High Dynamic Range Imaging

Johannes Baischer
Universität Salzburg
Fachbereich Informatik
Jakob-Haringer-Straße 2, 5020 Salzburg
Johannes.Baischer@stud.plus.ac.at

Elisabeth Walcher
Universität Salzburg
Fachbereich Informatik
Jakob-Haringer-Straße 2, 5020 Salzburg
Elisabeth.Walcher@stud.plus.ac.at

Abstract

Diese Arbeit bietet eine umfassende Einführung in das Thema High Dynamic Range Imaging (HDRI). Sie beginnt mit den Grundlagen der digitalen Fotografie und Bildverarbeitung, einschließlich Pixel, Auflösung, Farbtiefe und Farbmodelle. Anschließend wird das Problem des begrenzten Dynamikumfangs herkömmlicher Kameras erläutert und die Technik des HDRI als Lösung vorgestellt. Der Dynamikumfang beschreibt das Verhältnis zwischen den hellsten und dunkelsten Bereichen, die eine Kamera gleichzeitig detailreich abbilden kann. Bei großen Unterschieden, wie etwa bei einer Landschaft mit hellem Himmel und tiefen Schatten, kann die Kamera entweder die hellen Bereiche korrekt belichten, wobei die Schattenbereiche zu dunkel bleiben und Details verloren gehen, oder die dunklen Bereiche korrekt belichten, wodurch die hellen Bereiche überbelichtet und „ausgebrannt“ erscheinen.

Die Lösung mittels HDR-Techniken wird in drei Komplexitätslevels erklärt, von den grundlegenden Konzepten des Exposure Bracketing und der Exposure Fusion bis hin zu fortgeschrittenen Themen wie Gammakorrektur und logarithmischen Kurven. Beim Exposure Bracketing werden mehrere Aufnahmen derselben Szene mit unterschiedlichen Belichtungseinstellungen erstellt, um den vollen Dynamikumfang der Szene zu erfassen. Eine solche Belichtungsreihe wird dann zu einem einzigen Bild kombiniert, das die besten Teile jeder Belichtung enthält.

Abschließend werden die technischen Unterschiede zwischen SDR- und HDR-Bildschirmen sowie deren Auswirkungen auf die Bildqualität diskutiert, sowie die Vorteile, Herausforderungen und aktuellen Probleme der HDR-Technologie zusammenfasst.

Keywords: *High Dynamic Range Imaging, Digitale Bildverarbeitung, LaTeX*

1 Einleitung

Diese Arbeit wurde im Zuge der im Lehramtstudium UF Informatik enthaltenen Lehrveranstaltung *Wissenschaftliche Arbeitstechniken und Präsentation* unter der Leitung von Univ.-Prof. Mag. Dr. Andreas Uhl verfasst.

Vorwiegend geht es hier neben dem eigentlichen Thema des *High Dynamic Range Imaging* auch um die Anwendung wissenschaftlicher Arbeitstechniken und Präsentationstechniken. Einerseits wird hierbei auf die Verwendung von Latex als wissenschaftlichen Standard zum Erstellen von wissenschaftlichen Arbeiten eingegangen, auf korrekte Zitierweise und das korrekte Erstellen von Literaturverzeichnissen etc. eingegangen, andererseits wird mit einem Vortrag zum selben Thema auch die Präsentationstechnik geschult.

2 Einführung in die digitale Fotografie

Gegenstand dieser Arbeit soll zwar umfassende Zusammenstellung der digitalen Fotografie sein, jedoch wird hier ein kurzer Überblick über die wichtigsten, für das Verständnis der Besonderheiten des *High Dynamic Range Imaging* notwendigen Grundlagen gegeben.

2.1 Grundlagen der digitalen Bildverarbeitung

Pixel und Auflösung

In der digitalen Bildverarbeitung bilden Pixel die elementaren Bausteine eines Bildes. Ein Pixel, kurz für “Picture Element“, ist der kleinste adressierbare Bestandteil eines digitalen Bildes. Jedes Pixel repräsentiert dabei eine einzelne “Farbe“ und hat in Rastergrafiken eine feste Position und Größe. Ein Bild setzt sich somit aus einer Vielzahl von Pixeln zusammen, die wie ein Mosaik aneinandergereiht ein zusammenhängendes Bild ergeben. Der Pixelaufbau ist spezifisch für Rastergrafiken.

