für die Bearbeitung von Haut im kreativen Sinne. Um jedoch ein praktisches Beispiel für die explizite Bearbeitung von Hauttönen zu geben, wird im Folgenden die Bearbeitung der Hauttöne anhand des dieser Arbeit zugrunde liegenden Experiments dargestellt.

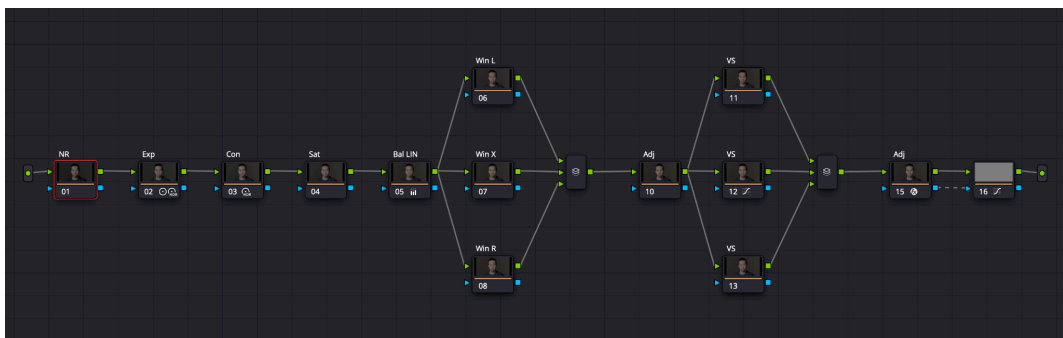


Abbildung 105: Bearbeitung von Hauttönen in DaVinci Resolve (Eigene Abbildung)

Jede “Node” (Quadrat mit Verbindungsstrich) in Abbildung 105 steht für eine Operation, die Farben oder Luminanzen bearbeitet. Dies können beispielsweise Operationen wie das Erhöhen oder Verringern von Farbsättigungen für bestimmte Bereiche, Kontrastverhältnisse oder die Verschiebung von ausgewählten Farbtönen in andere Farbtöne sein. Viele dieser Operationen können in einer sogenannten “(3D)-LUT” gespeichert werden. LUT steht für “Look Up Table” und beschreibt eine dreidimensionale Zuordnungstabelle, die jedem RGB-Eingabewert einen neuen

RGB-Ausgabewert zuweist und so die Veränderung von Farb- und Kontrast-Transformationen ermöglicht. (Lorenzo, 2012)

6. Wahrnehmungsexperiment

6.1 Anfertigung diverser Testaufnahmen

Um die Forschungsfrage dieser Arbeit durch reale Daten zur Wahrnehmung stützen zu können, wurde ein Experiment mit 33 Probanden durchgeführt. Es wurden Testaufnahmen von Menschen mit verschiedenen Hauttönen unter verschiedenen Lichtquellen angefertigt. Getestet wurden folgende Lampen:

1. Kunstlicht-Fresnel-Scheinwerfer (1KW) mit Osram Leuchtmittel (3200K)
2. Arri Orbiter RGBACL LED Scheinwerfer mit 30° Reflektor
3. Nanlux Evoke 600C dRRALGCB I Scheinwerfer mit 30° Reflektor

Zusätzlich war eine Aputure 1200X mit BLAIR-Engine und ein 30° Reflektor für die Durchführung des Experiments eingeplant. Die Einheit konnte jedoch vor Ort aufgrund eines Defekts nicht eingeschaltet werden und somit nicht im Wahrnehmungsexperiment berücksichtigt werden.

Versuchsaufbau:

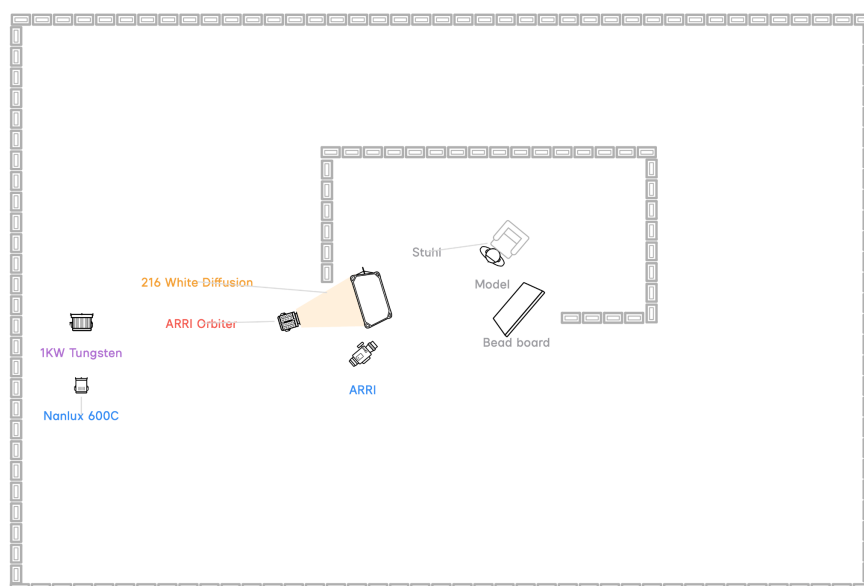


Abbildung 106: Grafik zur Vorplanung für den Versuchsaufbau (Eigene Abbildung)

Diffusionsfolie:

Lee 216 Full White Diffusion

Kamera: Arri Alexa 35

Objektiv: Zeiss CP2. 50mm und 135mm Brennweiten

Aufnahmeformat: ARRIRAW

Bilder/Sekunde: 25

Verschluss: 180°

Weißabgleich: 3200 Kelvin

Tint: 0 / 0

Blende: T 4.0 - T 5.6

Targets:

Xrite Color Checker Video

Color Checker Classic

Zusätzlich:

Styropor zum Aufhellen der Schattenseite des Models

Molton zum Abdecken des Bodens

Messgerät:

Sekonic C800 Spektrometer auf einem fest installierten Stativ

Messungen für alle Lampen: (Weißpunkt Referenz D65)

CCT, CC-Index, CC#, Lux, CRI Ra, CRI R1-R15, TM-30-18 Rf, TM-30-18 Rg, SSI(t), SSI(d), TLCl, DeltaUV, (TLMF), CIE1931 x, CIE1931 y, Hue, Saturation

Studio und Set-Aufbau:

Für den Aufbau wurde ein Stuhl in die Mitte eines bereits bestehenden Set-Aufbaus gestellt. Mit einem Abstand von etwa zwei Metern wurde eine Lampe auf einem Stativ aufgebaut. Die Position des Stativs wurde mit Klebeband auf dem Boden markiert, um einen gleichbleibenden Abstand zu gewährleisten. Mit einem Abstand von etwa 30 Zentimetern Entfernung wurde ein Stativ aufgebaut, das die Diffusionsfolie (White Diffusion Lee 216) zwischen das Licht und die Person auf dem Stuhl fixiert. Der Hersteller "Lee Filters" hat diese spezifische Folie auf Nachfrage empfohlen, da sie die geringste Farbverschiebung und die größte Beliebtheit im

gesamten Sortiment von “Lee Filters” als sinnvolle Faktoren für das Experiment mitbringt.



Abbildung 107: Aufbau des Sets für die Aufnahmen zum Wahrnehmungsexperiment (Eigene Aufnahmen)

Zusätzlich wurden die Farbtargets rechts und links von der Person aufgebaut. Sämtliche Lichtquellen aus dem Studio abseits der getesteten Lampe wurden ausgeschaltet. Zu Beginn wurde das Sekonic C800 Spektrometer auf einem Stativ so ausgerichtet, dass es an der Position des Stuhls in Richtung der Lichtquelle messen kann. Alle Test-Lampen wurden eingemessen und die jeweiligen LED-Varianten in der Intensität, im Weißabgleich und im Tint so neutral eingestellt, wie es werkseitig möglich war. Die Kunstlichtlampe wurde nicht verändert, gedimmt, lediglich so fokussiert, dass ein Vergleich mit den 30° Reflektoren der LED-Lampen möglich war.



Abbildung 108: Einleuchten des Sets für die Aufnahmen zum Wahrnehmungsexperiment (Eigene Aufnahmen)

Die Kamera wurde wie zuvor beschrieben eingerichtet und die jeweils zu testende Lampe, sowie die Brennweite, auf einem iPad notiert und für die ersten zwei Sekunden der Aufnahme in das Bild gehalten, um spätere Verwechslungen ausschließen zu können.

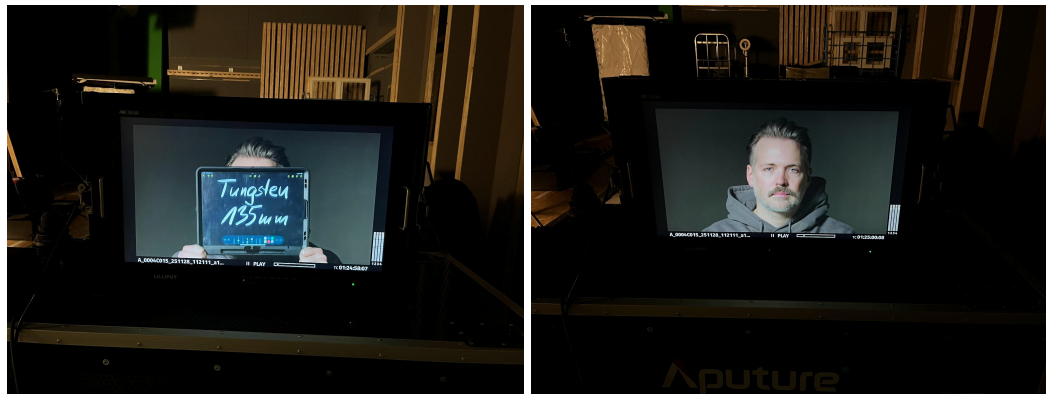


Abbildung 109: Live-Monitor am Set für die Aufnahmen zum Wahrnehmungsexperiment (Eigene Aufnahmen)

Es wurden von jeder Lampe unter jedem Hautton mit jeweils einmal dem 50mm Objektiv und einmal dem 135mm Objektiv etwa 10 sekundige Clips aufgenommen. Alle Daten wurden wie geplant und beschrieben aufgezeichnet und gesichert, um sie anschließend dem Coloristen Johannes Feltkamp zu übergeben.

6.2 Grading und Anfertigung einer Anpassungs LUT

Zum Start des Grading-Prozesses stellten sich einige Dinge schnell heraus. Zum einen wurde der Hintergrund als störend empfunden und nachträglich in der Postproduktion entfernt und zum anderen stellte sich die weitere Einstellung zwar als hilfreich heraus, was die Korrektur anging, jedoch nicht für den direkten Vergleich von Hauttönen im Experiment. Also wurde die Entscheidung gefällt, nur die Einstellungen des 135mm Objektivs für den Direktvergleich im Experiment zu nutzen, da wesentlich mehr Haut zu sehen ist.

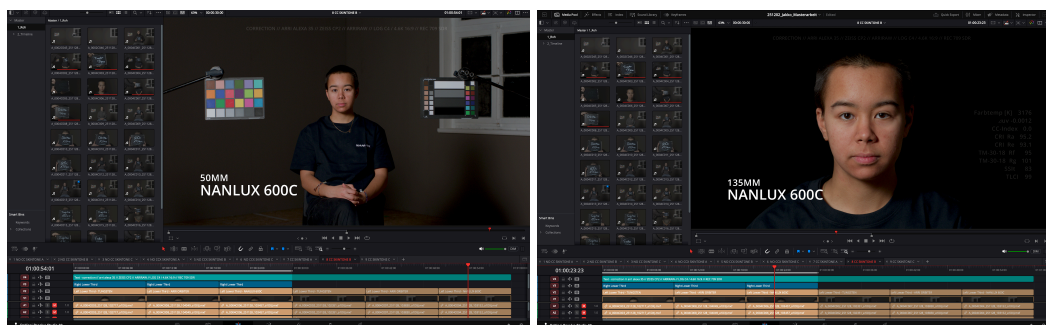


Abbildung 110: Gradingprojekt des Wahrnehmungsexperiments (Eigene Aufnahmen)

Es wurden schließlich zwei Varianten im Grading angefertigt. Zum einen die “NO CC X”-Variante, bei der die leichte Verschiebung von Weißabgleich und Tint der Kunstlichtlampe korrigiert wurde. Zum anderen wurde nur dezent die Belichtung der Einstellungen aneinander angepasst.

