

HDR in Motion

Ein Ansatz um ein HDR-Video mittels eines halbtransparenten Spiegels und zwei herkömmlichen Kameras zu erzeugen.

Bachelorarbeit
André Motz





Bachelorarbeit 1

HDR in Motion

Ein Ansatz um ein HDR-Video mittels eines halbtransparenten Spiegels und zwei herkömmlichen Kameras zu erzeugen.

eingereicht an der **FH Joanneum** in Graz.
Fachhochschulstudiengang Informationsdesign

verfasst von
Andreas Motz
Pommeregasse 25
A-8020 Graz

betreut von Johannes Grenzfurthner & DI (FH) Daniel Fabry





Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei Johannes Grenzfurthner und DI (FH) Daniel Fabry für die Bakkalaureatsbetreuung bedanken, sowie bei Univ.-Doz. Dr. Karl Stocker. Auch geht ein Dank an DI (FH) Thomas Radeke, der mich auf die Abhilfe des Brennweitenproblems mittels eines optischen Gitters brachte. Danke auch an Christina Fehrer und Michael Frager, die mir ihre Spiegelreflexkameras verliehen, sowie an meine Eltern, die mich nicht nur bei meiner Material- und Literaturbeschaffung, sondern auch finanziell unterstützen. Ein Riesendank geht auch an Gerfried Guggi für das Coverfoto.



Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, André Motz, dass die vorliegende Arbeit nur von mir verfasst wurde und nur mithilfe der angegebenen Quellen erschaffen wurde. Die Arbeit wurde bisher keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

Graz, 21.01.2010



Gleichheitsgrundsatz

Aus Gründen der Lesbarkeit wurde in dieser Arbeit darauf verzichtet, geschlechtsspezifische Formulierungen zu verwenden. Ich möchte jedoch ausdrücklich festhalten, dass die bei Personen maskuline Form für beide Geschlechter zu verstehen ist.

Kurzfassung

In meiner kombinierten Bachelorarbeit erläutere ich im ersten Teil die Funktionsweise und Anwendungsgebiete von HDR-Bildern. Über- und Unterbelichtung gehen damit der Vergangenheit an, wodurch es zu einer massiven Qualitätssteigerung der Bilder kommt. Weiterhin werden neue zusätzliche Bildoptionen ermöglicht, die der jeweiligen Aufnahmesituation bzw. den Gestaltungsmöglichkeiten und Wünschen des Videobearbeiters noch besser gerecht werden. Auf längere Sicht wird es deswegen herkömmliche 8 Bit-Dateiformate ersetzen.

Als Schlussfolge werden sich auch die Videoformate weiterentwickeln. Es gibt aber bisher nur wenige HDR-Videochips, die über das Entwicklerstadium hinausgehen. Der zweite Teil meiner Arbeit beschreibt die Herangehensweise der durchgeführten Experimente, bei dem mittels zwei herkömmlichen digitalen Camcorder ein HDR-Video erzeugt wurde. Dabei wird das Bild durch einen semitransparenten Spiegel zu den Kameras umgeleitet, die das entstehende Bild unterschiedlich belichtet aufnehmen.

Für die Foto HDR-Bilderzeugung gibt es bereits eine kleine Anzahl an Tools, die für die Erzeugung eines HDR-Videos benutzt werden können. Um den Effekt der HDR-Aufnahme sichtbar zu machen, wird in der vorliegenden Arbeit eine Tone Mapping-Ausgabe produziert.

Abstract

The first part of this Bachelor-Thesis is about the basics and the application of High Dynamic Range-Imaging, that helps saving the whole dynamic range of a scenery. This fact leads to an increased quality of our videos we will take and HDR-videos will replace old standards like the widely used JPEG.

As a reason, not only photographers will profit of a better quality, but also video formats. There are already a couple of HDR-Vision sensors, but they are far away from being used in consumer cameras. The second part is about the experimental approach to set up a very basic HDR-Camcorder, built up of two Low Dynamic Range-camcorders and a semi-transparent mirror to produce a High Dynamic Range-video. The proceedings should be detailed enough so that every interested person can reproduce the results.

To get an idea of the result, the Tone Mapping-technology will be used so that everyone with a usual display can see results.

Inhalt

1. High Dynamic Range-Image	1
1.1 HDR Geschichte	3
1.2 Anwendung	6
1.3 Erzeugung	8
1.4 HDR-Monitore	13
1.5 Dynamikumfang	14
1.6 Blendenstufe = Lichtwert = Belichtungsstufe = Exposure Value = f-stop	16
1.7 Das Auge	16
2. Datenverarbeitung	19
2.1 Tone Mapping	19
2.2 Exposure Fusion \neq Tone Mapping	20
2.3 HDR-Effekt oder: Hyperrealism	20
3. Das Experiment	27
3.1 Die Konstruktion	31
3.2 Die Kameras	32
3.3 Störfaktoren , Probleme, weitere Verbesserungsmöglichkeiten	36

Schlussfolgerungen	41
Literaturverzeichnis	43
Abbildungsverzeichnis	49

1. High Dynamic Range-Image

High Dynamic Range-Bilder bezeichnen Motive, deren Dynamikumfang den gewöhnlichen Medien wie Film, Fotos oder Sensoren bzw. dem menschlichen Auge übertrifft. Dadurch lassen sich zusätzliche Details in normalerweise zu hellen und zu dunklen Bereichen speichern. In der vorliegenden Bachelorarbeit werden High Dynamic Range oft mit HDR und High Dynamic Range-Imaging mit HDRI abgekörtzt.

Die Problemstellung: Angenommen man fotografiert einen Snowboarder auf einem schneebe-

deckten Berg mit der Sonne im Hintergrund. Mit etwas Ungeschick ist nicht nur die Sonne überbelichtet, sondern auch die meisten Schneeregionen, die bei einem 8 Bit RGB Bild also als absolutes Weiß gespeichert werden. Nun ist aber die Sonne bekanntermaßen um einiges heller als Schnee. Beide sollen aber gut detailliert erkennbar bleiben und das Bild bzw. den Sensor nicht überbelichten bzw. übersteuern, was zum Verlust von Details und Überstrahlung der Umgebung führt. Der herkömmliche 8 Bit Dynamikumfang hat hier wesentliche Bereiche des Dynamikumfangs beschnitten.

Bei einem HDR-Bild gibt es kein definiertes absolutes Weiß oder Schwarz. Es gibt also keinen absoluten Weißpunkt. Um ein HDR-Bild aus einer Belichtungsreihe erstellt, dann gibt es vermutlich mindestens ein Bild, das die korrekte Helligkeit des Schnees und ein Bild, das die Sonne nicht überbelichtet aufgenommen hätte, wodurch der korrekte Dynamikabstand zwischen dem weißen Schnee und der ultrahellen Sonne nicht verloren gehen würde. Mit HDR-Bildern gibt es also keine über- oder unterbelichteten Bereiche mehr. HDR-Bilder erlauben Aufnahmen von Straßen bei Nacht, bei denen der Himmel nicht untersteuert und Details in den Fenstern nicht überbelichtet sind. Lichter von entgegenkommenden Autos sind ebenfalls nicht mehr überbelichtet und Indoor-Aufnahmen sind auch möglich mit Details in den sonst überstrahlten Fensterregionen.

Die Beschränkungen der 8 Bit Formate wird immer bemerkbarer und der Wunsch nach mehr Möglichkeiten wird größer und größer. Unsere Computer und deren Betriebssysteme sind endlich auf 64 Bit aufgerüstet worden. Eine Soundverarbeitung mit 24 Bit Dynamikumfang kann jede Soundkarte des nächstbesten Rechners aus dem Elektronikdiscounter. Nur die Bildverarbeitung

mit ihren 8 Bit ist in den 1980er Jahren stecken geblieben, da die Miniaturisierung und gleichzeitige Dynamikerhöhung bei Video-Aufnahme-Chips sich technisch schwieriger gestalteten als bei Audio. Die extrem große Anzahl der Pixel-Sensoren auf diesen Chips ist auch mit Audio nicht vergleichbar. Zur rauschfreien Umsetzung eines Lichtsignals in ein elektrisches Signal ist aus physikalischen Gründen eine Mindestfläche für jedes Pixel erforderlich. Außerdem müssen für die Auflösung von dunkelsten Signalen in kurzer Belichtungszeit schon fast einzelne Photonen bzw. Elektronen erfasst werden, was erhebliche Anforderungen an die Auswert-Schaltungen für Pixel stellt.

Analog zur Bildverarbeitung befindet sich die Videotechnologie auf einem ähnlichen Level. Trotzdem ist natürlich diese Technologie weitaus komplexer, da es sich um bewegte Bilder handelt. Die verwendeten Bildsensoren sind aber ähnlich und speichern auch nur ein 8 Bit pro Farbkanal-RGB Bild. Die Zeit scheint aber reif zu sein, um hier wesentliche Verbesserungen zu erzielen.

Beispielsweise ergibt sich auch die Notwendigkeit von HDR-Videoauswertungen bei Autokameras

fr Sicherheits- und Komfortfunktionen, wenn auch hier geringere Pixelauflösungen gefordert sind. Hier kann in kritischen Lichtsituationen keine optimale Blende gefunden werden. Zum Beispiel muss eine hell leuchtende Ampel und ein dunkler Fußgänger erfassbar sein. (Vgl. Dirk Hertel, Andrew Betts, Rich Hicks, Machiel ten Brinke, automotive, Seite 1)

Bei der Produktionskontrolle in der Industrie werden vermehrt High Speed HDR-Kameras eingesetzt, (Vgl. Hoefflinger, Bernd: Vision, Seite 107) und auch in der Medizin sind solche Kameras in Gebrauch: Endoskope, Kameras mit denen das



Abb. 1.1. Gustave Le Gray, Mediterranean Sea

Innere unserer Organe sichtbar gemacht werden können.

1.1 HDR Geschichte

Gustave Le Gray (1820-1884) kam auf die Idee, unterschiedlich belichtete Negative von Meerespanoramen zu einem Bild zu kombinieren, um den mit damaligen Mitteln nicht erreichbaren Dynamikumfang in einem Bild zu kombinieren.

In den 1930er Jahren entwickelte Charles Wyckoff detaillierte Bilder von Nuklearexplosionen, in dem er mehrere Bilder einer Belichtungsreihe zu einem Bild verschmolz, um den hohen Dynamikumfang darzustellen.

1985 begann Greg Ward mit der Entwicklung seiner Radiance-Renderengine, dem wir heute das weit verbreitete Radiance HDR-Format verdanken. Mitte der 1980er Jahre waren zwar wissenschaftliche Anwendungsgebiete die einzige Möglichkeit, um mit High Dynamic Range in Kontakt zu treten, die Notwendigkeit für genauere Lichtberechnungen waren aber schon damals absehbar.

