



UNIVERSITÄT
KOBLENZ · LANDAU

Fachbereich 4: Informatik

Vertrauenswürdiges HDR-Tonemapping

Studienarbeit

im Studiengang Computervisualistik

vorgelegt von
Annabell Langs

Betreuer: Dipl.-Inform. Jakob Bärz, Prof. Dr.-Ing. Stefan Müller
Institut für Computervisualistik, AG Computergraphik

Koblenz, im Oktober 2009

Aufgabenstellung für die Studienarbeit Annabell Langs (205 210 184)

Thema: Vertrauenswürdiges HDR Tonemapping

Das visuelle System des Menschen ist in der Lage, sich an Beleuchtungsverhältnisse zu adaptieren, die nahezu zehn Größenordnungen umfassen. Dieser dynamische Kontrast beschreibt das Verhältnis zwischen maximaler wahrnehmbarer Leuchtdichte, beispielsweise im hellen Sonnenlicht, und minimaler Leuchtdichte, die z.B. bei Sternenlicht auftritt. Selbst im adaptierten Zustand kann der Mensch Kontrastverhältnisse von etwa 4000:1 erfassen. Trotz des aktuellen Trends moderner Displays, immer höhere Leuchtdichten und dunklere Schwarzwerte wiederzugeben, übersteigt der Dynamikumfang vieler realer und virtueller Szenarien die technischen Möglichkeiten der Ausgabegeräte. In diesen Fällen ist eine Kompression des Dynamikumfangs notwendig, das so genannte Tonemapping.

Seit dem sich in der Wissenschaft ein Bewusstsein für diese Problematik entwickelt hat, wurden viele Tonemapping Operatoren mit unterschiedlichen Zielsetzungen (z.B. Berechnungsdauer minimieren, Vereinfachung der Benutzerparameter) veröffentlicht.

Ziel dieser Arbeit ist es, einen Tonemapping Operator zu entwickeln, der nicht ein „schönes“ Ergebnis liefert, sondern eine vertrauenswürdige. Es gilt die Frage zu beantworten, ob bereits vorhandene Tonemapping Operatoren eine hohe Glaubwürdigkeit in ihre Ausgabebilder vermitteln können. Anhand dieser Ergebnisse ist ein eigener bzw. verbesserter Tonemapping Operator zu implementieren, der vertrauenswürdige Bilder liefern kann. Dieses Ziel ist insbesondere durch eine Evaluation der Tonemapping Operatoren - sowohl der bereits vorhandenen als auch des selbst entwickelten - durch Testpersonen anhand von Testszenen zu prüfen und stellt daher einen Schwerpunkt dieser Arbeit dar.

Schwerpunkte dieser Arbeiten sind:

1. Einarbeitung in verschiedene Tonemapping Operatoren und deren Vor- und Nachteile
2. Evaluation vorhandener Tonemapping Operatoren auf Vertrauenswürdigkeit ihrer Ausgaben
 - Aufstellung verschiedener Testszenarien
 - Kriterien erarbeiten, nach denen die Testpersonen die Testszenen beurteilen sollen
3. Implementierung eines Tonemapping Operators mit dem Ziel einer hohen Vertrauenswürdigkeit in die Ergebnisbilder und entsprechende Evaluation durch Testpersonen anhand von Testszenen. Vorhandene Tonemapping Operatoren sollen zum Vergleich herangezogen werden.

Koblenz, den

7.4.9

S. Müller

- Prof. Dr. Stefan Müller -

Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Ja Nein

Mit der Einstellung der Arbeit in die Bibliothek bin ich einverstanden.

Der Veröffentlichung dieser Arbeit im Internet stimme ich zu.

.....
(Ort, Datum)

.....
(Unterschrift)

Danksagung

Die Durchführbarkeit dieser Studienarbeit wäre ohne die Mithilfe einiger Personen so nicht möglich gewesen.

Daher möchte ich mich insbesondere bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Müller und Dipl. Inform. Jakob Bärz für die Inspiration und Motivierung zu diesem Thema bedanken. Jakob Bärz möchte ich darüber hinaus für seine allzeit offene Tür danken, ohne die einige interessante Ideen und Gedanken nicht zustanden gekommen wären.

Bei meinem Bruder Andreas möchte ich mich für die Bereitstellung seiner digitalen Spiegelreflexkamera bedanken, ohne die ein großer Teil dieser Studienarbeit nicht möglich gewesen wäre und deren vielfältige Einstellungsmöglichkeiten mich darüber hinaus stets motiviert haben, mich tiefer mit der Materie der HDR Fotografie zu befassen.

Tobias Klee gilt mein Dank für die großzügige Hilfe bei der Konstruktion der weißen Box. In der hitzigen Zeit der Evaluation stand mir darüber hinaus auch Jakob Bärz tatkräftig zur Seite. Ein besonderer Dank geht an Dipl. Inform. Stefan Rilling, der mir sein Büro für die eigentliche Evaluation während seines Urlaubes zur Verfügung stellte.

Herzlichen Dank an alle Testprobanden, die sich teilweise sehr kurzfristig dazu bereit erklärt haben bei meiner Evaluation teilzunehmen.

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	1
I Theoretische Grundlagen	2
1 Menschliche Wahrnehmung	2
2 Bestehende Tonemapping Verfahren	3
2.1 Einführung	4
2.2 Vorhandene Tonemapping Operatoren	4
2.2.1 Globale Tonemapping Operatoren	4
2.2.2 Lokale Tonemapping Operatoren	5
2.2.3 Frequenz- und Gradientendomänen Operatoren und Ähnliche	6
2.3 Kriterien für Vertrauenswürdigkeit	7
2.4 Bewertung der Tonemapping Operatoren	9
II Praktische Umsetzung	12
3 Testszenerien	12
3.1 Erstellung der HDR Bilder mittels (LDR-)Kamera	13
3.2 Erstellung der Boxszene	15
4 Vertrauenswürdiger Tonemapping Operator	15
4.1 Idee: Interaktiver Tonemapper	16
4.2 Implementation	16
4.2.1 Entwicklungsumgebung und Bibliotheken	17
4.2.2 Implementierte Funktionalitäten	18
4.2.3 Implementierungsdetails	19
III Ergebnisse und Bewertung	23
5 Evaluationsvorgehen	23
5.1 Zu beantwortende Fragestellungen	23
5.2 Allgemeiner Fragebogen	23

5.3	Aufgabenstellungen	24
5.4	Durchführung	27
6	Bewertung der Evaluationsergebnisse	28
6.1	Auswertung Aufgabe 1: Gedächtnisvergleich	28
6.2	Auswertung Aufgabe 2: Direktvergleich	31
6.2.1	Normierte Daten	31
6.2.2	Kurven getrennt nach Kenntnisstand	33
6.2.3	„Normalbeobachterkurve“	35
6.2.4	Kontrollpunkte	35
6.2.5	Auswertung der allgemeinen Fragen	36
6.3	Auswertung Aufgabe 3: Vergleich der Tonemapper	37
6.4	Gesamtbewertung	39
7	Vergleich mit anderen Evaluationen	40
7.1	Studien	40
7.2	Vergleich	41
	Zusammenfassung und Ausblick	43
	Abbildungsverzeichnis	45
	Literatur	46

Einleitung

Die Ausgabe von immer echter und realistischer aussehenden Bildern auf Bildschirmen ist heute ein wichtiger Bestandteil in der Konzeption, Präsentation und Simulation von neuen Produkten in der Industrie. Trotz der auch immer physikalisch echter werdenden Grafiksimulationen ist man bei der Ausgabe auf Bildschirme angewiesen, die einen limitierenden Faktor darstellen: Leuchtdichten in Simulationen gehen dabei weit über tatsächlich darstellbare Leuchtdichten von Monitoren hinaus. Das menschliche Auge ist hingegen in der Lage einen großen Dynamikumfang zu sehen, sich an gegebene Beleuchtungsverhältnisse anzupassen und auch kleinste Unterschiede in der Helligkeit einer Szene wahrzunehmen.

Für die Ausgabe solcher High Dynamic Range Bilder auf herkömmlichen Monitoren müssen sogenannte Tonemappingverfahren jene Bilder auf den darstellbaren Bereich reduzieren. Manche dieser Verfahren bedienen sich dabei direkt der Physiologie des Auges, um eine realistische Ausgabe zu erzeugen, andere dienen eher zur Stilisierung.

Ziel dieser Studienarbeit ist es ein Tonemappingverfahren zu entwickeln, das ein *vertrauenswürdiger* Ergebnis liefert. Ein solches Ergebnis ist erreicht, wenn der Betrachter eines solchen Bildes keine Unstimmigkeiten im Bild vorfindet, die der Realität widersprechen. Der Gesamteindruck soll dem entsprechen, was der Nutzer sehen würde, stünde er direkt neben der aufgenommenen Szene. Für eine abschließende Evaluation wurde insbesondere eine reale Boxszene am Computer nachmodelliert und gerendert. Neben einem HDR Foto kann damit der neu entstandene Tonemapping Operator untersucht und mit bereits vorhandenen Tonemappingverfahren verglichen werden. 13 Probanden haben bei dieser Evaluation teilgenommen um die Leistungsfähigkeit und Qualität zu bewerten.

Teil I

Theoretische Grundlagen

1 Menschliche Wahrnehmung

Um die Notwendigkeit von Tonemapping verstehen zu können, ist die Kenntnis über die menschliche Wahrnehmung unserer Umgebung wichtig. Unser Auge ist derart leistungsfähig, dass reale Szenen nicht ohne weiteres verlustlos auf einem Bildschirm wiedergegeben werden können. Das menschliche Auge kann Leuchtstärken von nahezu 14 Logarithmusstufen wahrnehmen. Nicht nur im Sonnenlicht ist die Umgebung für uns wahrnehmbar – auch in der Nacht kann das Auge durchaus noch einiges erkennen. Das menschliche Auge besteht aus der Netzhaut, die aus den lichtempfindlichen Stäbchen und Zapfen besteht. Die Stäbchen sind für das Nachtsehen (skoptisches Sehen) zuständig. Sie decken einen Leuchtdichtebereich von 10^{-6} bis $10 \frac{cd}{m^2}$ zu Ungunsten der Erkennbarkeit von Details und Farbe ab. Im Bereich von 0,01 bis $10^8 \frac{cd}{m^2}$ sind die Zapfen tätig und erlauben uns somit das photopische Sehen. Zwischen 0,01 und $10 \frac{cd}{m^2}$ (mesoptischer Bereich, Dämmerungssehen) sind beide Photorezeptoren aktiv. Insgesamt sind damit Kontraste von bis zu 1:10.000 für das menschliche Auge unterscheidbar [RWPD09].

Diese Dimensionen lassen das eigentliche Problem der Bildaufnahme und Bildwiedergabe erahnen: Was das Auge leisten kann, müsste zur realistischen Aufnahme bzw. Wiedergabe auch eine Kamera bzw. ein Bildschirm leisten. Die heutige Technik erlaubt es uns Bilder mit speziellen HDR-Kameras in ihrem gesamten *Dynamikumfang* (High Dynamic Range) aufzunehmen, also sowohl dunkle als auch helle Bereiche mit all ihren Details zu speichern. Jene Kameras sind allerdings eher nur im wissenschaftlichen Bereich vertreten. Auch mit handelsüblichen Kameras ist eine derartige Aufnahme möglich (siehe Kapitel 3.1). Zur Wiedergabe benötigt man ebenfalls ein Gerät, welches diese Daten in ihrer gesamten Fülle darstellt. Üblicher ist aber die Wiedergabe auf gewöhnlichen Bildschirmen. Es findet demzufolge eine Konvertierung von HDR nach LDR, der sogenannten Low Dynamic Range, statt. Für diesen Zweck benötigt man das sogenannte Tonemapping, welches die HDR Bilder auf den vom Monitor abbildbaren Bereich komprimiert.

Darüber hinaus gibt es noch einige weitere wichtige Faktoren in unserer Wahrnehmung, die für das Thema High Dynamic Range relevant sind. Dazu zählt, dass sich das Auge oftmals an Beleuchtungssituationen adaptieren muss. Für diese Adaption benötigt es unterschiedlich lange: Befindet man sich in einem dunklen Raum und möchte danach in die Sonne, so geschieht die *Helladaption* innerhalb weniger Sekunden. Andersrum dauert dieser

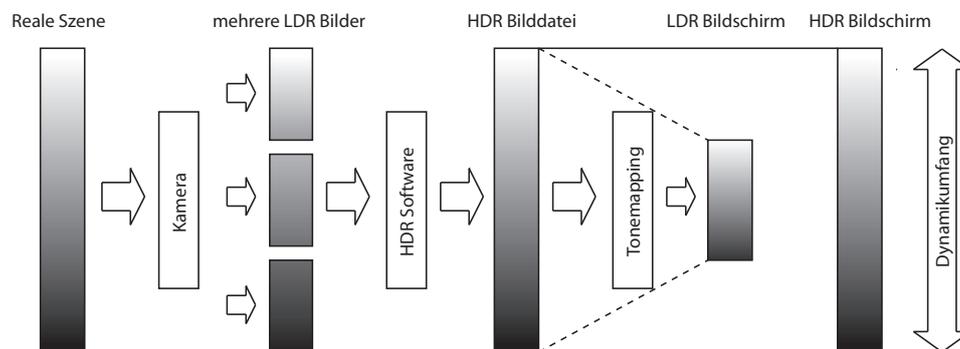


Abbildung 1: Tonemapping „Pipeline“ nach [Jac07]

Prozess, *Dunkeladaption* genannt, mehrere Minuten. Das Auge ist darüber hinaus auch in der Lage *lokale Adaptionen* durchzuführen, d.h. sowohl das Tageslicht draußen als auch den vergleichsweise sehr dunklen Monitor im Zimmer zeitgleich zu erkennen [Saw06].

