

HAUSARBEIT DIGITALE BILDVERARBEITUNG

Perceptually Uniform Color Spaces und der Oklab Farbraum

Digitale Bildverarbeitung
Duale Hochschule Baden-Württemberg
Stuttgart

von
Leon Kampwerth

Matrikelnummer: 5722356
Abgabedatum: 22.03.2023

Inhaltsverzeichnis

1	Farben und Farbräume	3
1.1	Farbräume	4
1.2	Farbeigenschaften	4
1.3	Unterschiedliche Farbräume	5
2	Der Oklab Farbraum	8
2.1	Farbverarbeitung heute	8
2.2	Was ist Oklab?	10
2.3	Herleitung von Oklab	11
2.4	Wie gut ist Oklab?	11
2.5	Bessere Sättigungskorrektur mittels Oklab	11
2.6	Oklab in der Praxis	11

Abkürzungsverzeichnis

1 Farben und Farbräume

Was ist Farbe? Das ist eine Frage die sehr einfach zu Beantworten scheint, da fast jeder Farben sehen kann. Die Encyclopedia Britannica definiert Farbe sinngemäß als Eigenschaft eines Objektes, die durch dessen Farbton, Helligkeit und Sättigung beschrieben werden kann. In der Physik werden Farben mit Elektromagnetischer Strahlung in einem bestimmten Bereich des elektromagnetischen Spektrums beschrieben, der für das menschliche Auge sichtbar ist [14]. Gerade hier liegt ein Problem vor, da Farben sowohl Phasikalisch erklärt werden können, aber auch Teil der Menschlichen wahrnehmung sind.

Farbwahrnehmung durch das menschliche Auge

Die Farbwahrnehmung des Menschen besteht aus mehreren Schritten, welche von dem Einfallen der Lichtstrahlen in das Auge bis zur Interpretation der Farbe durch das Gehirn reichen. Im Auge fällt das Licht auf die Netzhaut, wo sich Zapfen- und Stäbchenzellen befinden, welche Photorezeptoren sind, die das Licht in Signale für das Hirn umwandeln. Für die Farbwahrnehmung sind die Zapfen zuständig, von denen es drei Arten gibt, welche auf unterschiedliche Wellenlängen reagieren. S-Zapfen reagieren auf Wellenlängen im blauen Bereich des sichtbaren Spetrums (ca. 420nm), M-Zapfen auf Wellenlängen im grünen Bereich (ca. 530nm) und L-Zapfen auf Wellenlängen im gelb-grünen Bereich (ca. 560nm). Auch wenn der L-Zapfen auf Licht im gelb-grünen Bereich am stärksten reagiert, ist er am wichtigsten für die Wahrnehmung von Rot und wird daher auch als Rotrezeptor bezeichnet [2]. Die Farbwahrnehmung des Menschen entsteht durch das Zusammenspiel der drei Zapfen, die, wie in Grafik 1 zu erkennen, durch die Wellenlängen unterschiedlich stark angeregt werden. Dies kann auch dafür sorgen, dass unterschiedliche Lichtspektren als dieselbe Farbe wahrgenommen werden, da sie die unterschiedlichen Zapfen in gleicher Weise erregen. So ist es möglich, dass Displays nur durch die Kombination der drei Grundfarben Rot, Grün und Blau so viele Farben darstellen können [16].