1993 wurde die erste kommerzielle HDR-Videokamera vorgestellt. Die Adaptive Sensivity Kamera benutzt dabei einen Mosaikartigen CCD-Chip, dessen Pixel das Motiv mit zwei unterschiedlichen Belichtungsstufen aufnehmen. Die zwei Videosignale werden danach in einem Chip auf ein herkömmliches 8Bit-Bild heruntergerechnet. Wie auch diese Kamera basierten bisherige Kameras auf Charles Wyckoffs Neighborhood Tone Mapping, was mit dem im späteren Kapitel erklärten Exposure Fusion verglichen werden kann.

Ab 1993 wurden die ersten komplizierten mathematische Verfahren entwickelt, um aus Belichtungsreihen HDR-Bilder zu erzeugen, die sich nicht mehr nur auf Wyckoffs Technik beschränkten. Die nun erzeugten HDR-Bilder besitzen tatsächlich einen erweiterten Dynamikumfang, der erst mittels Tonemapping auf Low Dynamic Range-Medien sichtbar wird.

1997 präsentierte Paul Debevec der Öffentlichkeit erstmals die Möglichkeit, aus einer Belichtungsreihe ein HDR-Bild zu erzeugen.



Abb. 1.2. Time-Cover, 12. April 1954



Abb. 1.3. Low Dynamic Range-Bild mit automatisch gewählten Belichtungseigenschaften einer Canon EOS 450 D.

Die Popularität steigerte sich gleichzeitig mit der zunehmenden Verbreitung der Digitalkameras, die die Erzeugung der HDR-Bilder erst ohne Umwege ermöglicht.

2005 implementierte Adobe in Photoshop CS2 die Merge to HDR Funktion, wodurch eine große Anzahl an Amateurfotografen auf die Möglichkeiten der HDR-Fotografie aufmerksam wurden.

Bis zum heutigen Datum (Dezember 2009) gibt es keinen richtigen HDR-Videofilm. Zahlreiche Amateurfotografen begannen jedoch HDR-Zeitrafferaufnahmen im Internet zu veröffentlichen. (Vgl. engl. Wikipedia, HDR, online)

In den letzten Jahren wurden für Foto- und Videokameras Anstrengungen auf der Sensorebene unternommen, um den Dynamikbereich zu erhöhen, zum Beispiel durch logarithmische Sensorkennlinien oder Mehrstufenverfahren mit unterschiedlicher Sensitivität pro Einzelaufnahme. (Vgl. Chia-Nan Yeh, Yen-Tai Lai, Jui-Yu Chang, logarithmic, Seite 1)



Abb. 1.4. Bildausschnitt mit unter- und überbelichteten Bereichen im Motiv.

1.2 Anwendung

Extreme Helligkeitsunterschiede sind nur schwierig zu erfassen. Beispielsweise kann ein Nachtmotiv mit hellen Straßenlaternen und dunklen Schatten bei 15 Blendenstufen beinhalten. Einen solchen Kontrastumfang können nur die wenigsten Kameras erfassen. (Vgl. Bloch, HDR-Handbuch, Seite 161)

Zum Vergleich: Ein nur intern durch die Kamera verarbeitetes JPEG-Bild. An einem sonnigen Dezembertag wollte ich ein kontrastreiches Motiv mit satten Farben und räumliche Tiefe. Der Belichtungssensor empfahl eine Aufnahme mit ISO 400, 1/30 s Belichtungszeit und Blende von 30, um ein neutral ausgeleuchtetes Bild zu erhalten.

Bei einem HDR-Bild kann ganz einfach per Schieberegler nachträglich die Belichtung eingestellt werden,



Abb. 1.5. Tonemapping lässt die ansonsten in einem LDR-Bild verschwundenen Bereiche erkennen.

wodurch sich Pixel nicht zwangsläufig in die sonst üblichen 256 Graustufen zwängen müssen. Ist ein Objekt einfach gesagt heller als das hellste Weiß, dann wird diese Information auch so gespeichert, statt dass sie verloren geht. Der Großteil des Bildes wurde richtig ausgeleuchtet. Dennoch besteht das Innere der Brücke zum Großteil aus absolutem Schwarz. Betrachtet man die Brücke mit bloßem Auge, so kann man durchaus Details innerhalb der Brücke erkennen.

Gleich neben dem nahezu komplett schwarzen Bereich ist das besteuerte Weiß des FH-Joanneum-Schildes. In Wahrheit betrachtet bewegt sich die helle Fläche irgendwo zwischen sehr hell und sehr viel hellerem Hell, aber kein absolutes, bei allem Anderem stehendes Weiß.

Zusätzlich zum korrekt belichteten Bild entwickelte ich noch eine Belichtungsreihe, indem ich das Motiv

mit unterschiedlichen ISO-Werten (100, 200, 400 als Mittelbild, 800 und 1600) aufnahm.

Mittels intensiverem Tone-Mapping lassen sich die Veränderungen besonders deutlich vermitteln: Das Innere des Ganges ist besser erkennbar und das Weiße des Schildes besser steuert auch nicht mehr. Als Nebeneffekt des Tone-Mappings sind auch andere Details sichtbar. Die Struktur des Himmels und des Metalls kommt nun deutlicher hervor.

Panoramafotografie

Möchte man durch eine Bilderserie ein Panorama erzeugen, ist man in vielen Fällen mit unterschiedlichen Beleuchtungssituationen der einzelnen Bildern konfrontiert. Mittels eines lokal operierenden Tone Mapping Algorithmus lässt sich das entstehende Panorama gleichmäßig ausleuchten.

Astronomie

In der Astronomie sind schon seit längerer Zeit HDR-Bildformate beliebt, deren Kameras sich nicht an den Dynamikumfang des menschlichen Auges orientieren. Als Schlussfolge geben das Hubble-Teleskop und Co. ihre Bilddaten im FITS-Format (Flexible Image Transport System) aus. (Vgl. Willis, Linux, online)

Computer Generated Images (kurz CGI)

Computer generierte Bilder entstammen einer Rendering-Software, die zuvor aus einer Menge an Algorithmen ein fertiges Bild erzeugt. Reflexionen, Licht und Schatten müssen berechnet werden. Je komplexer diese Verfahren sind, desto realistischer und natürlicher wirkt das Rendering.

Um den Berechnungen der fertigen Renderings mehr Spielraum zu lassen, wird auch hier mit einem erhöhten Dynamikumfang gerechnet, auch wenn das fertig gerenderte Bild nur als 8 Bit-Bild ausgegeben wird. (Vgl. Ward, Encodings, online)

Eine Technik die bei korrekten Belichtungen von Renderings besonders beliebt ist, ist die Verwendung von HDRi-Panoramen für die globale Beleuchtung (Global Illumination, kurz: GI) in computergenerierten Bildern. Will man in ein reales Bild durch weitere 3D-Modelle erweitern, so fertigt man zuerst ein 360°-HDRi-Panorama der Umgebung an. Eine Halbkugel in der 3D-Szene oder ein anderes Projektionsmodell, mit dem HDRi-Panorama texturiert, simuliert dabei den Himmel und dessen Beleuchtung (Image Based Lighting, kurz: IBL).

Durch die korrekte Justierung der Szene beeinflussen nun alle reellen und indirekten Lichtquellen die 3D Szene.

Digital Compositing

Gleich wie bei CGI ist auch hier ein großer Dynamikumfang für die digitale Postproduktion interessant. Filmmaterial wird ebenfalls mit mehr als 8 Bit digitalisiert, doch mehr dazu im Kapitel der HDR-Formate unter DPX. (Vgl. Bloch, HDRI-Handbuch, Seite 38)

1.3 Erzeugung

Hauptquelle für HDR Bilder sind Computerrendings oder Belichtungsreihen des gleichen Motivs.

Spezialkameras

Heutige Spiegelreflex-Kameras besitzen immer mehr die Funktion der automatisierten Belichtungsreihe. (Vgl. Forumbenutzer, 40D, online) Aber auch deren verwendeten CCD-/CMOS-Chips können schon einen großen Dynamikumfang erfassen, als herkömmliche Bildformate überhaupt speichern können, wodurch sich immer mehr die RAW-Formate bei Fotografen durchsetzen. Sensoren handelsüblicher Digitalkameras sind in der

Lage einen Dynamikumfang von ca. 6-12 Blendenstufen aufzunehmen. Eine Canon EOS 450D kann ein RAW-Bild mit 14 Bit pro Farbkanal speichern, was sich aber dennoch bei weitem von echtem HDR unterscheidet. (Vgl. Askey, 450D, online)

Die Columbia University entwickelte einen CCD-Sensor mit einem Rasterfilter, das Pixel unterschiedlich belichtet. Die so verschieden stark belichteten Pixel werden später zu einem gesamten HDR-Bild zusammengerechnet. Allerdings kann so nur der Dynamikumfang nach oben hin erweitert werden, Details in den Schatten eines Motivs gehen dadurch genauso verloren. (Vgl. Bloch, HDRI-Handbuch, Seite 103)

Fujifilm entwickelte seine Super CCD SR-Chips, der unterschiedlich große Dioden auf einem Sensor vereint. Die kleineren Dioden besitzen eine geringere Empfindlichkeit und lassen sich dazu nutzen, ansonsten überbelichtete Bereiche in den Lichtern zu erfassen. (Vgl. Bloch, HDRI-Handbuch, Seite 105)



Abb. 1.6. Eine Belichtungsreihe aus drei Bildern.

An der Stanford University begann man das Programmable Digital Camera Project, bei dem eine Weiterentwicklung eines CMOS-Sensors eine sagenhafte Framerate von 10.000 Bildern pro Sekunde erreicht. Die hohe Framerate wird dazu genutzt, um 30 Belichtungsreihen pro Sekunde zu erzeugen. (Vgl. Bloch, HDRI-Handbuch, Seite 101f)

Das Fraunhofer Institut für Mikroelektronik Stuttgart entwickelte einen HDRC Sensor. Er speichert 50 Bilder pro Sekunde mit einem Dynamikumfang von 20 Blenden und beeinflusst dabei schon das menschliche Auge. (Vgl. dt. Wikipedia, High Dynamic Range Image, online)



Abb. 1.7. Die Bewegungsunschärfe lässt sich durch eine veränderte Belichtungszeit beeinflussen.



Abb. 1.8. Unterschiedliche Blenden verändern den Tiefenschärfeneffekt.



Abb. 1.9. Der ISO-Wert verändert die Empfindlichkeit des Bildsensors. Ein höherer Wert lässt kürzere Belichtungszeiten und kleinere Blenden zu, durch die Empfindlichkeit wird aber ein erhöhtes Rauschen im Bild in Kauf genommen.