Weiterhin ist hervorzuheben, dass das menschliche visuelle System empfindlicher auf relative statt auf absolute Leuchtdichten reagiert. Dies bedeutet, dass der Mensch in einer Szene Leuchtdichten schlecht absolut erkennen kann, dafür aber Leuchtdichteunterschiede sehr gut ausmachen kann – das Auge sieht also relativ.

Die Fähigkeit auch in der Dunkelheit Details zu erkennen, ist unter anderem der logarithmischen Reizbewertung des Auges zu verdanken [Löf03]. Sie stellt die Basis für viele Tonemappingoperatoren dar, die eine perzeptiv gleiche Wahrnehmung erreichen möchten. Verdoppelt sich beispielsweise die Leuchtdichte einer Lichtquelle, so nehmen wir die Helligkeitsverdoppelung nicht linear sondern logarithmisch wahr. Stellen wir einen Bildschirm z.B. zuerst auf $50 \frac{cd}{m^2}$ und danach auf $100 \frac{cd}{m^2}$, so werden wir kaum einen Helligkeitsunterschied erkennen und schon gar nicht die zweite Einstellung als doppelt so hell empfinden.

2 Bestehende Tonemapping Verfahren

Neben der Erstellung eines eigenen vertrauenswürdigen Tonemapping Operators ist es das Ziel dieser Studienarbeit, ebenso bereits vorhandene Verfahren zu untersuchen und in eine abschließende Bewertung mit einzubeziehen. Daher wird im Folgenden ein Überblick über bestehende Tonemapping Operatoren gegeben und erläutert, inwiefern man diese miteinander vergleichen kann.

2.1 Einführung

Bilder mit hohem Dynamikumfang lassen sich mit sogenannten Tonemapping Operatoren derart komprimieren, dass sie auf herkömmlichen Monitoren dargestellt werden können. Ohne eine derartige Dynamikkompression kann immer nur ein Teilausschnitt der Leuchtdichten des Bildes wiedergegeben werden, was zu sehr unnatürlichen Ausgaben führt.

Tonemapping Operatoren lassen sich grob in zwei Kategorien unterteilen: Globale Operatoren wenden ihren Algorithmus auf jedes Pixel im Bild gleichermaßen an. Lokale Operatoren hingegen berücksichtigen unterschiedliche Regionen im Bild und passen ihre Berechnungen entsprechend ihren Nachbarpixeln an. Reinhard [RWPD09] unterscheidet weiterhin zwischen Operatoren, die direkt auf den Pixeln des Bildes arbeiten und jenen, die in der Frequenz- oder Gradientendomäne arbeiten. Frequenzbasierte Verfahren teilen das HDR Ausgangsbild in zwei Bilder mit geringen und hohen Ortsfrequenzen auf. Gradientenbasierte Operatoren benutzen die Gradienten im Bild um zwischen Beleuchtung und Reflexion im Bild unterscheiden zu können. Diese Unterscheidung ist prinzipiell nicht notwendig, um ein Bild tonemappen zu können, liefert aber ebenfalls gute Ergebnisse.

Im Folgenden werden die wichtigsten und bekanntesten Tonemapping Operatoren kurz vorgestellt. Sie wurden anschließend (siehe Kapitel 2.4) nach den Kriterien in Kapitel 2.3 bewertet um jene Operatoren für die spätere Evaluation zu finden, die für eine vertrauenswürdige Ausgabe geeignet sind und daher verglichen werden können.

2.2 Vorhandene Tonemapping Operatoren

Das Forschungsfeld der Tonemapping Operatoren ist fast unübersichtlich groß. Daher werden im Folgenden nur jene genannt, die für die Evaluation in Frage kamen bzw. verwendet werden. Ihre Beschreibungen sind denen von [RWPD09] entliehen.

2.2.1 Globale Tonemapping Operatoren

Globale Tonemapping Operatoren wenden auf jedes Pixel eines Bildes eine globale, monoton steigende Funktion (eine Tonemapping Kurve) an. Durch die Einfachheit dieses Verfahrens sind globale Operatoren besonders dann geeignet, wenn das Tonemapping möglichst in Echtzeit geschehen soll. Bei Bildern mit sehr hohem Dynamikumfang können sie hingegen meistens Details in dunklen oder hellen Bereichen nicht so gut reproduzieren wie z.B. die lokalen Operatoren, die für solche Zonen gesonderte Berechnungen durchführen.

- **Ward Histogram Adjustment (1997)** Wards Ansatz [WLRP97] berücksichtigt sowohl die korrekte Wiedergabe des Kontrasts als auch die

visuelle Wahrnehmung. Weiterhin werden in einem Nachbearbeitungsschritt weitere Aspekte unserer Wahrnehmung, nämlich Blendeffekte, Schärfe und Farbempfindlichkeit, in das Ausgabebild mit einbezogen. Im Weiteren wird auf einem Histogramm der logarithmischen Leuchtdichten aller Pixel des Bildes gearbeitet.

- **Drago Adaptive Logarithmic Mapping (2003)** Drago [DMAC03] verwendet die Grundlagen des menschlichen visuellen Wahrnehmungssystems, das wie bereits erwähnt Leuchtdichten logarithmisch wahrnimmt. Auf jedes Pixel wird eine Logarithmusfunktion angewandt, die sich in ihrer Basis je nach Wert zwischen 2 und 10 anpasst. Damit ist es möglich, Details in dunklen Bereichen zu erhalten, in hellen dafür eine höhere Kompression zu verwenden. Zwischen den Funktionen mit unterschiedlichen Basen wird mit Hilfe einer weiteren sogenannten Bias-Funktion interpoliert. Ein Benutzerparameter kann verstellt werden um diese Bias-Funktion und damit den Kontrast im LDR Bild anzupassen.
- **Reinhard and Devlin Photoreceptor Model (2005)** Reinhard und Devlin [DR05] bauen auf einer präzisierten Aussage über die logarithmische Wahrnehmung auf: Zwar arbeitet das menschliche Auge in großen Helligkeitsbereichen logarithmisch, außerhalb dieses Bereiches schwächt sich dieses Verhalten allerdings ab. Elektrophysiologische Studien bestätigen, dass die Photorezeptoren auf Licht tatsächlich näherungsweise so reagieren. Diesem Verhalten kommen die Sigmoidfunktionen sehr nahe, die eine S-Form haben. Weiterhin wird diese Sigmoidfunktion auf die Farbkanäle Rot, Grün und Blau separat angewandt, da auch die drei Zapfenarten im Auge separiert arbeiten. Es können mehrere Parameter individuell eingestellt werden: Ein Parameter, der die Helligkeit steuert, ein weiterer der die chromatische Adaption anpasst sowie ein Parameter, der ungefähr einer Lichtadaption entspricht.

2.2.2 Lokale Tonemapping Operatoren

Lokale Tonemapping Operatoren ändern den LDR Wert eines Pixels auf der Grundlage seiner Nachbarpixel. Dieses Vorgehen fußt auf der Annahme, dass das menschliche Auge sich nicht an eine Gesamtszene anpasst, sondern an kleinere Bereiche einer Szene, während es sich auf diese fokussiert. Dadurch entstehen neue Problemstellungen, wie z.B. die Fragen, wieviele Nachbarpixel in die Berechnung mit einfließen oder wie die Werte dieser gewichtet werden sollen.

Lokale Operatoren sind daher durch das Einbeziehen weiterer Nachbarschaftsinformationen potentiell besser für hohe Dynamikbereiche geeignet,

bergen damit allerdings das Risiko, neue Artefakte im Ergebnisbild einzuführen. Ihre Berechnungsgeschwindigkeit ist ebenfalls geringer als die der globalen Verfahren [KYL⁺06].

- **Reinhard et al. Photographic Tone Reproduction (2002)** Wie der Name bereits vermuten lässt, dient als Basis dieses Operators [RSSF02] die Fotografie, die sich von jeher mit dem Problem des Tonemappings beschäftigen musste. Es macht sich das aus der Fotografie bekannte Zonensystem (Teilung des Dynamikumfangs des Fotopapiers in mehrere Zonen mit sich verdoppelnder Leuchtdichte [Mül08]) zunutze. Außerdem komprimiert der Operator insbesondere die großen Leuchtdichten wie in der modernen Fotografie üblich. Dieser Teil des Operators kann für sich global auf dem Bild arbeiten. Das in der Fotografie verwendete Abwedeln (dodging and burning) ergänzt den globalen um einen lokalen Teil.
- **Ashikhmin Spatially Variant Operator (2002)** Ashikhmins [Ash02] Operator konzentriert sich auf jene Aspekte des menschlichen visuellen Systems, die für die Dynamikkomprimierung wichtig sind, und versucht den lokalen Kontrast beizubehalten. In drei Schritten wird das LDR Bild berechnet: Zuerst wird für jedes Pixel ein lokaler Adaptionswert berechnet, danach eine Funktion zur Reduzierung des Dynamikbereichs angewandt und am Ende Details, die zuvor verloren gegangen sind, wiederhergestellt.

2.2.3 Frequenz- und Gradientendomänen Operatoren und Ähnliche

Diese Operatoren arbeiten auf den Ortsfrequenzen bzw. Gradienten des Bildes und unterscheiden sich damit wesentlich von den bisher vorgestellten Operatoren. Weiterhin wird der in der sogenannten Kontrastdomäne arbeitende Operator von Mantiuk hier zugeteilt.

- **Durand Bilateral Filtering (2002)** Durands [DD02] Operator arbeitet auf niederfrequenten Daten, die von den hochfrequenten LDR Werten getrennt sind. Dabei wird eine bilaterale Filterung angewandt, die das Bild weichzeichnet und gleichzeitig Kanten erhält. Nachdem mit dieser Filterung eine Basis- und eine Detailebene generiert wurde, wird der Dynamikumfang durch das Skalieren der Basisebene auf einen benutzerspezifischen Kontrastwert reduziert. Zum Schluss werden beide Ebenen wieder kombiniert.
- **Fattal Gradient Domain Compression (2002)** Dieser Tonemapping Operator [FLW02] wendet eine Komprimierungsfunktion auf das Gradientenfeld des Bildes an. Fattal konnte beobachten, dass große Leuchtdichteänderungen im Bild durch große Gradienten repräsentiert werden, kleinste Details hingegen wesentlich kleinere Gradienten

hervorrufen. Große Gradienten werden dann stärker abgeschwächt als kleine Gradienten, womit Details erhalten bleiben.

- **Mantiuk Perceptual Framework for Contrast Processing (2005)** Nach Mantiuk [MMS05] arbeitet dieser Operator in einer Kontrastdomäne. Statt also wie bisher auf absoluten Pixelwerten zu arbeiten, werden die Bilddaten in einen *Visual Response Space* transformiert, in dem der Kontrast mit der Sichtbarkeit im Bild korreliert. Diese Werte werden modifiziert und später zurücktransformiert.

2.3 Kriterien für Vertrauenswürdigkeit

Das Ziel dieser Studienarbeit ist es einen vertrauenswürdigen Tonemapper zu entwickeln. Zunächst ist daher auszumachen, welche Kriterien besonders wichtig sind um diese Vertrauenswürdigkeit zu erzielen. Vertrauenswürdig bedeutet im Weiteren, dass ein Mensch im Optimalfall keinen Unterschied zwischen Realität und Bildschirmausgabe ausmachen kann und er daher der Wiedergabe am Bildschirm *vertraut*. Im weiteren Sinne kann man vertrauenswürdig auch mit Adjektiven wie *realistisch* oder *natürlich* umschreiben. Im Vordergrund steht daher nicht, ob das Bild ästhetisch schön oder besonders detailreich ist.

Um die subjektive Empfindung von Vertrauenswürdigkeit untersuchen zu können, müssen Kriterien gefunden werden, die in Bildern weitestgehend objektiv verglichen werden können. Tonemapping Operatoren, die statt auf eine realistische Darstellung auf eine beispielsweise ästhetische Darstellung abzielen, gewichten solche Kriterien unterschiedlich. Einige wissenschaftliche Arbeiten, allen voran die Arbeit von Čadík [ČWNA08], haben sich mit solchen Kriterien befasst, von denen die wichtigsten im Weiteren genannt werden:

- **Helligkeit:** Als *Helligkeit* wird die subjektive Empfindung bezeichnet, die durch die absolute Größe der Leuchtdichte bestimmt wird. Sie wird meist als Helligkeit im gesamten Bild bestimmt. Ein starkes Abweichen von der Originalhelligkeit führt oftmals zu einem empfindungsgemäßen Grauschleier über dem Bild.
- **Kontrast:** Als *Kontrast* wird der Unterschied zwischen hellen und dunklen Bereichen im Bild bezeichnet. Ein Bild wirkt bei falschem Kontrast entweder zu flau (bei zu geringem Kontrast) oder zu künstlich (bei übertriebenem Kontrast).
- **Details:** Mit dem Kriterium *Details* ist die Reproduktion dieser insbesondere in dunklen bzw. hellen Bereichen gemeint. Durch die Reduzierung des Dynamikumfangs kommt es oftmals zum Verlust von Details in Schattenbereichen oder Glanzbereichen eines Bildes. Einige Tonemapping Operatoren heben solche Details besonders hervor,

zumeist auf Kosten von entstehenden Artefakten wie z.B. Halos. Andere wie z.B. Wards Histogram Adjustment [WLRP97] beziehen die menschliche Wahrnehmung in die Darstellung von Details ein und zeigen sie nur dann, wenn das Auge sie auch sehen würde. Damit werden bewusst die Limitierungen des menschlichen visuellen Systems berücksichtigt.