Die Anzahl der Pixel in einem Bild bestimmt seine Auflösung, welche als “Breite x Höhe“ in Pixeln angegeben wird, z.B. 1920 x 1080. Die Auflösung gibt an, wie viele Pixel insgesamt das Bild füllen. Ein Bild mit einer höheren Auflösung hat mehr Pixel, was theoretisch eine höhere Detailgenauigkeit und Schärfe ermöglicht. Bei einer höheren Pixelanzahl kann eine feinere Struktur dargestellt werden, da die Pixel kleiner und dichter zusammenliegen. In der Praxis wird die Auflösung oft in Zusammenhang mit der Bildschirm- oder Druckauflösung in PPI (points per inch) oder in DPI (dots per inch) betrachtet, insbesondere bei der Darstellung oder dem Druck eines Bildes wird explizit DPI verwendet, da es sich hier um physikalische Druckerpunkte handelt.

Abbildung 1. Vergleich der Auflösung in PPI ©Greenmark IT GmbH

Farbtiefe

Zusätzlich zur Pixelanzahl spielt die Farbtiefe eine wichtige Rolle. Die Farbtiefe beschreibt, wie viele verschiedene Farb- oder Helligkeitswerte jedem Pixel zugewiesen werden können. Eine höhere Farbtiefe bedeutet mehr Farbnuancen und feinere Abstufungen, was vor allem in der Bildbearbeitung und Bildverarbeitung oder digitalen Fotografie entscheidend sein kann. Die am häufigsten verwendeten Farbtiefen in der Bildverarbeitung sind 8-Bit und 10-Bit. Bei 8-Bit kann ein Pixel 256 verschiedene Helligkeitsstufen (2^8) darstellen, was für Graustufenbilder oder einfache Farbdarstellungen oft ausreichend ist. Ein 8-Bit-Farbbild mit RGB-Darstellung hat somit 256 x 256 x 256 mögliche Farben, was 16,7 Millionen Farbkombinationen entspricht. Im Gegensatz dazu ermöglicht eine Farbtiefe von 10-Bit pro Farbkanal 1024 Helligkeitsstufen (2^10), was eine insgesamt deutlich feinere Farbabstufung ermöglicht und von immer mehr Geräten unterstützt wird. **Tsuruta2019**

Abbildung 2. Vergleich der Farbtiefe in Bit ©Voltapc

Farbmodelle

Wie diese Farben erzeugt werden, wird im jeweiligen *Farbmodell* festgelegt. Die Farbmodelle RGB und CMYK sind die gängigsten Modelle, die zur Darstellung von Farben auf digitalen Displays bzw. im Druck verwendet werden. Das RGB-Modell (*Rot, Grün, Blau - Modell*) wird für Bildschirme verwendet, indem sie diese drei Grundfarben kombinieren, um verschiedenste Farben im Farbspektrum zu erzeugen. In digitalen Bildern wird daher jedem Pixel ein RGB-Wert zugewiesen, der angibt, wie viel Rot, Grün und Blau darin enthalten ist. Dass dadurch alle anderen Farben dargestellt werden können, basiert auf dem Fakt, das das menschliche Auge selbst nur 3 verschiedene Farbrezeptoren hat, die auf bestimmte Wellenlängen des Lichts reagieren. Die eigentliche *Farbe* entsteht also erst im Gehirn, indem die Signale der Rezeptoren interpretiert werden. Ein Computermonitor versucht dann durch die gleichzeitige Anzeige von roten, grünen und blauen Lichtern, die gleichen Signale im Auge zu erzeugen, die das Auge auch bei der Betrachtung eines realen Objekts empfangen würde.

Abbildung 3. Farbrezeptoren im menschlichen Auge und das RGB Farbspektrum ©BenRG

Grundsätzlich fügen wir also beim RGB Modell diese drei Grundfarben zu einem ansonsten schwarzen (= *nicht leuchtenden*) Pixel hinzu. Im Druckbereich hat man es dageben meist mit dem genau gegenteiligen Fall zu tun. Das Druckerpapier ist weiß (= *alle Farben ins Auge reflektierend*) und kann man durch Hinzufügen weiterer Farbe nicht optimal zu gewünschten Ergebnis kommen. Hierfür wurde das CMYK-Modell (*Cyan, Magenta, Gelb, Schwarz*) entwickelt. Bei diesen Farben handelt es sich um sogenannte Subtraktionsfarben, also Farben, die sich Gegenseitig absorbieren. Je nachdem welche und wieviel Farbe man hier wegnimmt, kann man eine Vielzahl von Farben erzeugen.

Abbildung 4. Vergleich der Farbmodelle RGB und CMYK ©Decal Impressions

2.2 Grundlagen der digitalen Fotografie

Um *High Dynamic Range Imaging* effektiv zu verstehen und anzuwenden, ist ein gewisses Verständnis der grundlegenden Kameraeinstellungen und des *Dynamikumfangs* notwendig. HDR-Bilder werden aus mehreren unterschiedlich belichteten Aufnahmen derselben Szene erstellt, die anschließend kombiniert werden, um Details sowohl in den dunklen als auch in den hellen Bereichen sichtbar zu machen. Dieser Prozess erfordert die präzise Steuerung der Kameraeinstellungen, insbesondere der Belichtung, des Dynamikumfangs und der Lichtempfindlichkeit des Bildsensors.