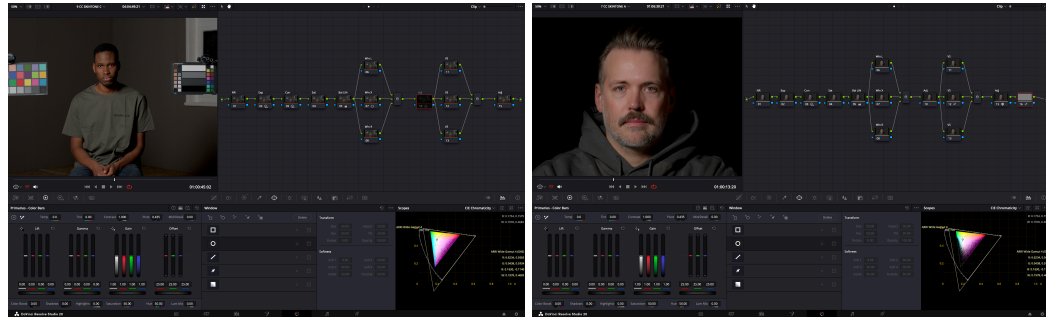


Abbildung 111: Live-Monitor am Set für die Aufnahmen zum Wahrnehmungsexperiment (Eigene Aufnahmen)

Weiterhin wurde eine “CC” Variante, bei der das Material des Arri Orbiter und der Nanlux 600C vom Coloristen an das Kunstlicht angepasst wurde, angefertigt. Das Kunstlicht selbst wurde dabei farblich nicht verändert.

DaVinci Resolve Einstellungen:

Projekt:

Resolution: 3080 x 2016 Pixel

Frame-Rate: 25 FPS

Colorscience: DaVinci YRGB

Timeline Colorspace: Davinci Wide Gamut / Intermediate Gamma

Output Colorspace: Rec. 709 / Gamma 2.4

Timeline:

Resolution: 4608 x 2592

Frame-Rate: 25 FPS

Colorscience: DaVinci YRGB

Timeline Colorspace: Davinci Wide Gamut / Intermediate Gamma

Output Colorspace: Rec. 709 / Gamma 2.4

Export:

Resolution: 3080 x 2016 Pixel

Frame-Rate: 25 FPS

ProRes 444 XQ

6.3 Befragung: Probanden beurteilen die Natürlichkeit der Hauttöne (3-AFC)

Das Experiment zur Wahrnehmung wurde am 19.12.2025 und am 22.12.2025 in der Technischen Hochschule Ostwestfalen-Lippe in Detmold zwischen 9:00 und 18:00 Uhr mit 33 Probanden durchgeführt. Um eine Zufälligkeit der Zusammenstellung der Probanden zu gewährleisten, wurden alle Personen, die sich innerhalb des Gebäudes befanden, ungeachtet jeglicher Merkmale, zur Befragung eingeladen.

Um den Probanden eine möglichst neutrale und vergleichbare Bewertungssituation zu ermöglichen, wurde ein kleiner Raum genutzt, in dem ein hochwertiger Canon DP-V3120 Referenzmonitor, der direkt über eine Ausgangskarte (Blackmagic Decklink), die das Bild unverfälscht und unkomprimiert per SDI-Kabel weitergibt, mit einem Mac Book Pro verbunden, auf dem das DaVinci Resolve Projekt läuft, mit dem der Colorist zuvor gearbeitet hat. Zusätzlich wurden die ProRes 444 XQ Exporte für eine flüssigere Wiedergabe des Materials mit einer Auflösung von 3840 x 2160 importiert. Der Monitor selbst wurde zuvor auf den Farbraum BT. 709 und ein Gamma von 2.4 eingestellt und bildete ebenfalls 3840 x 2160 Pixel bei 10 BIT Farbtiefe ab. Der Monitor war im gesamten Verlauf des Tests die einzige, für die Probanden sichtbare, Lichtquelle. Die Monitore, auf denen das Programm lief, wurden mit einer schwarzen Fläche abgedeckt. Die Probanden saßen mit einer festen Entfernung von etwa 70 cm Sehdistanz zum Monitor.

Um zu vermeiden, dass sich die Probanden das erste Bild anschauen und die chromatische Adaption der Augen bereits beginnt sich darauf einzustellen, wurde mit einem schwarzen Bildschirm begonnen. Die unbeschrifteten Clips wurden jeweils immer in der gleichen Reihenfolge für etwa 3-4 Sekunden abgespielt. Dabei wurde laut angesagt, dass es sich um Bild 1, 2 oder 3 handelt. Grundsätzlich war die Abfolge der Bilder bei jedem Hautton und in jedem Durchgang gleich. Erst 1, dann 2, dann 3. Den Probanden war es jedoch erlaubt, Bilder erneut anzusehen oder die Reihenfolge zu ändern. Sie hatten so viel Zeit, wie sie sich nehmen wollten,

um ihre Entscheidung zu treffen. Die Probanden wussten zu keinem Zeitpunkt, welche Lichtquelle sie sahen.

Vor Beginn der Befragung wurde das grobe Thema zum Experiment erläutert und dies jedes Mal im selben Wortlaut.

“Es wird untersucht, ob Kunstlicht die natürlichsten Hauttöne produziert”.



Abbildung 112: Fotos der Durchführung während des Wahrnehmungsexperiments
(Eigene Abbildung)

Die Frage wurde wie folgt formuliert;

“Welches der 3 Videos hat für Sie die natürlichsten Hauttöne, 1,2 oder 3?”

„Natürlichkeit“ wird in dieser Arbeit als subjektives Urteil der Betrachter verstanden und als Präferenzentscheidung im Test erfasst. Eine Beschreibung der Kriterien jedes einzelnen Probanden kann der Tabelle im Anhang entnommen werden.

6.4 Auswertung der Ergebnisse zur Wahrnehmung

Im ersten Durchlauf wurden die Videodaten (NO CC X) gezeigt, die lediglich einer leichten Korrektur der Belichtung, des Weißabgleichs und des Tints um alle 3 Lampen in ihrer neutralisierten Form vergleichbar machen, ohne dass spektrale Unterschiede dabei verloren gehen.

SKINTONE A (NO CC X)

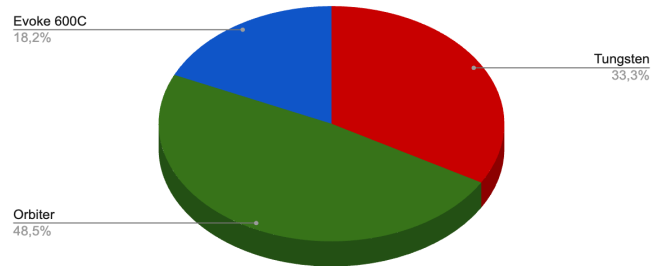


Abbildung 113: Diagramm zur Wahl der “natürlichsten Hauttöne” nach Lampentyp bei heller Haut (Model A) (Eigene Grafik)

SKINTONE B (NO CC X)

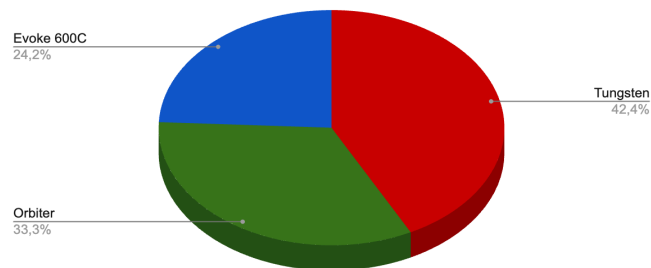


Abbildung 114: Diagramm zur Wahl der “natürlichsten Hauttöne” nach Lampentyp bei mittelheller Haut (Model B) (Eigene Grafik)

SKINTONE C (NO CC X)

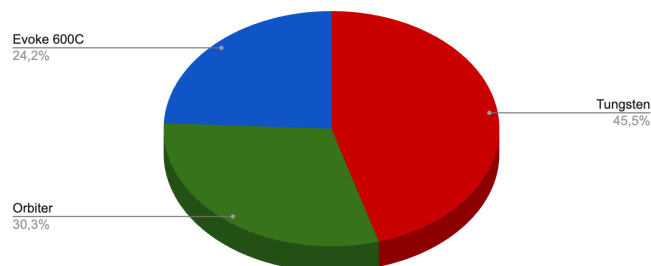


Abbildung 115: Diagramm zur Wahl der “natürlichsten Hauttöne” nach Lampentyp bei dunkler Haut (Model C) (Eigene Grafik)

Zusammenfassung (NO CC X):

Hautton A:

Orbiter:	16	(48,48%)
Kunstlicht:	11	(33,33%)
Evoke 600C:	6	(18,18%)

Hautton B:

Kunstlicht:	14	(42,42%)
Orbiter:	11	(33,33%)
Evoke 600C:	8	(24,24%)

Hautton C:

Kunstlicht:	15	(45,45%)
Orbiter:	10	(30,30%)
Evoke 600C:	8	(24,24%)

Beobachtung:

In der ersten Runde (NO CC X) wurde beim Hautton A der Arri Orbiter am häufigsten gewählt. Bei Hautton B und C wurde am häufigsten das Kunstlicht gewählt. Die Evoke 600C wurde bei allen 3 Hauttönen als "am wenigsten natürlich" wahrgenommen.

Im zweiten Durchlauf wurden die Videodaten (CC) gezeigt, die vom Coloristen möglichst nah an das Material der Kunstlichtlampe angepasst wurden. Hierbei konnte der Colorist alle Werkzeuge nutzen und konnte uneingeschränkt anpassen. Dieser Durchlauf ist für die Forschungsfrage von wesentlich höherer Relevanz, da Filme in der Regel nicht mit dem Rohmaterial veröffentlicht werden, sondern in der Postproduktion einer Korrektur und einem Grading unterzogen werden.

SKINTONE A (CC)

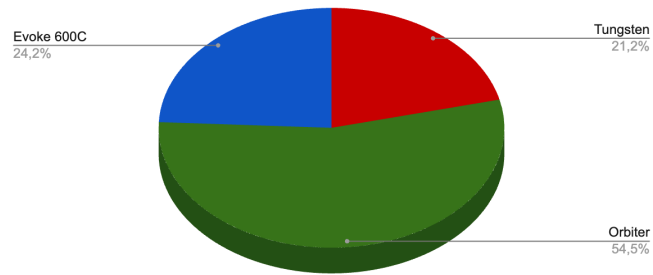


Abbildung 116: Diagramm zur Wahl der “natürlichsten Hauttöne” nach Lampentyp bei heller Haut (Model A) (Eigene Grafik)

SKINTONE B (CC)

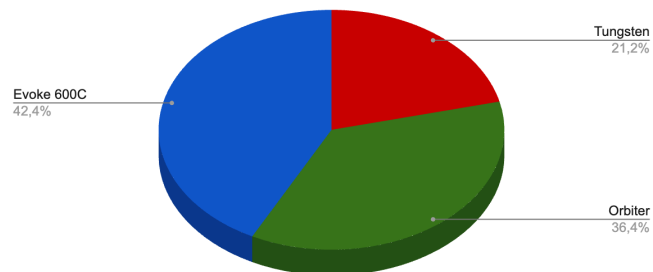


Abbildung 117: Diagramm zur Wahl der “natürlichsten Hauttöne” nach Lampentyp bei mittelheller Haut (Model B) (Eigene Grafik)

SKINTONE C (CC)

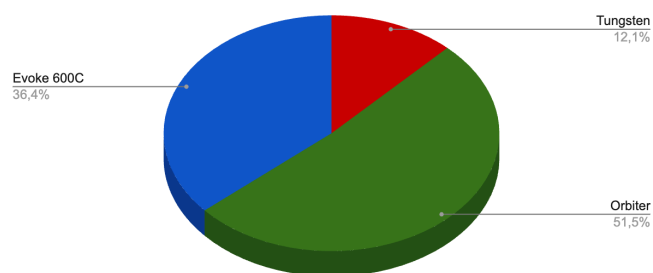


Abbildung 118: Diagramm zur Wahl der “natürlichsten Hauttöne” nach Lampentyp bei dunkler Haut (Model C) (Eigene Grafik)

Zusammenfassung (CC):

Hautton A:

Orbiter:	18	(54,55%)
Kunstlicht:	7	(21,21%)
Evoke 600C:	6	(24,24%)

Hautton B:

Evoke 600C:	14	(42,42%)
Orbiter:	12	(36,36%)
Kunstlicht:	7	(21,21%)

Hautton C:

Orbiter:	17	(51,52%)
Evoke 600C:	12	(36,36%)
Kunstlicht:	4	(12,12%)

Beobachtung:

Sowohl bei Hautton A, als auch bei Hautton C wurde der Arri Orbiter am häufigsten gewählt. Bei Hautton entschieden sich die meisten Probanden für die Evoke 600C, die im ersten Durchlauf bei selbigem Hautton noch am wenigsten Stimmen bekam. Kunstlicht wurde bei allen drei Hauttönen im zweiten Durchlauf mit farblich angepassten Videos (CC) am seltensten gewählt, obwohl dieser im ersten Durchgang gemeinsam mit dem Arri Orbiter am häufigsten gewählt wurde.

