

HDR – FARBRAUMTRANSFORMATIONEN – TRANSFORMATIONENSALGORITHMUS

PASCAL KUTSCHBACH

Bei der Produktion von HDR-Bewegt Bildern wird zum aktuellen Zeitpunkt schon bei der Kameraaufnahme Gebrauch von sehr großen Farbräumen gemacht. Diese Farbräume sind meistens herstellerspezifisch und werden oft bereits in der Kamera künstlich verkleinert und in ein übergeordnetes, normiertes Farbsystem umgewandelt. Somit werden noch zu selten die herausragenden Eigenschaften der Farbaufnahme der Kamerasensoren genutzt. Nicht jede Verarbeitungskette kann große Farbumfänge verarbeiten und am Ende so ausgeben, wie sie aufgenommen wurden. Insbesondere wird in naher Zukunft nicht jedes Wiedergabegerät High Dynamic Range (HDR) – und Wide Color Gamut (WCG) – fähig sein. Damit rechtfertigt sich die aktuelle Entwicklung von Produkten, die HDR-Bildmaterial so konvertieren, dass es auch auf SDR-Wiedergabegeräten gut aussieht und den vom Bildingenieur festgelegten Look behält. Sobald von HDR zu SDR-Konvertierungen die Rede ist, sollte ein Augenmerk auf eine korrekte Farbraumtransformation gelegt werden. Häufig findet nur eine Helligkeitskompensation statt, denn der Helligkeitsunterschied zwischen HDR und SDR ist am meisten sichtbar. Seltener jedoch findet eine akkurate Farbraumtransformation statt. Dieser Gesichtspunkt in der Verarbeitungskette von Bewegtbildern soll in dieser Artikelserie beleuchtet werden. Grundlagen zu Farbräumen und deren Transformation ineinander wurden im ersten Teil (FKT-Ausgabe 10/2019) aufgezeigt, Problemstellungen wurden dargestellt und mögliche Lösungswege werden im vorliegenden Artikel demonstriert.

Die theoretischen und praktischen Untersuchungen, die die Grundlage zu der Artikelserie bilden, wurden im Rahmen des LOEWE 3 KMU Forschungsverbundprojektes „EVI“ an der Hochschule RheinMain, im Studiengang Advanced Media Technology, im Labor Bildverarbeitung und unter der Leitung von Prof. Mike Christmann durchgeführt.

► The usage of wide colour volumes within the camera during image acquisition for HDR-imagery is common nowadays. However, these colour volumes are often manufacturer-specific and get minimized and transformed into a higher-order, standardized colour system. Not every process-chain for video-

imagery is currently capable of handling such wide colour volumes. The outstanding colour-capture-characteristics of prevailing image sensors therefore do not get used enough yet. Most image reproduction devices won't be able to display High Dynamic Range (HDR) – and Wide Colour Gamut (WCG) – content accurately in the near future. This justifies the current development of products that convert HDR-imagery to SDR-imagery with the aim of keeping the original look and the picture intent of the grading – or video-engineer. When we bring up HDR- to SDR-transformation, a focus should be set on colour volume transformation. In order to transform HDR- to SDR-content, a brightness compensation will usually be performed as the difference in brightness between HDR and SDR is most visible. Rarely an accurate colour volume transformation will be performed. This aspect, as part of an image processing chain, will be characterized in this series of articles as well as basics of colour volumes and transformation between colour volumes. The basics for colour transformations and the arising challenges were described in the last article (FKT issue 10/2019) and possible approaches will be demonstrated in this article.

The theoretical and practical research work, which is the basis for this series of articles, has been performed in the context of the LOEWE 3 funded SME research project “EVI” at the University of Applied Science RheinMain, department of Advanced Media Technology in the laboratory of image-processing and under the leadership of Prof. Mike Christmann.

In diesem Artikel wird ein Verfahren vorgestellt, mit dem man akkurate Farbraumtransformationen von HDR- zu SDR-Farbräumen vornehmen kann. Damit soll ein möglicher Lösungsweg dargestellt werden, um die Herausforderungen der Abwärtskonversion von HDR- und WCG-Bildinhalten in den Griff zu bekommen. Einfache Konversionsverfahren können dazu führen, dass Farben falsch transformiert werden und nach der Konversion einen anderen Buntton oder eine unpassende Helligkeit aufweisen. Die Begrifflichkeiten „HDR“, „WCG“ und „SDR“ dienen als Platzhalter und sollen allgemein beschreiben, dass eine Abwärtskonversion durchgeführt wird. Größere Farbräume (WCG oder Quellfarbräume) werden in kleinere Farbräume (Zielfarbräume), unter Beibehaltung des richtigen Bunttones, transformiert.

Das Verfahren basiert im Wesentlichen auf den Forschungserkenntnissen, die im letzten Artikel der Serie dargestellt wurden. Unter anderem wurden dafür verschiedene Farbrepräsentation gegenübergestellt und verglichen, inwie-

weit eine Farbraumtransformation in der jeweiligen Farbpräsentation in der Theorie zu mathematischen Fehlern und sichtbaren Bildartefakten führen kann. Daraus lassen sich zwei grundlegende Erkenntnisse ableiten:

- Eine zweidimensionale Betrachtung eines Farbumfangs (Farbgamut) und eine Beschränkung/Transformation von Farben auf zweidimensionaler Ebene kann, insbesondere bei sehr gesättigten und hellen HDR-Bildinhalten, zu unvermeidbaren Bildartefakten führen.
- Die Problematik, die einhergeht mit der zwei- und dreidimensionalen Sicht auf einen Farbraum, lässt sich auf alle mathematischen Farbrepräsentationen übertragen. Manche Farbrepräsentation eignen sich besser, andere schlechter für Farbraumtransformationen. Die Farbrepräsentationen unterscheiden sich in ihrer Uniformität, sprich der Gleichmäßigkeit der Darstellung der Farben¹⁾. Die Bunttonlinearität und die Art der Helligkeitsdarstellung sind hier die entscheidenden Qualitätsmerkmale, mit denen eine Farbrepräsentation charakterisiert werden sollte.