- **Artefakte:** *Artefakte* fallen einem menschlichen Beobachter stark auf und verursachen daher eine deutliche Minimierung der gesamten wahrgenommenen Bildqualität. Insbesondere lokale Tonemapping Operatoren leider unter diesem Phänomen, da angrenzende Bildregionen unterschiedlich getonemapt werden können. Neben daher auftretenden Halo- oder Bandingproblemen (siehe [ČWNA08]) kann es auf Grund der Reduzierung der zur Verfügung stehenden Farbtiefe zu Quantisierungsproblemen kommen.
- **Schärfe:** Die *Schärfe* eines Bildes zeigt sich oft in Schatten- oder Glanzbereichen und kann daher bei dem Kriterium *Details* mitbetrachtet werden.
- **Buntheit:** Da die Fähigkeit des Auges Farben korrekt zu erkennen auch von der Umgebungsbeleuchtung abhängt, wird oftmals das Kriterium der *Buntheit* oder auch der Reproduzierbarkeit von Farben aufgeführt. In dunklen Umgebungen ist es dem Auge nicht möglich Farben gut zu unterscheiden (siehe Kapitel 1). Weiterhin verfügt das menschliche Sehsystem über eine *chromatische Adaption*, die es dem Menschen ermöglicht, Farben auch dann noch natürlich wahrzunehmen, wenn sich die Beleuchtungssituation erheblich verändert. Auf Grund dieser Gegebenheiten wurden Tonemapping Operatoren entwickelt (z.B. Ferwerda [FPSG96], Ward [WLRP97] oder Pattanaik [PYG00]), die die Farbigkeit entsprechend anpassen. Die chromatische Adaption spielt zudem bei Nutzertests eine entscheidene Rolle (siehe Kapitel 5.4).
- **Natürlichkeit:** Mit *Natürlichkeit* ist oftmals der *Gesamteindruck* des Bildes gemeint.

In dieser Studienarbeit werden die Kriterien Helligkeit, Kontrast, Details im Schatten, Details im Glanzlicht und der Gesamteindruck des Bildes behandelt. Da die spätere Evaluation fotografierte Aufnahmen verwendet, würden die Faktoren Schärfe und Buntheit zu sehr vom Ausgangsfoto abhängen und damit keine unabhängige Beurteilung ermöglichen. Artefakte spielen im Gesamteindruck des Bildes eine Rolle und werden daher nicht separat bewertet.

Auch wenn es möglich ist einzelne Kriterien aufzuzählen, so ist der Gesamteindruck des Bildes entscheidend. Nicht ein einziger Faktor, sondern

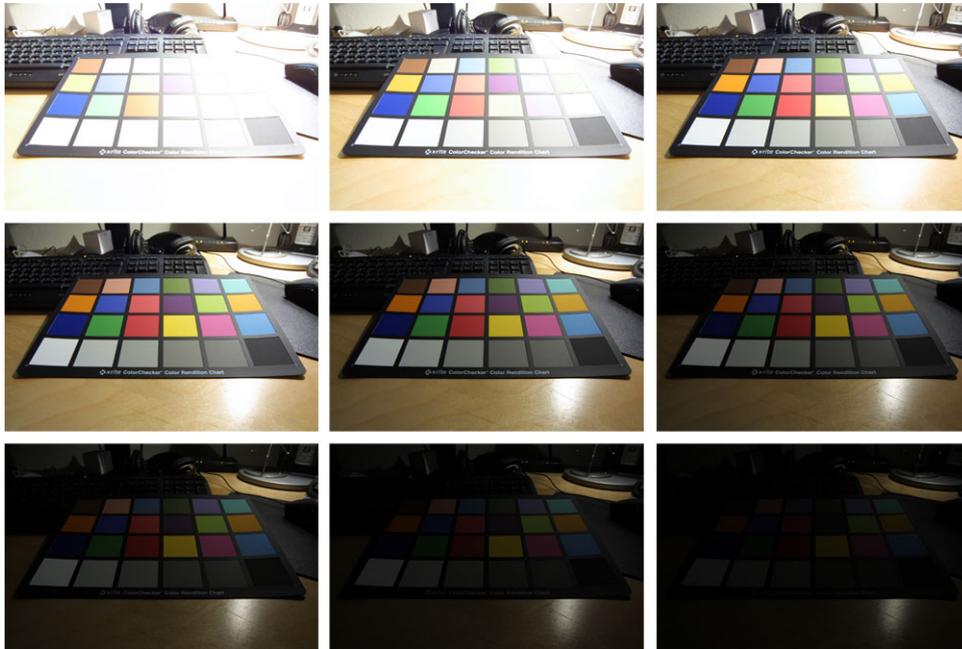


Abbildung 2: Belichtungsserie für die erste Testszene

mehrere, sind für den finalen Eindruck verantwortlich. Čadík [ČWNA08] sieht in den einzelnen Kriterien gewisse Abhängigkeiten: So beeinflusst die Betrachtung und Änderung des Kontrastes auch die Farbigkeit und Helligkeit im Bild. Fügt man spezielle visuelle Effekte zu diesem Vergleich hinzu, beispielsweise den Überstrahl- bzw. Blendeffekt (Blooming, Glare), den wir Menschen bei hellen Umgebungen wahrnehmen, so merkt man, dass diese wiederum z.B. die Helligkeit oder den Detailreichtum im Bild beeinflussen.

Čadík kommt zu dem Schluss, dass Attribute, die sich global auf das Bild auswirken, besonders wichtig sind. Daher erscheint ihm der Kontrast als der wichtigste Faktor. Das Schlusslicht bildet die Detailwiedergabe. Daraus schlussfolgert er, dass durch die Wichtigkeit der globalen Kriterien die globalen Tonemapping Operatoren besonders gut geeignet sind um realistische Ergebnisse zu erzielen. Lokale Operatoren könnten daher nur mit globalen Operatoren konkurrieren, falls diese einen starken globalen Anteil besitzen, wie dies beispielsweise bei dem Reinhard 2002 Operator der Fall ist.

2.4 Bewertung der Tonemapping Operatoren

Nachdem bisher einige wichtige Tonemapping Operatoren und Kriterien vorgestellt wurden, muss für die spätere Evaluation festgestellt werden, welche dieser Operatoren für einen Vergleich bezüglich ihrer Vertrauenswürdigkeit geeignet sind.



Abbildung 3: Vorabergebnisse verschiedener Operatoren. Von oben links nach unten rechts (zeilenweise): Drago, Reinhard 2005, Reinhard 2002 (lokal), Ashikhmin, Fattal, Mantiuk

Damit eine vergleichbare Ausgangssituation gegeben ist, können nur jene Operatoren weiterverwendet werden, die im Tool Qtpfsgui¹ implementiert sind, da dieses Programm für den eigenen Tonemapper verwendet wird. Eine Eigenimplementierung weiterer Operatoren wäre über den Rahmen dieser Studienarbeit hinausgegangen. Qtpfsgui baut auf den pfstools² auf und liefert für diese eine grafische Benutzeroberfläche (GUI).

Von denen in Kapitel 2.2 genannten Tonemapping Operatoren sind bereits jene von Ashikhmin, Drago, Durand, Fattal, Mantiuk und beide von Reinhard implementiert. Leider liefert der Operator Durand bei den allermeisten Bildern nur ein weißes Ausgabebild, was auf einen Fehler in der Implementation hindeutet, und kann daher in der weiteren Betrachtung nicht berücksichtigt werden.

Für einen ersten groben Test wurde der Munsell Colorchecker in einer Schreibtischszene fotografiert (siehe auch Kapitel 3.1 und Abbildung 2) und direkt mit der Ausgabe auf einem kalibrierten Eizo S1910 Bildschirm verglichen.

Somit wurden folgende Operatoren vorab auf ihre mögliche Einsatzfähigkeit für die spätere Evaluation untersucht:

- **Drago Adaptive Logarithmic Mapping** Dragos Operator liefert auf dem Testbild (vergleiche Abbildung 3) ein durchaus realistisches Bild. Manche Farben erscheinen zu hell, Schwarz und Weiß sind zu grau. Details im Glanzlicht vermatschen leicht.
- **Reinhard and Devlin Photoreceptor Model** Das erste Ergebnis mit den Standardeinstellungen war viel zu dunkel. Mit einer Anpassung

¹<http://qtpfsgui.sourceforge.net>

²<http://pfstools.sourceforge.net>

des Parameters Helligkeit auf -1,8 konnte ein durchaus akzeptables Ausgabebild erzielt werden. Die Farben wirken teilweise zu fad, teilweise aber auch zu leuchtend. Details in dunklen bzw. hellen Bereichen verschwimmen etwas.

- **Reinhard et al. Photographic Tone Reproduction** Auch Reinhard's fotografischer Operator liefert ein durchweg gutes Ergebnisbild. Es zeigt sich ebenfalls die zu gräuliche Darstellung von Schwarz und Weiß. Anders als bei Dragos Tonemapping könnten hier einige kräftige Farben stärker leuchten. Einen bedeutenden Unterschied zwischen lokaler und globaler Fassung ist nicht auszumachen. Für die Evaluation wird der lokale Operator verwendet.
- **Ashikhmin Spatially Variant Operator** Als Vertreter der lokalen Operatoren kann Ashikhmin's Operator hinsichtlich einer vertrauenswürdigen Ausgabe nicht überzeugen. Farbtöne werden nicht korrekt wiedergegeben. Artefakte entstehen durch die Betonung von Farbunterschieden an Kanten angrenzender Farbflächen.
- **Fattal Gradient Domain Compression** Auch Mantiuk's Gradientendomenkomprimierung liefert kein vertrauenswürdige Bild. Grautöne verschwimmen im Einheitsgrau und Artefakte entstehen durch die Überbetonung von Details.
- **Mantiuk Perceptual Framework for Contrast Processing** Gänzlich ungeeignet ist Mantiuk's Operator in der vorliegenden Implementierung. Das Testbild wirkt stark stilisiert und ist daher eher zur künstlerischen Benutzung anzuraten.

Aus diesen ersten Voruntersuchungen ergaben sich folgende Tonemapping Operatoren, die später für die Evaluation verwendet werden:

- Drago Adaptive Logarithmic Mapping (global) – kurz Drago
- Reinhard and Devlin Photoreceptor Model (global) – kurz Reinhard 2005 bzw. R05
- Reinhard et al. Photographic Tone Reproduction (lokal) – kurz Reinhard 2002 bzw. R02

Teil II

Praktische Umsetzung

3 Testszzenarien

Um Tonemapping Operatoren auf ihre Vertrauenswürdigkeit überprüfen zu können, benötigt es verschiedene Eingabebilder. Im Laufe der Studienarbeit sind mehrere High Dynamic Range Bilder entstanden, die sowohl für bereits vorhandene Verfahren als auch für den neu entwickelten Operator verwendet wurden. Dabei können solche Bilder auf mehrere Arten entstehen:

1. Aufnahme einer realen Szene mit Hilfe einer HDR-Kamera
2. Aufnahme einer realen Szene mit Hilfe einer handelsüblichen (LDR-) Kamera
3. Generierung einer künstlichen Szene und speichern eines Abbildes dieser

In dieser Studienarbeit wurden HDR Bilder auf die zwei letzten Arten erstellt.

HDR-Kameras sind heutzutage nach wie vor die Ausnahmeerscheinung und zudem sehr teuer. Darüber hinaus sind sie für den Außeneinsatz unhandlich. Daher wurde auf den Einsatz einer solchen Kamera verzichtet.

Auch mit einer handelsüblichen Kamera ist die Aufnahme von HDR Bildern möglich. Hierzu sind am besten Digitale Spiegelreflexkameras geeignet, da diese die genaue Einstellung von Objektiv und Aufnahmeart ermöglicht. Für die in dieser Arbeit vorgestellten Fotografien stand eine Canon EOS D30 Spiegelreflexkamera zur Verfügung. Weiterhin wurde ein Stativ und zur weiteren Verifizierung und Ausmessung der erhaltenen Aufnahmen das Leuchtdichtemessgerät Kodak CS100A verwendet. Die genaue Vorgehensweise wird in Kapitel 3.1 vorgestellt. Da für die spätere Evaluation der Wiedererkennungswert sehr wichtig ist, wurden diverse Szenen auf dem Campus Koblenz aufgenommen.

Im Gegensatz zu Aufnahmen aus der Realität mittels Kamera sind generische Bilder zur exakten Speicherung von Leuchtdichtewerten bestens geeignet. Übliche Kameras sind nicht für die photometrische Korrektheit ihrer Aufnahmen konzipiert worden. Zudem ändern sich insbesondere in Außenszenen die Umgebungsverhältnisse allzu häufig als das ein reproduzierbares Ergebnis ermittelt werden kann. Hier können computergenerierte künstliche Szenen glänzen, die entsprechend eigener Vorstellungen modelliert werden können. Eine solche Boxszene wird ebenfalls in der späteren

Evaluation verwendet und im PB Framework als OpenEXR-Datei exportiert (näheres in Kapitel 3.2). Das PB Framework entsteht im Rahmen des Förderprogramms *AVILUS*³ an der Universität Koblenz-Landau in der Computergraphik Arbeitsgruppe.