Belichtung: Zusammenspiel von Blende, Verschlusszeit und ISO

In der Fotografie bezeichnet die Belichtung die Lichtmenge, die den Bildsensor der Kamera erreicht. Sie wird durch drei Parameter gesteuert: Blende, Verschlusszeit und ISO-Wert. Die (*tatsächlich physikalische*) Blende steuert die Öffnung des Objektives und beeinflusst, wie viel Licht auf den Sensor gelangt. Eine kleine Blendenöffnung (z.B. f/16) lässt nur wenig Licht ein, während eine weit geöffnete Blende (z.B. f/2) viel Licht auf den Sensor lässt. Die Angabe der Blendenöffnung wird in der Regel als Verhältnis von Öffnungsdurchmesser zu Brennweite angegeben. Die kleine Blendenöffnung im Beispiel mit f/16 ist also nur 1/16 so groß wie die Brennweite des Objektives, während die große Blendenöffnung bei f/2 schon 1/2 der Länge der Brennweite beträgt, also viel weiter geöffnet ist. Offensichtlich lässt die große Blendenöffnung mehr Licht auf den Sensor, was bei geringer Beleuchtung trotzdem zu einem einigermaßen sichtbaren Bild verhelfen kann. Gleichzeitig kann eine zu weit geöffnete Blende bei einer stark beleuchteten zu einem überbelichteten Bild führen (*angenommen man fixiert alle anderen Einstellungen*). **Tsuruta2019**

Abbildung 5. Beispiel für Blendenöffnungen von f/2.8 bis f/11 ©Foto-Kurs

Die Verschlusszeit bestimmt, wie lange der Bildsensor dem Licht der Szene ausgesetzt ist. Eine längere Verschlusszeit lässt mehr Licht auf den Sensor, was besonders in dunklen Umgebungen nützlich ist, um das wenige vorhandene Licht auch aufnehmen zu können, sollte sich eine Lichtquelle aber während dieser Aufnahme bewegen, wird auch das abgebildet. Eine kurze Verschlusszeit hingegen friert Bewegungen weitestgehend ein, da schlicht nicht genug Zeit ist, um sich merkbar zu bewegen, lässt jedoch weniger Licht ein.

Abbildung 6. Beispielbild von Bewegungsunschärfe durch lange Belichtungszeit ©Rolands Fotokurs

Abbildung 7. Beispielbild von Lichtmalerei durch lange Belichtungszeit ©Digitale Fotoschule

Ein weiterer Parameter bei Aufnahmen, der ISO-Wert, beeinflusst die Lichtempfindlichkeit des Sensors. Eine niedrige ISO-Einstellung (z.B. ISO 100) erzeugt eine hohe Bildqualität bei guter Beleuchtung und ein zu dunkles Bild bei schlechter Beleuchtung, während höhere ISO-Werte die Lichtempfindlichkeit steigern, dadurch jedoch das Bildrauschen erhöhen.

Abbildung 8. Vergleich von ISO-Werten ©Pixolum

Abbildung 9. Auswirkungen von ISO-Werten ©Foto-Kurs

Dynamikumfang und Bildsensoren

Der Dynamikumfang ist entscheidend für die Fähigkeit der Kamera, Helligkeitsunterschiede in einer Szene darzustellen. Er bezeichnet das Verhältnis zwischen dem hellsten und dem dunkelsten Bereich, den der Sensor verarbeiten kann. Während das menschliche Auge in der Lage ist, einen großen Dynamikumfang wahrzunehmen und sich schnell an unterschiedliche Helligkeiten anzupassen, sind Digitalkameras oft eingeschränkt. Bei Szenen mit hohem Kontrast, wie etwa bei direktem Sonnenlicht neben tiefen Schatten, kann der Dynamikumfang der Kamera nicht ausreichen, um alle Details in einem einzigen Bild darzustellen.

Abbildung 10. Beispiel fehlender Dynamikumfang nach oben ©Freepik

3 High Dynamic Range Imaging

Bei einem so visuellen Thema wie dem *High Dynamic Range Imaging* ist es besonders verlockend, sich sehr schnell sehr sicher im eigenen Wissen zu fühlen. Im Folgenden wird deshalb versucht, die technische Umsetzung von HDR Imaging so zunächst einfach wie möglich in drei verschiedenen Komplexitätsgraden zu erklären. In den aufeinanderfolgenden Levels wird entsprechend dem *Spiralprinzip* immer näher auf die zugrundeliegenden Details eingegangen, ohne (weitestgehend) Widersprüche zu den vorherigen Erklärungen zu erzeugen.