Farbinterpretation durch das Gehirn

Die Signale der Zapfen werden im Hirn verarbeitet und interpretiert. Dabei werden die Farben durch den Mensch in Form unterschiedlicher Farbeigenschaften wahrgenommen, die nicht als physikalische Eigenschaften der Farbe definiert werden können [16]. Zu diesen Farbeigenschaften zählen der Farbton, die Leuchtkraft, die Helligkeit, das Chroma und die Sättigung. Wichtig ist hier, dass die Wahrnehmung dieser Eigenschaften durch viele psychologische Phänomene beeinflusst wird. Die chromatische Anpassung beschreibt zum Beispiel die Fähigkeit der menschlichen Farbwahrnehmung, bei der Betrachtung eines reflektierenden Objekts vom Weißpunkt der beleuchtenden Lichtquelle zu abstrahieren. Für das menschliche Auge sieht ein weißes Blatt Papier weiß aus, egal ob die Beleuchtung bläulich oder gelblich ist. Weitere solcher Effekte sind der Bezold-Brücke Effekt und der Abney Effekt, welche sich auf die Wahrnehmung des Farbtons auswirken, der Stevens Effekt, welcher sich auf den Kontrast auswirkt und der Helmholtz-Kohlrausch Effekt, der sich auf die Leuchtkraft auswirkt. All diese Effekte

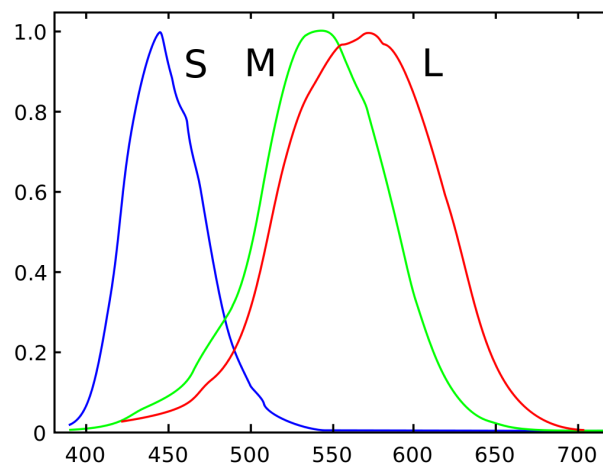


Abbildung 1: Normalisierte Empfindlichkeitsspektren menschlicher Zapfenzellen. X Achse: Wellenlänge in nm, Y Achse: Empfindlichkeit, anteilig. Quelle: [3]

sorgen dafür das die Farbwahrnehmung des Menschen schwer zu beschreiben ist und Modelle, die dies Versuchen sehr komplex werden können [4].

1.1 Farbräume

Ein Farbsystem stellt das Grundprinzip einer Farbmischung dar, beispielsweise durch das Mischen der Lichtfarben Rot, Grün und Blau oder durch das Mischen von Farbpigmenten. Farbmodelle werden aus einem solchen Farbsystem abgeleitet und ordnen Farben einen eindeutigen Wert (Farborte) zu. Farbmodelle sind häufig dreidimensional, damit sie einfach visualisiert werden können. Ein Farbraum wiederum beschreibt alle Farben eines Farbmodells, die durch farbgebende Methoden tatsächlich ausgegeben werden können [5]. Ein Beispiel ist der sRGB Farbraum, welcher ursprünglich für CRTs entwickelt wurde, aber auch heute noch von vielen Displays verwendet wird [1]. Die darstellbaren Farben bilden innerhalb des Farbmodells einen Körper, der als Gamut bezeichnet wird.

1.2 Farbeigenschaften

Abgesehen von den von RGB bekannten Farbdimensionen, welche den Anteil der Grundfarben Rot, Grün und Blau beschreiben, gibt es noch weitere mögliche Farbdimensionen. Diese Dimensionen nehmen Bezug auf die Farbeigenschaften, nach denen die Farben beschrieben werden können. Diese Farbeigenschaften stehen im Bezug zueinander und beeinflussen sich teilweise gegenseitig 3.

Farbton

Der Farbton (eng. hue) ist eine Eigenschaft der visuellen Wahrnehmung, in welcher eine Fläche ähnlich zu einer der Farben rot, gelb, grün oder blau erscheint oder eine Kombination von aneinanderliegenden Paaren dieser Farben in einem geschlossenen Farbring ähnelt (vgl. Grafik 2) [12].