3.1 Erstellung der HDR Bilder mittels (LDR-)Kamera

Um ein HDR Bild aus einer Reihe von LDR Bildern zu generieren, benötigt es zum einen eine Kamera, die sich manuell auf verschiedene Verschlusszeiten und Blendenzahlen einstellen lässt. Zum Anderen ist eine entsprechende Software von Nöten, die aus diesen einzelnen Aufnahmen ein einziges HDR Bild erstellt.

Vor der eigentlichen Aufnahme muss die Canon EOS D30 manuell mit Weiß abgeglichen werden, um die Farben annähernd wiederzuspiegeln zu können. Zudem ist hiermit gewährleistet, dass für alle folgenden Bilder der gleiche Weißabgleich benutzt wird. Die Farbtreue kann leider nicht gewährleistet werden, da hierfür eine exakte Kamerakurve bekannt sein müsste – hierzu später mehr.

Die Canon EOS D30 Digitale Spiegelreflexkamera erlaubt eine Verschlusszeit zwischen 1/4000 bis 30 Sekunden. Für die Campusszene, die in der späteren Evaluation verwendet wird, wurden folgende Einstellungen verwendet:

- RAW-Bildformat
- Blende: 8.0
- ISO: 100
- Verschlusszeit: 1/2000 Sekunde bis 1/8 Sekunde.
- jeweils 1 F-stop, d.h. zwischen jedem belichteten Bild ändert sich die Blende um einen Blendenschritt

Wichtig ist, dass die Blende für alle Bilder beibehalten wird und die unterschiedliche Belichtung einzig durch die Änderung der Belichtungszeit erzielt wird. Die Zeitautomatik (Av) leistet dies. Eine möglichst kleine Blende liefert einen großen Schärfereich. Mit Hilfe der Belichtungsreihenautomatik (AEB) lassen sich 3 Bilder in kurzer Abfolge automatisch aufnehmen, wobei ein Bild mit der eingestellten Verschlusszeit entsteht, sowie eines mit einer Blendenstufe weniger und einer Blendenstufe mehr. Wiederholt man diese Belichtungsreihenautomatik mit drei unterschiedlichen mittleren Verschlusszeiten, erhält man neun Aufnahmen. Da diese Prozedur etwas dauert, ist bei Außenaufnahmen ein wolkenloser Himmel zu empfehlen, da sich ansonsten die Beleuchtungssituation zwischenzeitlich ändern kann und

³http://uni-koblenz-landau.de/koblenz/fb4/institute/icv/agmueller/projects/avilus_o

damit die gesamte Belichtungsreihe nutzlos wird. Die Diplomarbeit von Fode [Fod04] oder die Arbeit von [Jac07] beschäftigen sich näher mit der Erstellung der Belichtungsreihe – die Einstellungen sind teilweise diesen Arbeiten entnommen.

Nachdem die Belichtungsreihe aufgenommen wurde, muss die Kalibrierung der Szene erfolgen. Zur Kamerakalibrierung und photometrischen Kalibrierung erschienen bisher einige Arbeiten. Die Arbeit von Jacobs [Jac07] erläutert die Schritte der Bildaufnahme und der Kalibrierung. Die Studie von Inanici [IG04] befasst sich mit der exakten Wiedergabe von Leuchtdichten mittels einer handelsüblichen Kamera. Für Details sei daher auf diese verwiesen. Möchte man aus dem HDR Bild aus jedem Pixel die tatsächlich ehemals vorherrschende Leuchtdichte auslesen, so muss sowohl die Kamera kalibriert werden als auch die Szene. Jede Kamera hat dabei eine unterschiedliche *Kamerakalibrierungskurve*, d.h. die Kamera bildet genauso wie beispielsweise ein Monitor eine Leuchtdichte auf einen Wert ab. Eine exakte 1:1 Speicherung der Werte ist dabei meistens von den Herstellern nicht gewollt – die Bilder sehen mit einer etwas angepassten Kurve meist ästhetischer aus. Außerdem ist jede Kameralinse unterschiedlich und kann daher einen weiteren Fehlerfaktor einführen. Die Kamerakurve kann mit Hilfe der LDR Bilder und einer entsprechenden Software berechnet werden. Als Software wurde hier webHDR⁴ verwendet, die wiederum zur Kalibrierung auf den Algorithmus von Debevec [DM97] in hdrgen⁵ zurückgreift. Die Kurve wird als ein Polynom⁶ angenähert.

Nachdem diese auf jeden Fall notwendige Kamerakalibrierung durchgeführt wurde, lässt sich die Aufnahme auch noch photometrisch korrekt kalibrieren. Dies geschieht durch ein Leuchtdichtemessgerät wie das Kodak CS100A. Dabei misst man mit diesem in der realen Szene an ausgesuchten Orten die tatsächliche Leuchtdichte. Im ersten generierten HDR Bild werden die zunächst unkalibrierten Leuchtdichten ausgelesen. Sie sind bisher nur relativ untereinander korrekt, nicht jedoch absolut. Indem man die unkalibrierte durch die tatsächliche Leuchtdichte dividiert, erhält man den sogenannten *Kalibrierungsfaktor*, der am besten durch mehrere gemessene Punkte gemittelt sein sollte. WebHDR erlaubt es nun, diesen Faktor in die Generierung des HDR Bildes mit einfließen zu lassen. Theoretisch sollte am Ende ein photometrisch korrektes HDR Bild entstehen, dass die tatsächlichen Leuchtdichten gespeichert hat. Leider hat sich bei der praktischen Anwendung gezeigt, dass dieser Faktor selbst durch sechs Punkte zu ungenau berechnet wurde und sich die Leuchtdichten nur durch einen fiktiven Faktor durch Ausprobieren recht genau kalibrieren ließen. Dieses Ärgernis stellte sich als nicht weiter schlimm heraus, da das in der Evalua-

⁴<http://luxal.dachary.org/webhdr/>

⁵<http://www.anyhere.com>

⁶http://groups.google.com/group/pfstools/browse_thread/thread/b62c7e4657efc438

tion verwendete Bild nur in einem Gedächtnisvergleich (siehe Kapitel 5.3) verwendet wurde. Alle Operatoren arbeiten somit auf den selben relativ zueinander korrekten Leuchtdichtewerten, die der Mensch ohnehin nicht absolut wahrnimmt.

3.2 Erstellung der Boxszene

Neben der Erstellung realer Aufnahmen entstand im Rahmen dieser Studienarbeit ein Nachbau einer weißen Box inklusive Colorchecker. Preßspanplatten bilden die Grundkonstruktion der quadratischen Box mit jeweils 0,5 Meter Kantenlänge. Weißes diffuses Canson Mi-Teintes Papier verkleidet die Box von innen an den Seitenwänden. Die Box ist von einer Seite gänzlich offen, an einer weiteren Seite befindet sich ein quadratisches Loch. Gegenüber dieses Loches hängt ein Munsell Colorchecker. Das Loch dient als Öffnung für einen von außen an die Box anlehenden LCD-Monitor, einem NEC SpectraView 2690. Er soll als Lichtquelle dienen und stellt hierfür einen weißen Hintergrund dar. Bei einer normalen Lampe müsste die Lichtstärkeverteilungsfunktion für die spätere Simulation bekannt sein, was höchstens bei sehr teuren, speziellen Lampen der Fall ist – bei diesem hochwertigen Monitor kann von einer annähernd diffusen Lichtquelle ausgegangen werden. Abbildung 7 zeigt den Aufbau.

Damit eine wirklichkeitstgetreue Nachbildung im Computer entstehen kann, müssen alle Materialien innerhalb der Box sowie der strahlende Monitor photometrisch vermessen werden. Die Daten des Colorcheckers wurden bereits sehr genau von Pascale⁷ vermessen. Das weiße Papier und der Monitor wurden mit dem Spektralfotometer X-Rite i1 Pro gemessen. Der Monitor wurde hierfür auf maximale Helligkeit und Kontrast eingestellt – erreicht damit ca. $300 \frac{cd}{m^2}$ – und mit der i1 Pro Software kalibriert. Beide Messungen liefern spektrale Daten, d.h. in 10 nm Schritten ein Messergebnis, insgesamt also 36 einzelne Messwerte.

Mit Hilfe sämtlicher Messwerte aller Objekte, die in der Szene vorkommen, kann ein Bild am Computer generiert werden. Ein modellierter Colorchecker hängt so virtuell in einer weißen Box. Diese Umgebung wird mit dem PB Framework simuliert. Dabei kommt ein Path-Tracer zum Einsatz, der auf den spektralen Werten arbeitet. Das Ergebnis ist eine virtuell exakte Kopie der realen Szene im openEXR HDR-Bildformat.

4 Vertrauenswürdiger Tonemapping Operator

Ziel des eigens entwickelten Tonemapping Operators ist es, ein vertrauenswürdigeres Bild zu generieren. Es stellt sich die Frage, in wie weit man den

⁷http://www.babelcolor.com/main_level/ColorChecker.htm#ColorChecker_data

Ergebnisbildern der bisher vorgestellten Tonemapping Operatoren vertrauen kann. Es ist entscheidend, dass ein vertrauenswürdiger Tonemapping Operator für jedes Eingabebild ein Ausgabebild liefern kann, auf das sich beispielsweise ein Entscheidungsträger im Produktdesign verlassen kann.

Im Weiteren wird der in dieser Studienarbeit entwickelte vertrauenswürdige Tonemapping Operator von der Konzeption bis zur Implementierung vorgestellt.

4.1 Idee: Interaktiver Tonemapper

Bisher vorhandene Tonemapping Operatoren zielen darauf ab, ein ästhetisch schönes oder aber möglichst realistisches LDR Bild für jede HDR Aufnahme auszugeben. Daher ist es fraglich, ob solch eher generalisiert gehaltene Operatoren überhaupt in der Lage sind eine immerzu vertrauenswürdige Ausgabe zu liefern. Viele Einsatzgebiete, z.B. in der Medienbranche oder Automobilbranche, erfordern es hingegen auf eine Ausgabe zu vertrauen, bevor die eigentliche Produktion anläuft. Ein in diesem Bereich im Einsatz befindlicher Tonemapper muss sich also individuell auf vorhandene Umgebungsbedingungen und Eingabebilder einstellen lassen. Statt sich für jedes Bild eine Tonemappingkurve berechnen zu lassen, soll diese Kurve interaktiv erstellbar sein. Dies erlaubt es Experten, eine Tonemappingkurve zu erstellen, die für das gegebene Setting sehr genau passt. Kein vorgefertigter Tonemapping-Algorithmus, so die Annahme, kann ein derart genaues Tonemapping gewährleisten.

Um die Interaktivität zu erreichen, war zunächst angedacht, lediglich bestimmte Farbtöne, genauer gesagt Grauwerte, durch Schieberegler anzupassen. Da allerdings bereits viele Programme wie z.B. Adobe® Photoshop® Kurvenwerkzeuge besitzen, um beispielweise eine Gradationskurve anzupassen, scheint die Bedienung eines solchen Werkzeugs als durchaus gebräuchlich oder wenigstens nicht befremdlich. Daher fiel die Entscheidung auf die Implementation eines kompletten Tools zur Änderung einer Tonemappingkurve. Die weiteren Details werden im nächsten Kapitel 4.2 beschrieben.

4.2 Implementation

Die erste Entscheidung während der Implementierungsphase galt der Frage, ob eine komplette Eigenentwicklung eines Tonemappingprogramms oder die Integration des Kurvenwerkzeugs in ein bestehendes Framework vorgenommen werden sollte. Die Umsetzung eines eigenständigen Programmes hätte die Programmierung vieler Basisfunktionalitäten bedingt. Darunter fallen das Laden von HDR Bildern, das Speichern von LDR Bildern, die Konzeption eines Benutzerinterfaces oder die Schnittstellen zwischen den

verschiedenen Bilddateiformaten. Zu Gunsten eines komplexeren Kurvenwerkzeugs wurde auf ein eigenes Rahmenprogramm verzichtet – die zu veranschlagende Zeit für Basisfunktionalitäten konnte stattdessen für die eigentliche Aufgabe der Studienarbeit gutgeschrieben werden.

In diesem Zuge wurde nach einem geeigneten Framework Ausschau gehalten. Der Markt der Tonemappingprogramme ist sehr groß. Unter anderem wurden folgende HDR Programme als Vergleich und Referenz inspiziert:

HDRShop 1.0.3	Qtpfsgui 1.9.3	easyHDR 1.60.3
Photosphere 1.8.2	Picturenaut 2.81	Artizen HDR 2.7
Photomatix Pro 3	FDRTools Basic 2.3.0	webHDR (hdrgen)

Bis auf Photosphere, welches es nur für Mac OS gibt, handelt es sich um Programme, die (auch) unter Windows laufen. Die bekanntesten Programme sind wahrscheinlich HDRShop⁸ von Paul Debevec, Photosphere⁹ von Greg Ward und Photomatix¹⁰, das vor allem wegen seiner ästhetisch schön generierten HDR Bilder bekannt ist.

Qtpfsgui baut auf den pfstools auf und ist anders als die übrigen Programme Open Source. Es beinhaltet ein grafisches Nutzerinterface (GUI), welches mit Qt4 geschrieben ist. Qtpfsgui war daher die einzige Wahl zur Implementierung des interaktiven Tonemappers.