Eine weitere interessante Untersuchung war die Wahrnehmung der Probanden, die Kunstlicht als Affinität angegeben haben. Die folgenden Ergebnisse zeigen ausschließlich die Entscheidung von Probanden, die Kunstlicht als ihre bevorzugte Lichtquelle angegeben haben.

Affinität zu Kunstlicht (NO CC X)

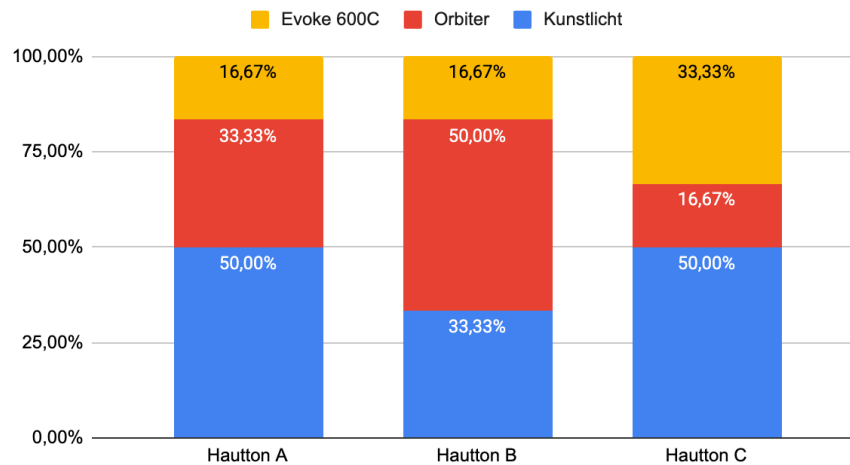


Abbildung 119: Zusammengefasstes Diagramm zur Wahl der natürlichsten Hauttöne von Probanden mit Kunstlicht-Affinität in Runde 1 (NO CC X) (Eigene Abbildung)

Beobachtung:

Es ist festzustellen, dass Kunstlicht bei Probanden mit Kunstlicht-Affinität in der ersten Runde (NO CC X) im Schnitt die häufigste Wahl darstellt. Die Nanlux Evoke 600C ist hier vor allem im Vergleich eher selten gewählt worden.

Affinität zu Kunstlicht (CC)

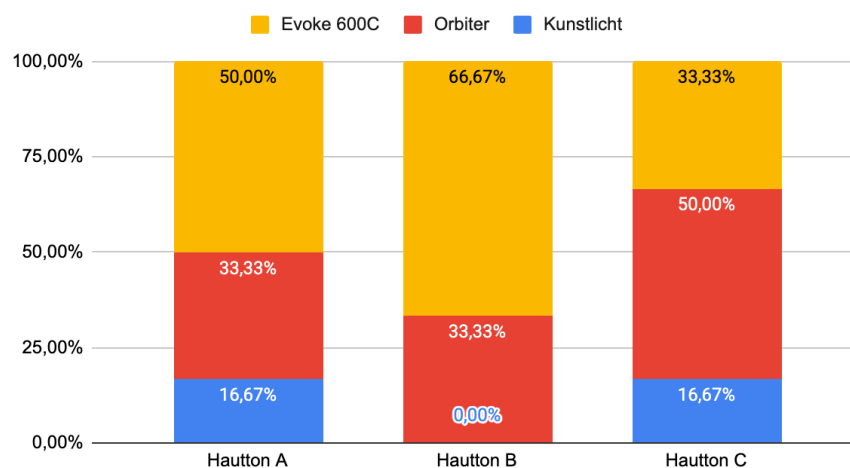


Abbildung 120: Zusammengefasstes Diagramm zur Wahl der natürlichsten Hauttöne von Probanden mit Kunstlicht-Affinität in Runde 2 (CC) (Eigene Abbildung)

Beobachtung:

Im Vergleich zur vorigen Grafik ist hier festzustellen, dass Probanden mit Affinität zu Kunstlicht dieses am seltensten gewählt haben. Auffällig ist auch, dass sich bei Hautton B kein Proband für Kunstlicht entschieden hat.

Auch die Ergebnisse der Probanden mit Affinität zu LED-Lichtquellen wurden untersucht und ausgewertet.

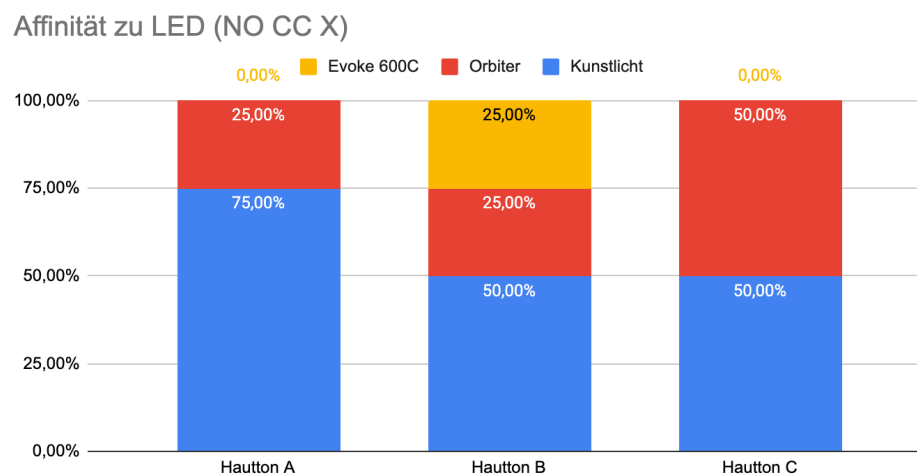


Abbildung 121: Zusammengefasstes Diagramm zur Wahl der natürlichsten Hauttöne von Probanden mit LED-Affinität bei Runde 1 (NO CC X) (Eigene Abbildung)

Beobachtung:

Es ist festzustellen, dass die Probanden mit einer Affinität zu LED-Licht im Durchschnitt am häufigsten das Kunstlicht gewählt haben. Die Evoke 600C wurde bei Hautton A und C nicht gewählt und ist auch bei Hautton B nur von einem Viertel der Probanden gewählt worden.

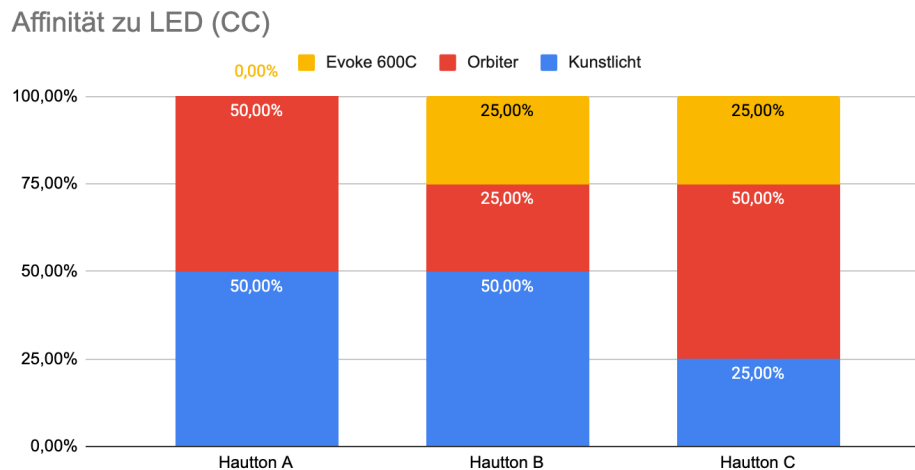


Abbildung 122: Zusammengefasstes Diagramm zur Wahl der natürlichsten Hauttöne von Probanden mit LED-Affinität in Runde 2 (CC) (Eigene Abbildung)

Beobachtung:

Auch in der zweiten Runde (CC) ist die Evoke 600C durchschnittlich am wenigsten gewählt worden. Kunstlicht und der Orbiter wurden im Durchschnitt gleich häufig gewählt.

Stammdaten aller Probanden:

Zusätzlich wurden verschiedene Daten zur Vergleichbarkeit der Probanden erhoben. Das Geschlecht, das Alter, ob eine Vorbildung im Bereich Fotografie oder Film vorliegt und ob eine persönliche Affinität zu bestimmten Lampentypen vorliegt. Als Auswahlmöglichkeiten waren "Kunstlicht", "LED", "Andere" oder "Keine Affinität" vorgegeben

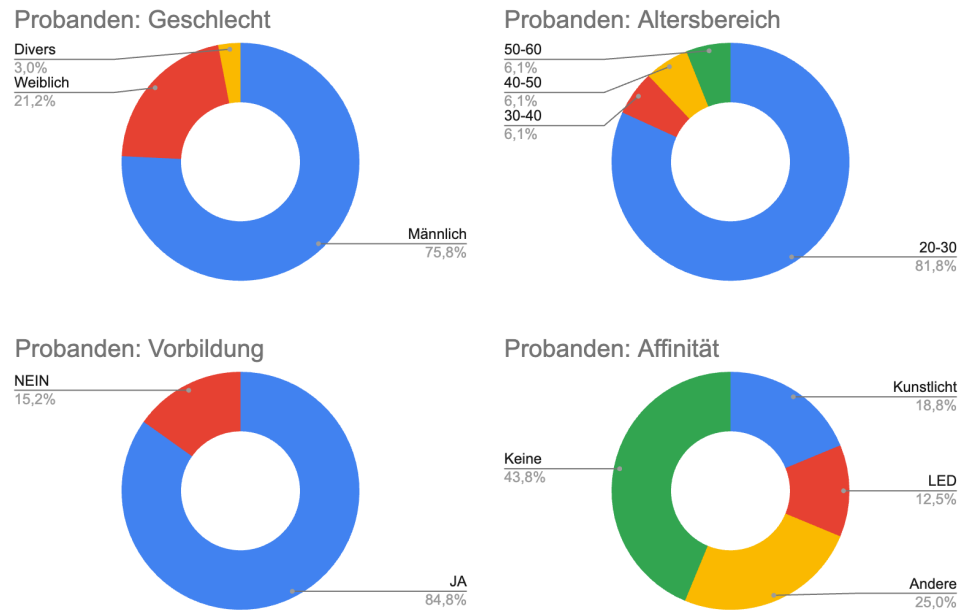


Abbildung 123: Probandendaten aus dem Wahrnehmungsexperiment. Geschlecht (L, O) Altersbereich (R,O), Vorbildung (L, U) und Affinität zu Lichttypen (R,U) (Eigene Abbildung)

Beobachtung: Sowohl das Alter, das Geschlecht und die Anzahl der Probanden mit einer entsprechenden Vorbildung sind eher homogen. Die prozentuale Anzahl der Probanden ohne Affinität übersteigt die der anderen Affinitäten.