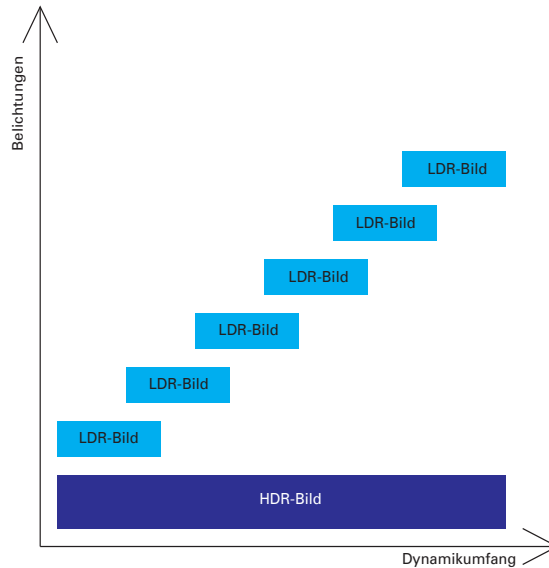


Abb. 1.10. Eine Belichtungsreihe aus 6 Bildern wird in ein HDR-Bild umgerechnet.

Unterschiedlich belichtete LDR-Bilder - HDR Bilderzeugung aus Belichtungsreihen

Umso mehr Bilder man für eine Belichtungsreihe verwendet und umso geringer deren Belichtungsabstand ist, desto feiner und somit besser wird die Qualität des erzeugten HDR-Bildes, weil auch mehr Informationen vorhanden sind.

Je weiter die Belichtungsreihe ins ansonsten Unter- und überbelichtete reichen, desto höher wird der Dynamikumfang.

Sobald eine Kamera in der Lage ist, alle Automationsmechanismen für die korrekte Belichtung zu deaktivieren, bietet sie sich an für die Erzeugung der für HDR Bilder benötigten Bilderreihen.

LW	2	1	0.5	0.25	0.125	0.063	0.031	0.016	0.008	0.004	0.002	0.001	0.0005
32	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
22.6	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
16	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
11.3	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
8	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5.7	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
4	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
2.8	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1.4	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

Abb. 1.11. Unterschiedliche Blenden

Als Mindestgrenze gilt dabei bei einer Belichtungsreihe eine Anzahl von drei Bildern: Ein korrekt belichtetes Bild plus ein um zwei Blendenstufen unterbelichtetes und ein überbelichtetes Bild.

Eine veränderte Belichtung lässt sich durch eine andere Belichtungszeit, eine vergrößerte oder verkleinerte Blende oder einen anderen ISO-Wert erreichen, wobei sich jeder dieser Parameter nicht nur auf die Helligkeit auswirkt.

Fotografiert man mit einer veränderten Blende und ändert die anderen beiden Werte dementsprechend, dass das Bild gleich belichtet wird, so beeinflusst man gleichzeitig die Tiefenschärfe des Motivs. Grund dafür ist die Streuung des Lichtes. Bei einer kleineren Blendenzahl empfängt der Sensor mehr Licht, wodurch der Tiefenschärfeneffekt verstärkt wird. Lichtstarke Objektive helfen also magen dabei, um einen Film-Look zu erhalten.

Eine verkürzte Belichtungszeit erzeugt weniger Bewegungsunschärfe, die bei einer schnelleren Bewegung eines Objektes im Bild deutlich sichtbar sein kann.

So bleibt noch der ISO-Wert für eine veränderte Belichtung. Der ISO-Wert ist dabei ein Maß für die Empfindlichkeit des Kamerasensors. Ein ISO-Wert von 200 ist gleichzusetzen mit den älteren ASA-Werten auf analogen Filmen, der sich wiederum logarithmisch verhält zur in der Vergangenheit verwendeten deutschen DIN-Norm. Verdoppelt man den ISO-Wert um das Zweifache, verdoppelt man auch die Belichtung und erzeugt somit ein Motiv um eine Blendenstufe heller. Nachteil dieser Art der Belichtungsveränderung ist ein höheres Rauschen im Bild.

Der Gain-Regler bei der in meinem Experiment verwendeten FX-7 ersetzt dabei den ISO-Parameter bei Kameras. Die Angabe des ISO-Wertes wird ersetzt durch eine Angabe in Dezibel.

1.4 HDR-Monitore

All die eben angesprochenen Anwendungsgebiete scheinen für den normalen Fotografen oder Videofilmer nicht wirklich oder nur selten von Bedeutung zu sein. Während herkömmliche TFT-Bildschirme und Rechnermonitore nur einen Dynamikumfang von 7-9 Lichtwerten darstellen können (Vgl. Helmers, Dynamic-Umfang, online), sind Hersteller schon heute mit der Entwicklung von HDR-Bildschirmen beschäftigt, die all die Details von HDR-Bildern darstellen können, die heute noch nicht ohne weiteres sichtbar gemacht

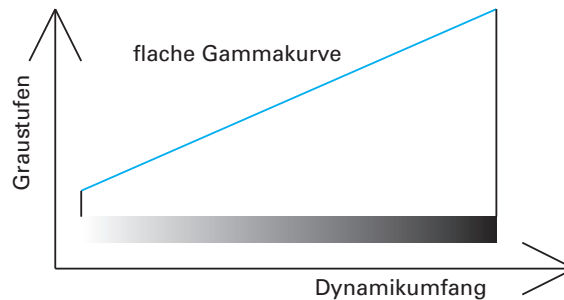
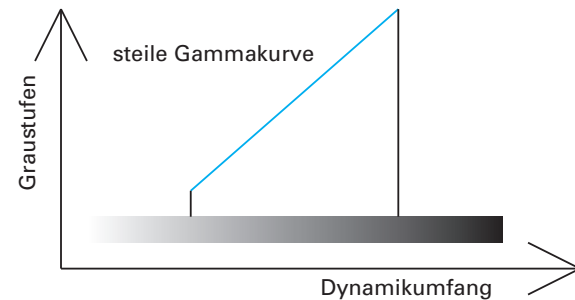


Abb. 1.12. Mit einer flachen Gammakurve kann mehr Dynamikumfang auf die zur Verfügung stehenden Graustufen verteilt werden, eine steilere Gammakurve erzeugt jedoch mehr Kontrast, nimmt aber ein Beschneiden der dunklen und hellen Bereiche in Kauf.

werden können. Erste Prototypen können 18 Lichtwerte darstellen (Vgl. Bloch, HDRI-Handbuch, Seite 33). Herkömmliche 8 Bit LDR-Bilder sollten im Vergleich zu HDR-Bildern geradezu ausgewaschen wirken.

Für die Wiedergabe eines HDR-Films muss die gesamte Produktionskette mit den neuen Formaten und dem Dynamikumfang kompatibel sein: Von den Sensoren der Kamera, über die digitale Produktion und Speicherung, hin zum Ausgabemedium - dem Bildschirm.

Die HDMI-Spezifikation für die Übertragung von HD-Material, sieht bereits die Übertragung von mehr als 8 Bit/Farbe vor. Man spricht dabei nicht mehr vom True Color-Begriff, sondern von Deep Color. (Vgl. HDMI Licensing, HDMI, online)



1.5 Dynamikumfang

Ein anderes Wort für den Dynamikumfang ist auch Kontrastverhältnis. Es beschreibt das Verhältnis zwischen dem dunkelsten Punkt in einem Bild und dem hellsten. Der Dynamikumfang kann allgemein in verschiedenen Einheiten angegeben werden (Auswahl):

- als Verhältnis: Zum Beispiel 200:1 (nicht logarithmisch)
- in Dezibel: 48 dB
- als Lichtwert: 15 LW
- als Bits: 8 Bit

Nimmt man ein Motiv mit einer geringen Gammakurve auf, so erhöht sich zwar der Dynamikumfang, jedoch erscheint das Bild kontrastärmer oder flauer. Man erhält zwar mehr Details in den Schatten und Lichtern, jedoch wird ein größerer Helligkeitsbereich im selben Dynamikumfang gespeichert, als bei kontrastreichen Bildern. Andererseits erhöht eine steilere Gammakurve automatisch den Kontrast, weil ein geringerer Helligkeitsbereich im selben Dynamikumfang gespeichert werden kann. Motive auf Film gespeichert wirken dadurch unbearbeitet eher flau im

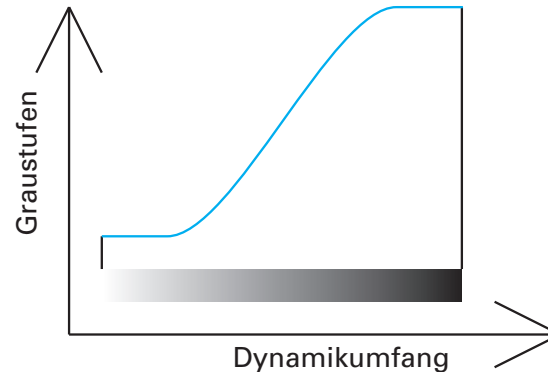


Abb. 1.13. Gammakurve mit S-förmigen An- und Abstieg.

Vergleich zu digitalen Bildern, letztere tendieren jedoch schneller zum Ausfransen von Schatten und Lichtern, wodurch bei herkömmlichen Digitalkameras genauer auf eine korrekte Belichtung geachtet werden muss.

Eine Gammakurve wie man sie von Film gewohnt ist, ist nur im mittleren Bereich linear. An den Enden steigt und fällt sie ab, wodurch zusätzliche Details, wenn auch nicht linear, gespeichert werden können. (Vgl. Helmers, Dynamik-Umfang, online)

Techniker betrachten neben Audiosignale auch ein Bild als Signal, denn beide besitzen einen Dynamikumfang. Wie eher in der Tontechnik kann daher auch bei Bildern der Dynamikumfang in Dezibel angegeben werden.

Ein paar gebräuchliche Umrechnungen:

- 48 dB = 8 Bit = 256 Graustufen
- 96,32 dB = 16 Bit = 65536 Graustufen
- 144,49 dB = 24 Bit = 16,7 Mio. Graustufen
- 120 dB = 20 LW
- Blendenstufe = $\text{Log}(\text{Bitanzahl} - 1) / (2^3 + 1), 2)$
- $\text{dB} = \text{Bitanzahl} * 6 + 1.76\text{dB}$
z.B: 50dB $\approx 8\text{bit} * 6 + 1.76\text{dB}$

Die hinzugerechneten 1.76dB kommen einfach aus dem Unterschied des Spitzenwertes zum Effektivwert eines Sinus-Signals: Spitzenwert = 1.41* Effektivwert. Dieser fixe Faktor-Wert wird nach dem Logarithmieren ein fixer additiver Wert. (Vgl. Maxim, Calculator, online)

Leicht zu merken:

- Graustufen-Verdopplung = +6dB = Biterhöhung um +1
- Graustufen-Verzehnfachung = +20dB \approx Biterhöhung um +3.33 (wegen 20/6)

Doch Vorsicht: Ein Erhöhen der Bittiefe, beispielsweise in Photoshop, bedeutet nicht, dass aus einem herkömmlichen Bild automatisch ein HDR-Bild erzeugt wird. Einmal verlorene Informationen können auch hier nicht wiedergewonnen werden.