4.2.1 Entwicklungsumgebung und Bibliotheken

Qtpfsgui 1.9.3 wurde unter Microsoft Visual Studio 2008 zur weiteren Integration des vertrauenswürdigen Tonemapping Operators, der in C++ geschrieben wurde, kompiliert. Da von Haus aus eine Kompilierung nur mit MinGW und MSYS möglich bzw. beschrieben ist, da einige der verwendeten Bibliotheken wie exiv2 oder libtiff nur mit MinGW laufen, mussten etliche Anpassungen des gesamten Projekts vorgenommen werden um es unter Visual Studio 2008 zum Laufen zu bekommen. Leider hat dies zur Folge, dass ein paar wenige Funktionalitäten von Qtpfsgui entfernt werden mussten, die auf Bibliotheken zugreifen, die nicht unter Visual Studio kompilieren. Es handelt sich dabei insbesondere um die Möglichkeit, ein HDR Bild aus mehreren LDR Bildern zu generieren oder besondere Bildformate (z.B. TIFF) zu laden. Da diese Möglichkeiten für den eigentlichen Tonemapper nicht von Bedeutung sind und die HDR Bilder mit webHDR als EXR- bzw. HDR-Bilddateien erstellt wurden, kann auf diese verzichtet werden.

Weitere Abhängigkeiten, die ohne Probleme unter Visual Studio laufen, sind OpenEXR¹¹ zum Verwenden des Dateiformates EXR und Qt4 von Troll-

⁸<http://projects.ict.usc.edu/graphics/HDRShop>

⁹<http://www.anyhere.com>

¹⁰<http://www.photomatix.de>

¹¹<http://www.openexr.com>

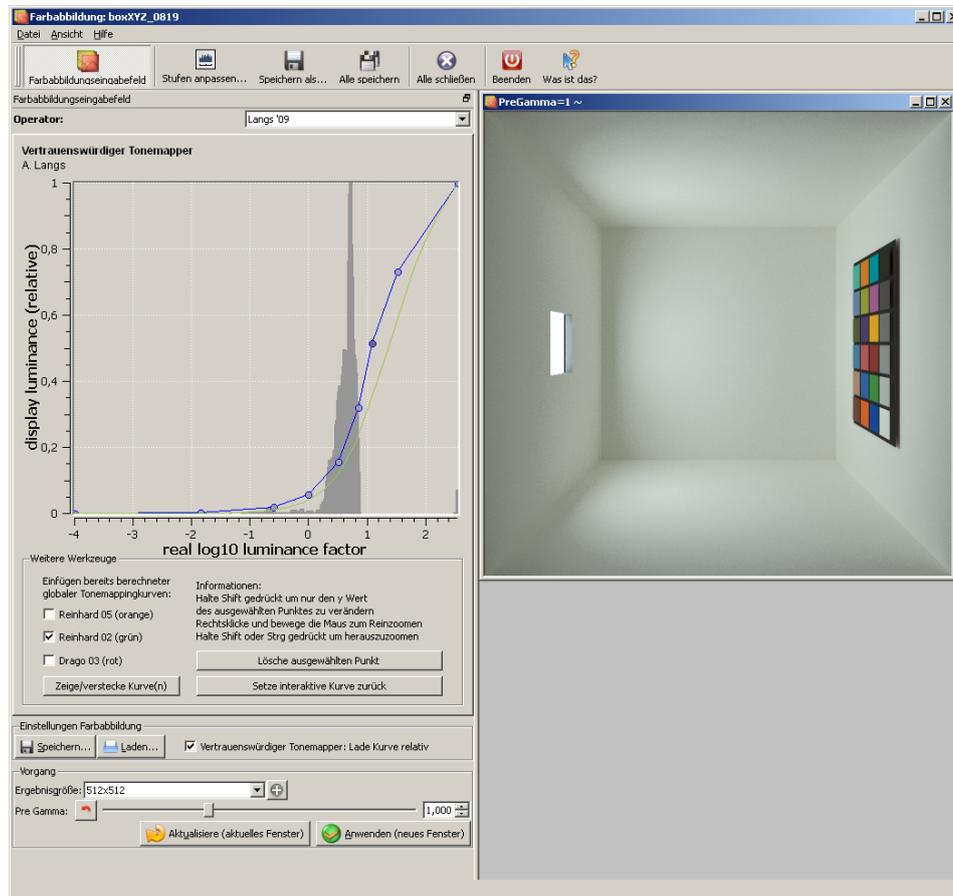


Abbildung 4: Hauptfenster Qtpfsgui (advanced) mit interaktivem Tonemapper

tech. Letzteres kann bequem als Visual Studio Add-In¹² verwendet werden und ermöglicht das einfache Anpassen des grafischen Benutzerinterfaces.

Für das eigentliche Kurvenwerkzeug wird die Open Source Bibliothek Qwt 5.2, Qt Widgets for Technical Applications¹³, verwendet, das einem viele Kurvenfunktionalitäten bereits zur Verfügung stellt.

4.2.2 Implementierte Funktionalitäten

Einen ersten Eindruck aller Funktionalitäten liefert Abbildung 4. Es zeigt das Hauptfenster des Tonemappers und das durch ihn erstellte LDR Bild.

Auf der X-Achse des Plots ist die tatsächliche Leuchtdichte im 10er Logarithmus abgetragen, auf der Y-Achse der darauf abgebildete relative Bildschirm-Leuchtdichtewert. 1,0 entspricht damit der maximal darstellbaren Leuchtdichte des anzeigenden Monitors.

¹²<http://qt.nokia.com/downloads/visual-studio-add-in>

¹³<http://qwt.sourceforge.net>

Kurvenmanipulation

Mit Hilfe der blauen Punkte ist es möglich die ebenso blaue Kurve interaktiv zu ändern und zu steuern. Dabei können beliebig viele Punkte der Kurve mit einem einfachen Linksklick hinzugefügt oder wieder gelöscht werden. Mit Hilfe der Tastenkombination Shift und Linksklick kann ein angewählter Punkt lediglich in der Y-Richtung verändert werden und beugt so dem „Verrutschen“ in X-Richtung vor – damit würde man automatisch einen anderen Leuchtdichtewert verändern.

Statische Kurven

Um die eigene Kurve mit anderen Tonemapping Operatoren vergleichen zu können, wurde die Möglichkeit implementiert, Tonemappingkurven dreier ausgewählter Operatoren direkt im Plot anzeigen zu lassen. Sowohl Dragos als auch Reinhardts 2002 Operator lassen sich ohne Probleme im Plot als statische Kurve im Hintergrund einblenden. Reinhardts 2005 Operator, da auf drei Farbkanälen separat arbeitend, ist leider nicht mit den anderen Kurven vergleichbar. Um die Funktionalität nutzen zu können, muss das HDR Bilder vorher mit diesen Operatoren getonemappt werden. Während dieses Prozesses werden die entsprechenden Werte zwischengespeichert und können danach als Kurve manuell ein- oder ausgeblendet werden.

Komfortfunktionen

Durch einen Doppelklick auf eine Stelle im LDR Bild wird ein Kontrollpunkt im Plot erzeugt, der an jener X-Position erscheint, die der Leuchtdichte im korrespondierenden HDR Bildpunkt entspricht. Dadurch ist es möglich, Bildbereiche gezielt im Plot anzupassen. Das im Hintergrund des Plots dargestellte Histogramm erleichtert es zudem, wichtige Leuchtdichtebereiche zu identifizieren.

Weiterhin ist es möglich in den Plot herein- bzw. herauszuzoomen, um Punkte sehr genau platzieren zu können. Das LDR Bild wird automatisch aktualisiert, wenn ein neuer Punkt gesetzt, gelöscht oder fertig verschoben wurde. Das Zurücksetzen der interaktiven Kurve ist ebenso möglich.

Ebenfalls möglich ist das Speichern und Laden von erstellten Kurven. Eine Kurve ist relativ oder absolut ladbar, d.h. in erstem Fall wird die Kurve entsprechend des Leuchtdichtebereichs gestreckt oder gestaucht, im zweiten Fall wird die Kurve exakt an jenen Leuchtdichten geladen, an denen sie erstellt wurde.

4.2.3 Implementierungsdetails

Die wichtigsten Schritte des Programmverlaufs werden im Folgenden kurz erläutert.

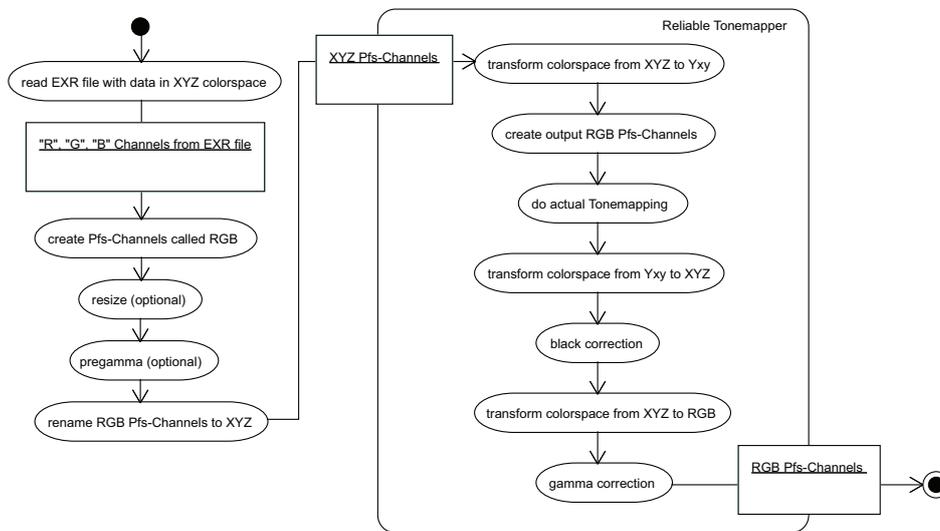


Abbildung 5: Aktivitätsdiagramm zum Verlauf des Tonemappings

Tonemapping

Da sowohl HDR Bilder im RGB Farbraum (aufgenommen mit der Spiegelreflexkamera) als auch HDR Bilder im XYZ Farbraum (erzeugt innerhalb einer Simulation mittels Path-Tracer) zum Einsatz kommen, mussten zwei Versionen des Hauptprogramms entwickelt werden. Das Framework bietet bisher nur die Möglichkeit auf Daten im RGB Farbraum arbeiten zu können. Einige wenige Änderungen am Quellcode ermöglichen es nun auch EXR-Dateien im XYZ Farbraum einzulesen. Abbildung 5 zeigt den Verlauf vom Lesen eines EXR-Bildes im XYZ Farbraum bis hin zum Schreiben der RGB Pfs-Channels. Diese werden später als QImage ausgegeben. Sollte ein EXR-Bild im RGB Farbraum eingelesen werden, so muss anstelle des `rename RGB Pfs-Channels to XYZ` ein `transform colorspace from RGB to XYZ` stehen.

Das in Abbildung 5 abgebildete `do actual Tonemapping` entspricht dem Algorithmus 1. Dabei wird für jeden Bildpunkt der Y-Wert abgefragt und im Plot an entsprechender $\log(\text{Y-Wert})$ -Position nachgeschaut, welcher X-Wert diesem Wert zugeordnet wurde. Anschließend wird dieser `scale`-Wert mit der maximal darstellbaren Leuchtdichte des Monitors verrechnet und wieder im Y-Kanal des Ausgabeframes gespeichert. Die übrigen Kanäle `x` und `y` bleiben unverändert. Damit ist sichergestellt, dass sich tatsächlich nur die Leuchtdichte ändert und nicht der Farbwert des Pixels.

Schwarzwert und Kalibrierung

Nachdem das eigentliche Tonemapping stattgefunden hat, muss zunächst der Farbraum von Yxy nach XYZ zurückkonvertiert werden. Auf den XYZ-

Algorithmus 1 Tonemapping

```

for( int x=0 ; x<w ; x++ )

    for( int y=0 ; y<h ; y++ ){
        tmp = (*Y_Yxy)(x,y);
        if (tmp > 0) //catch negative Y-values
            Yw = log10( tmp );
        else //return a very small value
            Yw = log10( 0.0000001 );
        scale = plotcurve->getYvalue(Yw);
        (*Yo)(x,y) = MAXLUMDISPLAY * scale;
        (*xo)(x,y) = (*x_Yxy)(x,y);
        (*yo)(x,y) = (*y_Yxy)(x,y);
    }

```

Werten wird eine Schwarzwertkorrektur vorgenommen. Jörg Koch [Koc09] beschäftigte sich in seiner Diplomarbeit eingehend mit vertrauenswürdigen Farben in der Computergraphik. Die Subtraktion des Schwarzwertes des Monitors (genauer gesagt des Tristimuluswertes XYZ von Schwarz) führt zu einer wesentlich präziseren Farbwiedergabequalität. Da die korrekte Ausgabe auf dem Anzeigebildschirm für die spätere Evaluation besonders wichtig ist, wurde dieser Schritt vor der letzten Farbraumkonvertierung von XYZ nach RGB durchgeführt. Der Schwarzwert wurde mit dem i1 Pro und der Software KeyWizard¹⁴ von GretagMacbeth ermittelt.