6.5 Limitationen und Validität der Ergebnisse

Grundsätzlich ist zu sagen, dass eine höhere Anzahl von Befragten auch eine höhere Aussagekraft aufgrund einer breiteren Datenlage gehabt hätte. Aufgrund der geringen Anzahl an Probanden und der willkürlichen Wahl ebendieser, sind Parameter wie Geschlecht, Alter und Vorbildung in einem eher homogenen Bereich. Die Auswertung nach diesen Merkmalen hat also weniger Aussagekraft in einem gesamtgesellschaftlichen Kontext, da beispielsweise die Gesamtheit aller Deutschen nicht zu 75% männlich und auch nicht zu 81% zwischen 20 und 30 Jahre alt ist. Um Unterscheidungen nach diesen Merkmalen zu untersuchen, sollte die Stichprobe deutlich größer sein. (Statistisches Bundesamt, 2024) Auch eine Überprüfung der Fähigkeit zum korrekten Farbsehen der Probanden, hätte die Validität geschärft. Die drei Videos wurden zuerst in einer festen Reihenfolge (1→2→3) präsentiert. Für die finale Auswahlentscheidung haben jedoch alle Probanden die Videos mindestens einmal erneut aufgerufen und dabei in variabler Reihenfolge miteinander verglichen. Dadurch wird ein möglicher Einfluss der

initialen Reihenfolge reduziert, kann aber nicht vollständig ausgeschlossen werden. Ein weiterer Kritikpunkt am Vorgehen und der Gestaltung dieser Befragung ist der Begriff "natürliche Hauttöne". Nachdem die Probanden das Material gesehen und sich entschieden hatten, wurden sie zusätzlich nach ihren Kriterien für die Entscheidung gefragt. Beispiele folgen: (Auszug, Anhang: 7.4.1)

Proband 18: *"Eine höhere Farbdynamik ist natürlicher."*, Proband 25: *"Weniger Farbdynamik ist natürlicher."* Proband 26: *"Zu Gelb oder zu Rot ist unnatürlich."*, Proband 28: *"Zu Grün oder zu Blau ist unnatürlich."* Dieser Auszug an Aussagen zur Natürlichkeit von Hauttönen gibt einen Eindruck, wie unterschiedlich die Voraussetzungen und Kriterien bereits vor der eigentlichen Wahrnehmung von Hauttönen zu sein scheinen. Ein weiterer Kritik-Faktor ist die Beeinflussung durch die vorige Aufklärung des Untersuchungskontextes. Da vorab erläutert wurde, was genau erforscht werden soll, könnten Probanden auf die Idee gekommen sein, aktiv zu versuchen, Kunstlicht von LED anhand ihrer Erfahrungen und Vorbildung zu identifizieren und so eine beeinflusste Stimme abzugeben. Eine Vorprägung (Priming) kann hier also nicht ausgeschlossen werden. Anhand von Kunstlicht-typischen Merkmalen wie beispielsweise der Infrarotverschmutzung in dunklen Textilien bei Kunstlicht, wäre dies grundsätzlich möglich gewesen.

7. Fazit

7.1 Einordnung der Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse des Experiments eingeordnet und gedeutet. Um die Ergebnisse in einen verwertbaren Kontext zu setzen, ist es wichtig zu betonen, dass ausschließlich die Ergebnisse der zweiten Runde des Wahrnehmungsexperiments (CC) von direkter Relevanz für die Forschungsfrage sind, da diese dem realen Prozess der Erstellung und Postproduktion von Filmmaterial bei Filmproduktionen entspricht. Es sollte auch berücksichtigt werden, dass es sich bei dem Experiment um Idealbedingungen im Sinne des erstellten Materials und bei der Sichtungsqualität während des Experiments handelt. Bei der Erstellung des Materials ist ausschließlich eine einzelne Lichtquelle verwendet worden. Das Material zeigt nur einen Darsteller mit annähernd frontaler Beleuchtung, einer statischen Kamera und statischen Darstellern vor einem digital entfernten Hintergrund. Es gibt keine Audio-Ebene und auch sonst keinerlei abweichende Faktoren für die Wahrnehmung. Die Probanden sahen das Material alle am selben Ort mit einem professionellen Referenzmonitor, der perfekt auf das

Material angepasst war. Der Monitor war dabei die einzige Lichtquelle im Raum. Dieses Szenario eignet sich zwar um die Vergleichbarkeit und Reproduktion zu erreichen, entspricht aber nicht dem durchschnittlichen Wahrnehmungsszenario eines Filmrezipienten. Es ist denkbar, dass ein Zuschauer im häuslichen Rahmen neben den offensichtlichen Faktoren wie Ton, Schauspiel, Kamerabewegung und Mischlicht im Bild auch auf Geräten schaut, die kein neutrales oder korrektes Bild wiedergeben. Unter diesen Umständen ist die Wahrnehmung und Bewertung einer verwendeten Lichtquelle am Set denkbar komplizierter. Es ist also anzunehmen, dass Unterschiede in einer regulären Filmproduktion und einem Rezipienten im durchschnittlichen Wahrnehmungsszenario schwieriger festzustellen sind, als unter den Idealbedingungen im Experiment. Obwohl die erste Runde des Experiments (NO CC X) von geringerer Bedeutung ist, können daraus Erkenntnisse gezogen werden. Kunstlicht wird im ersten Durchgang mit einem marginalen Vorsprung gegenüber dem Orbiter als natürlichste Lichtquelle gewählt. Ebenso hat sich gezeigt, dass die Probanden mit Kunstlicht-Affinität die Kunstlichtquelle im ersten Durchgang (NO CC X) häufiger gewählt haben, als im Zweiten. Das lässt darauf schließen, dass sich die von ihnen bevorzugten Charaktereigenschaften von Kunstlicht dort eher von den LED-Lichtquellen abgrenzen ließen. Da in der zweiten Runde (CC) kaum noch Kunstlicht gewählt wurde, kann man darauf schließen, dass sich diese Charakteristika durch das Grading nachstellen ließen.

7.2 Beantwortung der These anhand der Ergebnisse

“Ist Kunstlicht im Zeitalter von LED noch immer die technisch beste Wahl für natürliche Hauttöne?”

Da die Probanden keine Kenntnis über die verwendeten Lichtquellen im Experiment hatten und Kunstlicht im 2. Versuchsdurchlauf dennoch konsequent seltener als natürlich wahrgenommen wurde, deuten die Ergebnisse dieser Arbeit darauf hin, dass Kunstlicht im Vergleich zu den untersuchten LED-Lichtquellen keine bevorzugte Wahrnehmung natürlicher Hauttöne erzeugt, sobald ein professionelles Grading in der Postproduktion angewandt wird. Auch eine allgemeine persönliche Affinität zu Kunstlicht oder LED-Licht hatte keinen Einfluss auf diese Ergebnisse. Auch bei einer Produktion ohne Postproduktion, ähnlich der ersten Versuchsrunde (NO CC X), waren die Ergebnisse zwischen LED-Licht (Orbiter: 37/99 Stimmen) und Kunstlicht (40/99 Stimmen) im Experiment eher marginal. Die Ergebnisse dieser Arbeiten deuten also darauf hin, dass sich nach der entsprechenden Postproduktion

kein wahrnehmbarer Unterschied zwischen LED und Kunstlichtlampen im Bezug auf natürliche Hauttöne wahrnehmen lässt. Jedoch ist zu berücksichtigen, dass eine entsprechende Postproduktion die von LED-Licht erzeugten Hauttöne komplexer darstellen kann, wenn LED-Licht und Kunstlicht sich im selben Bild, oder sogar auf derselben Haut mischen.

7.3 Ausblick auf zukünftige Entwicklungen

Grundsätzlich ist zu sagen, dass die Art und Weise, wie ein Licht auf die menschliche Haut wirkt, stark mit dem zugehörigen Spektrum zusammenhängt. Mit der Weiterentwicklung von LED-Technologien und Mischmethoden könnte es in der Zukunft möglich sein, den spektralen Fußabdruck von Kunstlicht nahezu oder auch komplett nachzubilden. Technologien wie die die Aputure BLAIR-Engine, aber auch die Nebula C8 Engine von Nanlux haben gezeigt, dass die Erweiterung des Spektrums, zum Beispiel über Ultraviolett und Infrarot, von LEDs in der Filmproduktion umsetzbar ist.

In der Postproduktion ist die Implementierung von künstlicher Intelligenz für Color-Grading Prozesse bereits fortgeschritten und wird es vermutlich in der Zukunft leichter machen, einen Kunstlicht-Look im Bild, zum Beispiel anhand von Referenzmaterial, zu replizieren. Ein eigener Versuch, mit Hilfe einer KI (Higgsfield, Kling 01) die spektralen Unterschiede von Kunstlicht anhand des LED-Referenzmaterials der Nanlux Evoke 600 C zu emulieren, verlief nicht erfolgreich.

Dies könnte sich mit dem Fortschreiten der KI-Technologie jedoch ändern. Prompt;

“Match the color rendering characteristics and skin tone appearance of the reference footage shot under tungsten lighting, while preserving original scene geometry and exposure”

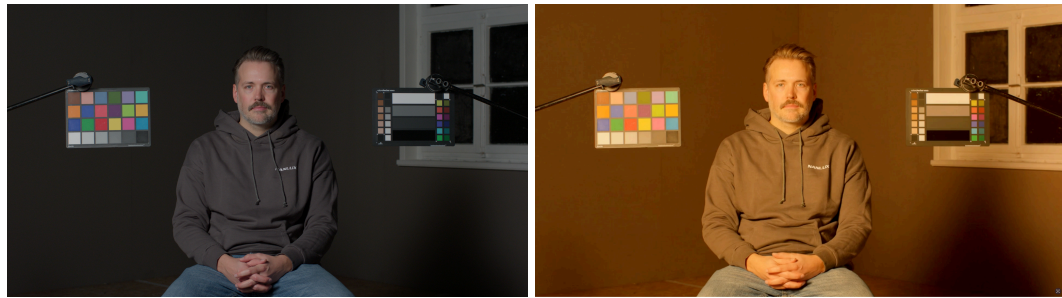


Abbildung 124: Referenzmaterial beleuchtet mit der Kunstlichtlampe (L) und die Ergebnisse des Versuchs Kunstlichtcharakteristiken mit einer KI zu simulieren (R) (Eigene Abbildungen)

Angeichts der vergleichsweise geringen Effizienz, der benutzerunfreundlicheren Handhabung und der höheren Wartungsintensität von Kunstlicht ist es denkbar, dass dessen Nutzung im Laufe der Zeit so weit zurückgeht, dass LED-Licht und möglicherweise auch zukünftige Technologien diese Art der Lichterzeugung vollständig ablösen.

7.4 Glossar

ANSI / IES TM-30-18 (Technical Memorandum 30)

Farbwiedergabemetrik der Illuminating Engineering Society zur Bewertung der Farbwiedergabequalität von Lichtquellen anhand von 99 Testfarben. Der Standard umfasst Kennwerte zur Farbübereinstimmung (Rf), Farbsättigung (Rg) sowie zur Farbverschiebung einzelner Farbbereiche.

Blackbody (Planckscher Strahler)

Theoretisches physikalisches Modell eines idealen Strahlers, der elektromagnetische Strahlung ausschließlich abhängig von seiner Temperatur emittiert. Dient als Referenz für die Definition der Farbtemperatur und der Planckschen Kurve.

CCT (Correlated Color Temperature)

Korrelierte Farbtemperatur einer Lichtquelle, angegeben in Kelvin. Beschreibt die visuelle Lichtfarbe einer Quelle in Relation zu einem planckschen Strahler, ohne Aussagen über deren spektrale Zusammensetzung zu treffen.

CC-Index (Color Compensation)

Maß zur Beschreibung chromatischer Abweichungen einer Lichtquelle entlang der Grün-Magenta-Achse. Wird in der Filmproduktion häufig als Tint bezeichnet und praxisnah zur Farbkorrektur eingesetzt.

Chromatische Adaption

Physiologischer Anpassungsprozess des menschlichen Sehsystems, bei dem sich die Farbwahrnehmung an vorherrschende Lichtbedingungen angleicht, sodass Farben trotz wechselnder Lichtquellen als konstant wahrgenommen werden.

CIE (Commission Internationale de l'Éclairage)

Internationale Beleuchtungskommission, die grundlegende Standards zur Farbmessung, Farbwahrnehmung und Photometrie definiert.

CIE 1931 Normfarbsystem

Standardisiertes Farbmodell zur quantitativen Beschreibung des menschlichen Farbsehens auf Basis von Tristimuluswerten (X, Y, Z) und dem 2°-Normalbeobachter.

CIE 1964 10°-Normalbeobachter

Erweiterung des CIE-Standards zur Berücksichtigung eines größeren Gesichtsfelds bei der Farbwahrnehmung, basierend auf einem Sehwinkel von 10°.