3.1 Das Problem

Digitalkameras mit begrenztem Dynamikumfang stoßen bei kontrastreichen Szenen an ihre Grenzen. Der Dynamikumfang beschreibt das Verhältnis zwischen den hellsten und dunkelsten Bereichen einer Szene, die eine Kamera gleichzeitig detailreich abbilden kann. Bei hohem Kontrast, wie etwa bei einer Landschaft mit hellem Himmel und tiefen Schatten, kann die (*herkömmliche*) Kamera entweder die hellen Bereiche korrekt belichten, wobei die Schattenbereiche zu dunkel bleiben und Details verloren gehen, oder die dunklen Bereiche korrekt belichten, wodurch die hellen Bereiche überbelichtet und „ausgebrannt“ erscheinen.

Abbildung 11. Beispiel fehlender Dynamikumfang nach oben ©c-g-w.net

Abbildung 12. Beispiel fehlender Dynamikumfang nach unten ©c-g-w.net

High Dynamic Range Imaging ist hierzu ein Ansatz, dieses Problem zu lösen und den Dynamikumfang der Kamera / des Bildes zu erweitern. Im nächsten Schritt wollen wir auf die technischen Besonderheiten eingehen um dieses Ziel zu erreichen.

3.2 Level 1: Beginner

Exposure Bracketing

Exposure Bracketing bezeichnet den Vorgang, mehrere Aufnahmen derselben Szene mit unterschiedlichen Belichtungseinstellungen zu erstellen. Ziel ist es, den vollen Dynamikumfang der Szene zu erfassen, indem Bereiche mit unterschiedlichen Helligkeiten jeweils korrekt belichtet werden. Eine typische Belichtungsreihe besteht aus mindestens drei Bildern: einem Bild mit normaler Belichtung, einem überbelichteten Bild für Details in den Schatten und einem unterbelichteten Bild für Details in den hellen Bereichen. Einige Kameras bieten die Möglichkeit, Belichtungsreihen automatisch aufzunehmen, man muss diese Variation der Belichtung also nicht selbstständig vornehmen. In diesem Fall wird eine Serie von Aufnahmen schnell hintereinander geschossen, wobei die Kamera die Belichtungseinstellungen für jede Aufnahme automatisch anpasst. **Cvetkovic2010**

Die Technik des Exposure Bracketing ist die Grundidee des High Dynamic Range Imaging, da so zumindest einmal auf mehreren Bildern die gesamte Szene korrekt belichtet wird und somit der gesamte Dynamikumfang der Szene eingefangen wird.

Besonders in der Landschafts-, Architektur- und Innenraumfotografie wird Exposure Bracketing in Verbindung mit HDR häufig verwendet, da diese Szenen oft große Helligkeitsunterschiede aufweisen. In wissenschaftlichen und technischen Anwendungen, wie z.B. der medizinischen Bildgebung oder astronomischen Fotografie, ermöglicht HDR zudem die präzise Erfassung und Darstellung von Details in Umgebungen mit extremen Kontrastverhältnissen.

Abbildung 13. Beispiel für Exposure Bracketing ©Kevin McCoy

Exposure Fusion

Nachdem wir unsere verschieden belichteten Bilder erzeugt haben, geht es jetzt beim sog. Exposure Fusion darum, daraus ein möglichst Detailreiches Gesamtbild zu erzeugen. Anstatt hier aber gleich den Schritt zu klassischen HDR-Bildern zu machen, wird beim Exposure Fusion oft schlicht die Dynamic, die Farbtiefe etc. von SDR (= *Standard Dynamic Range*) bestmöglich ausgeschöpft. Die Bilder einer Belichtungsreihe werden zu einem einzigen Bild kombiniert, das die besten Teile jeder Belichtung enthält.

Es werden die Belichtungen auf Pixelebene analysiert, und es wird aus jedem Bild der Teil ausgewählt, der die besten Details und den besten Kontrast für den jeweiligen Helligkeitsbereich bietet. Dies erfolgt im professionellen Umfeld durch gewichtete Pixelüberlagerung oder Bildmischalgorithmen, bei denen eine Software Bereiche mit hoher Schärfe und Sättigung bewertet und auswählt. Es ist aber auch möglich (und für einzelne Fotos oft auch ausreichend), die Bilder manuell in einem Bildbearbeitungsprogramm zu kombinieren. Man wählt dabei schlicht die Teile der verschiedenen Belichtungen aus, die einem die natürlichsten und sichtbarsten Details im Bild liefert und schneidet sie zu einem nahtlosen Mosaik an Aufnahmen zusammen.**Lapray2014**

Will man mittels Exposure Fusion ein “echtes“ HDR-Bild erzeugen, muss man jedoch noch ein paar technische Schritte genauer betrachten (*siehe* **??** *und* **??**).