In dieser letzten Farbraumkonvertierung steckt zugleich die Anpassung der Ausgabe auf den spezifischen Ausgabemonitor. Daher wurde zuvor dieser Ausgabemonitor, ein EIZO FlexScan 2000, mit dem i1 Pro und der i1 Share Software auf einen Gammawert von 2,2 kalibriert. Die Helligkeit des Monitors wurde auf 25% gesenkt, was ungefähr einer maximalen Leuchtdichte von $100 \frac{cd}{m^2}$ entspricht. Damit bedarf es eines Tonemappingvorgangs, um die Boxszene (vgl. Kapitel 3.2), die von einem wesentlich helleren Monitor beleuchtet wird, auf diesem Monitor darstellen zu können. Das durch die Kalibrierung erhaltene ICC Profil wurde unter Windows gesetzt.

Im Anschluss an die Kalibrierung wurde mit dem i1 Pro und der KeyWizard Software die Matrix M ermittelt, die für die Farbraumkonvertierung benötigt wird:

$$M = \begin{pmatrix} X_r - X_{black} & X_g - X_{black} & X_b - X_{black} \\ Y_r - Y_{black} & Y_g - Y_{black} & Y_b - Y_{black} \\ Z_r - Z_{black} & Z_g - Z_{black} & Z_b - Z_{black} \end{pmatrix}^{-1}$$

Für besagten EIZO Monitor ergab sich folgende Matrix:

¹⁴http://www.xrite.com/product_overview.aspx?ID=772

$$M = \begin{pmatrix} 0,029307 & -0,013481 & -0,0041967 \\ -0,010294 & 0,019695 & 0,0002018 \\ 0,0011172 & -0,0023739 & 0,011322 \end{pmatrix}$$

Diese im Programmcode genannte `xyz2rgbD65Mat`-Matrix wird mit den XYZ-Werten multipliziert. Zudem wird eine einfache Gammakorrektur von 2,2 durchgeführt.

Mit diesen Schritten ist eine korrekte photometrische Ausgabe gewährleistet, die für eine korrekte Evaluation benötigt wird.

Teil III

Ergebnisse und Bewertung

5 Evaluationsvorgehen

Mit Hilfe eines Probandentests können wichtige bisher rein theoretisch festgehaltene Annahmen belegt oder widerlegt werden.

Im Weiteren wird erläutert, wie die Evaluation aufgebaut ist, welche Fragestellungen es durch diese zu beantworten gilt und wie die Evaluation durchgeführt wird.

5.1 Zu beantwortende Fragestellungen

Der interaktive Tonemapper lässt eine Vielzahl an Einstellungsmöglichkeiten zu und ermöglicht es dem Nutzer, eine Tonemappingkurve beliebig genau einzustellen. Es gilt zu untersuchen, ob solch eine Kurve auch ein realistischeres Ergebnis liefert als vorhandene Tonemapper (siehe Kapitel 2.4). Generieren die Nutzer eventuell sogar Kurven, die identisch zu Kurven bekannter Tonemapper sind? Gibt es gar eine „genormte“ Kurve für eine Szene? Neben diesen Fragen zur Vertrauenswürdigkeit werden auch die Kriterien aus Kapitel 2.3 untersucht. Wie werden Bilder von Nutzern nach diesen Kriterien bewertet? Kann eine individuell angepasste Kurve an ein Szenario besser abschneiden als übliche Tonemapping Operatoren? In diesem Zusammenhang lässt sich prüfen, wie wichtig die einzelnen Kriterien für den Gesamteindruck sind.

Zu guter Letzt wird untersucht, ob die Bedienung des Operators intuitiv ist. Bisherige Tonemapping Operatoren bieten meist eine Vielzahl einstellbarer Parameter, von denen viele nicht intuitiv verständlich sind. Oftmals ist dann nicht klar, was eine Änderung eines Parameters bewirkt. Als Beispiel sei hier Reinhard et al. Photographic Tone Reproduction genannt, der einem das Einstellen eines Parameters *Key Value* oder *Phi* (Benennung entnommen aus Qtpfsgui) erlaubt. Lässt sich also die Graphenmetapher, bekannt aus vielen Grafikprogrammen, auch auf die Aufgabe eines Tonemappers übertragen?

Von diesen Fragestellungen ausgehend wurde der Aufbau der Evaluation entwickelt, der in den nächsten zwei Kapiteln erklärt wird.

5.2 Allgemeiner Fragebogen

Vor den eigentlichen Aufgaben stehen einige allgemeine Fragen, die für die spätere Auswertung wichtig sind. Es wird gefragt, ob sich der Proband bisher schon mit dem Thema High Dynamic Range oder Tonemapping beschäftigt hat und wie er seinen Wissensstand auf diesem Gebiet einschätzt.

Hiermit kann später zwischen erfahrenen und eher unerfahrenen Testern unterschieden werden. Weiterhin wird abgefragt, ob die Testperson unter einer Farbfehlsichtigkeit leidet. Sollten die Ergebnisse dieser Probanden stark von denen der Normalsichtigen abweichen, so müssen gegebenenfalls die Ergebnisse getrennt voneinander betrachtet werden.

Als Letztes wird nach der Erfahrung mit der Benutzung von HDR Programmen, speziell auch noch einmal von Qtpfsgui, gefragt. Die zustimmende Beantwortung einer dieser Fragen könnte Auswirkungen auf die späteren softwareergonomischen Fragestellungen haben.

5.3 Aufgabenstellungen

Die gesamte Evaluation ist grob in zwei Bereiche unterteilt, die sich fundamental unterscheiden:

1. Gedächtnisvergleich vierer mit unterschiedlichen Operatoren getonemappeter Bilder einer Campusszene
2. Direktvergleich einer realen Szene mit der Bildschirmausgabe

Der erste Bereich wird von Aufgabe 1 abgedeckt. Aufgabe 2 und 3 arbeiten mit der Boxszene, die mittels Direktvergleich bewertet wird.

Aufgabe 1: Gedächtnisvergleich

Bei der ersten Aufgabe handelt es sich um einen sogenannten Gedächtnisvergleich, d.h. die Probanden haben das Bild in ihrer Vorstellung vor Augen, nicht aber direkt neben sich. Den Probanden ist nicht bekannt, welches Bild zu welchem Tonemapper gehört. Die im Bild gezeigte Umgebung ist den Probanden bekannt, da bewusst ein Standort am Campus gewählt wurde. Eine kurze Beschreibung der Umgebungsbeleuchtung (sonniger, wolkenloser Nachmittag) wird angefügt, damit die Kandidaten einen besseren Eindruck von der ehemals vorherrschenden Helligkeit bekommen. Der Dynamikumfang beträgt ca. 1:100.000. Das Bild wurde mittels des in Kapitel 3.1 vorgestellten Verfahrens mit einer Spiegelreflexkamera aufgenommen. In diesem Kapitel wurde ebenfalls die Problematik der absoluten Kalibrierung angesprochen. Sie konnte zwar nicht entgültig gelöst werden, spielt aber auf Grund der gewählten Fragestellung keine Rolle. Jedes der vier getonemappten LDR Bilder hat als Quelle das gleiche HDR Bild. Damit bestehen für jeden Tonemapper die gleichen Voraussetzungen. Wie in Kapitel 1 erwähnt, verarbeitet das menschliche Auge zudem die Leuchtdichten nicht absolut sondern relativ zueinander. Diese Relationen bleiben im HDR Bild trotz fehlender absoluter Kalibrierung erhalten. Da es sich um einen Gedächtnisvergleich handelt, kann der Mensch sich die Leuchtdichten im Bild sowieso nur relativ vorstellen. Die Funktionsweise des interaktiven Tonemappers ist durch den verschobenen Leuchtdichtebereich im Allgemeinen



Abbildung 6: Vergleichsbilder aus Aufgabe 1 – links oben: Drago, rechts oben: interaktiver Tonemapper, links unten: Reinhard 2005, rechts unten: Reinhard 2002

nicht beeinträchtigt, da die Kurve für jeden gleichgroßen Leuchtdichtebereich identisch ist. Eine auf einem falsch kalibrierten Leuchtdichtebereich erstellte Kurve lässt sich auf einen nachträglich korrigierten Leuchtdichtebereich gleichermaßen anwenden. Für jeden der drei Tonemapper wurden die Standardeinstellungen verwendet – sie entsprechen den Einstellungen aus Tabelle 1, wobei für dieses Bild der Parameter *Brightness* des Reinhard und Devlin Photoreceptor Models auf -3 gesetzt wurde. Die verwendete Kurve des interaktiven Tonemappers wurde von mir ohne Direktvergleich mit der Szene nach bester Gedächtnisvorstellung erstellt.

Der Vergleich der Bilder ist ansich natürlich subjektiv, mit Hilfe der Kriterien Helligkeit, Kontrast, Details im Schatten und Details im Glanzlicht (in der Sonne) soll das Ergebnis möglichst objektiv betrachtbar werden. Eine Schulnote zwischen 1 (gut) und 5 (schlecht) soll für den Gesamteindruck des Bildes vergeben werden. Eine Note kann auch mehrmals vergeben werden. Zur Einschätzung der Kriterien wurden bipolare Ordinalskalen verwendet. Die Bewertung kann in fünf Abstufungen von *zu gering/wenig* bis *zu hoch/viel* erfolgen. Durch eine ungerade Anzahl an Ankreuzmöglichkeiten ist auch die Antwort *genau richtig* möglich, die sich bei der Bewertung von Kriterien anbietet.

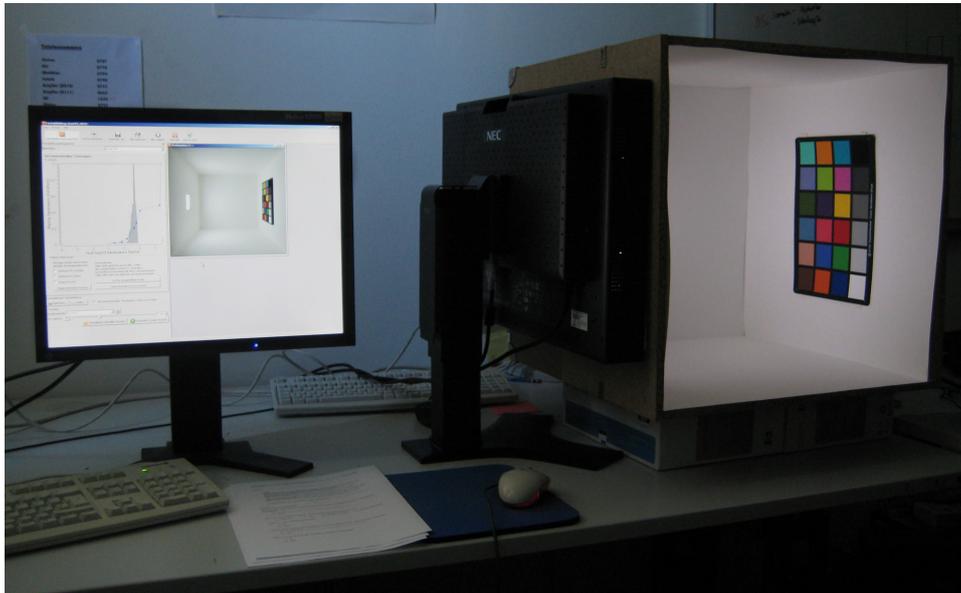


Abbildung 7: Aufbau Boxszene real und virtuell (Foto nachbearbeitet)

Aufgabe 2: Direktvergleich

Bei der zweiten Aufgabe handelt es sich um einen Direktvergleich zwischen einer mittels Computer simulierten Szene und der gleichen realen Szene (vgl. Kapitel 3.2). Der Aufbau ist in Abbildung 7 zu sehen. Die gesamte Evaluation fand im verdunkelten Raum statt um Streulicht zu verhindern, das die Lichtverhältnisse negativ beeinflusst hätte.

Die Aufgabe bestand nun darin, eine Kurve derart zu gestalten, dass das getonemappede LDR Bild der realen Szene entspricht. Da Monitor sowie Szene nebeneinander stehen, ist ein Direktvergleich möglich.

Die nächste Teilaufgabe bestand darin, die Bedienung des interaktiven Tonemappers zu bewerten. Eine Likert-Skala mit fünf Stufen dient als Antwortmöglichkeit. Eine Likert-Skala erlaubt die „Messung von persönlichen Einstellungen“ [Wik09b] mit Antworten der Art *trifft voll und ganz zu*, *teils teils* und *trifft überhaupt nicht zu*. Es wurde gefragt, ob die Bedienung intuitiv oder fummelig ist, das Ändern der Kurve eine vorhersehbare Veränderung im Bild erzeugt, der zeitliche Aufwand angemessen ist und ob man mit dem Ergebnis (zunächst) zufrieden ist.

Aufgabe 3: Vergleich zwischen individueller Tonemappingkurve und vorhandenen Tonemappern

Die letzte Aufgabe besteht darin, das Ergebnis der eigenen Tonemappingkurve mit den Ergebnissen zu vergleichen, die die Operatoren von Reinhard und Drago liefern. Dazu sollte abschließend eine Gesamteindrucksnote für

jedes LDR Bild vergeben werden. Anders als bei Aufgabe 1 ist hier erkennbar, welcher Tonemapper welches Bild erzeugt hat. Die Einstellungen für die Tonemapper sind wie folgt:

<i>Tonemapper</i>	<i>Standard Einstellungen</i>	<i>Geänderte Einstellungen</i>
Drago Adaptive Logarithmic Mapping	Bias = 0,85	–
Reinhard et al. Photographic Tone Reproduction	Key Value = 0,18 Phi = 1 Range = 8 Lower Scale = 1 Upper Scale = 43	Use Scales (lokale Version)
Reinhard and Devlin Photoreceptor Model	Chromatic Adaptation = 1 Light Adaptation = 0	Brightness = 3

Tabelle 1: Einstellungen in Qtpfsgui

Zum Abschluss bleibt den Testern Platz für weitere Kommentaren und Anregungen, speziell auch zum interaktiven Tonemapper. Diese offene Antwortmöglichkeit wird später gesondert im Ausblick ausgewertet.