CIE 1976 u'v'-Farbraum (CIELUV)

Weiterentwicklung des CIE-Normfarbsystems mit verbesserter Wahrnehmungsgleichabständigkeit, insbesondere zur Bewertung kleiner Farbabweichungen.

Color Grading

Kreativer und technischer Prozess der Farbkorrektur und Farbgestaltung in der Postproduktion, um Bildästhetik, Farbkonsistenz und visuelle Aussagen zu steuern.

Color Quality Scale (CQS)

Vom NIST entwickelte Farbwiedergabemetrik als Weiterentwicklung des CRI, die stärker gesättigte Testfarben nutzt, um spektrale Defizite moderner Lichtquellen besser zu erfassen.

Color Rendition Index (CRI)

Standardisierte Metrik zur Bewertung der Farbwiedergabe von Lichtquellen anhand definierter Testfarben im Vergleich zu einer Referenzlichtquelle. Der CRI gibt keine vollständige Aussage über spektrale Qualität.

Debayering

Algorithmischer Prozess zur Rekonstruktion eines vollständigen Farbbildes aus den Sensordaten eines Bayer-Farbfilters auf digitalen Kamerasensoren.

Delta u'v'

Maß für die chromatische Abweichung einer Lichtquelle von der Planckschen Kurve im CIE-1976-Farbraum. Wird zur Beschreibung von Grün- oder Magenta-Verschiebungen genutzt.

Farbmetrik

System zur quantitativen Bewertung von Farbeigenschaften und Farbwiedergabe, basierend auf normierten Mess- und Vergleichsverfahren.

Farbvarianz

Phänomen, bei dem identische Objekte unter unterschiedlichen spektralen Lichtquellen abweichende Farben reflektieren und wahrgenommen werden.

HMI (Hydrargyrum Medium-arc Iodide)

Gasentladungslampe mit hohem Lichtoutput und tageslichtähnlicher Farbtemperatur, die in der Filmproduktion häufig für Außen- und Großlichtanwendungen eingesetzt wird.

JND (Just Noticeable Difference)

Psychophysischer Schwellwert, ab dem Unterschiede zwischen zwei Reizen vom menschlichen Wahrnehmungssystem wahrgenommen werden können.

Kunstlicht (Wolfram / Halogen)

Lichtquelle mit glühendem Wolframdraht, typischerweise mit einer Farbtemperatur um 3200 Kelvin und nahezu kontinuierlichem Spektrum.

LED (Light Emitting Diode)

Halbleiterbasierte Lichtquelle, deren Licht durch Elektrolumineszenz erzeugt wird. Moderne LED-Systeme erlauben variable Farbtemperaturen und spektrale Anpassungen.

LED-Engine

Interne Kombination mehrerer LED-Emitter und Mischsysteme zur gezielten Erzeugung bestimmter Spektren und Farbtemperaturen.

Lichtstrom (Φ_v)

Photometrische Größe zur Beschreibung der von einer Lichtquelle abgegebenen sichtbaren Lichtleistung, angegeben in Lumen.

Lux / Footcandle

Einheiten zur Messung der Beleuchtungsstärke des auf eine Fläche auftreffenden Lichtstroms. Lux ist die SI-Einheit, Footcandle eine imperiale Einheit.

Metamerie

Zustand, bei dem unterschiedliche spektrale Lichtverteilungen für das menschliche Auge identische Farben erzeugen, jedoch auf Kamerasensoren zu abweichenden Ergebnissen führen können.

Photometrie

Teilgebiet der Optik, das sich mit der Messung von Licht unter Berücksichtigung der spektralen Empfindlichkeit des menschlichen Auges beschäftigt.

Plancksche Kurve

Darstellung der spektralen Leistungsverteilung eines planckschen Strahlers in Abhängigkeit von der Temperatur.

RAW-Codec

Unkomprimiertes oder minimal verarbeitetes Datenformat digitaler Kameras, das Sensordaten ohne kamerainterne Farbverarbeitung speichert.

RGB-Farbmodell

Additives Farbmodell basierend auf den Primärfarben Rot, Grün und Blau, das Grundlage der digitalen Bilddarstellung ist.

Spectral Similarity Index (SSI)

Der von der Academy of Motion Picture Arts and Sciences entwickelte Index zur Bewertung der spektralen Übereinstimmung zweier Lichtquellen im Wellenlängenbereich von 300–830 nm.

Spektrale Leistungsverteilung (SPD)

Darstellung der Intensität einer Lichtquelle in Abhängigkeit von der Wellenlänge; zentrale Grundlage für die Beurteilung von Farbwiedergabe.

TLCI (Television Lighting Consistency Index)

Der von der EBU entwickelte Index zur Bewertung der Farbwiedergabe von Lichtquellen im Kontext von Kamerasystemen, insbesondere für Film- und TV-Produktionen.

TLMF (Television Luminaire Matching Factor)

Ergänzende Metrik zum TLCI, die die Übereinstimmung zweier Lichtquellen miteinander bewerten.

Weißabgleich

Anpassung der Farbwiedergabe eines Kamerasystems an eine definierte Lichtquelle, um neutrales Weiß korrekt darzustellen.

Weißpunkt (Standard Illuminant)

Normierter Referenzwert für neutrales Weiß, z. B. D65 oder A, basierend auf definierten Lichtbedingungen.

7.5 Literaturverzeichnis

About Kino FLO Lighting System. (2022, 2. Dezember). Kino Flo. <https://kinoflo.com/about/#:~:text=A%20HISTORY%20OF%20INNOVATION,1993>

About us | Mole Richardson Co. (o. D.). Mole Richardson Co. Abgerufen am 7. Januar 2026, von <https://www.mole.com/about-us>

Academy, F. (2023, 26. Dezember). *Lighting Black Skin Tones with Sade Ndya*. Filmmakers Academy. <https://www.filmmakersacademy.com/lighting-black-skin-tones/>

Academy of Motion Picture Arts and Sciences. (2020). *Academy Spectral Similarity Index (SSI): Overview: 2020-03-13*. Abgerufen am 19. November 2025, von <https://www.oscars.org/>

Affi, M., Brown, M. S. & York University, Toronto. (2020). Interactive White Balancing for Camera-Rendered Images. In <https://arxiv.org/>. Abgerufen am 27. Dezember 2025, von <https://arxiv.org/pdf/2009.12632>

All about light. (2024, 17. November). Green Film Shooting. <https://greenfilmshooting.net/blog/en/2024/11/17/all-about-light/>

Angelopoulou, E. (1999b). The Reflectance Spectrum of Human Skin. *ScholarlyCommons (University Of Pennsylvania)*. https://repository.upenn.edu/cis_reports/584

Apple. (2017b). *Apple ProRes* [White Paper]. https://www.apple.com/tw/final-cut-pro/docs/Apple_ProRes_White_Paper.pdf

Aputure. (o. D.). *STORM 1000C* | Aputure. www.aputure.com. Abgerufen am 5. Januar 2026, von <https://aputure.com/en-US/products/storm-1000c?Title=Default+Title>

Arnold & Richter Cine Technik GmbH & Co. Betriebs KG. (2018). *Bedienungsanleitung*. Abgerufen am 11. Januar 2026, von <https://www.arri.com/resource/blob/31448/bc5856bd85e1db931bae4b20c89032ca/arri-eb-m-ax-2-5-4-manual-de-en-data.pdf>

Arri. (o. D.). *ALEV Sensors | Technology | Learn & Help*. ARRI. Abgerufen am 27. Dezember 2025, von <https://www.arri.com/en/learn-help/arri-camera-technology/alev-sensors?>

ARRI. (o. D.-c). *ARRIRAW | File Formats | Pre- & Postproduction | Learn & Help*. Abgerufen am 27. Dezember 2025, von <https://www.arri.com/en/learn-help/learn-help-camera-system/pre-postproduction/file-formats-data-handling/arriraw>

ARRI. (o. D.-e). *Best overall image quality*. Abgerufen am 8. Januar 2026, von <https://www.arri.com/en/learn-help/arri-camera-technology/best-overall-image-quality>

ARRI. (o. D.-f). *ProRes | File Formats | Pre- & Postproduction | Learn & Help*. Abgerufen am 27. Dezember 2025, von <https://www.arri.com/en/learn-help/learn-help-camera-system/pre-postproduction/file-formats-data-handling/prores>

ARRI. (o. D.-g). *Tech Specs | Orbiter | Lighting | ARRI*. Abgerufen am 9. Januar 2026, von <https://www.arri.com/en/lighting/led-spotlights/orbiter/tech-specs>

ARRI. (2022). *Dynamic range* (S. 2–6). <https://www.arri.com/resource/blob/295460/e10ff8a5b3abf26c33f8754379b57442/2022-09-28-arri-dynamic-range-whitepaper-data.pdf>

Bailey, B. (2023, 19. Dezember). *A Beginner's Guide to Shooting Raw*. Frame.io Insider. <https://blog.frame.io/2019/09/23/beginners-guide-to-shooting-raw/>

Berkl, D. S. B. O. C. F. J. H. A. A. (o. D.). *ARRI Formats & Data Rate Calculator*. <https://tools.arri.com/fileadmin/adapps/afdc/index.html>

BG-ETEM. (2016). Expositionsbeschreibung Quecksilberexpositionen bei der Herstellung von Leuchtmitteln. In *bgetem.de*. Abgerufen am 13. Dezember 2025, von <https://newsletter.bgetem.de/redaktion/arbeits-sicherheit-gesundheitsschutz/dokumente-und-dateien/themen-von-a-z/gefahrstoffe/expositionsbeschreibungen/quecksilberexpositionen-bei-der-herstellung-von-leuchtmitteln>

Blankenship, T. (2018, 30. August). *This DIY Roger Deakins-Style ring light costs less than \$150*. The Beat: A Blog By PremiumBeat. <https://www.premiumbeat.com/blog/diy-roger-deakins-ring-light/>

Brown, B. (2016). *Cinematography Theory and Practice*. <https://doi.org/10.4324/9781315667829>

Brown, B. (2019). *Motion Picture and Video Lighting for Cinematographers, Gaffers, and Lighting Technicians* (Third). Routledge. https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9780429866678_A35486954/preview-9780429866678_A35486954.pdf

Calcsimpler. (o. D.). *Correlated Color Temperature (CCT): Kelvin Scale for Perceived White Light*. Abgerufen am 27. Dezember 2025, von <https://www.calcsimpler.com/units-and-measures/correlated-colour-temperature-kelvin-lighting>

Cao, M., Luo, M. R. & Liu, G. (2020). Preferred skin tones reproduction of three ethnic groups under different ambient lighting conditions. *Color And Imaging Conference*, 28(1), 94–99. <https://doi.org/10.2352/issn.2169-2629.2020.28.13>

Center for Devices and Radiological Health. (2018, 5. Februar). *Ultraviolet Radiation Burns from High Intensity Metal Halide and Mercury Vapor Lighting Remain a Public Health Concern*. U.S. Food And Drug Administration. Abgerufen am 11. Januar 2026, von <https://www.fda.gov/radiation-emitting-products/alerts-and-notice/ultraviolet-radiation-burns-high-intensity-metal-halide-and-mercury-vapor-lighting-remain-public>

CIE - International Commission on Illumination. (2020). *17-21-003 | CIE*. cie.de. Abgerufen am 21. Dezember 2025, von <https://cie.co.at/eilvterm/17-21-003>

cinelight. (o. D.). *Types of Incandescent Lighting Fixtures*. cinelight.com. Abgerufen am 20. Januar 2026, von

https://cinelight.com/en/blog/5_types-of-incandescent-lighting-fixtures.html#:~:text=Open%20lights%20%E2%80%93%20also%20known%20as.they%20are%20far%20less%20controllable.