Abbildung 2: Beispiel eines Farbrings. Quelle: [6]

Leuchtkraft (und Brillanz)

Leuchtkraft (eng. brightness) ist eine Eigenschaft der visuellen Wahrnehmung, nach der eine Fläche mehr oder weniger Licht zu emittieren oder zu reflektieren scheint. Die Brillanz (eng. brilliance) ist die Leuchtkraft einer Fläche relativ betrachtet zu ihrer Umgebung. Leuchtkraft ist ein absoluter Wert, während Brillanz in Relation zur Umgebung steht. Da bei der Bildverarbeitung eine Erhöhung der Leuchtkraft auch die Brillanz erhöht, werden diese Begriffe häufig synonym verwendet [12].

Helligkeit

Die Helligkeit (eng. lightness) einer Fläche beschreibt die Leuchtkraft der Fläche relativ zu einer ähnlich beleuchteten weißen oder stark reflektierenden Fläche [12].

Chroma (Buntheit)

Chroma beschreibt die Farbigkeit einer Fläche, beurteilt im Verhältnis zur Leuchtkraft einer ähnlich beleuchteten grauen oder weißen Fläche [12].

Sättigung

Die Sättigung (eng. saturation) ist die Farbigkeit einer Fläche im Verhältnis zu ihrer Leuchtkraft [12].

1.3 Unterschiedliche Farbräume

Farben können in vielen unterschiedlichen Farbräumen dargestellt werden. Dabei braucht jede Farbe unabhängig vom Farbraum mindestens drei Werte, um beschrieben

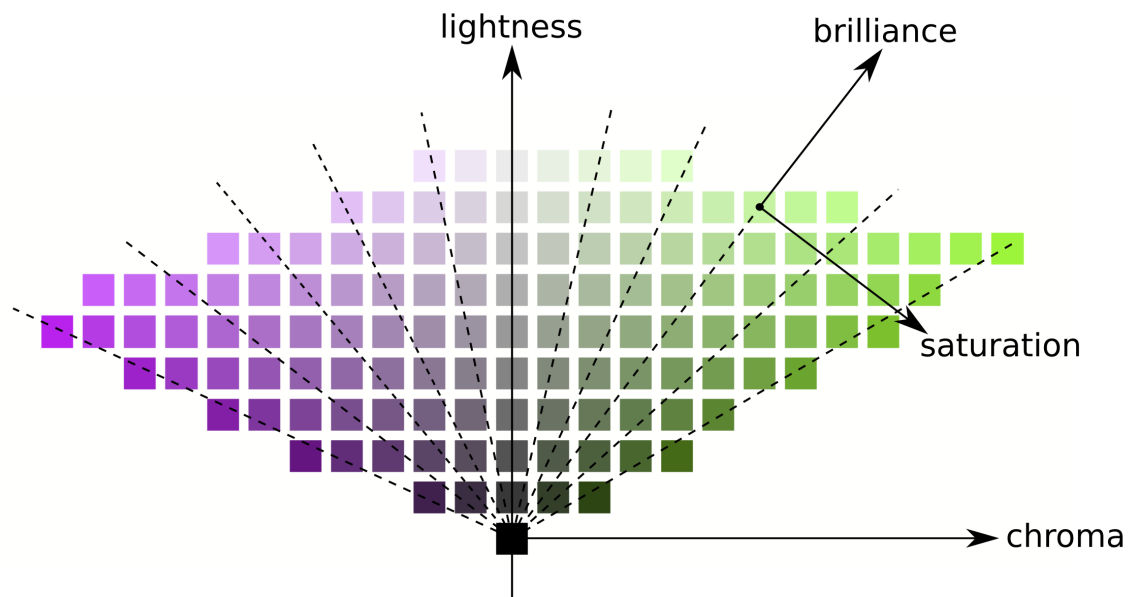


Abbildung 3: Beispiel für den Zusammenhang zwischen den Farbeigenschaften. Quelle: [12]

werden zu können. Zum einen eine Metrik für Helligkeit oder Leuchtkraft und zum anderen zwei Metriken für die Chromazität (nicht zu verwechseln mit Chroma). Diese zwei Metriken können zum Beispiel Farbtone und Buntheit/Chroma oder komplementäre Farbkoordinaten sein [12]. Im Folgenden werden einige Farbräume kurz vorgestellt. Diese Farbräume werden im weiteren Verlauf des Artikels nochmal aufgegriffen.