5.4 Durchführung

An der gesamte Evaluation haben 13 Probanden teilgenommen. Fünf von ihnen schätzten ihren Wissensstand als gut ein, die übrigen durchschnittlich bis wenig. Alle Personen sind zwischen 21 und 30 Jahren alt. Zwei von ihnen gaben eine Rot-Grün-Schwäche an. Die Hälfte der Nutzer hat bereits einmal ein HDR Programm verwendet, aber nur einer bereits Qtpfsgui. Weiterhin habe ich selbst eine eigene Kurve für die weiße Box unter gleichen Bedingungen erstellt.

Jede Person wurde zuerst gebeten die allgemeinen Fragen zu beantworten. In dieser Zeit konnte sich jeder an die dunkle Umgebung anpassen. Dies ist insbesondere auf Grund der chromatischen Adaption des Auges wichtig. Der Test war für eine halbe Stunde angelegt, die von jeder Person benötigt wurde. Die Monitore wurden zwei Stunden vor dem Test angeschaltet, damit diese ihre maximale Leuchtdichte erreichen.

Während des Tests stand ich für Fragen bereit. Außerdem gab ich einige Hinweise: Bei Aufgabe 1 habe ich auf besondere Stellen im Bild hingewiesen, an denen man die Kriterien beurteilen kann. Für Aufgabe 2 habe ich die vorhandenen Tastenkombinationen und Funktionen kurz erklärt. Außerdem habe ich die Nutzer aufgefordert, insbesondere die Grauwertskala auf dem Colorchecker mit Hilfe der Kurve passend abzubilden. Bei Aufgabe 3 habe

ich die Bilder der übrigen Tonemapping Operatoren erstellt, damit für jede Person die identischen Parameter verwendet wurden.

6 Bewertung der Evaluationsergebnisse

Für alle Fragen wurden, wie bereits in Kapitel 5.3 angerissen, Fünferskalen (genauer gesagt Ordinalskalen) verwendet. Dies begründet sich darauf, dass noch differenziertere Skalen nur eine Scheingenauigkeit vortäuschen und der Befragte die verschiedenen Stufen nicht mehr voneinander abgrenzen kann [PG09]. Ordinalskalen drücken eine Rangfolge aus ohne etwas über die Relation zwischen den einzelnen Stufen auszusagen [Fri07] – der Abstand zwischen den einzelnen Merkmalen ist daher als nicht gleich anzunehmen. Daher können keine Differenzen, Summen oder arithmetischen Mittelwerte berechnet werden. Geht man hingegen davon aus, dass die Abstände zwischen den Antwortmöglichkeiten von den Befragten als gleich aufgefasst werden können, so können die Daten auch als Intervalldaten ausgewertet werden [May08]. Letztere Auswertungsmöglichkeit wird bei der Notengebung berücksichtigt, ansonsten wird von Ordinaldaten ausgegangen.

Die gezeigten Box-Whisper-Plots wurden anhand der Beschreibung von [Wik09a] erstellt. Die Quartilen wurden nach der Beschreibung von [Wik09c] berechnet. Dabei wird der „halbierte“ Median zwischen zwei Werten berücksichtigt wie im dortigen Beispiel 2 oder 3 angegeben.

6.1 Auswertung Aufgabe 1: Gedächtnisvergleich

Bei Aufgabe 1 sollten vier getonemappte Bilder einer Campusszene nach vier verschiedenen Kriterien beurteilt werden und eine Note zum Gesamteindruck vergeben werden. Abbildung 8 zeigt die verwendete Kurve des interaktiven Tonemappers, Abbildung 9 zeigt die Ergebnisse der Evaluation von Aufgabe 1.

Die Gesamthelligkeit wird nach Meinung der Probanden am besten von Reinhard 2002, dicht gefolgt vom interaktiven Tonemapper, wiedergegeben. Vergleicht man die Tonemappingkurven in Abbildung 8, so kann daraus geschlossen werden, dass entweder der Leuchtdichtebereich zwischen $\log_{10}3, 2$ und $\log_{10}4, 1$ vom interaktiven Tonemapper zu dunkel oder der Bereich zwischen $\log_{10}4, 1$ und $\log_{10}5$ zu hell abgebildet wird. Nur in diesem Bereich unterscheidet sich die Kurve signifikant von der Kurve des Reinhard 2002 Tonemappers. Die Ergebnisse von Drago und Reinhard 2005 sind den Nutzern zu hell, wobei hier sehr wahrscheinlich der Taschenbereich bei Drago bzw. der Stuhlbereich bei Reinhard 2005 ausschlaggebend waren.

Beim Gesamtkontrast schneidet der interaktive Tonemapper am besten ab. Die allermeisten Nutzer empfanden den Kontrast als *genau richtig*. Auch

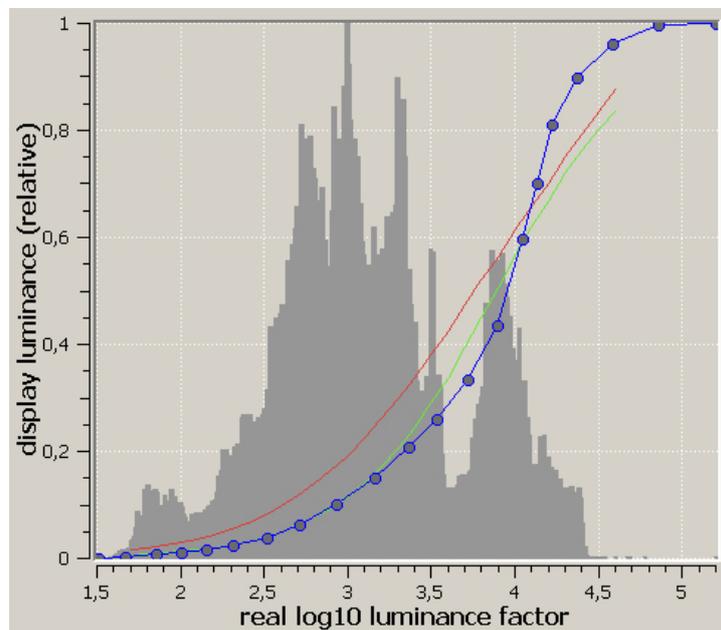


Abbildung 8: Verwendete Kurve (blau) des interaktiven Tonemappers für Aufgabe 1, sowie Kurven von Drago (rot) und Reinhard 2002 (grün). Im Hintergrund (dunkelgrau) ist das Histogramm (Verteilung der Leuchtdichten) zu sehen.

hier kann der Operator von Reinhard 2002 punkten mit leichter Tendenz zu wenig Kontrast. Drago und Reinhard 2005 konnten wiederum nicht überzeugen, da der Kontrast bei ihnen zu niedrig bzw. zu hoch war.

Die Details im Schatten sind insbesondere bei der Tasche auszumachen. Die überwiegende Mehrheit empfand den Detailgrad bei Reinhard 2002 am passendsten, wieder gefolgt vom interaktiven Tonemapper. Die Antworten zum Drago Operator sind sehr verstreut, tendenziell sind allerdings für die Tester die Details zu gering gewesen. Auch bei Reinhard 2005 sind zu wenige Details im Schatten erkennbar.

Die Details im Glanzlicht, im Bild insbesondere bei den Bodenplatten bzw. den Stühlen in der Sonne zu erkennen, kommen laut den Testern am besten beim interaktiven Tonemapper zur Geltung. Die übrigen Tonemapper liefern hier zu wenige (Drago und Reinhard 2002) bzw. viel zu wenige Details (Reinhard 2005). Vergleicht man auch hier die Tonemappingkurven in den großen Leuchtdichtebereichen, so ist zu erkennen, dass die interaktive Kurve einer S-Form nahekommt und damit den hellen Bereichen differenzierter tonemappt.

Insgesamt zeigt sich, schaut man sich die Ergebnisse bei den Kriterien an, dass sowohl der interaktive als auch der Reinhard 2002 Tonemappe ein gutes Campusbild liefern. Oftmals liegen ihre Ergebnisse dicht beieinander. Dies

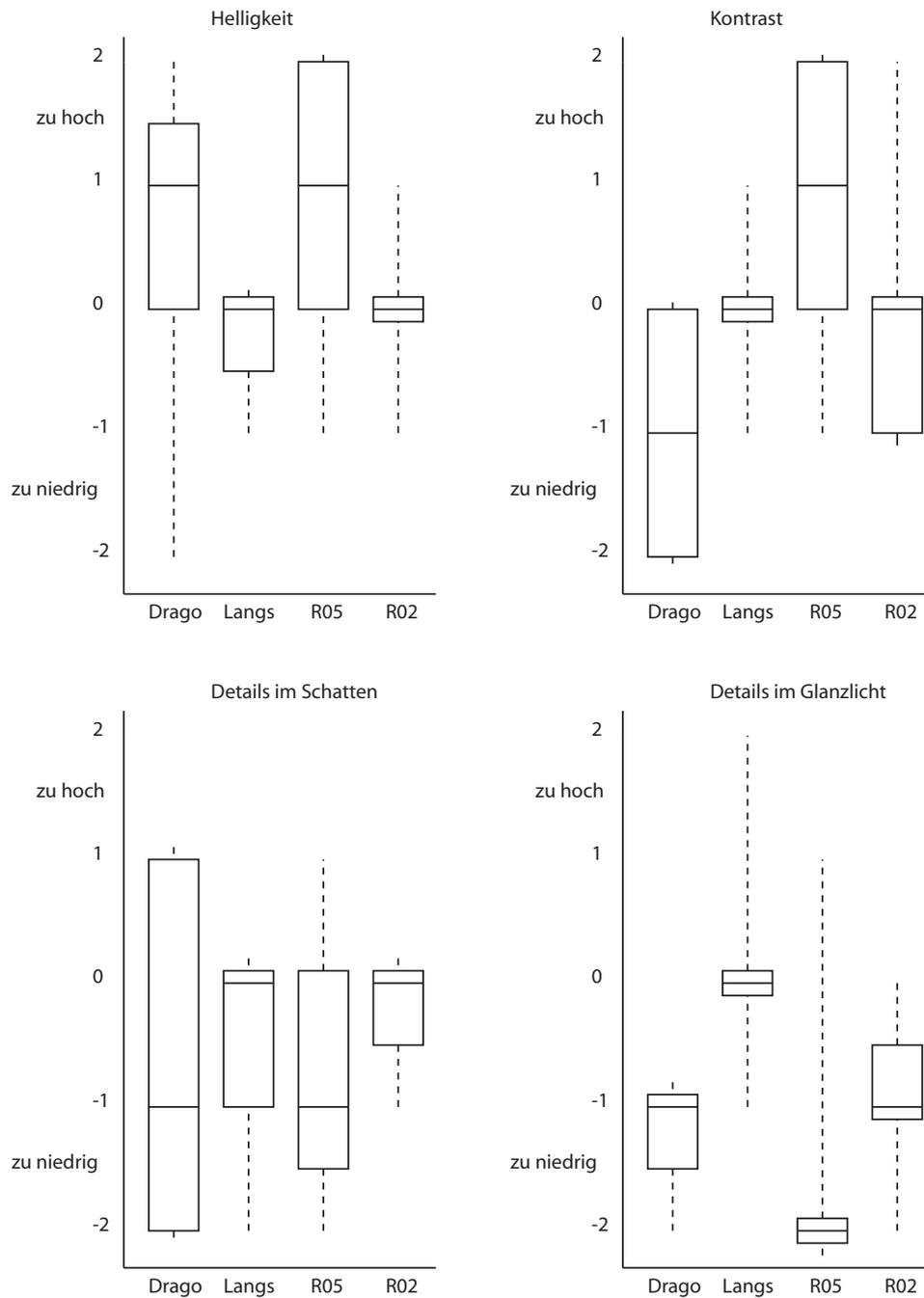


Abbildung 9: Auswertung Aufgabe 1: Box-Whisker-Plot mit Median (horizontaler mittlerer Strich innerhalb der Box), unterem und oberem Quartil, sowie Minimum und Maximum (Spannweite der abgegebenen Antworten als gestrichelte Linie)

bestätigt die Wahrnehmung, dass sich diese beiden LDR Bilder sehr ähnlich sehen, sich durchaus bei unterschiedlichen Kriterien dennoch voneinander unterscheiden.

In der Gesamtnote (vgl. Abbildung 14) setzt sich der interaktive Tonemapper klar vor dem Reinhard 2002 Operator ab. Danach folgt mit größerem Abstand der Drago Tonemapper. Das Schlusslicht bildet die Reinhard 2005 Implementation. Bildet man das arithmetische Mittel der vergebenen Noten so erhält der interaktive Operator die Note 1,2, Reinhard 2002 die 2,0, Drago die 3,5 und Reinhard 2005 die 3,9. Einen direkten Zusammenhang zwischen den einzelnen Kriterien und dem Gesamteindruck ist nicht auszumachen, da die Gesamtnote für den interaktiven Tonemapper wesentlich besser ausfällt als für den Reinhard 2002 Operator, obwohl dieser oftmals bei Einzelkriterien besser abschnitt. Eine von einem Experten speziell auf eine Szene angepasste Tonemappingkurve wird von den Nutzern als besonders realistisch eingeschätzt. Für bestimmte Szenen kann eine solche spezielle Kurve ein vertrauenswürdigeres Ergebnis erzielen als ein generischer Operator. Hieraus lassen sich viele Einsatzgebiete eines interaktiven Tonemapping Operators ableiten, wie sie in Kapitel 4.1 beschrieben sind.