1.6 Blendenstufe = Lichtwert = Belichtungsstufe = Exposure Value = f-stop

Blendenstufen helfen dem Fotografen beim Umrechnen von Blendenzahl, Belichtung und ISO-Wert bei der korrekten Belichtung.

ISO (International Organization for Standardization) legt dabei eine Belichtung von 0 LW bei 1 Sekunde

bei Blende 1 fest. Die gleiche Belichtung kann bei einer Belichtung von 2 Sekunden mit Blende 1,4 erreicht werden. (Vgl. Bloch, HDRI-Handbuch, Seite 4f)

Eine Blendenstufe bedeutet eine Verdoppelung der anfallenden Lichtmenge. Öffnet man die Blende um eine Stufe, beispielsweise von f8 auf f11, verdoppelt man die anfallende Lichtmenge. Eine verdoppelte Belichtungszeit verdoppelt ebenfalls die anfallende Lichtmenge. Zu guter letzt verdoppelt auch ein doppelter ISO Wert die Lichtmenge, z.B. ISO 400 statt ISO 200.

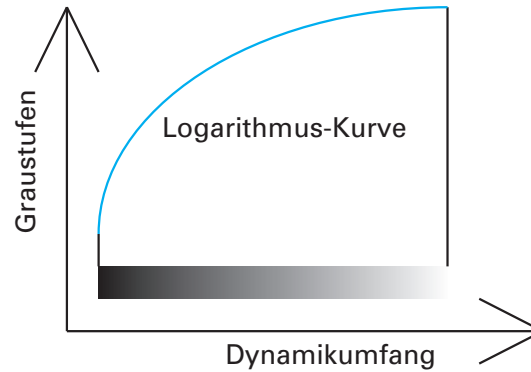


Abb. 1.14. Die Logarithmus-Kurve erklärt, warum doppelt so starke Lichtquellen für unser Auge nicht als doppelt so hell wahrgenommen werden.

Man sieht also, dass Blendenstufen nicht nur durch die Veränderung der Blende hervorgerufen werden können, daher ist auch die neutralere Bezeichnung als Lichtwert gebräuchlich.

1.7 Das Auge

Unser Auge scheint ohne weitere Probleme mit einem großen Dyna-

mikumfang zurechtzukommen, als der Großteil aller Medien. Den Himmel vom Licht am Ende des Tunnels sehen wir mehr oder weniger gleich gut wie die dunklen Tunnelwände, obwohl ein hoher Kontrastunterschied vorherrscht. Wie kann das funktionieren? Und vor allem: Können wir diese Techniken vielleicht für unsere HDR-Bilder und Videos kopieren?

Das Auge bedient sich dabei bei einem Trick, den sich auch die Belichtungsautomatik der Kamera zunutze macht. Unsere Iris schließt und öffnet sich, je nach Gegebenheit und den Punkt, auf den

wir unseren Blick fokussieren relativ schnell. Auch unsere Rezeptoren passen sich dem vorhandenen Licht an. Es kann dabei Kontraste im Verhältnis von 10.000:1, oder anders ausgedrückt, 14 LW verarbeiten (Vgl. Bloch, HDRI-Hanbduch, Seite S. 11). Durch diesen erfassbaren Kontrastumfang und der Effektivität der Iris, kann es sich beinahe jeder Lichtsituation anpassen. Es gibt nur wenige Dinge im Alltag, mit dem es befordert ist: Betrachten wir direkt die Sonne, werden wir neben einem Schmerz leider nur geblendet. Sehen wir uns bei Neumond den Schatten eines Steines in einer Höhe an, so werden wir Zeuge von dem dunkelsten Schwarz, was wir uns überhaupt nur vorstellen können.

Nichtlineare Empfindlichkeit

Nichtlineare Empfindlichkeit, die sich auch auf unser Auge übertragen lässt. Unsere Sinnesorgane arbeiten mit einer logarithmusartigen Kurve, was in der Praxis bedeutet, dass ein doppelt so starkes Signal nicht als doppelt so laut oder doppelt so hell wahrgenommen wird. So kann das Ohr zwar kleinste Lautstärken wahrnehmen, die wahrgenommene Lautheit flacht aber mit zunehmender Leistung ab. Auch unser Auge verhält sich so: Kleinste Lichtquellen können wahrgenommen werden, der

x-fach hellere Himmel blendet uns aber dennoch nicht.

Eine Lichtquelle, die eine doppelt so hohe Anzahl an Photonen aussendet als eine andere, wird also nicht als doppelt so hell wahrgenommen. Und ein 20 Watt Verstärker klingt nicht doppelt so laut wie ein 10 Watt Verstärker, was die Angabe von Helligkeit und Lautstärke in einer Logarithmus-Einheit wie Dezibel oder Bit erklärt: Mit ihr lässt sich einfacher rechnen und hantieren und gibt auch besser vergleichbare Unterschiede bzw. Verhältnisse von Lautstärke und Helligkeit wieder.

Lokale Adaption nennt man die Fähigkeit des Auges, dass scheinbar dunklere Bereiche in unserem Blickfeld anders belichtet werden als helle, sozusagen lokal unterschiedlich, wodurch sich der wahrgenommene Dynamikumfang nochmals erweitert.

Technisch vergleichbar - jedoch genau umgekehrt - ist das dynamische Kontrastverhältnis eines Fernsehers, bei dem zwar nicht die Auflösung geändert wird, jedoch in dunklen Stellen eines Bildes zusätzlich abgedunkelt wird (durch örtliche Leuchstärkeänderung von LEDs). Hier wird also

der Dynamikumfang nicht wie beim Auge komprimiert, sondern expandiert. (Vgl. Hoefflinger, Vision, Seite 215f)

Film als Medium kann ungefähr einen Helligkeitsunterschied von 1:750 (ca. 9,5 Blendenstufen) speichern, ist also herkömmlichen Bildsensoren etwas überlegen. Hochglanzfotopapier stellt dagegen nur noch 6 Blendenstufen dar. (Vgl. Helmers, Dynamik-Umfang, online)

2. Datenverarbeitung

2.1 Tone Mapping

Tone Mapping beschreibt die Umwandlung eines HDR-Bildes in ein LDR-Bild.

Dabei wird der Kontrastumfang an das Ausgabe-medium oder Format angepasst (z.B. 8 Bit/Kanal JPEG). Der Dynamikumfang wird in einen kleineren Bereich komprimiert. Verschiedenste Algorithmen liefern oft sehr unterschiedliche Ergebnisse. Sie lassen sich in zwei Gruppen einteilen:

Global operierende Algorithmen mappen die Helligkeitswerte über das gesamte Bild gleich verteilt herunter. Lokal operierende Algorithmen hingegen beachten unterschiedliche Bereiche eines Bildes, gleich wie die lokale Adaption unseres Auges. Verschiedenste Algorithmen wurden entwickelt. Durch eine extreme Anwendung können jedoch Halo-Artefakte entstehen: Ausstrahlungen von Helligkeitseffekten in Nachbarbereiche.

2.2 Exposure Fusion \neq Tone Mapping

Exposure Fusion wurde in älteren Photomatix Versionen auch passenderweise als Exposure Blending bezeichnet. Diese Technik hat zwar nichts mit HDR-Tonemapping zu tun, jedoch lässt sich dadurch ein ähnlicher Effekt erreichen. Auch hier dienen Belichtungsreihen als Ausgangsmaterial. Die Software gewichtet dabei Bit für Bit auf seine Brauchbarkeit und kombiniert sie zu einem beargungsloses Gesamtbild. Dabei werden überbelichtete Pixel durch die des nächst dunkleren Bildes aus einer Belichtungsreihe ersetzt. Da das Generieren des HDR-Bildes wegfällt und das komplizierte Tonemapping durch das relativ schnelle Exposure Fusion ersetzt wird, lassen sich auch so schnell die Vorteile von HDR-Tonemappings reproduzieren: Ein verschmolzenes Bild aus einer Belichtungsreihe. Die beschriebenen Halo-Effekte lassen sich mit dieser Technik vermeiden.

2.3 "HDR-Effekt" oder: Hyperrealism

Immer wieder stolpert man vor allem in Internetforen auf die Ablehnung der mittels Tone Mapping bearbeiteten HDR-Bilder - in vielen Fällen bearbeitete der Fotograf zu extrem seine Bilder, was anfangs einen wahren HDR-Effekt-Boom auslöste, an dem sich jedoch die Konsumenten schnell satt sahen. Die Ästhetik der Bilder wurde oft in Frage gestellt. Vor allem der bei Photomatix eingebaute Details Enhancer erzeugt ohne weitere Einstellungen auf der ersten Blick verblüffende Ergebnisse

Dabei ist mir eine häufige Verwechslung aufgefallen, der ich anfangs ebenfalls unterlag: Die im Internet verbreiteten, und als HDR-Bilder ausgestellten Bilder sind in den meisten Fällen mittels Tone Mapping verarbeitete HDR-Bilder. Da sie ja aber auf ein 8 Bit-Bild heruntergerechnet wurden, handelt es sich ganz und gar nicht um HDR-Bilder.

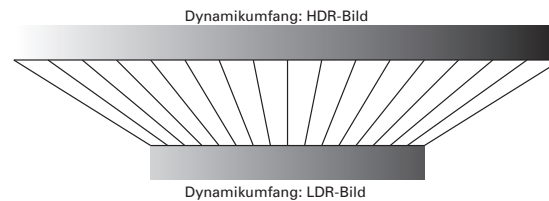


Abb. 2.1. Global operierender Algorithmus, dessen Dynamikkomprimierung auf das gesamte Bild gleichmäßig angewendet wird.

Eine in einem Thread vorgeschlagene Bezeichnung wäre Hyperrealism-Pictures, da die Bilder meistens einen krasseren Dynamikumfang darstellen, als wir mit unseren Augen überhaupt wahrnehmen können.

Tone Mapping Algorithmen wurden entwickelt um HDR-Bilder in natürlich aussehende LDR-Bilder umzuwandeln, bzw. den oft eingeschränkten Dynamikumfang vieler CMOS-Chips zu umgehen. Speziell lokal operierende Tone Mapping Algorithmen lassen teils extreme Bildmanipulationen zu, die sich schon eher dem Impressionismus zuordnen lassen könnten und das Motiv ziemlich dramatisch darstellen. Sie wirken geradezu surreal. Der Dynamikumfang wird stark eingeschränkt, während die Farbinformationen im mittleren Bereich nichtlinear verstärkt werden, ohne in hellen Bereichen überbelichtungen hervorzurufen.



Abb. 2.2. Halo-Effekt beim Übergang vom Himmel zu einem anderen Objekt.

Getonemappte Bilder sollten real aussehen, müssen aber nicht.