Um Farbräume unterschiedlicher Größe ineinander zu überführen, lassen sich verschiedene Konvertierungsmethoden anwenden:

- **Color Clipping:** Farborte, die außerhalb eines Zielfarbraumes (zum Beispiel ITU-R BT.709 [1]) liegen, werden abgeschnitten und unter Umständen nicht mit dem richtigen Farbsättigungswert und dem richtigen Buntton dargestellt. Das Abschneiden (Clipping/Clamping) kann dabei auf Basis verschiedener Signal Darstellungen erfolgen. Oftmals werden zur Helligkeitsbeschränkung NCL-Signal Darstellungen²⁾ verwendet (zum Beispiel $Y_{Cb}C_r$ [2]) und zur Beschränkung der Chromatizität finden RGB-Signal Darstellungen Anwendung. Durch diese Art der Signalbeschränkung auf einen vorgegebenen Wertebereich, wird die Helligkeitsverteilung zwischen den Farbkanälen verändert. Das kann dazu führen, dass der abgeschnittene Farbort einen anderen Buntton aufweist und die zugehörige Helligkeit in unzulässige Bereiche steigt oder sinkt. Bei Betrachtung dieser Beschränkungsmethode auf zweidimensionaler Ebene (zum Beispiel CIE-xy [3]) zeigt sich, dass außerhalb des Zielfarbraumes liegende Farborte unvorhersagbar auf den Rand des Zielfarbraumes projiziert werden. Daraus resultieren mögliche Bildartefakte, unpassende Farben oder Bunttonverschiebungen.
- **Color-Mapping:** Farborte, die außerhalb eines Zielfarbraumes (zum Beispiel ITU-R BT.709 [1]) liegen, werden Farborten im Zielfarbraum zugeordnet, bei denen der Betrachter einen ähnlichen Farb- und Helligkeitseindruck erhält. Hiermit soll eine Farbdifferenzierung außerhalb liegender Farborte erhalten bleiben, die es bei dem einfachen Clipping/Clamping nicht gibt. Durch die Beibehaltung der spektralen Leistungsverteilung des Signals bleibt die Balance der Farbkanäle (RGB-Signal) erhalten und mögliche Bunttonverschiebungen werden vermieden. Jeder Hersteller nutzt für die Konvertierung seine eigene Methode, die in der Regel auch nicht offengelegt wird. Als Resultat ergeben sich, je nach verwendeter Konvertierungstechnik, unterschiedliche Farbeindrücke. Schlussendlich richtet sich bei dieser Konvertierungsmethode die erzielte Qualität nach dem betriebenen Aufwand.

Das Ziel des hier vorgestellten Verfahrens ist es, (ungewollte) Buntton- und Helligkeitsveränderungen zu eliminieren, die auftreten können, wenn ein HDR-WCG-Signal in einer Farbdifferenzdarstellung (NCL, zum Beispiel $Y_{Cb}C_r$) nur in seinem