Correlated Color Temperature and Kelvin. (2020, 18. Mai). Diode LED. Abgerufen am 5. Januar 2026, von <https://www.diodeled.com/correlated-color-temperature-and-kelvin/#:~:text=Interesting%20facts%20about%20Correlated%20Color,the%20JND%20range%20identified%20above.>

Datacolor. (2024a, Oktober 3). Was ist Metamerie? *Datacolor.* <https://www.datacolor.com/de/business-solutions/blog/was-ist-metamerie/>

datacolor [Gabriele Hiller]. (2019). Die Farbmessung – das CIE-Farbenraum. In <https://www.datacolor.com/>. Abgerufen am 2. Dezember 2025, von <https://www.datacolor.com/wp-content/uploads/2023/05/color-management-ebook-3-de.pdf>

Ebrary. (o. D.). *Measuring color - Set Lighting Technician's Handbook: Film Lighting Equipment, Practice, and Electrical Distribution* -. Abgerufen am 9. Januar 2026, von https://ebrary.net/263559/education/measuring_color

EBU [TECH 355]. (2017). TECH 3355, Method for the assessment of the colorimetric properties of luminaires the Television Lighting Consistency Index (TLCI-2012) and the Television Luminaire Matching Factor (TLMF-2013) [Datensatz]. In *Method for the assessment of the colorimetric properties of luminaires The Television Lighting Consistency Index (TLCI-2012) and the Television Luminaire Matching Factor (TLMF-2013)* (Bd. 13, Nummer 2, S. 40). <https://tech.ebu.ch/docs/tech/tech3355.pdf>

Eissfeldt, A., Zandi, B., Herzog, A. & Khanh, T. Q. (2021a). Quantifying observer metamerism of LED spectra which chromatically mimic natural daylight. *Optics Express*, 29(23), 38168. <https://doi.org/10.1364/oe.433411>

Eissfeldt, A., Zandi, B., Herzog, A. & Khanh, T. Q. (2021b). Quantifying observer metamerism of LED spectra which chromatically mimic natural daylight. *Optics Express*, 29(23), 38168. <https://doi.org/10.1364/oe.433411>

Fauer, J., ASC & John Brawley. (2020). *Art, Technique and Technology in Motion Picture Production Worldwide* [Journal-article]. Abgerufen am 21. Januar 2026, von <https://www.fdtimes.com/pdfs/free/104FDTimes-2.00-Aug2020-150.pdf>

Fekete, J. (2014). Das Central-Theater in Esslingen. Ein technik- und kulturgeschichtliches Denkmal aus der Frühzeit des Kinos. *Denkmalpflege in Baden-Württemberg – Nachrichtenblatt der Landesdenkmalpflege*, 17(4), 169–174. <https://doi.org/10.11588/nbdpfbw.1988.4.13881>

Forsythe, A. & Funt, B. (2024). Assessing Color-rendering Differences in Cinematic Lighting with a New Metamer Mismatch Metric. *Color And Imaging Conference*, 32(1), 13–16. <https://doi.org/10.2352/cic.2024.32.1.4>

Furfari, F. A. T., Wallace, H. & Wallace, H. (2001). History: A Different Kind of Chemistry: A History of Tungsten Halogen Lamps. *IEEE Industry Applications Magazine*, 7(6), 10–17. <https://doi.org/10.1109/2943.959111>

FWU Institut für Film und Bild in Wissenschaft und Unterricht gemeinnützige GmbH. (o. D.). Leuchtdioden (LED) - Einführung. *Leifiphysik.de*, <https://www.leifiphysik.de/elektronik/halbleiterdiode/grundwissen/leuchtdioden-led-einfuehrung>.

<https://www.leifiphysik.de/elektronik/halbleiterdiode/grundwissen/leuchtdioden-led-einfuehrung>

Gloman, C. (2014, 5. März). *The Magic of HMIs*. TV Tech. https://www.tvtechnology.com/opinions/the-magic-of-hmis?utm_source

Gyllenbok, J. (2018). *Encyclopaedia of Historical Metrology, Weights, and Measures: Volume 1*.

https://openlibrary.org/books/OL28191705M/Encyclopaedia_of_Historical_Metrology_Weights_and_Measures

Hanlon, K. L., Wei, G., Correa-Selm, L. & Grichnik, J. M. (2022). Dermoscopy and skin imaging light sources: a comparison and review of spectral power distribution and color consistency. *Journal Of Biomedical Optics*, 27(08). <https://doi.org/10.1117/1.jbo.27.8.080902>

Held, M. H. (2022). *"FixtureCheck": Methode zum Vergleich der Farbwiedergabe-Qualität von Weißlicht bei LED-Scheinwerfern* [Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg Fakultät Design, Medien und Information Department Medientechnik]. <https://hdl.handle.net/20.500.12738/17740>

HMI Single End Lampen (andere) | OSRAM PIA. (o. D.). Abgerufen am 7. November 2025, von

[https://www.osram.de/ecat/HMI%20Single%20End%20Lampen%20\(andere\)-HMI-Entertainment-Beleuchtung-Entertainment%20&%20Industrie/at/de/GPS01_265569/](https://www.osram.de/ecat/HMI%20Single%20End%20Lampen%20(andere)-HMI-Entertainment-Beleuchtung-Entertainment%20&%20Industrie/at/de/GPS01_265569/)

Hoffmann, F. & Tingwaldt, C. (1938). Die Farbtemperatur. In *Die Farbtemperatur* (S. 80–98). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-663-02804-8_11

Houser, K. W., Wei, M., David, A. & Krames, M. R. (2014). Whiteness Perception under LED Illumination. *LEUKOS The Journal Of The Illuminating Engineering Society Of North America*, 10(3), 165–180. <https://doi.org/10.1080/15502724.2014.902750>

IEC 60050 - International Electrotechnical Vocabulary - Details for IEC number 845-21-012: „light“. (o. D.). IEC - International Electrotechnical Commission. <https://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=845-21-012>

IEC 60050 - International Electrotechnical Vocabulary - Details for IEC number 845-21-013: „light“. (o. D.). IEC - International Electrotechnical Commission. <https://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=845-21-013>

IEC 60050 - International Electrotechnical Vocabulary - Details for IEC number 845-21-036: „CIE standard photometric observer“. (o. D.). IEC - International Electrotechnical Commission. <https://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=845-21-036>

IEC 60050 - International Electrotechnical Vocabulary - Details for IEC number 845-21-039: „luminous flux“. (o. D.). IEC - International Electrotechnical Commission. <https://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=845-21-039>

IEC 60050 - International Electrotechnical Vocabulary - Details for IEC number 845-21-060: „illuminance“. (o. D.). IEC - International Electrotechnical Commission. <https://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=845-21-060>

Industry-leading LED engine by Astera. (o. D.). <https://astera-led.com/titan-led-engine/>
Jüstel, T. & Schwung, S. (o. D.). *Leuchtstoffe, Lichtquellen, Laser, Lumineszenz* (3. Aufl.) [PDF]. Springer Spektrum. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-662-70868-2.pdf>

Kadner, N. (2024a, Oktober 2). Cinematic Color Fidelity. *Kino Flo*. Abgerufen am 8. Januar 2026, von <https://kinoflo.com/blog/kino-flo-educational-series-cinematic-color-fidelity-by-noah-kadner/#:~:text=Metamerism%20occurs%20when%20two%20colors,across%20different%20stages%20of%20production.>

Kalb, W. C. (1934). Characteristics and Uses of the Carbon Arc. *Transactions Of The American Institute Of Electrical Engineers*, 53(8), 1173–1179. <https://doi.org/10.1109/t-aiee.1934.5056800>

Kannenberg, A. (2012, 22. November). Erfinder des Bayer-Filters gestorben. *Heise Online*. <https://www.heise.de/news/Erfinder-des-Bayer-Filters-gestorben-1754906.html>

Karge, A., Froehlich, J. & Eberhardt, B. (2021). Spectral Database of Commonly Used Cine Lighting - Karge et al. (2015) [Datensatz]. In *Zenodo (CERN European Organization for Nuclear Research)*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4642271>

Kidd, J. (2024, 13. Juni). *ARRI REVEAL Color Science explained*. Frame.io Insider. <https://blog.frame.io/2024/06/10/arri-reveal-color-science-explained/>

Kiyak, İ., Gökmen, G. & Koçyiğit, G. (2021). Lifetime Prediction for a Cell-on-Board (COB) Light Source Based on the Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS). *Journal Of Nanomaterials*, 2021, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2021/6681335>

Knudsen, S. (2022, 31. August). *Fluoreszierendes Licht beim Filmemachen erklärt: Sollten Sie es verwenden oder nicht?* <https://www.wedio.com>. Abgerufen am 13. Dezember 2025, von <https://www.wedio.com/de/lernen/fluoreszenzlicht?srsId=AfmBOoq3ZRfztdID8RLJRSOe2fZgjnXmJ83KWWIcaKaQ1GUXQf5U7Azp>

Kremers, J., Baraas, R. C. & Marshall, N. J. (2016). *Human Color Vision: Bd. Springer Series in Vision Research* (1. Aufl.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-44978-4>
Lasers and optical radiation (EHC 23, 1982). (o. D.). <https://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc23.htm?>

Laurent. (2023, 23. Juni). *Cove Lightning - Roger A. Deakins* (R. Deakins, Hrsg.). Roger A. Deakins. <https://www.rogerdeakins.com/forums/topic/cove-lightning/>

Lee, A. T. L., Chen, H., Tan, S. & Hui, S. Y. R. (2015). Precise Dimming and Color Control of LED Systems Based on Color Mixing. *IEEE Transactions On Power Electronics*, 31(1), 65–80. <https://doi.org/10.1109/tpel.2015.2448641>

LeGendre, C., Lepicovsky, L. & Debevec, P. (2022). Jointly Optimizing Color Rendition and In-Camera Backgrounds in an RGB Virtual Production Stage. *The Digital Production Symposium*, 1–12. <https://doi.org/10.1145/3543664.3543681>

Light engine & colors | Orbiter | Lighting | ARRI. (o. D.). ARRI. Abgerufen am 7. Dezember 2025, von <https://www.arri.com/en/lighting/led-spotlights/orbiter/light-engine>

Lorenzo, A. (2012, 11. Dezember). *LUTs Part 1: What is a LUT?* Fallen Empire. Abgerufen am 2. Januar 2026, von <https://web.archive.org/web/20230116201134/http://www.fallenempiredigital.com/blog/2012/12/04/luts-part-1-what-is-a-lut/>

Lu, Y., Xiao, K., Pointer, M., He, R., Zhou, S., Nasseraldin, A., Sueeprasan, S., Gao, C., Li, C., Sohaib, A., He, Y., Mizokami, Y., Wang, M., Romero, E. P., Zardawi, F., Gill, L., Liao, N. & Wuerger, S. (2025). The International Skin Spectra Archive (ISSA): a multicultural human skin phenotype and colour spectra collection. *Scientific Data*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41597-025-04857-5>

Maher, M. (2017a, Oktober 16). *How Roger Deakins Shot and Lit Blade Runner 2049*. The Beat: A Blog By PremiumBeat. <https://www.premiumbeat.com/blog/blade-runner-2049-lighting-cinematography/>

Maher, M. (2017b, Oktober 16). *How Roger Deakins Shot and Lit Blade Runner 2049*. The Beat: A Blog By PremiumBeat. <https://www.premiumbeat.com/blog/blade-runner-2049-lighting-cinematography/>

Manvell, R. (2025, 18. Februar). *film technology, movie technology*. Britannica. Abgerufen am 7. Januar 2026, von <https://www.britannica.com/technology/motion-picture-technology/Lighting>

Mazor Mischa. (2014, 12. Januar). No Country for Old Men. *CineGleaner*. <https://cinegleaner.postach.io/post/no-country-for-old-men>

Mehr, M. Y., Van Driel, W. D. & Zhang, G. Q. (2015). Progress in understanding color maintenance in Solid-State lighting systems. *Engineering*, 1(2), 170–178. <https://doi.org/10.15302/j-eng-2015035>

Melanin Cinematography | Lighting. (2020, 31. Januar). Bfmmag. <https://bfmmag.com/melanin-cinematography-lighting/>

Nanlux. (o. D.). *NANLUX*. Nanlux - Nebula C8 Engine. Abgerufen am 7. Dezember 2025, von <https://www.nanlux.com/product-nebula-light-engine#/en>

Neudeck, S. (1999, 4. Dezember). *Datenblattsammlung Film/Video*. Abgerufen am 7. November 2025, von <http://www.filmtechnik-online.de/filmtechnik/reload.htm?Daten18.htm>
Neudeck, S. (2012, 24. Januar). *Datenblattsammlung Film/Video - Leuchtstofflampen*. <http://filmtechnik-online.de/>. Abgerufen am 13. Dezember 2025, von <http://filmtechnik-online.de/filmtechnik/reload.htm?Daten14.htm>

Neumeyer, C. (2024). *Farbensehen - Wie und warum wir die Welt farbig wahrnehmen* [PDF]. In *springer.com* (1. Aufl., Bd. 1). Springer Spektrum Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-69341-4>