HSV und HSL

HSV steht für Hue, Saturation und Value und HSL für Hue, Saturation und Lightness. Beide Farbräume sind alternative Darstellungen des RGB Farbraums. HSL und HSV können beide zylindrische Farbkörper (Abbildung 4) dargestellt werden, wobei hue den Winkel und Saturation den Radius definieren. Die Höhe des Zylinders ist der Wert, der die Helligkeit als Lightness oder Value beschreibt. HSV oder HSL werden in Endnutzeranwendungen häufig für Color Picker verwendet [7].

CIE 1931 XYZ

Die CIE-Farbräume von 1931 sind die ersten definierten quantitativen Verbindungen zwischen den Verteilungen der Wellenlängen im elektromagnetischen sichtbaren Spektrum und den physiologisch wahrgenommenen Farben im menschlichen Farbsehen. Bei CIE XYZ werden die drei Farbkoordinaten X, Y und Z verwendet, um die Farbe zu beschreiben. Dabei ist Y die Lumineszenz, Z ist ähnlich zu Blau im RGB Farbraum und X ist eine Mischung der drei CIE RGB Kurven. Vorteil ist hier, dass bei einem konstanten Y Wert die XZ Fläche alle Farben dieser Lumineszenz enthält [8].

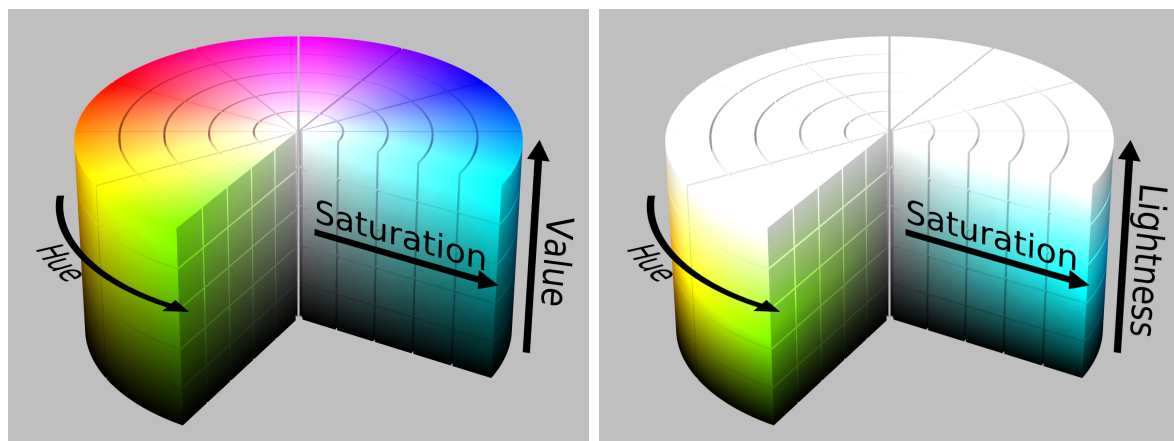


Abbildung 4: Beispiel von Farbkörpern für HSV links und HSL rechts. Quelle: [7]