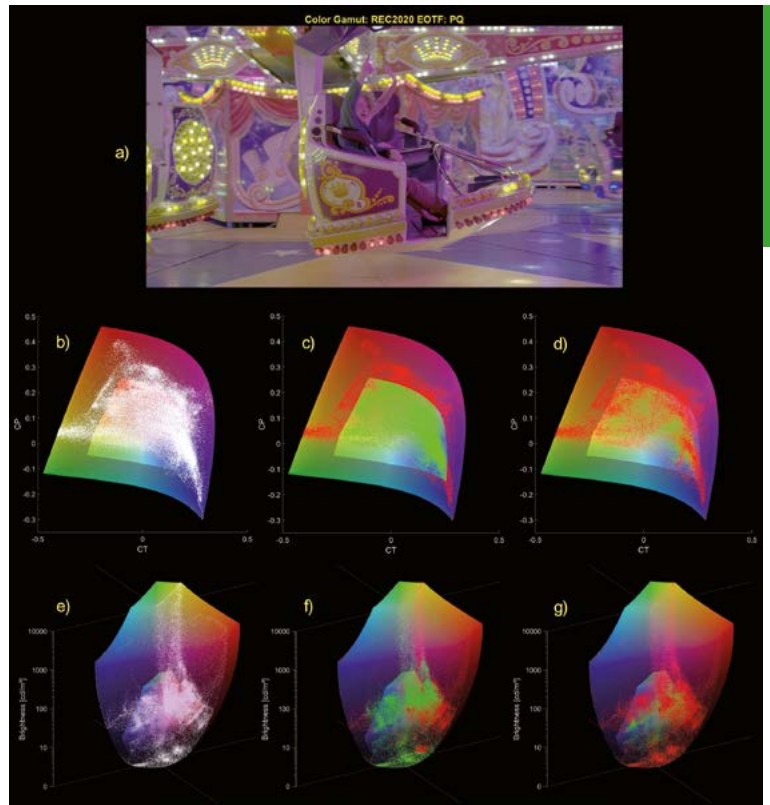


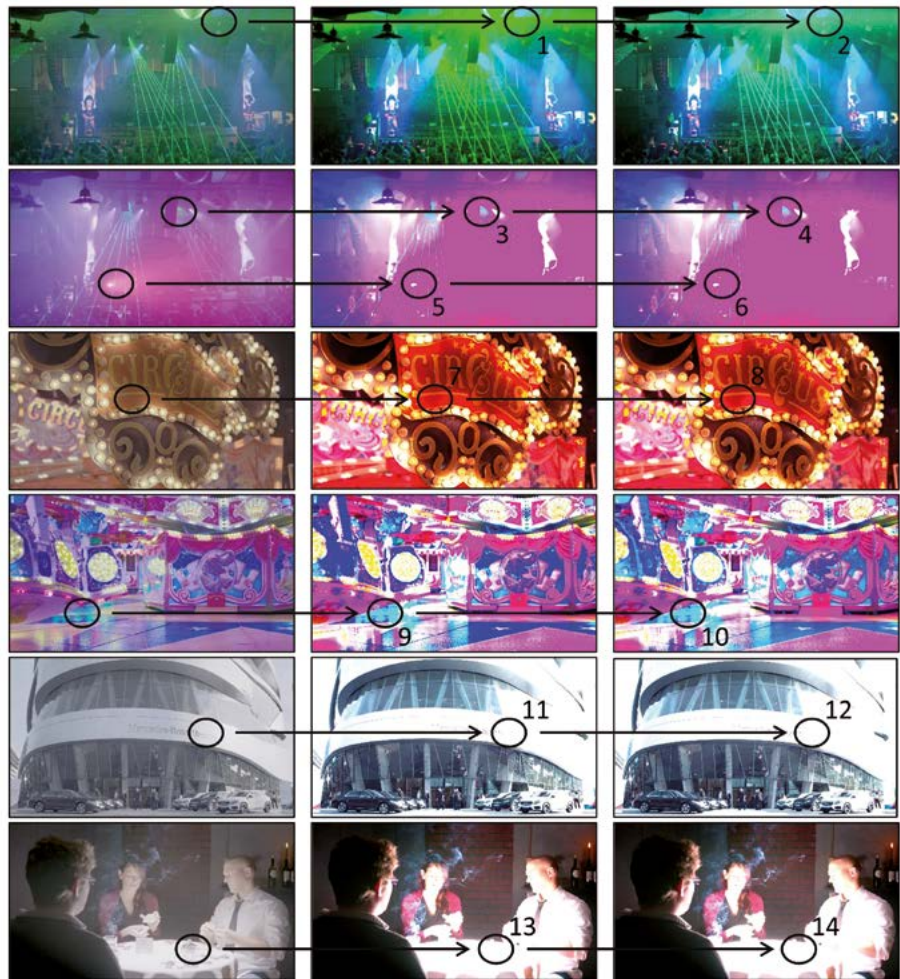
Abbildung 1: Darstellung des Rec.2020 PQ Bildes aus a) in zweidimensionaler Darstellung in IC_{C_p} (b-d) und dreidimensionaler Darstellung (e-g) als Punktwolke. Der äußere/größere Farbkubus entspricht Rec.2020 PQ, während der innere/kleinere Kubus Rec.709 Gamma entspricht. Die Spalte b/e zeigt alle Farborte in weißer Farbe, die innerhalb Rec.2020 liegen. Die Spalte c/f zeigt alle Farborte in roter Farbe, die nur aufgrund ihrer Chromatizität außerhalb von Rec.709 liegen. Die Spalte d/g zeigt alle Farborte in roter Farbe, die aufgrund ihrer Chromatizität und Helligkeit außerhalb von Rec.709 liegen. Bildquelle a): [5]

Helligkeitskanal verändert wird. Eine Kontrastkompression dieser Art findet Anwendung bei dem von der Hochschule RheinMain entwickelten EVI-Verfahren [4]. Dies ermöglicht es, HDR-Bildsequenzen in SDR-Bildsequenzen zu wandeln und dabei den Bildeindruck beizubehalten. Bei diesem Verfahren kommen sogenannte TMOs (Tone Mapping Operatoren) für die Kontrastkompression zum Einsatz. Diese Kontrastkompression kann sich auf den Farbeindruck auswirken, da klassische TMOs dazu tendieren, Farben zu übersättigen. Durch den Einsatz spezieller Methoden, kann eine Übersättigung der Farben kompensiert werden. Die Chromatizitätskompensation soll dabei wahrnehmungsgetreu erfolgen und denselben Bildeindruck hervorrufen, der am Eingang bei dem HDR-WCG Bild vorzufinden ist.

Aus den bisherigen Erkenntnissen lässt sich ableiten, dass ein Transformationsalgorithmus mit den genannten Zie-

1) Um die Uniformität einer Farbrepräsentation qualitativ bestimmen zu können, werden in der Regel Mac-Adam Ellipsen [4] verwendet und auf zweidimensionaler Ebene in den Farbgamut eingezeichnet. Je runder die Ellipsen dargestellt werden, umso besser ist die Gleichmäßigkeit der Farbdarstellung.
 2) Farbdifferenzsignale können unterteilt werden in CL- (Constant Luminance) und NCL- (Non-Constant Luminance) Signale. CL-Signale weisen einen hohen Dekorrelationsgrad zwischen dem Helligkeits- und den Farbkanälen auf. NCL-Signale sind anfällig für Kanalübersprechen und weisen dementsprechend einen geringeren Dekorrelationsgrad zwischen den Kanälen auf. Die übliche Unterabtastung der Farbkanäle bei der TV-Produktion kann dazu führen, dass es bei NCL-Signalen zu ungewollter Veränderung des Helligkeitskanals kommt.