HDR Bildformate: Eine Auswahl

Bisherige Bildformate hatten nur eine begrenzte Anzahl an Bits/Pixel, oft einhergehend mit der Beschränkung des Ausgabebildschirmes (meistens ein CRT-Monitor). So bietet JPEG als Dateiformat gerade mal 256 Graustufen pro Farbe (=8 Bit), was im Vergleich zum Dynamikumfang in unserer Natur eine ziemlich Beschränkung dar-

stellt. Es werden also neue Dateiformate notwendig, um den bisher bläulichen Dynamikumfang zu erweitern oder die Begrenzung gänzlich aufzuheben.

Achtung, Verwechslungsgefahr: 8 Bit bedeutet dabei 8 Bit pro Pixel und Farbkanal. Bilder im RGB Farbraum, so wie sie bläuliche Dateiformate wie beispielsweise JPG benutzen, speichern also drei Farbkanäle



Abb. 2.3. Ein Beispielmotiv mit unter- und überbelichteten Regionen, mitgeliefert mit Photoshop CS4.



Abb. 2.4. Moderater Details Enhancer.

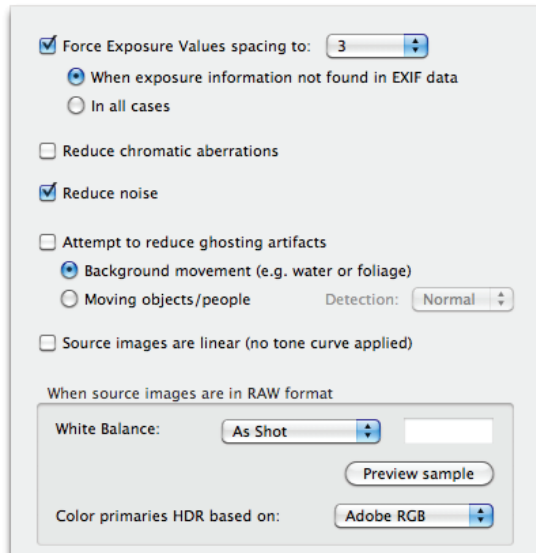


Abb. 2.5. Einstellungen des Details Enhancer.



Abb. 2.6. Extremer Details Enhancer.

pro Pixel, also 3×8 Bit pro Pixel = 24 Bit/Pixel, weswegen man bei JPEG auch von einem 24 Bit-Format spricht. Die proprietären RAW-Formate sind der erste Ausweg aus dem 8 Bit Dilemma: Sie speichern die ankommenden Daten des Kamera-chips mit der Ausgangsbittiefe.

Da aber nahezu jeder Hersteller sein eigenes RAW-Format entwickelt hat, gibt es keinen festen Standard. Führende Grafikprogramme wie Photoshop oder auch der Mac von Haus aus unterstützen zwar eine Vielzahl an RAW-Formaten, ein proprietäres Dateiformat ist aber dennoch nicht zukunftssicher, wenn es nicht auf breiter Ebene unterstützt wird. Eigens für HDR-Bilder wurden spezielle Bildformate entwickelt.

Portable Float Map (.pfm, .pbm)

Das Portable Float Map Dateiformat ist das simpelste Format unter den HDR-Formaten. Es speichert die einzelnen RGB-Werte mittels einer Fließkommazahl Pixel für Pixel nacheinander in einem Raster ab, wodurch es von einem Programmierer ohne viel Wissen einfach unterstützt werden kann.

Als nachteilig erweisen sich jedoch die großen unkomprimierten Datenmengen im Vergleich zu einem OpenEXR oder Radiance-HDR Bild. Es ist also gänzlich ungeeignet, um einen Standard wie JPEG abzulösen, es bietet gar keine verlustfreie oder verlustbehaftete Komprimierung und würde unsere Festplatten sinnlos verstopfen. (Vgl. Bloch, HDRI-Handbuch, Seite 41)

Digital Picture Exchange (.dpx)

Das Digital Picture Exchange-Format ist in der Filmbranche das Standard-Format, mit dem Film digitalisiert gespeichert wird. Zuerst wird dabei der Film digitalisiert und das DPX-Format speichert den Dynamikumfang logarithmisch mit 10 Bit pro Farbkanal ab. Anschließend werden visuelle Effekte wie Belichtungs- und Farbkorrekturen durchgeführt, um die Ausgabe nach der digitalen Bearbeitung wieder auf Film zu speichern.

Wegen den 10 Bit kann es aber nicht als echtes HDR-Bildformat angesehen werden, eher als Middle Dynamic Range. DPX bietet auch keine weiteren Features im Vergleich zu den folgendbeschriebenen Formaten. Mindestens ein Alphakanal wäre aber seit dem Durchbruch des PNG-Formates im Internet wünschenswert. (Vgl. Bloch, HDRI-Handbuch, Seite 38f)

Radiance HDR

Etwas eleganter als Portable Float Maps speichert das Radiance-HDR Format die Informationen. Statt die RGB-Kanäle mittels Fließkommazahlen zu erweitern, wird zusätzlich ein vierter Kanal gespeichert, der den Exponenten der Fließkommazahl beinhaltet, wodurch sich die Informationen in der Datei viel kompakter, und damit platzsparender speichern lassen. Das entspricht also einer Verschiebung des Dynamikbereichs. Die notwendige Verschiebung ist im Exponenten enthalten und entspricht in etwa zusätzlichen Bits wegen der Logarithmierenden Wirkung.

Das Format wurde bereits in den 1980ern entwickelt. Zusammen mit der einfachen Implementierung für Entwickler könnte sich dieses Format für HDR-Bilder durchsetzen. Es ist neben OpenEXR

das Standardformat für HDR-Fotografen. (Vgl. Ward, Encoding, online)

OpenEXR

Durch den Wunsch nach mehr Dynamikumfang in der Visual Effects-Industrie entwickelte Industrial Light & Magic (George Lucas Effektschmiede) das OpenEXR-Format ab dem Jahre 2000 und stellte es später unter eine Open Source-Lizenz, um eine weite Verbreitung zu garantieren.

OpenEXR kann x-beliebige zusätzliche Kanäle speichern, wie beispielsweise einen Alphakanal oder den Z-Puffer einer Renderengine, was bei der Postproduktion ungemein nützlich sein kann. Dadurch lassen sich Effekte wie die Tiefenschärfe nachträglich verändern, oder auch Objekte im Nachhinein in den Raum einfügen. Durch die Anzahl der Features und der weiten Verbreitung durch die Bemühungen des Entwicklers, konnte sich dieses relativ neue Format neben dem bewährten Radiance-Format etablieren und stellt nicht nur in Hollywood einen Standard da. (Vgl. Bloch, HDRI-Handbuch, Seite 41)

TIFF

Tiff als "normales" Dateiformat existiert eigentlich gar nicht. Eher dient es als Containerformat für eine Vielzahl von Formaten. Deswegen gibt es Tiff-Bilder mit 8 Bit pro Farbkanal, Tiff-Bilder mit 32 Bit pro Farbkanal, Tiff-Bilder mit Zip-Komprimierung, Tiff-Bilder mit Ebenen und Tiff-Bilder mit einer weiteren Vielzahl von Eigenschaften, die aber leider fast alle einen riesigen Nachteil haben: Sie sind nicht standardisiert.

So kann es durchaus vorkommen, dass man ein Tiff-Bild in einem bestimmten Format mit einem Programm öffnen, bearbeiten und speichern kann, aber das nächste Programm kann nichts mit der verwendeten Komprimierung anfangen.

Die ZIP-Komprimierung funktioniert außerdem nicht bei den Fließkommazahlen eines 32-Bit Bildes, weswegen die Dateigröße eines 32-Bit Bildes gleich groß ist wie die der schon erwähnten Portable Float Maps. (Vgl. Bloch, HDRI-Handbuch, Seite 42f) Auch das Photoshop Format beruht auf dem Tiff-Standard, kann also auch HDR-Bilder speichern.

TIFF LogLuv

Dieses Format ist ganz besonders, denn es speichert die Farben nicht wie sonst üblich im RGB- oder CMYK-Farbraum, sondern im LUV-Farbraum und erfasst die gesamten sichtbaren Farben.

Trotzdem hat es nie den erhofften Durchbruch geschafft. Nur wenige Programme unterstützen vollständig das Format, wodurch es für eine langfristige Archivierung von HDR-Bildern unbrauchbar ist, denn niemand kann die Unterstützung eines halbherzig implementierten Formates für die Zukunft voraussagen. (Vgl. Bloch, HDRI-Handbuch, Seite 41)

FITS: Flexible Image Transport System

FITS oder Flexible Image Transport System wurde bereits 1982 definiert und dient primär Wissenschaftler und Astronomen zum Bildaustausch, wo es also irgendwann Zeit hatte sich zum De Facto-Standard zu entwickeln. Dennoch scheint es in der HDR-Fotografie keine wesentliche Rolle zu spielen.

Eine FITS-Datei enthält einen oder mehrere Header im ASCII-Format, in dem Informationen wie Schlüsselwörter oder Koordinaten gespeichert sein können. (Vgl. Wikipedia, FITS, online)

HDR-Erweiterung für MPEG

Auch ein HDR-Videoformat, das auf der Xvid-Bibliothek basiert, existiert bereits, das einen Dynamikumfang von 12 Lichtwerten aufzeichnen kann. (Vgl. Reinhard, Erik: Imaging, Seite 88)

3. Das Experiment

HDR-Bilder lassen sich also mittels Belichtungsreihen erstellen und konventionelles Filmmaterial erfasst ebenfalls einen hohen Dynamikumfang, als wir es von Videokameras gewohnt sind. Dennoch sind wir weit entfernt von Consumer-HDR Camcordern. Da Filmkameras mit einem erweiterten Dynamikumfang nicht jedermann zugänglich und HDR-Camcorder dem Konsumentenmarkt noch länger entfernt sind, machte ich mich auf die Suche nach einer Möglichkeit mit vorhandenen Mitteln dennoch experimentell HDR-Videos zu erzeugen. Dadurch bin ich auf folgende Idee

gekommen: An unserer Fachhochschule haben wir den Ausrüstungsverleih, bei dem ich mir jede freie Minute zwei baugleichen Kameras auslieh: Zwei Sony HDR-FX7 Kameras, mit denen ich versuchte etwas neues auszuprobieren.

Der Erfolg der Umsetzung war bis zum Schluss durchaus nicht absehbar bzw. offen. Als Notlösung dachte ich mir zwei möglichst nahe nebeneinander gestellte Kameras aus, die das gleiche Motiv aufnehmen sollten. In die Unendliche hätte diese Konstruktion wahrscheinlich funktioniert, nahe Objekte wären jedoch versetzt aufgenommen worden. Die so entstandenen Bilder könnte man nicht übereinander legen, denn nahe an den Kameras platzierte Objekte wären nicht deckungsgleich. Am Rande erwähnt wird dieser Effekt für die Erzeugung von 3D-Bildern benutzt.