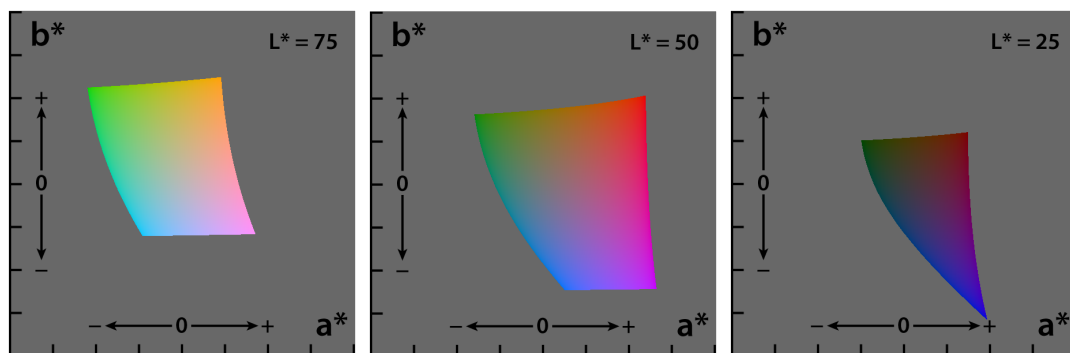


Abbildung 5: a^*b^* Farbebene des CIELAB Farbraumes bei unterschiedlichen L^* Werten. Quelle: [9]

CIELAB

Der CIELAB Farbraum wurde 1976 von der CIE entwickelt. CIELAB hat drei Dimensionen und erstreckt sich über den gesamten Gamut des menschlichen Farbsehens (siehe Grafik 5). Die drei Farbkoordinaten orientieren sich ebenfalls an der menschlichen Wahrnehmung, wo Rot und Grün, Blau und Gelb, sowie Schwarz und Weiß als Gegenfarben wahrgenommen werden. Dies bedeutet, dass die Farben sich ausschließen und es zum Beispiel kein rötliches Grün gibt [11]. Um dies aufzugreifen werden die Farbkoordinaten L , a und b verwendet. Die L -Achse ist die Helligkeit und definiert 0 als Schwarz und 100 als Weiß. Die a -Achse ist eine Relative Achse für die Farbtonkomplementarität von Rot und Grün. Negative Werte gehen in Richtung Grün, positive Werte in Richtung Rot. Die b -Achse ist eine Relative Achse für die Farbtonkomplementarität von Blau und Gelb. Negative Werte gehen in Richtung Blau, positive Werte in Richtung Gelb. CIELAB wird immer in relation zu einem Referenzweiß definiert, wofür CIE die Nutzung von CIE Standard illuminant D65 empfiehlt [9].

CAM16-UCS

In der Farbmeterik ist der OSA-UCS (Optical Society of America Uniform Color Space) ein Farbraum, der erstmals 1947 veröffentlicht und vom Committee on Uniform Color Scales der Optical Society of America entwickelt wurde. Der Ausschuss beschloss, dass eine neue Form verwendet werden muss, um einheitliche Farbunterschiede in jeder Richtung genau darstellen zu können. Die drei dimensionen des Farbraumes sind sehr ähnlich zu CIELAB. Die L-Achse ist die Helligkeit, die j-Achse ist die Farbtonkomplementarität von Blau und Gelb, wobei positive Werte gelber sind und negative Werte blauer sind. Die g-Achse ist die Farbtonkomplementarität von Rot und Grün, wobei positive Werte grüner sind und negative Werte sind pinker [10].

IPT

Der IPT Farbraum ist ein dreidimensionaler Farbraum. I steht für die Intensität und P und T ähneln a^* und b^* von CLAB. P beschreibt die Rot-Grün Dimension und T beschreibt die Blau-Gelb Dimension. Die Vorteile von IPT sind, dass es eine bessere Repräsentation von hue in Anlehnung an die menschliche Wahrnehmung bietet. Außerdem ist IPT sehr simpel Konzipiert und lässt sich sehr einfach aus dem CIEXYZ Farbraum berechnen [13].

2 Der Oklab Farbraum

Das korrekte Darstellen von Farben durch Software ist heutzutage kein Problem mehr, anders sieht es bei der Manipulation von Farben aus. Typische Farboperationen in Software sind unter anderem das realistische rendern von Bildern, das stilisieren und bearbeiten von Bildern, digitales Malen und das Erstellen von Farbverläufen. Um dies zu ermöglichen können drei unterschiedliche Vorgehensweisen verwendet werden [16].