Abbildung 14. Beispiel für Exposure Fusion ©Skarabeusz

Limitationen von HDR

Obwohl High Dynamic Range Imaging zahlreiche Vorteile zur Erfassung von Szenen mit großem Helligkeitsunterschied bietet, weist die Technik auch mehrere Limitationen auf, die ihre Anwendung in bestimmten Kontexten einschränken. Eine der prominentesten Einschränkungen von HDRI ist der potenziell realitätsferne Look, der entstehen kann, wenn der neu gewonnene Dynamikumfang in einem unrealistischen Ausmaß ausgeschöpft wird. Auch wenn das menschliche Auge einen exzellenten Dynamikumfang besitzt, tritt es in der echten Welt selten auf, dass dieser zu einem bestimmten Zeitpunkt voll ausgeschöpft wird. Bilder die das versuchen, wirken daher oft zu lebhaft bzw. übertrieben dargestellt. Dieser Effekt ist besonders in der Landschafts- und Architekturfotografie störend, wenn eine realistische Darstellung der Szene erwünscht ist.

Abbildung 15. Beispiel für unrealistische HDR-Darstellung ©Sleeklens

Ein weiteres Problem der HDR-Technik ist die Bewegungsunschärfe oder die Entstehung von sogenannten Geisterbildern (engl. „ghosting“), die auftreten können, wenn sich Objekte zwischen den Aufnahmen eines *Exposure Bracketing* bewegen. Da HDRI eine Serie von unterschiedlich belichteten Bildern kombiniert, kann die Bewegung von Menschen, Tieren, Wolken oder anderen Objekten zu unscharfen Überlagerungen führen. Dies erfordert entweder die Verwendung von Software zur Geisterbildreduktion oder spezielle Kamera- und Softwaretechniken, um die Auswirkungen zu minimieren. In Szenen mit viel Bewegung ist die Anwendung von HDRI daher oft problematisch. Zusätzlich erfordert die HDR-Aufnahmetechnik ein hohes Maß an Präzision und Stabilität. Belichtungsreihen werden oft auf einem Stativ aufgenommen, da bereits minimale Verwacklungen oder Positionsänderungen zwischen den Aufnahmen die Qualität des resultierenden HDR-Bildes beeinträchtigen können. Dies macht HDR-Aufnahmen für spontane, aus der Hand geschossene Fotos oder dynamische Szenen ungeeignet, bei denen keine Zeit für eine stabile Kameraaufstellung bleibt. **Bandoh2010 Cvetkovic2010 Wang2021**

Abbildung 16. Beispiel für Geisterbilder in HDR-Aufnahmen ©Mediachance

3.3 Level 2: Intermediate

Color Gamut und Bittiefe

Neben der Helligkeit und dem Dynamikumfang sind auch der Farbraum und die Farbtiefe wichtige Spezifikationen, die die Bildqualität von SDR- und HDR-Bildschirmen beeinflussen. SDR-Bildschirme nutzen meist den sRGB-Farbraum (= *Standard RGB*) und bieten eine Farbtiefe von 8 Bit pro Kanal, was etwa 16,7 Millionen Farben ermöglicht. HDR-Bildschirme unterstützen jedoch erweiterte Farbräume wie DCI-P3 oder Rec. 2020 und bieten oft eine Farbtiefe von 10 Bit oder mehr, wodurch sie über eine Milliarde Farben darstellen können. Dadurch wird der Farbumfang deutlich vergrößert, was besonders in hellen und gesättigten Farbbereichen eine realitätsnähere Darstellung erlaubt.

Hier ist es bedeutend zu erwähnen, dass zwar Farbraum und Bittiefe oft gemeinsam verfeinert werden, es sich jedoch um zwei unterschiedliche Konzepte handelt. Der Farbraum beschreibt die Menge der Farben, die ein Bildschirm darstellen kann, während die Bittiefe die Anzahl der Farbabstufungen pro Farbkanal angibt. Ein erweiterter Farbraum ermöglicht eine realistischere Darstellung von Farben, während eine höhere Bittiefe feinere Farbnuancen ermöglicht.

Abbildung 17. Vergleich von Farbraum und Bittiefe ©Mattdm

Wie man im Beispiel sieht, stehen einem jeweils 16 Farben zur Verfügung, die obere Stiftreihe hat hier einen umfassenderen Farbraum, wodurch zb. Rot dargestellt werden kann. Dafür hat die untere Stiftreihe (*umgerechnet auf die vorhandenen Farben*) eine höhere Bittiefe, wodurch feinere Abstufungen (bspw. bei grün) möglich sind.