Abbildung 2: Vergleich verschiedener Farbbeschränkungsmethoden. Linke Spalte: PQ-Rec.2020 Bilder; Mittlere Spalte: Mittels RGB-Clipping erzeugte Gamma-Rec.709 Bilder; Rechte Spalte: Mittels CIE xy-Clipping erzeugte Gamma-Rec.709 Bilder. Es gilt zu beachten, dass die HDR-Bilder (linke Bildspalte) hier nur beispielhaft dargestellt sind. Eine korrekte Darstellung und Beurteilung der HDR-Bilder ist nur auf einem HDR-Referenzmonitor möglich. Bildquellen: [5]



len, auf Basis einer CL-Signaldarstellung arbeiten muss. Das CL-Signal muss Farben uniform darstellen und Helligkeiten abbilden können, die üblicherweise in dem HDR-WCG-Bildmaterial zu finden sind.

2D vs. 3D – Farbraumbetrachtung

Mit Hilfe von Abbildung 1 und Abbildung 2 lässt sich die grundlegende Problematik gut illustrieren. Das Originalbild aus Abbildung 1 a) liegt im Farbgamut Rec.2020 [6] und als PQ-Signal vor. Durch Wandlung jedes Farbortes innerhalb des Bildes nach $IC_{r,c,p}$ lässt sich sowohl die zwei-, als auch die dreidimensionale $IC_{r,c,p}$ -Darstellung verwenden. Die Spalte c/f in Abbildung 1 zeigt alle Farborte in rot, die auf Grundlage der zweidimensionalen Darstellung außerhalb von Rec.709 [1] liegen. Die Spalte d/g zeigt alle Farborte in rot, die auf Grundlage der dreidimensionalen Darstellung außerhalb Rec.709, in Kombination mit der Gamma-EOTF, liegen. Im Vergleich beider Spalten erkennt man die Differenz an Farborten, die zusätzlich zu ihrer Chromatizität auch durch ihre Helligkeit außerhalb von Rec.709-Gamma liegen. Dies zeigt sich insbesondere durch den Vergleich der Bilder c) und d). Die aufgrund ihrer Helligkeit außerhalb von Rec.709 liegenden Farborte sind in zweidimensionaler Darstellung (Bild d) schlicht nicht korrekt darstellbar und erwecken den Anschein, innerhalb Rec.709 zu liegen. Im Vergleich der Bilder f) und g) wird weiterhin sichtbar, dass nicht nur sehr helle Bildbereiche außerhalb Rec.709 liegen können, sondern auch sehr dunkle. Die Chromatizitätswerte liegen zwar innerhalb des Farbumfangs, der auf zweidimensionaler Ebene für Rec.709-Gamma zulässig ist, die Helligkeitswerte liegen aber unter denen, die die Gamma-Kurve für den Rec.709-Ku-

bus erlaubt. Eine Farbdarstellung mit PQ und Rec.2020 erlaubt dunklere, aber stärker gesättigte Farben, als diese in Rec.709-Gamma darstellbar sind. Daraus resultiert, dass der Blick für problematische Farbbereiche nicht nur auf den Bereich oberhalb des Zielfarbgamuts gelegt werden muss, sondern auch auf den Bereich darunter.

In Abbildung 2 ist der Vergleich verschiedener Color-Clipping Methoden zu sehen. Die linke Bildspalte zeigt zunächst die HDR-Bilder, interpretiert mit der Gamma-EOTF. Die Bilder wirken kontrastarm, da die Farbwerte im Original mit der PQ-Kurve verzerrt sind und somit einer logarithmischen Kennlinie folgen. Die mittlere Bildspalte zeigt mittels RGB-Clipping erzeugte Bilder. Hierfür wurden die HDR-Bilder linearisiert und durch eine 3×3 Umwandlungsmatrix von Rec.2020 nach Rec.709 gewandelt. Die nach der Wandlung unzulässigen RGB-Werte wurden abgeschnitten. Durch diese Art der Gamut-Beschränkung entstehen bereits Bunttonverschiebungen. Im HDR-Bild stark gesättigte Grüntöne verschieben sich zu Hellblau (1/3). Aus stark gesättigten Rottönen werden teilweise Rosatöne (5) und mittlere Blautöne werden zu gesättigten Blautönen (9). Die rechte Bildspalte zeigt ein einfaches Color-Mapping auf Basis der CIE xy-Darstellung. Das Color-Mapping erfolgt, indem alle außerhalb des Zielgamuts liegenden Farborte in Richtung des Weißpunktes auf der xy-Ebene verschoben werden. Die Helligkeitskompensation findet im Nachgang durch Clipping in den RGB-Kanälen statt. Es zeigt sich, dass diese Art der Farbraumbeschränkung zu ähnlichen Ergebnissen führt wie das RGB-Clipping. Grüntöne werden noch mehr in Richtung Hellblau verschoben (2/4) und Rottöne werden teilweise dunkler als nötig dargestellt (8) oder zu weit in Richtung Rosa