- **Nacharmen des Verhaltens von echtem Licht und Materialien.**
Beispielsweise das hinzufügen von Lens Blur, das Hinzufügen von realistischem Nebel oder Raytracing.
- **Nacharmen der menschlichen Farbwahrnehmung,** mit dem Ziel eine intuitive und nachvollziehbare Farbmanipulation zu ermöglichen. Zum Beispiel für das Anpassen des Chroma ohne die Farbe oder Helligkeit zu verändern, das erstellen einheitlich aussehender Farbverläufe oder das monocromatisieren von Bildern ohne deren empfundene Helligkeit zu verändern [15].
- **Stilisierte Operationen ohne Realitätsbezug.**

2.1 Farbverarbeitung heute

Da Farbe sowohl eine physikalische als auch psychologische Komponente hat, könnte man nun denken, dass Farbverarbeitung in Farbräumen auf Basis der physikalischen Interaktion in der echten Welt oder auf Basis der menschlichen Wahrnehmung erfolgen sollte. Beides ist aber meistens nicht der Fall, da die meisten Programme der Einfachheit

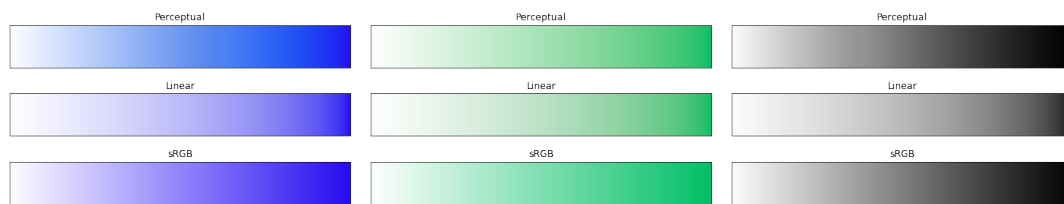


Abbildung 6: Drei Farbverläufe von Weiß zu Blau, Grün und Schwarz. Quelle: [16]

halber den weit verbreiteten sRGB Farbraumsystem verwenden. Auch Bildbearbeitungsprogramme wie Photoshop nutzen meistens einfach denselben Farbraum, in dem die Bilder gespeichert werden, um Manipulationen durchzuführen. Zum einen werden so meist Farbräume verwendet, die für die Farbproduktion entwickelt wurden, statt welche für das durchführen von Berechnungen. Zum anderen werden immer die Farbräume verwendet, in denen das Bild gespeichert ist, was zu inkonsistenten Ergebnissen zwischen verschiedenen Bildformaten führen kann. Dies sorgt dafür, dass Farbverarbeitung zu einem Nebenprodukt der Definition des Farbraums wird und mit sRGB als verbreiteter Standard ist die definiert danach, wie CRT displays in den 80ern Funktioniert haben. Um dieses Problem zu beheben wurden über die Jahre viele Funktionen in den Bildbearbeitungsprogrammen implementiert, diese sollten das Verhalten an die menschliche Wahrnehmung oder das physikalische Verhalten von Licht anpassen. Dennoch wurde der zugrundeliegende Fehler eines nicht zweckdienlichen Farbraumsystems nicht behoben [16].

Um die Probleme mit der Bildbearbeitung in nicht geeigneten Farbräumen zu visualisieren folgen nun ein paar Beispiele. In diesen Beispielen wird der gleiche Farbverlauf mit der drei unterschiedlichen Farbräumen erzeugt, der erste basiert auf einem Farbraum der an die menschliche Wahrnehmung angepasst ist, der zweite ist ein linearer Farbraum und veranschaulicht gut die physikalische Mischung von Licht, der dritte ist ein Farbverlauf in sRGB. Hier können nun einige Unterschiede zwischen den Farbräumen beobachtet werden.