Mehrere theoretische - teils waghalsige - Überlegungen bei Spiegel/Prisma-Konstruktionen folgten, als das selbe Motiv in zwei Kameras umlenken wollte. Bei Dreichip-Kameras funktioniert der Trick, indem ein Prisma das Licht aufteilt und es an drei Sensoren weiterleitet. Allerdings wird nicht das gesamte Licht umgelenkt, sondern jeweils das rote, grüne und blaue Licht an einen eigenen Chip umgelenkt, um eine bessere Farbbrillanz zu erhalten.

Bei meinem Experiment leitet ein halbtransparenter Spiegel das Bild durch zu einer Kamera und spiegelt es zu einer anderen.

Um sicher zu gehen, dass der Trick mit dem halbtransparenten Spiegel funktioniert, habe ich mit Cinema 4D den Versuchsaufbau simulieren lassen und Kameras & Testobjekte in einer Szene platziert, sowie (halbtransparente) Spiegel definiert.

Da ein halbtransparenter Spiegel das Licht nicht verdoppelt sondern nur aufteilen kann, kommt bei jeder Kamera nur ein Teil der Ausgangslichtintensität an, was gleich wie beim Ansatz des HDR-Chips der Columbia University, nur einen erweiterten Dynamikumfang nach oben hin zulässt. Obendrein gehen dadurch erst einmal ca. 3 bis 6 dB Dynamikbereich verloren, da das dunkelste aufnehmbare Licht durch den halb-reflektierenden Spiegel noch einmal halbiert wird oder zumindest abgeschwächt wird.

Durch unterschiedliche Belichtung, verursacht durch Veränderung der Blende, Belichtungszeit oder Gain-Wert der Kamera und des Spiegels, erzeugte ich eine Belichtungsreihe bestehend aus zwei Bildern in Form von zwei Videos. Der

Dynamikbereich kann nach oben zu helleren Bildern also durch die zweite Kamera etwa mit einer größeren Blende (kleinere Blendenzahl) deutlich erweitert werden. Damit kann auch das zusätzliche Rauschen von ca 3dB kompensiert werden, was bei Überlagerungen von 2 Bildern durch die statistische Verteilung des Rauschens zwischen den Pixeln und zwischen aufeinanderfolgenden Bildern entsteht. Eine dritte Kamera mit einer korrekten Belichtung wäre zusätzlich sehr hilfreich für ein genaueres HDR-Bild.

Mit einer festgelegten Tool-Kette verarbeitete ich das so gewonnene Material am Computer einem HDR-Video und wandelte das Ergebnis zusätzlich mittels Tonemapping in ein herkömmliches Low-Dynamic-Range Video um, um die Ergebnisse sichtbar zu machen.

Die Qualität von HDR-Bildern lässt sich magisch durch die Anzahl an unterschiedlich belichteten Motiven erhöhen. Jedoch würde der zusätzliche Materialaufwand und die damit verbundenen Kosten meine Möglichkeiten überschreiten, weswegen ich bei meinem Experiment auf die bestmögliche Qualität mit zwei Kameras konzentrierte.

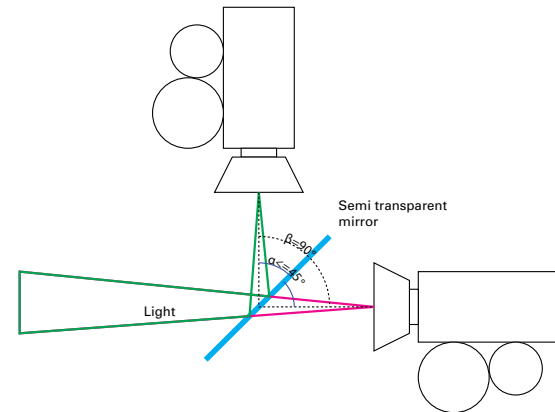


Abb. 3.1. Theorie hinter einem HDR-Camcorder mit zwei Kameras.

Auch von der Seite unseres Verleihs wurden mir Grenzen gesetzt, da nur maximal zwei Kameras des selben Typs zur Verfügung standen. Eine Konstruktion mit mehreren Kameras und Spiegeln würde auch das Maß an Genauigkeit um ein Vielfaches erhöhen.

Doch mit welcher Dynamikumfang-Erweiterung kann man rechnen? Bei einer Belichtungsreihe wird ein Unterschied von zwei Blendenstufen pro Bild empfohlen, den ich auch in meinem Beispiel verwenden möchte. Die 8 Bit bei einer gewöhnlichen

lichen Kamera entsprechen in etwa 48 dB. Eine Erhöhung um 2 Blendenstufen bedeutet eine Vervierfachung der Lichtintensität, was wieder umgerechnet 12 dB entspricht, da 6 dB eine einfache Verdoppelung bedeutet. Das 2-LW Bild ist also um 36 dB mit dem ersten Bild deckungsgleich. Als Schlussfolge sollte das das HDR-Bild einen Dynamikumfang von 60-62 dB abdecken.

Bei meinem Experiment versuchte ich also das exakt gleiche Bild in zwei Kameras umzuleiten, um mittels zwei herkömmlichen Camcordern ein HDR-Video zu erzeugen. Die Einzelbilder sollen im OpenEXR-Bildformat vorliegen. Um außerdem ein Resultat sichtbar zu machen, rechne ich die HDR-Bilder mittels Tonemapping auf 8 Bit-Versionen herunter und erzeuge so eine Animation.

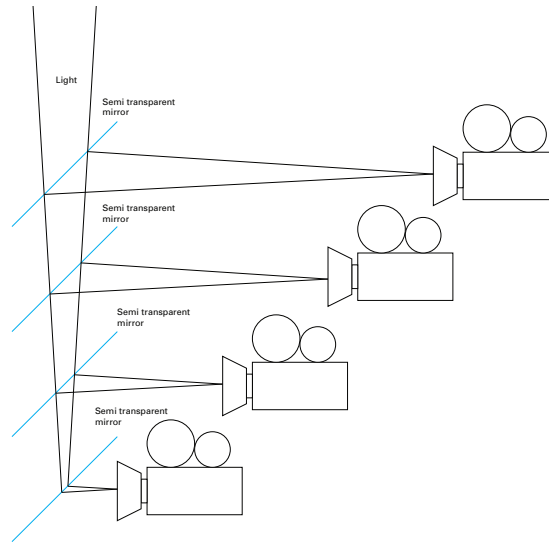


Abb. 3.2. Theorie hinter einem HDR-Camcorder mit mehreren Kameras.

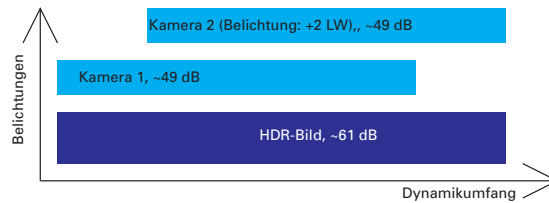


Abb. 3.3. Ein 3:2 Bild in einem rechten Winkel



Abb. 3.4. Belichtungsreihe, erstellt mit einer Spiegelreflexkamera.

3.1 Die Konstruktion

Wie bei so vielen Konstruktionen ist ein Histogramma an Präzision und Stabilität unerlässlich. Schließlich geht es darum zwei Kameras pixelgenau zu positionieren. Für solche Versuchsaufbauten gibt es zahlreiches Zubehör, das eine Platzierung von Linsen, Lichtern, Lasern und Kameras mehr als millimetergenau auf der X-/Y- und Z-Achse zulässt.

Leider kostet solch ein professionelles System 575, was mein Budget wesentlich be-
 rüstete. Also musste ich mich mit den Mitteln unserer wirklich lobenswert ausgestatteten internen Fachhochschule-Werkstatt auskommen. Um nicht mit Holzfällermethoden im Experimentallabor zu scheitern, entwickelte ich doch einige Methoden, die mir zumindest eine optische Kontrolle



Abb. 3.5. Aus der Belichtungsreihe erzeugtes HDR-Bild und anschließend mit extremen Tonemapping-Einstellungen heruntergerechnetes Bild.

und Korrektur für die notwendige Präzision zu erlauben.

Da der Winkel von Kamera 1 zum Spiegel gleich dem Winkel von Spiegel zu Kamera 2 sein muss, war ich auf einen genau definierten Winkel angewiesen. Für die Konstruktion stellte sich heraus, dass ein Winkel von 45° am leichtesten einzuhalten war. Linien, die normal zur Holzkante verlaufen, ließen mir eine Kontrolle des Winkels zu, da sich die Linien im Spiegel spiegelten. Wenn die spiegelnden Linien parallel zu den durchscheinenden Linien verlaufen, dann befindet sich der Spiegel in einem 45° -Winkel zu den gewünschten Kamerapositionen.

Mittels zwei Laptops richtete ich beide Kameras optisch zueinander aus. Geringe Feinjustierungen der Bilder können mittels Rotation und Skalierung auch teilweise in der Software noch nachträglich vorgenommen werden, wobei dadurch optische Verzerrungen nicht wirklich ausgeglichen werden können.

3.2 Die Kameras

Bei meinem Versuchsaufbau benutzte ich zwei Sony HDR-FX7 Kameras. Bei dieser Kamera lassen sich Blende-, Belichtungszeit- und Gainwert-Automatik deaktivieren und im Bedarfsfall mehr oder weniger komfortabel nachregeln. Das verwendete HDV Format nimmt mit einer Auflösung von 1440×1080 Pixeln auf und beruht auf dem High Definition 1080i-Standard. Das von der FX7 verwendete Interlace-Verfahren verarbeitet 50 Halbbilder pro Sekunde zu 25 vollen Bildern. Der 1080i-Modus der FX7 definiert Pixel nicht quadratisch sondern anamorphotisch ($1,333:1$), um ein Seitenverhältnis von $16:9$ zu erlangen.



Abb. 3.6. Ein 3:2 Bild in einem rechten Winkel



Abb. 3.7. Justierung der Kameras.

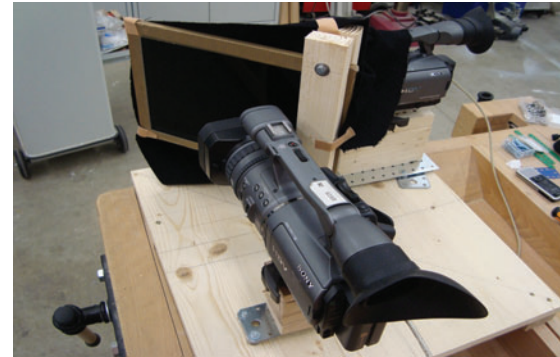


Abb. 3.8. Eine Kamera nimmt das gespiegelte Bild auf, während eine weitere durch den halbdurchsichtigen Spiegel filmt.