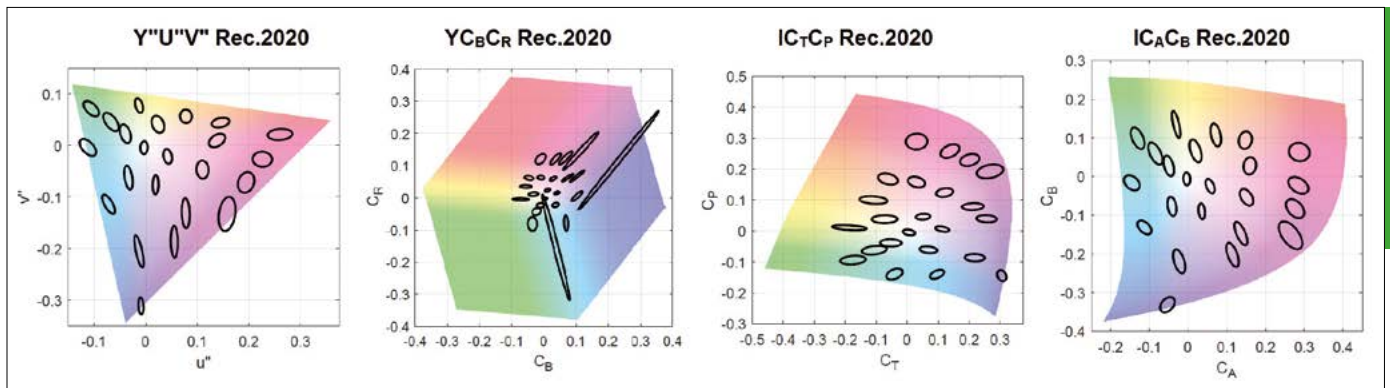


Abbildung 3: MacAdam Ellipsen in verschiedenen Farbrepräsentationen. [7]

verschoben (6). Abbildung 2 verdeutlicht aber auch, dass die Qualität der Farbraumtransformation, sei es durch Clipping oder (einfaches) Mapping, stark vom Bildinhalt abhängt. Die unteren beiden Bildreihen verdeutlichen das. Die Beispiele weisen bereits im HDR-Bild nicht viel Farbinformation auf. Hier führt das RGB-Clipping und xy-Mapping lediglich zu einer Helligkeitskompensation, die kaum zu Bunttonverschiebungen führt. Die Bilder behalten ihren Farbeindruck bei und sind nur in ihrer Helligkeit überstrahlt (11–14).

An dieser Stelle setzt die Transformationsmethodik eines komplexen Gamut-Mapping Verfahrens an. Mit Hilfe eines solchen Verfahrens soll sowohl der Farbeindruck, als auch der Helligkeitseindruck eines HDR-Bildes im SDR-Bild erhalten bleiben.

Transformationsfarbraum

Als Transformationsfarbraum für eine HDR-SDR-Abwärtskonvertierung eignet sich ein Farbkubus, der nach dem CL-Verfahren arbeitet und zusätzlich einen sehr großen Helligkeitsumfang zulässt. Außerdem sollte der Farbkubus an die Helligkeitswahrnehmung des menschlichen Auges angepasst sein. Farbdarstellungen, die auf dem CL-Verfahren basieren, erlauben einen sehr hohen Dekorrelationsgrad zwischen dem Helligkeitskanal und den Farbkanälen. Die Veränderung einzelner Kanäle führt dann nicht automatisch zur Veränderung der jeweils anderen Kanäle. Zuletzt ist eine sehr hohe Bunttonlinearität von Vorteil. Dies äußert sich durch die relative Gleichförmigkeit der MacAdam-Ellipsen im gesamten Farbbereich (siehe Abbildung 3) und besagt, dass gleiche Abstände zwischen Farborten auch in etwa vom Auge gleich wahrgenommenen Farbunterschieden entsprechen. Diese Eigenschaft ist dann von großer Bedeutung, wenn der Farbkubus in geometrische Formen zerlegt wird, um Transformationen durchzuführen.

Jeder dreidimensionale Farbkubus lässt sich in die drei Achsen Helligkeit, Buntton und Chromatizität aufteilen. Unter der Voraussetzung, dass eine uniforme, bunttonlineare Farbrepräsentation für ein Transformationsverfahren gewählt wird, ist es möglich einen solchen Farbkubus von der dreidimensionalen Darstellung in eine zweidimensionale Darstellung zu überführen. Dazu muss eine der drei Achsen eines Farbkubus eliminiert werden. Bei der klassischen CIE xy-Darstellung ist dies die Helligkeitsachse Y. Für HDR-SDR Transformationen ist die Eliminierung der Helligkeitsachse nicht zielführend, da oft eine starke Helligkeitskompensation stattfinden muss. Durch die Eliminierung dieser Achse, und dem geometrischen Verschieben des Farbortes auf den verbliebenen Achsen, wird die Helligkeit einer Farbe nach einer Farbraumtransformation unvorhersagbar. Die Helligkeit muss nach der Farbortverschiebung unter Umständen

abgeschnitten werden, was zu unschönen Farbflächen und ungewollten Bildartefakten führen kann (siehe Abbildung 2). Durch die Eliminierung einer anderen Achse, beispielsweise des Bunttones (Hue), bleibt die Vorhersagbarkeit der Helligkeit erhalten. Die Verwendung der Buntton- und der Chromatizitätsachse als Basis für geometrische Verschiebungen ist eben nur dann sinnvoll, wenn der zugehörige Farbkubus den Buntton möglichst linear darstellt, damit die Eliminierung dieser Achse nicht zu unvorhersagbaren Bunttonverschiebungen führt.

In Abbildung 4 ist die Eliminierung einer Achse eines dreidimensionalen Farbkubus dargestellt. Als Beispiel wird hier $IC_T C_P$ verwendet. Der Quell- und Zielfarbraum kann so zweidimensional und (relativ) buntton-linear dargestellt werden und wird zugänglich für geometrische Verschiebungen eingehender Farborte. Die Aufteilung ist vergleichbar mit dem Schneiden eines Kuchenstücks. Wie im letzten Artikel der Serie dargestellt, ist das menschliche Auge in der Lage, ca. 200 Bunttöne zu unterscheiden. Diese Anzahl an wahrnehmbaren Bunttönen dient als gute Basis für die Bestimmung der Anzahl der „Kuchenstücke“, in die ein Farbkubus unterteilt wird. Ein gewisser Grad an Oversampling ist jedoch sinnvoll.