Abbildung 18. Vergleich von Farbräumen ©Myndex

Color Banding

Auch wenn es bei der Recherche zu HDR Geräten wie Fernsehern oder Monitoren oft den Anschein hat, HDR sei zwangsweise mit 10 oder 12 Bit Bittiefe verbunden, so ist dies nicht zwingend der Fall. High Dynamic Range Imaging ist grundsätzlich nicht an eine höhere Bittiefe gebunden, wird aber praktisch immer gemeinsam auftreten, um den sogenannten *Banding-Effekt* zu vermeiden. Dieser Effekt tritt auf, wenn es bei Übergängen zwischen Farb- oder Helligkeitsabstufungen sichtbare Streifen gibt, was besonders in Szenen mit weichen Farbverläufen unangenehm auffallen kann. Im Standard Dynamic Range (SDR) wird oft eine Bittiefe von 8 oder 10 Bit verwendet, was in der Regel ausreicht, um ein flüssiges Bild darzustellen. HDR-Inhalte auf HDR Geräten hingegen haben eine größere Bandbreite an Helligkeitswerten, was bei gleichbleibender Bittiefe das Auftreten von Banding-Effekten merklich erhöhen würde. Um dies zu vermeiden, verwendet man bei HDR häufig eine Bittiefe von 10 oder 12 Bit. Diese höhere Bittiefe erlaubt feinere Abstufungen und minimiert das Risiko von Banding, insbesondere in Kombination mit modernen Übertragungsfunktionen wie PQ (Perceptual Quantizer) oder HLG (Hybrid Log Gamma). Diese Funktionen nutzen das menschliche Wahrnehmungsvermögen effizienter aus und ermöglichen dadurch eine realistischere Darstellung von Farben und Helligkeit. **Bandoh2010**

Abbildung 19. Beispiel für Color Banding ©Phlake

3.4 Level 3: Advanced

Gammakorrektur und Logarithmische Kurven

Gammakorrektur und logarithmische Kurven sind wesentliche Konzepte in der digitalen Bildverarbeitung, die sich auf die Helligkeits- und Kontrastdarstellung von Bilddaten auswirken. Diese Techniken werden eingesetzt, um die visuelle Wahrnehmung von digitalen Bildern an die nicht-lineare Empfindlichkeit des menschlichen Auges anzupassen und so eine realistischere Darstellung auf Bildschirmen zu erreichen.

Die Gammakorrektur ist eine nicht-lineare Transformation der Bilddaten, die darauf abzielt, die visuelle Darstellung von Helligkeitstönen zu optimieren. Digitale Kameras und Bildsensoren erfassen Helligkeitsinformationen linear zur Lichteinwirkung, was bedeutet, dass die Bildsensoren doppelt so viel Licht mit einer Verdopplung der Helligkeit messen. Das menschliche Auge hingegen nimmt Helligkeit nicht linear wahr: Es ist empfindlicher gegenüber kleinen Helligkeitsänderungen in den dunkleren Bereichen als in den hellen. Daher würde ein linear aufgenommenes/dargestelltes Bild ohne Korrektur auf einem Display zu dunkel wirken, besonders in den Schattenbereichen.

Die Gammakorrektur wird durch die Gammakurve beschrieben, eine Funktion, die die Intensitätswerte jedes Pixels nicht direkt wiedergibt, sondern durch eine Potenzfunktion transformiert.

$$I_{out} = I_{in}^{\gamma}$$

wobei

I_{in} die ursprüngliche lineare Intensität ist und I_{out} die korrigierte Intensität. Der Wert von γ bestimmt, wie stark die dunklen und hellen Bereiche angepasst werden. Bei Werten größer als 1 muss die Intensität am Anfang stärker zunehmen im Vergleich zur linearen Darstellung umd die selbe Änderung zu bewirken ((man bemerkt allgemein eine Verdunkelung)). Gleichzeitig ist es im oberen Bereich einfacher am Bildschirm feine Unterschiede in Intensität zu bemerken.

Achtung: Der Einfachheit halber wird in vielen Programmen nicht der Gammawert direkt angegeben, sondern dessen Kehrwert, also $1/\gamma$. Das hat den Vorteil, dass nun ein Erhöhen dieses Wertes einer Erhöhung der *"Helligkeit"* gleichkommt.

Abbildung 20. Vergleich von Gammakurven ©Berklas

Abbildung 21. Beispiel für Gammakorrektur ©Berklas

Im professionellen Kontext reicht oftmals auch die Gammakorrektur nicht aus, um die gewünschten Ergebnisse zu erzielen und vorallem Szenen so detailreich wie möglich aufzunehmen. Hier kommt die logarithmische Korrektur ins Spiel.