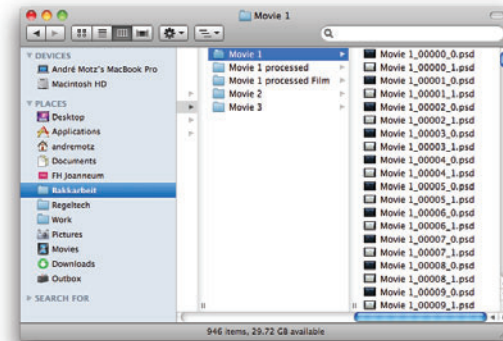


Abb. 3.9. Die aus den zwei Videos erzeugte Belichtungsreihe in einem Ordner.

Bei den meisten Versuchen nahm ich dabei direkt auf zwei MacBooks über den Firewire-Ausgang auf. Zuerst importierte ich die entstandenen Videos in After Effects, um einige Korrekturen vorzunehmen. Danach synchronisierte ich die zwei Videos framegenau, was für die folgenden Schritte essentiell ist.

Als nächstes versuchte ich mittels Überlagerung der zwei Videos optische Ungleichheiten auszugleichen. Durch die Scale-, Rotate- und Position-Werte lassen sich so zwar noch kleinste Abweichungen ausgleichen, die ich mit meiner mechanischen Konstruktion nicht ausbessern konnte, perspektivische Verzerrungen können aber nicht wirklich korrekt ausgeglichen werden. Die so entstandenen Sequenzen rechnete ich Photoshop-Bildsequenzen heraus, um sie weiter mit Photomatrix zu bearbeiten. Die Bilder wurden im Format Dateiname_Framennummer_0.psd für den überbelichteten Frame, bzw. Dateiname_Framennummer_1.psd für den unterbelichteten Frame im selben Ordner abgespeichert, wodurch sich eine für Photomatrix' Batchfunktion leicht verarbeitende Belichtungsreihenfolge ergibt.

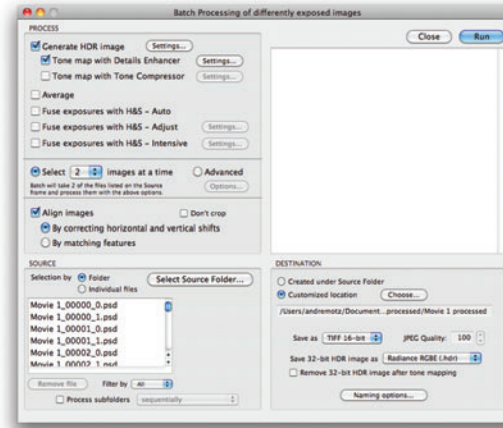


Abb. 3.10. Photomatrix-Dialog für die automatisierte Erzeugung von HDR-Bildern.

In Photomatrix lassen sich die vorher gewonnenen Bildsequenzen mittels der Batch Processing Funktion in einem Arbeitsschritt zu HDR- und getonemappten Bildern umrechnen. Eine 18-sekündige Videosequenz-Berechnung dauerte auf meinem MacBook Pro (2,6 GHz, 2 GB Ram) in etwa eine dreiviertel Stunde.

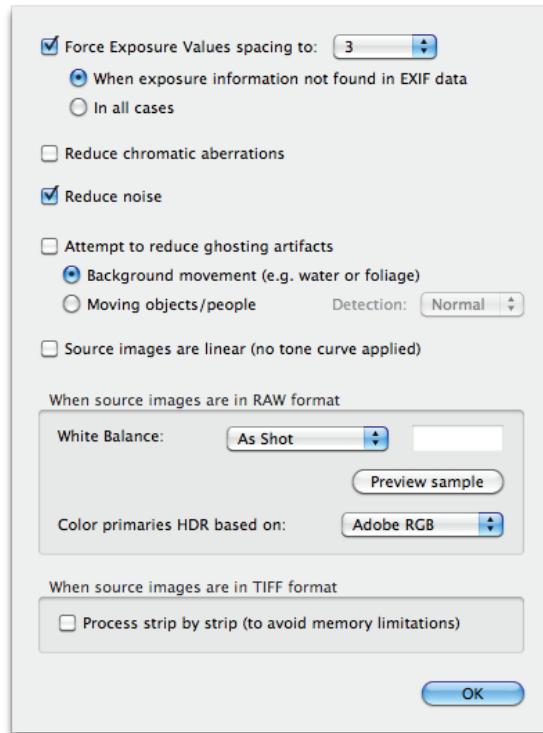


Abb. 3.11. Einige Einstellungen für die Erzeugung der HDR-Bilder.



Abb. 3.12. Einer der ersten Versuche.



Abb. 3.13. Das Prinzip klappt im Grunde genommen, es muss aber noch die Präzision erhöht werden.

Da jegliche Exif-Informationen in der so entstandenen Bildsequenz fehlen, muss der Belichtungsabstand manuell eingegeben werden, der sich aus der Kamerablende, Belichtungszeit, Gain und den Eigenschaften des Spiegels ergibt.

Im nächsten Dialog lassen sich einige Optionen für das Erstellen des HDR Bildes festlegen. Sehr nützlich sind dabei Photomatix' Algorithmen gegen Bewegungen im eigentlichen Bild.

Als Resultat liefert Photomatix eine getone-mappte Tiff-Bildsequenz und zusätzlich eine HDR-Bildsequenz, die sich beide weiter mit After Effects bearbeiten lassen. In den meisten Fällen klappte die automatische Ausrichtung der Quellbilder. In After Effects lässt sich die Bildsequenz ohne weiteres importieren und als eigenständiges Quicktime-Animation Video exportieren. Da After Effects erfreulicherweise ein sehr import- und exportfreudiges Programm ist, kann man auch OpenEXR-, Radiance- und die schon erwähnten Tiff-Bildsequenzen exportieren. Das Programm bietet grundsätzlich die Unterstützung für HDR-Bildformate, es lassen sich aber viele Effekte im 32 Bit Modus nicht verwenden.

3.3 Störfaktoren , Probleme, weitere Verbesserungsmöglichkeiten

Damit mein Experiment auch ein gutes Ergebnis liefert, müssen zahlreiche Faktoren beachtet und in die Planung mit einbezogen werden. So führt primär folgende Punkte zum gewünschten Ergebnis:

- die Positionierung der Kameras und des Spiegels untereinander
- die Qualität des halbtransparenten Spiegels
- richtige Einstellungen bei den Kameras
- die mechanische Stabilität der gesamten Versuchsanordnung
- Die Positionierung der Kameras und des Spiegels untereinander



Abb. 3.14. Doppelspiegelung.



Abb. 3.15. Halbtransparenter Spiegel.

Der größte Störfaktor den es zu minimieren gab, war die exakte Positionierung der vorausberechneten Positionierung zum Spiegel. Ein genau gleiches Bild entsteht dann in beiden Kameras, wenn folgende Kriterien berücksichtigt werden:

- Die Kameras müssen im exakt gleichen Abstand zum Spiegel platziert sein.
- Beide Kameras müssen den gleichen Winkel von $\leq 45^\circ$ zum Spiegel aufweisen.

Die Qualität des halbtransparenten Spiegels

Beim Experiment suchte ich längere Zeit nach halbtransparenten Spiegeln. Als nicht ideale, aber dennoch brauchbare Lösung verspiegelte ich zuerst eine Glasscheibe mit einer halbtransparenten Folie, die $3/4$ des anfallenden Lichts reflektiert, wodurch $1/4$ Licht durchdringen konnte. Doch die von einem eBay-Händler erworbenen Folie lieferte nicht annähernd die gewünschte Qualität, weswegen ich meine Versuche mit zwei farbneutralen, hintereinander-gestellten Glasscheiben fortsetzte. Der Gedanke dahinter war, dass dunkle Scheiben mehr Licht reflektieren sollten und als Nebeneffekt für die Unterbelichtungs-Kamera das

Bild weiter verdunkeln. Weiteres Kopfzerbrechen bereitete mir die Tatsache, dass vor allem der erste Spiegel eine sichtbare Doppelspiegelung verursachte, was dazu führte, dass sich das spiegelnde Bild nur unscharf aufnehmen lie.

Ein guter Spiegel ist für ein gutes Bild von wirklich wichtiger Bedeutung. Leider vermindert theoretisch jede dazwischengesetzte Glasscheibe den Kontrast und die Farben, was wohl auch den Preis der teuren Oberklasse-Objektive für Spiegelreflexkameras erklärt...

Gleiche Einstellungen

Vor jedem Versuch überprüfte ich beide Kameras auf gleiche Einstellungen in den Untermens, da jede Abweichung das Bild beeinflussen könnte.

Die Brennweite

Sobald die Brennweite einer Kamera nicht mehr mit der anderen übereinstimmt, entstehen bedingt durch den Aufbau des Experiments auch zwei unterschiedliche Bilder in den Kameras. Die exakt gleiche Brennweite lässt sich nur theoretisch einstellen - praktisch jedoch können sich durch Fertigungsunterschiede kleinste Abweichungen ergeben.

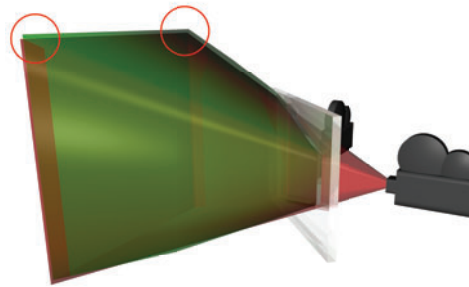


Abb. 3.16. Die zwei sich gegenüberliegenden Blickwinkel der Kameras sind nicht korrekt zueinander ausgerichtet, wodurch optische Fehler im Video erzeugt werden.



Abb. 3.17. Frame Timing- Ungenauigkeit. Man beachte den unterschiedlichen Abstand zwischen Jacke und Baumstamm beider Bilder.

Zur Einstellung der gleichen Brennweite beziehe ich mich dabei auf einen fest definierten Abstand der Kamera zu einem optischen Gitter. Das Bild der ersten Kamera muss dabei mit dem der zweiten übereinstimmen.

Plaziert man Objekte in der Tiefe des Raumes, so hilft das immens bei der Justierung der Kameras. Man kann sich das ein bisschen wie ein Fadenkreuz eines Gewehres vorstellen: Erst wenn sich beide Fadenkreuze übereinlagern, weiß man als Schütze, worauf man schießt.

Bei meiner Justierung war das Ziel, dass beide Kameras sozusagen beide Fadenkreuze übereinandergelegt sahen.

Die Zeitsynchronisation

Auf den ersten Blick stellt sich das Problem der synchronen Kameras nicht wirklich, weil bei den späteren Arbeitsschritten die zwei entstandenen Videos Bild-für-Bild bearbeitet werden. Sie lassen sich somit framegenau schneiden und übereinanderlegen. Tatsächlich bedeutet eine Frame-Genauigkeit aber nur eine Genauigkeit von 1/25 Sekunden = 0.04 Sekunden, was sich bei einer schnellen Bewegung schon mal gewaltig auswirken kann.