NIST- National Institute of Standards and Technology & Ohno, Y. (2000). CIE Fundamentals for Color Measurements: Optical Technology Division National Institute of Standards and Technology. In *NIST- National Institute Of Standards And Technology* (IS&Ts NIP16: 2000 International Conference on Digital Printing Technologies IS&Ts NIP16: 2000 International Conference on Digit). NIST. Abgerufen am 24. Dezember 2025, von https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=841491&

No Country for Old Men. (2014, 12. Januar). CineGleaner. <https://cinegleaner.postach.io/post/no-country-for-old-men>

OSRAM. (o. D.). *HMI DIGITAL 4000 W | OSRAM PIA.* osram.de. Abgerufen am 11. Januar 2026, von https://www.osram.de/ecat/HMI%20DIGITAL-HMI-Entertainment-Beleuchtung-Entertainment%20&%20Industrie/at/de/GPS01_265568/ZMP_4061377/

OSRAM. (2024). OSRAM HMI® DIGITAL. In *Osram*. Abgerufen am 11. Januar 2026, von <https://look.ams-osram.com/m/6916830706de285c/original/HMI-DIGITAL-EN.pdf>
Planck'sches Strahlungsgesetz. (2004, 9. Juli). Spektrum.de. Abgerufen am 21. Dezember 2025, von https://www.spektrum.de/lexikon/geographie/planck-sches-strahlungsgesetz/6037?utm_source
[ce](https://www.spektrum.de/lexikon/geographie/planck-sches-strahlungsgesetz/6037?utm_source)

Reflectance Measurements of Human Skin | NIST. (2025, 26. März). NIST. Abgerufen am 6. Januar 2026, von [https://www.nist.gov/programs-projects/reflectance-measurements-human-skin#:~:text=Measurements%20are%20made%20using%20a,reflectance%20factors%20observed%20\(below\)](https://www.nist.gov/programs-projects/reflectance-measurements-human-skin#:~:text=Measurements%20are%20made%20using%20a,reflectance%20factors%20observed%20(below))
[\)](https://www.nist.gov/programs-projects/reflectance-measurements-human-skin#:~:text=Measurements%20are%20made%20using%20a,reflectance%20factors%20observed%20(below)

Rhodes, P. (2023a, November 4). What exactly is Rec.709? *Redsharknews*. Abgerufen am 1. Januar 2026, von <https://www.redsharknews.com/technology/item/3289-what-exactly-is-rec-709>

Ronan, P. (o. D.). *Licht.* <https://denkwerkstatt-physik.de/denkwerkstatt-physik/awk/w-Licht.html>
Royer, M. (2019). Evaluating tradeoffs between energy efficiency and color rendition. *OSA Continuum*, 2(8), 2308. <https://doi.org/10.1364/osac.2.002308>
Royer, M. (2022). Tutorial: Background and Guidance for Using the ANSI/IES TM-30 Method for Evaluating Light Source Color Rendition. *Leukos*, 18:2-191–23. <https://doi.org/10.1080/15502724.2020.1860771>

Royer, M., Murdoch, M. J., Smet, K., Whitehead, L., David, A., Houser, K., Esposito, T., Livingston, J. & Ohno, Y. (2022). Improved Method for Evaluating and Specifying the Chromaticity of Light Sources. *LEUKOS The Journal Of The Illuminating Engineering Society Of North America*, 19(1), 35–52. <https://doi.org/10.1080/15502724.2022.2029710>
Rybalochka, A., Kornaga, V., Kalustova, D., Mukhin, V., Kornaga, Y., Zavgorodnii, V. & Valyukh, S. (2022). White Colour Hues in Displays and Lighting Systems Based on RGB and RGBW LEDs. *International Journal Of Image Graphics And Signal Processing*, 14(3), 1–10. <https://doi.org/10.5815/ijigsp.2022.03.01>

S60-RP | C Series | SkyPanel | Lighting | ARRI. (o. D.). ARRI. <https://www.arri.com/en/lighting/led-spotlights/discontinued/s60-rp>

Schroeder, T. (2017, 10. Juli). *Farbwiedergabeindex CRI RA und RE (Color Rendering Index)*. LED Blog Zum LED Fachhandel. <https://www.ledclusive.de/blog/glossar/cri-farbwiedergabeindex/?srsltid=AfmBOop5Yxjpl2UDxRQuFoYi1bMB0Ik4QmzZRKUqfLZ-6iGRhoqLGtAE>

Sesay, A. (o. D.). Light Meters and Color Meters. *Sekonic Worldwide*. Abgerufen am 8. Januar 2026, von <https://global.sekonic.com/classroom/part-1-light-meters-and-color-meters-their-roles-and-why-theyre-essential-on-set/>

Sharma, A. (2019). Understanding RGB Color Spaces for Monitors, Projectors, and Televisions. *Information Display*, 35(2), 17–43. <https://doi.org/10.1002/msid.1020>

Sicario. (2014, 12. Januar). CineGleaner. <https://cinegleaner.postach.io/post/sicario>

Spektrum. (2004, 9. Juli). *Schwarzer Körper*. Spektrum.de. Abgerufen am 21. Dezember 2025, von <https://www.spektrum.de/lexikon/geographie/schwarzer-koerper/7094>

SSI Calculator. (o. D.). <http://ssi-calculator.oscars.org/>

Statistisches Bundesamt. (2024, 14. Juni). *Bevölkerung nach Nationalität und Geschlecht*. Abgerufen am 5. Januar 2026, von <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Bevoelkerungsstand/Tabellen/deutsche-nichtdeutsche-bevoelkerung-nach-geschlecht-deutschland.html>

STORM 1200x | Aputure. (o. D.-a). https://aputure.com/en-US/products/storm-1200x?srsltid=AfmBOooQjyNww-Wtr9YZ1Yqa-kl4pordlW9ko3r-B_83fW2yc9hveBd

Sulzberger, C. (2006). A bright and profitable idea - four decades of Mazda incandescent lamps. *IEEE Power And Energy Magazine*, 4(3), 78–85. <https://doi.org/10.1109/mpae.2006.1632462>

T5 | True Blue T | Lighting | ARRI. (o. D.). ARRI. <https://www.arri.com/en/lighting/daylight-tungsten/tungsten/true-blue-t/t5>

Takhar, A. (2015). Will L.E.D lights displace Tungsten Halogen light as the dominant technology for both high end and low end filmmaking? In BIRMINGHAM CITY UNIVERSITY, *BSc (Hons) Film Production & Technology*. https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/56121003/Main_Project_Report-1.0-libre.pdf?1521640750=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DWill_L_E_D_lights_displace_Tungsten_Halo.pdf&Expires=1759677319&Signature=NvQBaDz7OQ9oFWEv2UbKuUas3AUc1Or0u4mWtiHn4mm5k54axxzJ93qWQdfclEgD4AuyGGFsHv7s0UQTUUsWjd6vm90~j7bn7msusveYG4JfdEoszoKI9Zyzja5ADvpblsaPe0Yh7XTqkY3436We27cS6Qe0E1Wmw3ywQeK6fu2mrRAFceS3kLICGOKaf~gw4gsUAza65hueBqfgR1pg7rKde9yLdYughkeqMgN4kL2zlxS B4RWrxz5ZiuYzjyaVNYpsqJZx5cCvfc24sLdkSxAq1KSUt21UQg96sjiAhITdyHahlEn8HrmY3L-b~5xOOAOgVZnL0fQzY3nxIRA__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA

TechNexion. (2025, 3. November). *IR-CUT Filter in Embedded Vision - TechNexion*. Abgerufen am 8. Januar 2026, von <https://www.technexion.com/resources/ir-cut-filter-in-embedded-vision/>

Tektronix. (o. D.). The Basics of Waveform Monitors and Vectorscopes. In *Tektronix*. Abgerufen am 1. Januar 2026, von https://download.tek.com/document/25W_29166_0_Interactive.pdf

The History of ARRI in a Century of Cinema. (o. D.). ARRI. Abgerufen am 21. Januar 2026, von <https://www.arri.com/en/company/the-arri-philosophy/history/the-history-of-arri-in-a-century-of-cinema>

The Tiffen Company. (o. D.). *4 x 5.650" IR-Filter – W4565IR12*. Abgerufen am 8. Januar 2026, von <https://de.tiffen.com/products/4-x-5-65-ir-filter#pageproducts>

Wikipedia contributors. (2025). Standard Illuminant [Datensatz]. In *Wikipedia*. https://en.wikipedia.org/wiki/Standard_illuminant

wisotop. (2017, 1. Januar). *Farbraum SRGB • farbe.wisotop.de*. wisotop.de. Abgerufen am 1. Januar 2026, von <https://wisotop.de/Arbeitsfarbraum-sRGB.php>

Wood, M. (2013). Out of the Wood. In *Television Lighting*. <https://www.mikewoodconsulting.com/articles/Protocol%20Fall%202013%20-%20TLCI.pdf>

Wood, M. (2014). Out of the Wood. In *Color Rendering – Where Are We?* <https://www.mikewoodconsulting.com/articles/Protocol%20Winter%202014%20-%20Color%20Rendering%20Update.pdf>

Wood, M. (2018). Better phosphors = better whites. In *Out Of The Woods*. Abgerufen am 7. Januar 2026, von <https://www.mikewoodconsulting.com/articles/Protocol%20Summer%202018%20-%20Better%20Whites.pdf>

Woods, M. (o. D.). CRI and the Color Quality Scale, Part 2. *Out Of The Woods*, <https://www.mikewoodconsulting.com>. <https://www.mikewoodconsulting.com/articles/Protocol%20Spring%202010%20-%20CRI%202%20CQS.pdf>

Wright, G. & Sheldon, R. (2024, 30. Dezember). *What is a complementary metal-oxide semiconductor (CMOS)?* WhatIs. https://www.techtarget.com/whatis/definition/CMOS-complementary-metal-oxide-semiconductor?utm_source

Wyszecki, G. & Stiles, W. S. (2000). Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae, 2nd Edition. *Color Science*, 2, 968. https://books.google.de/books?hl=de&lr=&id=dOKdEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=1964+Illuminants+H.+W.+Budde&ots=x32XFYdwk&sig=es4_dA6nVc4JkXEj0uM7fY3bgUc#v=onepage&q&f=false. ...W/abstract

Zhao, H. & Lee, S. W. R. (2012, 1. August). Determination of driving current of RGB LEDs for white light illumination. In <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7289346>. 2012 International Conference On Electronic Packaging Technology & High Density Packaging, Hongkong, Volksrepublik China. <https://doi.org/10.1109/icept-hdp.2012.6474900>

Zjakić, I., Ljevak, I. & Bilalli, A. (2021). METAMERISM INDEX OF LED LIGHT ON HALFTONE COLOUR IMAGES. *ACTA GRAPHICA Journal For Printing Science And Graphic Communications*, 30(2), 1–9. <https://doi.org/10.25027/agj2017.28.v30i2.197>

7.6 Abbildungsverzeichnis

Altman Par Can 64 Light - Liman Video Rental Inc. (2023, 11. April). Liman Video Rental Inc. <https://lvrusa.com/product/altman-par-can-64-light/>

Anders, T. (2005, 28. März). *Datei:CIE-Normfarbtafel.png* – Wikipedia. Wikipedia. <https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:CIE-Normfarbtafel.png>

Angelopoulou, E. (1999a, Januar 1). *The Reflectance Spectrum of Human Skin*. ScholarlyCommons (University Of Pennsylvania). https://repository.upenn.edu/cis_reports/584

Ansell-lighting. (o. D.). *Light source colour rendition – ANSI/IES TM30*. <https://ansell-lighting.com/en/articles/technical/light-source-colour-rendition-ansi-ies-tm30>

Apple. (2017a, April). *Apple ProRes* [White Paper]. https://www.apple.com/tw/final-cut-pro/docs/Apple_ProRes_White_Paper.pdf

ARRI. (o. D.-a). *ALEXA 35 | Camera Systems | ARRI*. Abgerufen am 11. Januar 2026, von <https://www.arri.com/en/camera-systems/cameras/legacy-camera-systems/alexa-35>

ARRI. (o. D.-b). *ARRILITE 2000 Plus | ARRILITE Plus | Lighting | ARRI*. <https://www.arri.com/en/lighting/daylight-tungsten/tungsten/arrilite-plus/arrilite-2000-plus>