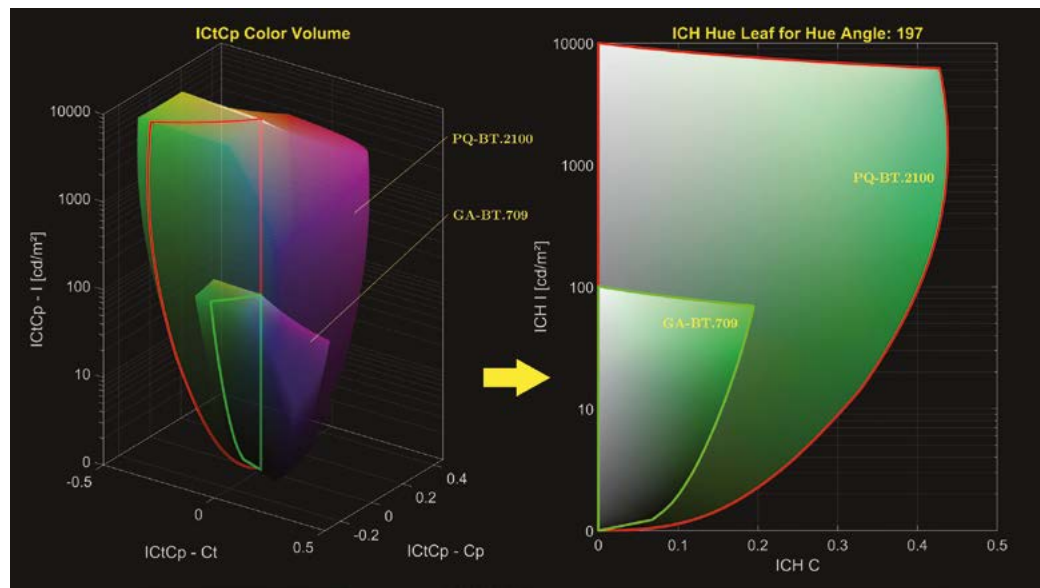
Algorithmus-Design

Das entwickelte Gamut-Mapping-Verfahren verwendet eine CL-Signaldarstellung als Grundlage. Eingehende Farborte werden wahrnehmungsgerecht von einem Quellfarbraum in einen Zielfarbraum gewandelt. Im Vordergrund der Entwicklung stand, dass der Buntton einer Farbe durch die Transformation erhalten bleibt und die Sättigungs- und Helligkeitsdifferenz kompensiert wird. Für die Farbbetrachtung gilt es, nicht nur die korrekte mathematische Darstellung und Umwandlung zu betrachten, sondern ebenfalls physiologische Einflüsse zu berücksichtigen. Das menschliche Auge ist relativ empfindlich gegenüber Verschiebungen des Bunttones und dem damit einhergehenden veränderten Bildeindruck eines transformierten Bildes. Weiterhin ist bekannt, dass das menschliche Auge bei sehr großer und sehr kleiner Helligkeit nur achromatisches Licht wahrnehmen kann. Diese Eigenschaft wurde im Design des Algorithmus berücksichtigt, indem bei sehr hellen, gesättigten Farben eine stärkere Entsättigung vorgenommen wird, als dies technisch notwendig ist. Mit Hilfe dieser Entsättigung ist eine weiche Gradation in hellen Bildbereichen bis hin zu Spitzlichtern möglich.

Implementierung als LUT

Die Implementierung eines Gamut-Mapping-Verfahrens kann auf zwei verschiedene Arten erfolgen: Entweder ist es möglich, den Algorithmus so kompakt und einfach be-

Abbildung 4: Quell- und Zielgamut in zwei- und dreidimensionaler Darstellung. Quellgamut: PQ-Rec.2020 (rote Umrandung); Zielgamut: Gamma-Rec.709 (grüne Umrandung)



rechenbar zu gestalten, dass eine geschlossene Funktion erstellt werden kann, die in einem vorhandenen Programmcode eingebettet wird, oder die Berechnungen werden für alle möglichen Eingangswerte im Voraus berechnet und in einer LUT (LookUp-Table) gespeichert. Aufgrund der Komplexität der Berechnungen im vorliegenden Fall und der gleichzeitigen Forderung nach einer Echtzeitanwendung, ergibt eine Implementierung mittels 3D-LUT Sinn. Insbesondere die Ermittlung der Farbgamutgrenzen (siehe Abbildung 4) erfordert viel Rechenaufwand, da dafür große Tabellen mit Stützstellen durchsucht werden müssen. Dieser Rechenaufwand sorgt dafür, dass die Implementierung in Form einer geschlossenen Funktion nicht echtzeitfähig ist. Die Implementierung mittels 3D-LUT bietet deshalb für den Anwendungsbereich des EVI-Verfahrens wesentliche Vorteile. Die LUT-Berechnung mag sehr lange dauern, dafür erfolgt die Berechnung der Ausgangsfarbwerte durch den Einsatz der LUT umso schneller.