Neben der Gammakorrektur werden in der digitalen Bildverarbeitung auch logarithmische Kurven verwendet, um die Helligkeit eines Bildes zu steuern, insbesondere bei Szenen mit hohem Dynamikumfang (HDR). Während die Gammakorrektur oft ausreicht, um Bilder für Standard-Monitore und -Drucke anzupassen, bieten logarithmische Kurven eine präzisere Kontrolle über die Helligkeit und Kontrastverteilung in Szenen mit extremen Helligkeitsunterschieden. Im Gegensatz zur Gammakorrektur, die eine Potenzfunktion verwendet, folgt die logarithmische Korrektur einer Logarithmusfunktion, die Helligkeitsänderungen stärker in dunklen und mittleren Bereichen betont. Die Transformation erfolgt typischerweise durch:

$$I_{\text{out}} = a \cdot \log(I_{\text{in}} + b) + c$$

Anmerkung: Die genauen logarithmischen Funktionen der verschiedenen Hersteller sind nicht sehr leicht einsehbar, da sie damit auch einen gewissen Wiedererkennungswert und Charakter in sich tragen, den man nicht so einfach weitergeben will.

Diese Transformation sorgt dafür, dass Helligkeitsunterschiede in den dunklen Bereichen deutlicher hervorgehoben werden, während die hellen Bereiche nicht überbelichtet erscheinen. **Yan2020**

Abbildung 22. Vergleich von Logarithmus- und Gammakurven ©Diwonusojo

Technische Details von SDR- und HDR-Bildschirmen

SDR- und HDR-Bildschirme (Standard Dynamic Range und High Dynamic Range) unterscheiden sich in ihrer Fähigkeit, Helligkeit und Kontrastumfang darzustellen, was maßgeblich durch die technischen Spezifikationen der Geräte beeinflusst wird.

Die Helligkeit eines Displays wird oft in Nits gemessen, wobei ein Nit der Lichtintensität von einem Candela pro Quadratmeter (cd/m²) entspricht. SDR-Bildschirme haben typischerweise eine Helligkeit von 100 bis 300 Nits und einen eingeschränkten Dynamikumfang, wodurch sie Schwierigkeiten haben, sowohl tiefe Schatten als auch helle Highlights gleichzeitig darzustellen. HDR-Bildschirme hingegen erreichen deutlich höhere Helligkeiten, typischerweise 1000 Nits, einige Modelle erreichen aber sogar bis zu 4000 Nits oder mehr. Dies ermöglicht eine präzisere Darstellung von Kontrastunterschieden und sorgt für lebendigere Farben, ohne dass helle Bereiche ausbrennen oder Details in den Schatten verloren gehen.

Der Wechsel zwischen HDR Inhalten und SDR Inhalten auf jeweils einem bestimmten Bildschirm gestalten sich daher oft nicht so reibungslos, wie gedacht. Würden sich SDR-Anzeigegeräte an die Vorgaben der dazu passenden Inhalte halten, würde man mit sehr dunklen Bildern konfrontiert werden.

Zum Vergleich: Das Iphone 15 kommt auf eine maximale Helligkeit von 2000 Nits.

Die meisten Hersteller skalieren deshalb ihre Anzeige so, dass die hellsten Inhalte (*=100Nits*) so hell als möglich dargestellt werden (*typischerweise 3-5x so hell*) und alle anderen Werte gleichverteilt dazwischen angezeigt werden. Mit der Einführung von bspw. HDR-Video gerät ein herkömmlicher Bildschirm jetzt in eine Zwickmühle, da Werte wie 250 Nits im Video selbst erlaubt sind. Gleichzeitig müssen demnach HDR-Geräte die Inhalte so darstellen, wie sie auch definiert wurden, sie können also nicht selbstständig die maximale Helligkeit der Inhalte bestimmen. Dadurch entsteht der Effekt, das SDR-Inhalte auf HDR-Geräten oft sehr dunkel und kontrastarm wirken. **Bandoh2010**

4 Fazit

4.1 The Good

High Dynamic Range Imaging (HDRI) bringt im wissenschaftlichen und privaten Kontext zahlreiche Vorteile mit sich, da es die Grenzen traditioneller Fotografie überwindet. Die Hauptstärke von HDRI liegt in der Fähigkeit, extreme Kontraste zwischen hellen und dunklen Bereichen in einem Bild detailliert darzustellen. Im wissenschaftlichen Bereich, etwa in der Astronomie, Archäologie oder Biologie, erlaubt HDRI dadurch die Erfassung feiner Details, die sonst in Schatten oder überbelichteten Bereichen verloren gehen würden. Dies ist besonders nützlich, wenn Bilddaten entscheidend für die Forschung sind - zum Beispiel in der Mikroskopie, wo feine Strukturen sichtbar gemacht werden müssen, oder in der Wetterforschung, bei der es auf klare und differenzierte Bilddaten von Wolkenstrukturen ankommt.