ARRI. (o. D.-d). *ARRIRAW | File Formats | Pre- & Postproduction | Learn & Help*. <https://www.arri.com/en/learn-help/learn-help-camera-system/pre-postproduction/file-formats-data-handling/arriraw>

BCM Families Foundation. (2025, 18. Januar). *Wie funktioniert das Auge und was passiert bei BCM? | BCM Families Foundation*. Abgerufen am 5. Januar 2026, von <https://www.blueconemonochromacy.org/de/mehr-erfahren/auge/>

BenQ. (2022, 7. Juli). *Was verbirgt sich hinter einem Rec. 709 Farbraum von mehr als 100 %?* <https://www.benq.eu/de-de/knowledge-center/knowledge/projector-color-coverage-and-color-gamuts.htm>

CineGleaner. (2014a, Januar 12). *No Country for Old Men*. <https://cinegleaner.postach.io/post/no-country-for-old-men>

CineGleaner. (2014b, Januar 12). *Sicario*. <https://cinegleaner.postach.io/post/sicario>

CineGleaner. (2016, 26. Februar). *Skyfall*. <https://cinegleaner.postach.io/post/skyfall>

Co, M. (o. D.). *Type - MR 450*. Flickr. <https://www.flickr.com/photos/mole-richardson/7365856730/>

Datacolor. (2024b, Oktober 3). Was ist Metamerie? Datacolor.
<https://www.datacolor.com/de/business-solutions/blog/was-ist-metamerie/>

Datenblattsammlung Film/Video - Leuchtstofflampen. (2012, 24. Dezember).
filmtechnik-online.de. <http://filmtechnik-online.de/filmtechnik/reload.htm?Daten14.htm>

ECG Productions. (2021, 17. Februar). The Oscar-Winning lighting design in Blade Runner 2049 | ECGProd.com. Entertainment Creative Group.
<https://www.ecgprod.com/lighting-design-blade-runner-2049/>

Filmgear. (o. D.-a). Daylight Fresnel 9kW/6kW SE. Film Gear (International) Ltd. Abgerufen am 11. Januar 2026, von
https://www.filmgear.net/index.php?route=product/product&path=521_173_177&product_id=366

Filmgear. (o. D.-b). Electronic Ballast 9kW/6kW V3 (300Hz). Film Gear (International) Ltd.
https://www.filmgear.net/index.php?route=product/product&path=521_173_179&product_id=789

Gaddis, L. (o. D.). What is IR Pollution? – Gaddis Visuals.
<https://gaddisvisuals.com/irpollution/>

GreenLED. (2023, 22. Juli). What is the CRI/Ra in LED lights? - GRNLED. GRNLED.
<https://grnled.com/blog/cri-of-led-lights.html>

Iori, F. (2022, 14. Februar). Tungsten quartz halogen fresnels - de sisti. De Sisti.
<https://www.desisti.it/tungsten-quartz-halogen-fresnels/>

JP Film & Television Services Ltd trading as Film & TV Services (FTVS). (2024, 18. Mai). Kino FLO 4ft 4 Bank Kit - FILM & TV SERVICES. FILM & TV SERVICES.
<https://ftvs.co.uk/product/kino-flo-4ft-4-bank-kit/>

Kadner, N. (2024b, Oktober 2). Cinematic Color Fidelity by Noah Kadner. Kino Flo.
<https://kinoflo.com/blog/kino-flo-educational-series-cinematic-color-fidelity-by-noah-kadner/#:~:text=Metamerism%20occurs%20when%20two%20colors,across%20different%20stages%20of%20production.>

Kaever, O. (2016, 6. Januar). The Revenant. DER SPIEGEL, Hamburg, Germany.
<https://www.spiegel.de/kultur/kino/the-revenant-mit-leonardo-dicaprio-ein-mann-sieht-dunkelrot-a-1070536.html>

Ko, P. (2025, 15. März). The Ultimate Guide to Color Rendering Index (CRI): Everything You Need to Know for Perfect Lighting | Architectural Lighting Developer & Manufacturer in China. Architectural Lighting Developer & Manufacturer in China.
<https://www.ledaplus.com/2025/03/what-is-color-rendering-index/>

Kremers, J. (2016). Human Color Vision.
<https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-44978-4>
<https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-44978-4>

LED» Die Leuchtdiode einfach erklärt. (2022, 25. Mai). conrad.de.
<https://www.conrad.de/de/ratgeber/industrie-40/led-leuchtdiode.html>

Light Engine & Colors | ARRI. (o. D.). ARRI.
<https://www.arri.com/en/lighting/led-spotlights/orbiter/light-engine>

Locke, A. (2025, 9. Januar). BATHROOM LIGHTING - PART FOUR — MINT Lighting Design. MINT Lighting Design.
<https://www.mintlighting.com.au/lighting-blog/708rfcsyvdtayv6yb6tumi0wilbz3g>

Lumileds. (2024, 30. April). Understanding COB LEDs | LumiLEDs.
<https://lumileds.com/technology/led-technology/understanding-cob-leds/>

Mazda Glühbirne 1917. (2009, 4. Mai).
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e7/Mazda_1917.jpg

Mobley, C. (2021, 16. März). From XYZ to RGB:: Ocean Optics Web Book. oceanopticsbook.info.
<https://www.oceanopticsbook.info/view/photometry-and-visibility/from-xyz-to-rgb?>

NANLUX. (o. D.). www.nanlux.com. <https://www.nanlux.com/product-nebula-light-engine#/en>
PAR Scheinwerfer. (2018, 5. Januar). Production Partner WIKI.
<https://wiki.production-partner.de/licht/par-scheinwerfer/>

Product Pictures & Images | Orbiter | Lighting | ARRI. (o. D.). ARRI.
<https://www.arri.com/en/lighting/led-spotlights/orbiter/in-action/gallery>

Ransen, O. (2016, 17. Dezember). There are two sorts of Duv ($\Delta u, v$ and $\Delta u', v'$) in lighting - what is the difference?
<https://ransenlightingandcolor.blogspot.com/2016/11/there-are-two-sorts-duv-delta-u-v-and.html>

RGB COB LED Multi-Color Array - ShiningEasy. (2023, 10. Januar). ShiningEasy.
<https://www.shiningeasy.com/product/rgb-cob-led-multi-color-array/>
Rhodes, P. (2023b, November 4). What exactly is Rec.709? Redsharknews.
<https://www.redsharknews.com/technology/item/3289-what-exactly-is-rec-709>

Royer, M. (2021, März). TM-30-Color Chart. researchgate.net.
https://www.researchgate.net/figure/sual-representation-of-the-99-color-evaluation-samples-used-in-TM-30_fig3_350116795

S60-RP | ARRI. (o. D.). ARRI.
<https://www.arri.com/en/lighting/led-spotlights/discontinued/s60-rp>
SEKONIC SPECTROMETER. (o. D.). Sekonic Worldwide.
<https://global.sekonic.com/sekonic-c-800-spectrometer/>

Special, F. (2020, 3. September). Huzzah. John Brawley and "The Great" Film And Digital Times. <https://www.fdtimes.com/2020/09/03/huzzah-john-brawley-and-the-great/>

STORM 1000C | Aputure. (o. D.).
<https://aputure.com/products/storm-1000c?srltid=AfmBOoozLKl14czBUMjmiTwggsppbqJtJD6HUL3D4uYRI6yTOUgyuQ6K>

STORM 1200x | Aputure. (o. D.-b).
https://aputure.com/products/storm-1200x?srsId=AfmBOoqvCW8ACEfMKdKW_uZsT6T22BvwMW1AlloCTvsiV2TxeWS1Al6M

Tobias, S. (2024, 31. Januar). *House of the Dragon: Sind die Weißen Wanderer im "Game of Thrones"-Spin-off zu sehen?* Netzwelt.
<https://www.netzwelt.de/serien/house-of-the-dragon/206932-house-of-the-dragon-weissen-w-anderer-game-of-thrones-spin-off-sehen.html>

Ultra-portable kabellose LED-Röhre by Astera. (o. D.).
<https://astera-led.com/de/produkte/helios-tube/>
<https://astera-led.com/de/produkte/helios-tube/>

Vargas, A. (2019, 29. April). *These Reddit theories about the Night King's death on „Game of Thrones“ will make you question Jon & Bran.* Bustle.
<https://www.bustle.com/p/these-reddit-theories-about-the-night-kings-death-on-game-of-thrones-will-make-you-question-jon-bran-17230623>

ViboRuby. (2025, 16. September). *Grayscale of LED Display: 8Bit vs 16Bit, How It Impacts Quality.* ViboLED. <https://viboled.com/grayscale-rental-led-displays/>

Wikipedia-Autor „Adoniscik“. (2007, 25. April). *CIELUV-Farbraumsystem.*
https://de.wikipedia.org/wiki/CIELUV-Farbraumsystem#/media/Datei:CIE_1976_UCS.png

Wikipedia-Autoren. (2003, 16. Januar). *Farbtemperatur.* Wikipedia.
https://de.wikipedia.org/wiki/Farbtemperatur#/media/Datei:Color_temperature_black_body_800-12200K.svg

Wikipedia-Autoren. (2007, 13. Juli). *Datei:CIEXY1931.svg* – Wikipedia.
<https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:CIExy1931.svg>

Wikipedia-Autoren [Mysid]. (2005, 21. Juli). *Weißpunkt D65 in CIE31.*
https://de.wikipedia.org/wiki/SRGB-Farbraum#/media/Datei:CIExy1931_sRGB.svg

Wood, M. (2010). *Out of the Wood.* MacAdam Ellipses.
<https://www.mikewoodconsulting.com/articles/Protocol%20Fall%202010%20-%20MacAdam%20ellipses.pdf>

Wyszecki & Stiles. (1982). *Color science.* Google Books.
https://books.google.de/books?hl=de&lr=&id=dOKdEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=1964+Illuminants+H.+W.+Budde&ots=_x32XFYdwk&sig=es4_dA6nVc4JkXEj0uM7fY3bgUc#v=onepage&q&f=false

7.7 Anhangsverzeichnis

7.4.1 Tabellen zur Befragung

7.4.2 Messdaten und Grafiken für alle Lampentypen

7.4.3 LUT (3) für die Kunstlicht-Konvertierung des Nanlux Evoke 600C

7.4.4 LUT (3) für die Kunstlicht-Konvertierung des Arri Orbiter

7.4.5 ProRes Export Daten des Wahrnehmungsexperiments (NO CC X & CC)

DANKSAGUNG

Mein besonderer Dank gilt allen Unterstützern dieser Arbeit:

Nicole Ortlepp

Katja Ortlepp

Johannes Feltkamp

Mihanta Muriel

Ebenezer Odonkor-Quartey

Lucas Böckler

Frank Deutschländer und Michael Fischer von Kaiser Fototechnik für die
Bereitstellung der Nanlux Evoke 600C

Henning Poltrock vom Filmhaus Bielefeld für die Bereitstellung der Aputure 1200X

Sebastian Schütte von der TH OWL für die Unterstützung während der
Dreharbeiten

Prof. Dr. Guido Falkemeier und Jan Pieniak für die Betreuung dieser Arbeit.

Ehrenwörtliche Erklärung

Ausarbeitung/ Abschlussarbeit im Fachbereich Wirtschaftswissenschaften gemäß Prüfungsordnungen für die Bachelor-Studiengänge und Master-Studiengänge in der für den Studenten relevanten Fassung.

Thema: "Zwischen Mythos und Messbarkeit: Ist Kunstlicht im Zeitalter von LED noch immer die technisch beste Wahl für natürliche Hauttöne?"

Angefertigt von: Jakkomo Youri Ortlepp

Matr.-Nr. 15376090

Studiengang: Medienproduktion (MA)

Betreuer/in: Prof. Dr. Falkemeier

Korreferent/in: Jan Pieniak

Die Arbeit umfasst incl. eventueller Anhänge 120 Seiten.

Ich erkläre, dass ich die vorliegende Ausarbeitung/ Abschlussarbeit - bei Gruppenarbeit den entsprechend gekennzeichneten Anteil der Arbeit - selbständig angefertigt und keine anderen als die angegebenen und bei Zitaten kenntlich gemachten Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Detmold, den 27.1.2026

Unterschrift