Es hat sich als praktikabel erwiesen, 3D-LUTs in den Größen $33 \times 33 \times 33$ und $65 \times 65 \times 65$ zu berechnen und zu verwenden. Größere LUTs bieten zwar mehr Genauigkeit, erschweren aber den echtzeitfähigen Einsatz. Durch optische Tests auf einem Klasse 1 Studiemonitor hat sich gezeigt, dass der Qualitätszugewinn durch den Sprung von LUTs der Größe 33 zu LUTs der Größe 65 nur marginal ausfällt. Größere LUTs versprechen hier deshalb keine weitere Verbesserung. LUTs, die in ihrer Größe kleiner als $33 \times 33 \times 33$ sind, sollten ebenfalls

vermieden werden, da der Unterschied zwischen der LUT Größe 17 und 33 bereits deutlich sichtbar wird.

Die Werteveränderung durch die LUT findet im EVI-Verfahren auf Basis von RGB-Werten statt. Am Eingang der LUT werden sowohl negative RGB-Werte, als auch RGB-Werte über dem maximalen, normierten Signalwert von 1 zugelassen, sofern eine SDR-Transferkurve und ein SDR-Farbgamut verwendet wird. Streng genommen entsprechen die negativen RGB-Werte physikalisch nicht darstellbaren Farben, da sie zu negativen Helligkeitswerten korrespondieren. Dennoch gibt es den Anwendungsfall von Narrow-Range Signalen, die so genannte Under- und Over-Verte, also Werte im Ultraschwarz, sowie über 100 Prozent Videopegel, beinhalten [8]. Hier ist es zwingend nötig, negative Helligkeitswerte zuzulassen, um den Signalbereich unterhalb des absoluten Schwarzwertes mit akkuraten Werten zu füllen. Für die Erzeugung des Quellfarbraumes, der zwingend größer als der Zielfarbraum sein muss, wurde diese Eigenschaft von Narrow-Range Signalen verwendet.

Der dargestellte Anwendungsfall des Verfahrens gilt für die Verwendung innerhalb des EVI-Programmes [4]. Die Einstellungen des Algorithmus sind für viele Anwendungsfälle wandelbar. Beispielsweise ist es auch möglich, unterschiedliche EOTFs am Eingang und Ausgang zu verwenden (HDR zu SDR Konvertierung), um eine stärkere Helligkeitskompensation, bei gleichzeitiger Kompensation des Farbumfanges, zu erzielen. Ebenso sind unterschiedliche Kombinationen von Eingangs- und Ausgangsfarbgamut möglich. Neben Anwendungen im Broadcastbereich, ist die Anwendung des Gamut-Mappings Verfahrens im Kino-Bereich denkbar. Für Cinema-Anwendungen wäre beispielsweise die Transformation von Rec.2020 PQ zu DCI P3 Gamma denkbar.

Fazit/Ausblick

Es wurde gezeigt, welchen Vorteil ein Gamut-Mapping-Verfahren gegenüber einem Clipping/Clamping-Verfahren hat. Das vorgestellte Verfahren bietet eine echtzeitfähige Lösung für Farbraumtransformationen mittels Gamut-Mapping an, das qualitativ hochwertige Ergebnisse liefert. Der vor der Transformation gewünschte Buntton bleibt durch die Transformation nahezu gleich. Dadurch bleibt der farbliche Bildeindruck erhalten, die Farben liegen aber im zulässigen Farb- und Helligkeitsumfang des Zielfarbraumes. Es gilt nach wie vor: Qualität richtet sich nach Aufwand. Für das Verfahren

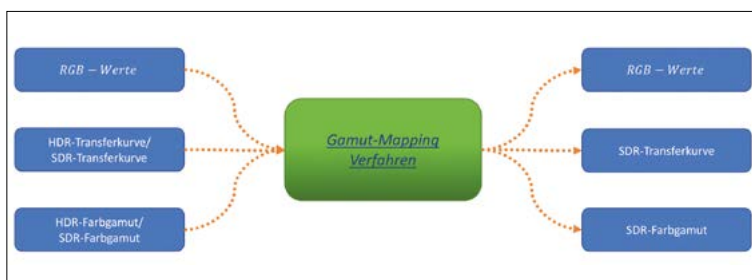
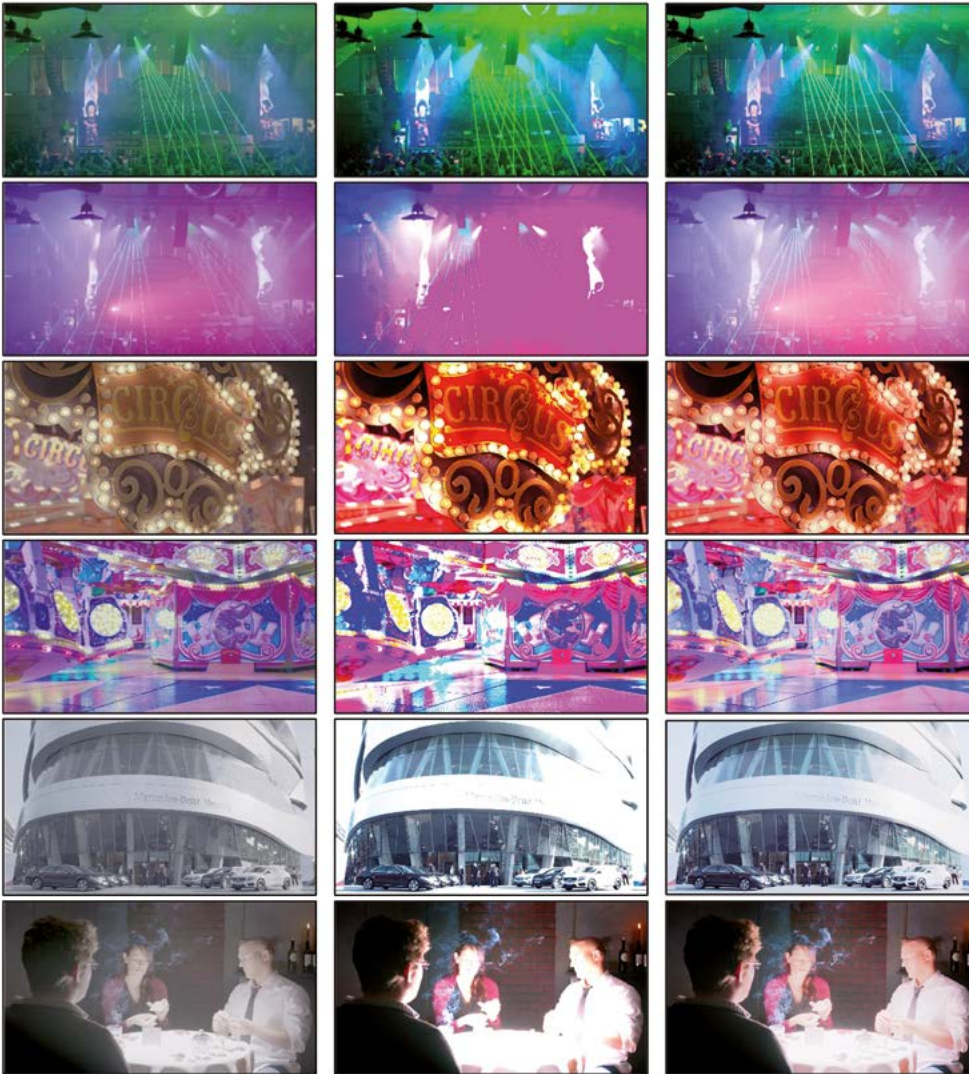