Im privaten Bereich hat HDRI ebenfalls signifikante Vorteile. In der Fotografie und Videografie hilft HDR dabei, Szenen lebendiger und realistischer wirken zu lassen, was besonders in der Naturfotografie oder bei Reiseaufnahmen geschätzt wird. Moderne Displays und Fernseher unterstützen HDR-Wiedergabe, was den Betrachtern ein detailreicheres und fesselnderes Seherlebnis bietet. Die Farben sind lebendig, die Details klar, und dunkle Bereiche verlieren keine Information, was gerade bei Filmaufnahmen oder Spielen die Bildqualität erheblich steigert.

4.2 The Bad

Trotz der zahlreichen Vorteile weist High Dynamic Range Imaging heute noch einige Herausforderungen und technische Probleme auf, die seine Anwendung sowohl im wissenschaftlichen als auch im privaten Bereich einschränken. Das zentrale Problem besteht in der bereits erwähnten Kompatibilität: HDR-Bilder und -Videos erfordern spezielle Hardware wie HDR-fähige Displays, um korrekt dargestellt zu werden. Auf Standardbildschirmen erscheinen HDR-Inhalte oft eintönig oder verfälscht. Zudem wird das Label "HDR"wegen der fehlenden allgemeinen Abtrennung zu Auflösung und Bittiefe oft als Marketinginstrument missbraucht, was für Konsumenten verwirrend sein kann.

Ein weiteres Problem ist der erhöhte Bedarf an Speicherplatz und Rechenleistung. HDR-Bilder enthalten aufgrund des größeren Dynamikbereichs mehr Daten, was nicht nur die Speicheranforderungen erhöht, sondern auch die Bearbeitung und Übertragung anspruchsvoller macht. Für den Einsatz in Echtzeitanwendungen, etwa in der Videospielbranche oder im Streaming, bedeutet dies zusätzliche Anforderungen an die Hardware und Bandbreite, was die Nutzung in vielen Kontexten einschränken kann.

Hinzu kommt, dass HDR-Inhalte bei der Erstellung und Bearbeitung anspruchsvoll sind. Die genaue Kalibrierung und Anpassung von HDR-Bildern erfordert Erfahrung und spezielle Software, da selbst kleine Fehler zu unnatürlich wirkenden Bildern führen können. In wissenschaftlichen Anwendungen, wo Präzision entscheidend ist, können solche Unregelmäßigkeiten die Datenqualität und die Interpretation der Ergebnisse beeinflussen. Auch im privaten Bereich sind viele Nutzer überfordert, wenn sie HDR-Inhalte selbst erstellen möchten, da das richtige Verständnis für Belichtung und Kontrast erforderlich ist, um die vollen Vorteile auszuschöpfen.

4.3 The Ugly

Das Problem der derzeit begrenzten HDR-Verbreitung gleicht dem Dilemma in der E-Mobilität: Ähnlich wie Autofahrer skeptisch gegenüber Elektrofahrzeugen sind, solange keine flächendeckende Ladeinfrastruktur existiert, sehen viele Fotografen und Videografen wenig Anreiz, HDR-Inhalte zu erstellen, solange HDR-fähige Geräte nicht weit verbreitet sind. Für professionelle Kreative bedeutet das Produzieren von HDR-Inhalten höhere Kosten und zusätzlichen Aufwand, sei es durch leistungsstarke Software oder durch den Einsatz spezifischer Hardware, um den erweiterten Dynamikumfang korrekt darzustellen. Doch wenn nur ein kleiner Teil der Endnutzer über HDR-fähige Displays verfügt, bleibt der potenzielle Mehrwert auf einen Bruchteil des Publikums beschränkt.

Gleichzeitig zögern Gerätehersteller, mehr HDR-kompatible Bildschirme und Fernseher zu produzieren, solange nur ein begrenztes Angebot an HDR-Inhalten verfügbar ist. Das führt zu einer Art „Henne-Ei"-Problem, bei dem sich beide Seiten gegenseitig blockieren: Hersteller sehen die Investition in HDR-Hardware als wenig lohnend an, solange es an Inhalten fehlt, und Content-Creator wiederum sind unmotiviert, hochwertige HDR-Inhalte zu erstellen, solange nur wenige Zuschauer davon profitieren können.

Zusätzliche Zitate für die fehlenden Literaturverweise: **Bennett2018**, **Barceloux2012**, **Rempel1956**, **almendro**