- Weder sRGB noch der lineare Farbraum sind in der Lage Farben mit Weiß zu mischen, ohne dass der Eindruck eines konstanten Hue aufrechterhalten wird. Besonders gut erkennbar ist dies bei dem blauen Farbverlauf in Grafik 6.
- sRGB dunkelt Farben stark ab, wenn unterschiedliche Farben mit hoher Sättigung gemischt werden. Dies ist besonders gut bei dem Farbverlauf von Grün zu Magenta in Grafik 7 zu erkennen.
- Sowohl sRGB als auch der wahrnehmungsbasierte Farbraum mischen Schwarz und Weiß sehr ähnlich (siehe Grafik 6), während der lineare Farbraum viel heller erscheint. Dies ist der Grund weshalb sRGB manchmal auch als wahrnehmungsbasierter Farbraum bezeichnet wird, trotz all seiner Probleme.

In dem Vergleich ist zu erkennen, dass sRGB weder die menschliche Farbwahrnehmung noch das physikalische Verhalten von Licht korrekt abbildet. Daher ist sRGB nicht für die Farbmanipulation von Bildern geeignet [16].

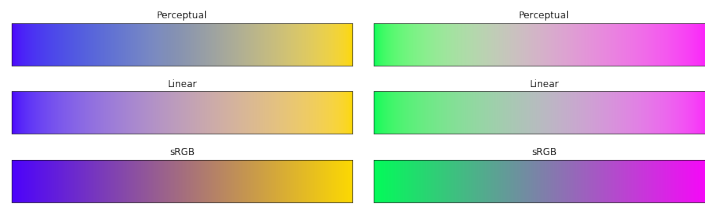


Abbildung 7: Zwei Farbverläufe, links von Blau nach Gelb, rechts von Grün nach Magenta.
Quelle: [16]

2.2 Was ist Oklab?

Motivation für Oklab

Da nun klar ist, dass die häufig verwendeten Farbräume nicht für die Farbmanipulation geeignet sind, muss ein neuer Farbraum entwickelt werden, der diese Aufgabe erfüllt. Es gibt bereits einige Farbräume, die sich auf die Wahrnehmung von Farben konzentrieren, aber alle haben signifikante Nachteile bei der Nutzung für die Bildbearbeitung. Oklab ist ein neuer wahrnehmungsbasierter Farbraum, der 2020 von Björn Ottosson entwickelt wurde und dessen Ziel es ist einfach zu nutzen zu sein und dennoch eine gute Verhersage, der Wahrnehmung von Helligkeit, Chroma und Farbton zu liefern [15]. Der Name „Oklab Color Space“ steht für *OK Lab Color Space* und meint, dass der Farbraum Ok also gut genug ist und es sich dabei um einen Lab Farbraum handelt.

Ziele von Oklab

Oklab soll ein wahrnehmungsbasierter Farbraum sein, der sich gut für die Bildbearbeitung eignet. Björn Ottosson hat auf Basis seiner Erfahrungen folgende Ziele für Oklab definiert [15]:

1. Der Farbraum soll wie CIELAB auf der Gegenfarbentheorie basieren.
2. Der Farbraum soll Helligkeit, Chroma und Farbton gut vorhersagen. Die Werte sollen als orthogonal wahrgenommen werden, sodass sie unabhängig voneinander manipuliert werden können.
3. Das Mischen zweier Farben soll in einem möglichst gleichmäßigen Übergang resultieren. Die Übergangsfarben sollen als mittel zwischen den beiden Farben wahrgenommen werden.
4. Der Farbraum soll den D65 Standardweißpunkt verwenden. Dieser wird von den meisten Farbräumen verwendet.
5. Der Farbraum soll sich numerisch gut verhalten. Das bedeutet, dass er einfach zu berechnen und numerisch stabil ist.
6. Der Farbraum soll gut ausgeleuchtete Sichtverhältnisse annehmen, da die Unterstützung für unterschiedliche Sichtverhältnisse und Beleuchtungen unpraktisch und schwer umzusetzen ist.

7. Wenn die Belichtung von Farben geändert wird, sollen die Koordination nur mit einem Faktor skaliert werden. Es wird angenommen, dass die Farben bei normalen Sichtverhältnissen und mit an die Lumineszenz angepassten Augen betrachtet werden.