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Anwendung des Gamut-Mapping Verfahrens. Bei der Verwendung einer HDR-Transferkurve und eines HDR-Farbgamuts liegen die RGB-Werte eingangsseitig im Full-Range Bereich. Bei der Verwendung einer SDR-Transferkurve und eines SDR-Farbgamuts sind RGB-Werte mit Over- und Under-Werten zulässig.



Beispielbilder

Abbildung 6: Vergleich verschiedener Farbbeschränkungsmethoden. Linke Spalte: PQ-Rec.2020 Bilder; Mittlere Spalte: Mittels RGB-Clipping erzeugte Gamma-Rec.709 Bilder; Rechte Spalte: Mittels Gamut-Mapping erzeugte Gamma-Rec.709 Bilder. Es gilt zu beachten, dass die HDR-Bilder (linke Bildspalte) hier nur beispielhaft dargestellt sind. Eine korrekte Darstellung und Beurteilung der HDR-Bilder ist nur auf einem HDR-Referenzmonitor möglich.

Bildquellen: [5]

des Gamut-Mapping bedeutet das: Die Werteverarbeitung ließe sich stets weiter verfeinern und akkurater ausgestalten. Auch die Wahl des Transformationsfarbraumes spielt für die Verarbeitungsgenauigkeit des Verfahrens eine entscheidende Rolle. Im Vergleich zu älteren Farbrepräsentationen eine wesentlich bessere Uniformität auf, die sinnvollerweise für Farbraumtransformationen von HDR-Bildmaterial genutzt werden sollte. ➤

Literaturverzeichnis

- [1] ITU-R, „Recommendation ITU-R BT.709-6,“ 2015. [Online]. Available: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.709-6-201506-1!!PDF-E.pdf. [Zugriff am 29 04 2019].
- [2] „Wikipedia - YCbCr,“ [Online]. Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/YCbCr-Farbmodell>. [Zugriff am 09 08 2019].
- [3] „CIE Normvalenzsystem,“ [Online]. Available: <https://www.biologie-seite.de/Biologie/CIE-Normvalenzsystem>. [Zugriff am 15 04 2019].
- [4] M. Christmann, R. Hedtke und L. Lenzen, „HDR - Höherer Dynamischer Bereich,“ FKT 05/2016, Wiesbaden, 2016.
- [5] J. Fröhlich, S. Grandinetti, I. Rieger und H. Quosdorf, „Creating cinematic wide gamut HDR-video for the evaluation of tone mapping operators and HDR-displays,“ HdM Stuttgart, [Online].

Available: <https://hdr-2014.hdm-stuttgart.de>. [Zugriff am 09 10 2019].

[6] ITU-R, „Recommendation ITU-R BT.2020-2,“ Oktober 2015. [Online]. Available: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.2020-2-201510-1!!PDF-E.pdf. [Zugriff am 13 März 2018].

[7] J. Fröhlich, „Dissertation: Encoding High Dynamic Range and Wide Color Gamut Imagery,“ [Online]. Available: https://www.hdm-stuttgart.de/~froehlichj/diss/Jan_Froehlich_Thesis_2018_02_15_Acrobat_300dpi.pdf. [Zugriff am 31 05 2019].

[8] ITU-R, „Report ITU-R BT.2408-3,“ 07 2019. [Online]. Available: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-BT.2408-3-2019-PDF-E.pdf. [Zugriff am 10 10 2019].

[9] „Wikipedia – MacAdam Ellipsen,“ [Online]. Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/MacAdam-Ellipse>. [Zugriff am 15 4 2019].



© Andreas Schliote

PASCAL KUTSCHBACH

Bachelor of Engineering (FKTG)
ist Masterstudent im Studiengang
Advanced Media Technology an der
Hochschule RheinMain.

www.hs-rm.de