Abhilfe könnte hier ein aus dem Bereich der digitalen Audiotechnik bekannter Wordclock-Generator schaffen: Um signalverarbeitende Geräte wie Soundkarten und Sequencer synchron zu halten, verwendet man ein solches Gerät. Asynchron laufende Soundprozessoren können schnell Störungen wie Klick- und Pop-Geräusche verursachen, und senken damit erheblich die Soundqualität.

Die fehlenden Belichtungsinformationen

Moderne Digitalkameras speichern noch zusätzliche Informationen direkt in die eigentlichen JPEG- oder RAW-Bilder, wie die für die HDR-Bilder interessante Belichtungszeit, verwendete Blende und ISO-Wert. Mit den vorhandenen Daten weiß die HDR-Software ohne weiteres, wie sie das aktuelle LDR-Bild im Verhältnis zu den anderen Bildern zu verarbeiten hat.

Da ich meine Einzelbilder aus dem aufgenommenen Video beziehe, fehlen mir diese Daten. Ein Dialog zu Beginn des Herstellungsprozesses fordert mich auf die fehlenden Informationen anzugeben, was mich bei meinem Experiment auf eine gleichbleibende Belichtung beschränkt, da ich nicht die Belichtungsveränderung nachträglich nachvollziehen kann.

Eine brauchbare Lösung ist aber vorher die genauen Kameraeinstellungen zu notieren. Eine Konstante ist dabei der von mir verwendete Spiegel, dessen Lichtreflexions-Werte und Lichtdurchlass-Werte mit einem Belichtungsmesser messen lassen. Mit den Blenden-, Gain- und Belichtungs-einstellungen der Kameras lassen sich die fehlenden Metadaten aber verkraften.

Schlussfolgerungen

Videochips mit erweitertem Dynamikbereich wurden erst in den letzten Jahren entwickelt. Dadurch lässt sich eine HDR-Videoerzeugung ohne den Umweg über halbtransparente Spiegel erreichen. Die meisten Sensorchips befinden sich aber noch in der Entwicklungsphase oder haben eine noch relativ geringe Pixelauflösung. Die Tatsache, dass der Spiegel die Bildqualität in der Farbqualität und Kontrast mindert aber vor allem das anfallende Licht gravierend minimiert, ist keine gute Voraussetzung.

Dennoch bietet das Prinzip einige Vorteile im Vergleich zur Belichtungsreihen-Erzeugung durch einen Chip: Eine exakte Synchronisation würde zwei zeitlich exakt gleiche Videos ermöglichen, durch die auch feinste Bewegunterschiede vermieden werden könnten. Durch das doppelt vorhandene Bild könnten auch der Rauschabstand erhöht werden.

Schon heute werden Chips mit einem höheren Dynamikumfang verbaut, vor allem in Kameras der Profiklasse. Eine nichtlineare Abtastung des Dynamikbereiches, wie man es auch von Film gewohnt ist, erhöht den subjektiv wahrgenommenen Dynamikumfang. Die benötigten Belichtungszeiten für einen Bildsensor werden immer kürzer. Die so gewonnene Zeit kann für eine Belichtungsreihe genutzt werden, um mehrere HDR-Bilder pro Sekunde zu erzeugen.

Literaturverzeichnis

- Askey, Phil:
Canon EOS 450D / Digital Rebel XSi, <http://www.dpreview.com/news/0801/08012403canoneos450d.asp>,
zuletzt aufgerufen am 13.01.2010
- Bloch, Christian:
Das HDRI-Handbuch. High Dynamic Range Imaging für Fotografen und Computergrafiker,
Heidelberg: dpunkt.verlag GmbH,
2008
- Dirk Hertel, Herve Marechal, Daniel A. Tefera, Wensheng Fan & Rich Hicks:
A low-cost VIS-NIR true color night vision video system based on a wide dynamic range CMOS imager.
Intelligent Vehicles Symposium, 2009 IEEE,
Juni 2009

- Dirk Hertel, Andrew Betts, Rich Hicks & Machiel ten Brinke:
An adaptive multiple-reset CMOS wide dynamic range imager for automotive vision applications,
Intelligent Vehicles Symposium, 2008 IEEE, Juni 2008
- Formumbenutzer:
Dynamikumfang - oder der Versuch eine ewige Verwirrung aufzuklären,
[http://www.dslr-forum.de/showthread.php?t=364384,](http://www.dslr-forum.de/showthread.php?t=364384)
zuletzt aufgerufen am 13.01.2010
- Forumbenutzer:
40D - automatische Belichtungsreihe / HDR,
[http://www.dslr-forum.de/showthread.php?t=268073,](http://www.dslr-forum.de/showthread.php?t=268073)
zuletzt aufgerufen am 14.01.2010
- Jian Guo & Sameer Sonkusale:
A High Dynamic Range CMOS Image Sensor for Scientific Imaging Applications.
Erschienen in IEEE SENSORS JOURNAL, VOL. 9, NO. 10, Oktober 2009
- HDMI Licensing:
HDMI Glossary,
[http://www.hdmi.org/learningcenter/glossary.aspx#30,](http://www.hdmi.org/learningcenter/glossary.aspx#30)
zuletzt aufgerufen am 13.01.2010
- Helmers, Henner:
Dynamik-Umfang,
[http://www.henner.info/hell.htm,](http://www.henner.info/hell.htm)
zuletzt aufgerufen am 13.01.2010
- Hoefflinger, Bernd:
High-Dynamic Range (HDR) Vision. Microelectronics, Image Processing, Computer Graphics,
Berlin: Springer, 2007
- Anton Kachatkou & Roelof van Silfhout:
Dynamic Range Enhancement Algorithms for CMOS Sensors With Non-Destructive Readout.
IEEE International Workshop on Imaging Systems & Techniques - IST 2008, 2008

- Pei-Ying Lu, Tz-Huan Huang, Meng-Sung Wu, Yi-Ting Cheng & Yung-Yu Chuang:
High dynamic range image reconstruction from hand-held cameras.
Computer Vision and Pattern Recognition, 2009. CVPR 2009. IEEE Conference, Juni 2009
- Maschwitz, Stu:
Digital Cinema Dynamic Range,
<http://prolost.com/blog/2008/2/22/digital-cinema-dynamic-range.html>,
zuletzt aufgerufen am 14.01.2010
- Maxim:
Data Conversion Calculator,
http://www.maxim-ic.com/tools/calculators/index.cfm/calc_id/maxim_sinad,
zuletzt aufgerufen am 17.01.2010
- Vikas Ramachandra, Matthias Zwicker & Truong Nguyen:
HDR Imaging From Differently Exposed Multiview Videos.
3DTV Conference: The True Vision - Capture, Transmission and Display of 3D Video, Mai 2008
- Reinhard, Erik:
High Dynamic Range Imaging.: Acquisition, Display, and Image-Based Lighting,
San Francisco: Morgan Kaufmann, 2006
- Pierre-François Re-di, Pascal Heim, Steve Gyger, François Kaess, Claude Arm, Ricardo Caseiro, Jean-Luc Nagel, Silvio Todeschini:
An SoC Combining a 132dB QVGA Pixel Array and a 32b DSP/MCU Processor for Vision Applications.
ISSCC 2009 / SESSION 2, 2009
- P.-F. Re-di, P. Heim, S. Gyger, F. Kaess, C. Arm, R. Caseiro, J.-L. Nagel, S. Todeschini:
An SoC combining a 132dB QVGA pixel array and a 32b DSP/MCU processor for vision applications.
Solid-State Circuits Conference - Digest of Technical Papers, 2009. ISSCC 2009. IEEE International,
Februar 2009

- Senpiel, Eberhard:
Wie kann man dB berechnen? - dB-Rechner,
<http://www.sengpielaudio.com/Rechner-db.htm>,
zuletzt aufgerufen am 13.01.2010
- Yuanyuan Shang, Weigong Zhang, Yong Guan, Xiaohui Tan:
Research on a Method to Extend Dynamic Range of CMOS APS.
IEEE International Workshop on Imaging Systems & Techniques - IST 2008, 2008
- Arthur Spivak, Alexander Belenky, Alexander Fish, Orly Yadid-Pecht:
Wide-Dynamic-Range CMOS Image Sensors Comparative Performance Analysis.
IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, VOL. 56, NO. 11,
November 2009
- The Vision and Image Sciences Laboratory:
Adaptive Sensitivity ,
<http://visl.technion.ac.il/research/isight/AS/>,
zuletzt aufgerufen am 13.01.2010
- Ward, Greg:
High Dynamic Range Image Encodings,
http://www.anyhere.com/gward/hdrenc/hdr_encodings.html,
zuletzt aufgerufen am 20.01.2010
- Webers, Johannes:
Film- und Videotechnik. Die Aufnahme, Speiherung, Bearbeitung und Wiedergabe audiovisueller Programme,
Poing: Franzis Verlag GmbH, 2000
- Wikipedia:
FITS,
<http://en.wikipedia.org/wiki/FITS>,
zuletzt aufgerufen am 13.01.2010
- Wikipedia:
High Dynamic Range Image,
http://de.wikipedia.org/wiki/High_Dynamic_Range_Image,
zuletzt aufgerufen am 13.01.2010

- Wikipedia:
High Dynamic Range Imaging,
http://en.wikipedia.org/wiki/High_dynamic_range_imaging,
zuletzt aufgerufen am 14.01.2010
- Willis, Nathan:
High Dynamic Range images under Linux,
<http://www.linux.com/archive/articles/50413>,
zuletzt aufgerufen am 13.01.2010
- Takayoshi Yamada, Shigetaka Kasuga, Takahiko Murata, Yoshihisa Kato:
A 140dB-Dynamic-Range MOS Image Sensor with In-Pixel Multiple-Exposure Synthesis.
ISSCC 2008 / SESSION 2, 2008
- Chia-Nan Yeh, Yen-Tai Lai, Jui-Yu Chang:
A logarithmic CMOS digital pixel sensor.
TENCON 2008 - 2008 IEEE Region 10 Conference, November 2008
- Ziegler, André:
Blende als Angabe der Belichtung,
http://www.andreziegler.de/c/blendeblendenstufen,3_46.html,
zuletzt aufgerufen am 13.01.2010

Abbildungsverzeichnis

- **Abb. 1.1:** Gustave Le Gray, Mediterranean Sea, http://arthistory.about.com/od/from_exhibitions/ig/gustave_courbet_2008/mma_gc_11.htm
- **Abb. 1.2:** Time-Cover, 12. April 1954, <http://www.time.com/time/covers/0,16641,19540412,00.html>
- **Abb. 2.3:** Adobe Photoshop HDR-Beispiel, © Adobe Systems Incorporated
- **Abb. 2.4:** Moderater Details Enhancer, © Adobe Systems Incorporated
- **Abb. 2.6:** Extremer Details Enhancer., © Adobe Systems Incorporated
- **Coverfoto:** © Gerfried Guggi