Definition von Oklab

Das Resultat der zuvor genannten Ziele ist folgende Definition von Oklab. Eine Farbe in Oklab kann durch drei Werte beschrieben werden, die denen von CIELAB ähneln, aber besser auf die menschliche Wahrnehmung abgestimmt sind. Diese drei Werte sind L, a und b. L beschreibt die empfundene Helligkeit, a beschreibt wie grün oder rot die Farbe ist und b beschreibt wie blau oder gelb die Farbe ist. Für den Referenzweißwert lehnt sich Oklab an CIELAB und sRGB an und verwendet den D65 Standardweißpunkt.

Oklab koordinaten lassen sich direkt in die Polarform umwandeln, was die Farbbeschreibung mit den Polarkoordinaten Lightness (Helligkeit), Chroma und Hue (Farbton) ermöglicht. Dies ist hilfreich, da so Manipulationen dieser Farbeigenschaften leichter durchgeführt werden können [15]. Die Formeln für die Umwandlung der Koordinaten sind wie folgt:

$$C = \sqrt{a^2 + b^2}$$

$$h^\circ = \text{atan2}(a, b)$$

$$a = C * \cos(h^\circ)$$

$$b = C * \sin(h^\circ)$$

2.3 Herleitung von Oklab

2.4 Wie gut ist Oklab?

Helmholtz-Kohlrausch Effekt

2.5 Bessere Sättigungskorrektur mittels Oklab

2.6 Oklab in der Praxis

Literatur

- [1] de. Page Version ID: 195090610. Dez. 2019. URL: <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=SRGB-Farbraum&oldid=195090610>.
- [2] de. Page Version ID: 229557864. Jan. 2023. URL: [https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Zapfen_\(Auge\)&oldid=229557864](https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Zapfen_(Auge)&oldid=229557864).
- [3] en. Page Version ID: 1146215736. März 2023. URL: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=LMS_color_space&oldid=1146215736.
- [4] en. Page Version ID: 1149341611. Apr. 2023. URL: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Color_appearance_model&oldid=1149341611.
- [5] de. Page Version ID: 231484234. März 2023. URL: <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Farbraum&oldid=231484234>.
- [6] en. Page Version ID: 1148627921. Apr. 2023. URL: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Hue&oldid=1148627921>.
- [7] en. Page Version ID: 1149339709. Apr. 2023. URL: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=HSL_and_HSV&oldid=1149339709.
- [8] en. Page Version ID: 1147642162. Apr. 2023. URL: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=CIE_1931_color_space&oldid=1147642162.
- [9] en. Page Version ID: 1149341107. Apr. 2023. URL: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=CIELAB_color_space&oldid=1149341107.
- [10] en. Page Version ID: 1147720899. Apr. 2023. URL: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=OSA-UCS&oldid=1147720899>.
- [11] Christian Becker-Carus und Mike Wendt. *Allgemeine Psychologie: eine Einführung*. ger. 2., vollständig überarbeitete und erweiterte Neuauflage. Lehrbuch Psychologie. Berlin: Springer, 2017. ISBN: 9783662530054.
- [12] Darktable. *Farbdimensionen von darktable*. de. 2023. URL: <https://darktable-org.github.io/dtdocs/de/special-topics/color-management/color-dimensions/>.
- [13] Fritz Ebner. „Derivation and modelling hue uniformity and development of the IPT color space“. In: *Theses* (Juli 1998). URL: <https://scholarworks.rit.edu/theses/2858>.
- [14] Kurt Nassau. *Color Definition, Perception, Types Facts Britannica*. en. März 2023. URL: <https://www.britannica.com/science/color>.
- [15] Björn Ottosson. *A perceptual color space for image processing*. en. Dez. 2020. URL: <https://bottosson.github.io/posts/oklab/>.
- [16] Björn Ottosson. *How software gets color wrong*. en. Dez. 2020. URL: <https://bottosson.github.io/posts/colorwrong/>.