6.2 Auswertung Aufgabe 2: Direktvergleich

In Aufgabe 2 ging es um das Erstellen einer eigenen Kurve, so dass das resultierende Bild auf dem Bildschirm der realen weißen Box mit Colorchecker entspricht. Danach wurden noch einige Fragen zum interaktiven Tonemapper gestellt.

6.2.1 Normierte Daten

Die Nutzer wurden dazu aufgefordert, zunächst die Grauwertskala des Colorcheckers korrekt mittels Kurve abzubilden. Es erwies sich schon in einem eigenen Vortest als äußerst schwierig die Farben korrekt wiederzugeben. In Wirklichkeit leuchten diese heller als dies mittels einer Kurve korrigierbar wäre. Zudem erwiesen sich die Rottöne und das Pink sowie Hellgrün in der zweiten oberen Reihe als äußerst schwierig und kaum reproduzierbar. Daher sollten die Farbtöne und auch die gesamte weiße Box selbst erst nach der Grauskala angepasst werden, falls genug Zeit und Lust verbleiben.

Daher ergaben sich teils sehr unterschiedliche Kurven. Die besonders dunklen Leuchtdichten, im Simulationsbild waren dies Schatten unterhalb der Farbflächen, wurden meistens nicht beachtet und folglich zu hell dargestellt, weil ein Kontrollpunkt der initialen Kurve sehr weit oben (bei 0,1) lag. Wenige Tester waren besonders akribisch bei der Anpassung der Farbtöne. Dadurch ergaben sich Sprünge in den Kurven. Erreicht werden sollte damit, dass einzelne Farbatches heller oder dunkler abgebildet werden –

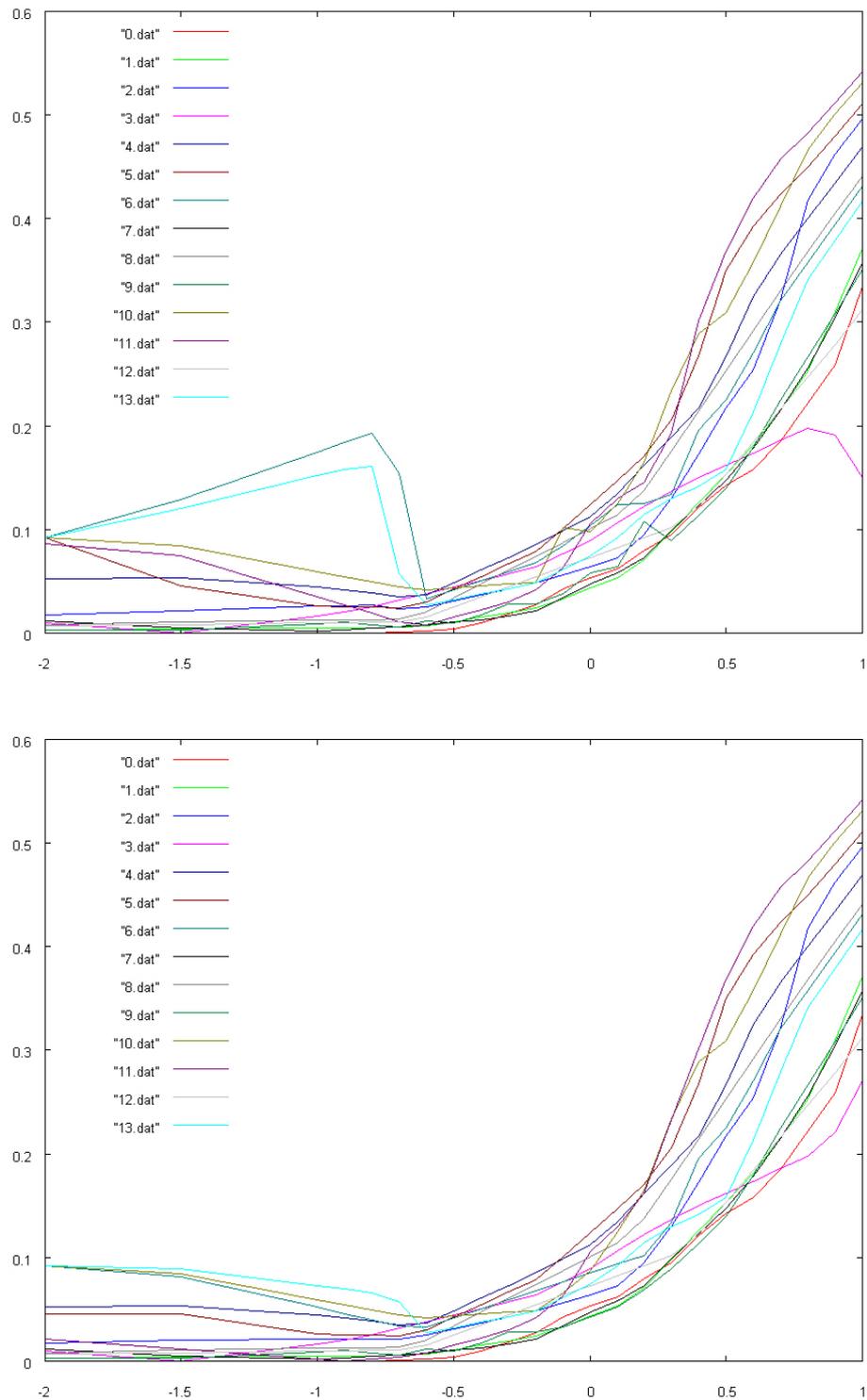


Abbildung 10: Von den Testern erstellte Kurven: oben die Originaldaten, unten die normierten Daten (ohne Ausreißer) – Ausschnitt ist auf den realen Leuchtdichtebereich von $\log_{10} - 2$ bis $\log_{10} 1$ und den relativen Bildschirmbereich von 0 bis 0,6 begrenzt.

diese wurden dann mit Hilfe der LDR-Anklick-Funktionalität (siehe Kapitel 4.2.2) gesondert betrachtet und angepasst. Bei genauerem Hinsehen ergeben sich dadurch aber teilweise Bildartefakte, da die Farbflächen mitunter nicht komplett die gleiche Leuchtdichte tragen.

Diese Besonderheiten innerhalb der Kurven wurden für die weiteren Untersuchungen entfernt. Kurvenkontrollpunkte, die solche *Ausreißer* darstellen, wurden aus den Datensätzen gelöscht und die übrigen Kontrollpunkte als neue, sogenannte *normalisierte* Kurve gespeichert. Dabei ist natürlich nicht zu vergessen, dass durch diese Änderungen auch die LDR Ausgabe nicht mehr der originalen, vom Probanden gewünschten Ausgabe entspricht. Allerdings führen Kurven, die solche Sprünge aufweisen, keinesfalls mehr zu einem im Detail vertrauenswürdigen Ergebnis, da es sich nicht mehr um eine monoton steigende Funktion handelt – alles andere wäre allein schon von der menschen Wahrnehmung aus betrachtet wenig realistisch. Abbildung 10 zeigt einen ausgewählten Bereich aller erstellter Kurven, einmal mit den Originaldaten und einmal mit den normierten Daten.

6.2.2 Kurven getrennt nach Kenntnisstand

Interessant zu erfahren ist, ob sich die Kurven von jenen Personen, die einen guten Kenntnisstand auf dem HDR Gebiet angaben, signifikant von jenen unterscheiden, die sich selbst nur einen durchschnittlichen Kenntnisstand beschneinigten. Dazu wurden die normierten Daten getrennt voneinander geplottet – Abbildung 11 zeigt das Ergebnis. Auffällig ist besonders der Kurvenverlauf im niedrigeren Leuchtdichtebereich zwischen $\log_{10} - 4$ und $\log_{10} - 1$. Offensichtlich sind sich die „guten“ Probanden der Problematik bewusst, dass die Kurve monoton steigend sein muss um keine Artefakte zu erzeugen. Ihre Kurven sind im dunklen Bereich einheitlich dunkler als die Kurven der „durchschnittlichen“ Probanden. Im für die Leuchtdichten der Grauskala des Colorcheckers wichtigen Bereich zwischen $\log_{10} - 0,5$ und $\log_{10} 0,2$ unterscheiden sich die Kurven hingegen kaum. Die Wahrnehmung der Grauskala ist offenbar bei jeder Person gleich und etwa auch gleich modelliert worden. Anders sieht hingegen prinzipiell der Kurvenverlauf bei den größeren Leuchtdichten aus: Hier gibt es große Unterschiede, was darauf zurückzuführen ist, dass viele Tester keinen großen Wert auf die helligkeitsgetreue Darstellung der weißen Box gelegt haben. Dies konnte während der Evaluation beobachtet werden und ist auch darauf zurückzuführen, dass die korrekte Wiedergabe der Grauskala forciert wurde und die Box selbst kaum Beachtung fand.

Die beiden farbfehlsichtigen Personen, die sich unter den „durchschnittlichen“ Probanden befinden, haben Kurven angegeben, die sich nicht auffallend von denen der anderen unterscheiden, weshalb auf eine weitere gesondere Auswertung verzichtet wurde.

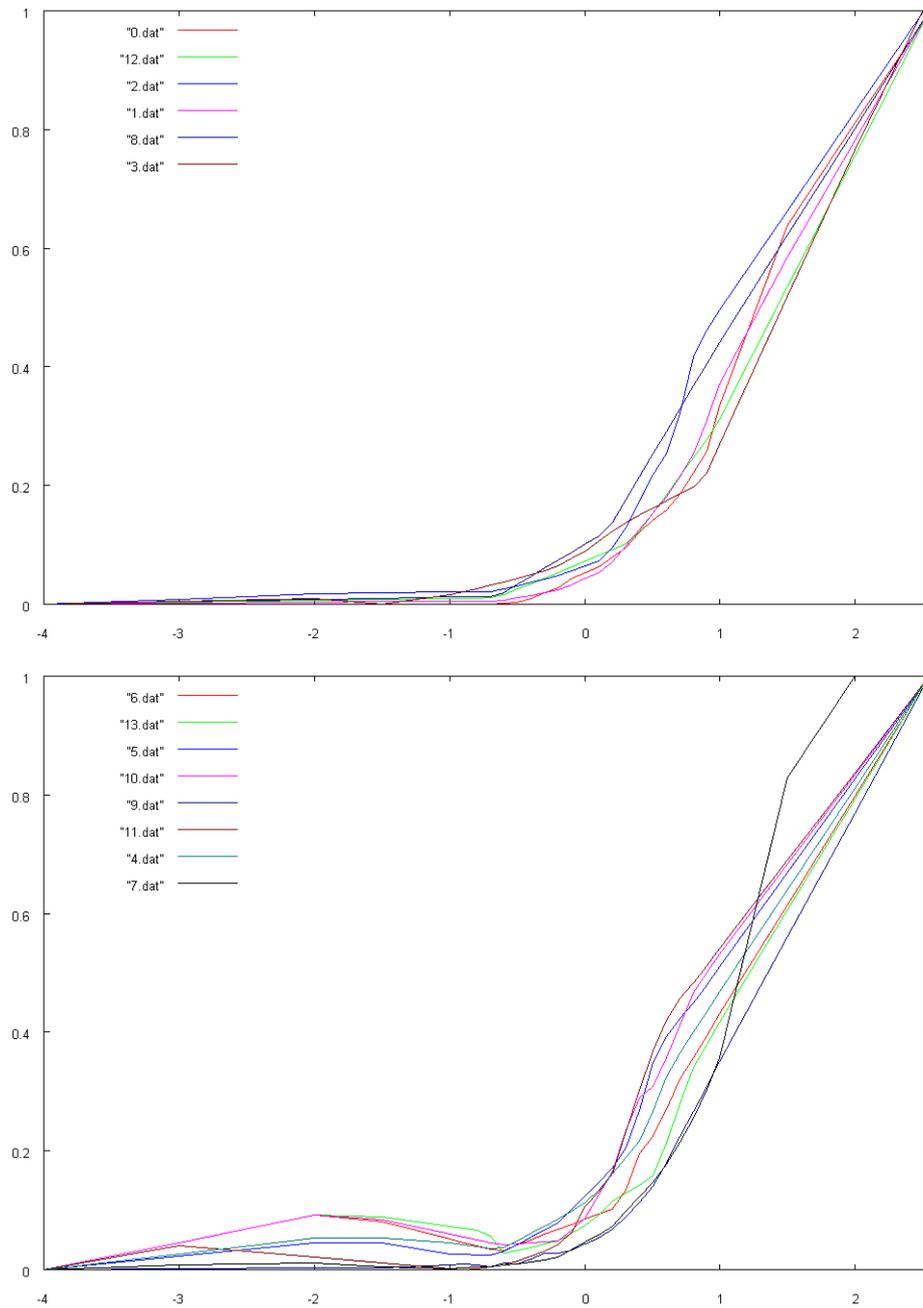


Abbildung 11: Erstellte Kurven (normierte Daten), getrennt nach gutem Kenntnisstand (oben) und durchschnittlichem Kenntnisstand (unten). Kenntnisstand beruht auf eigener Angabe im allgemeinen Fragenbogen

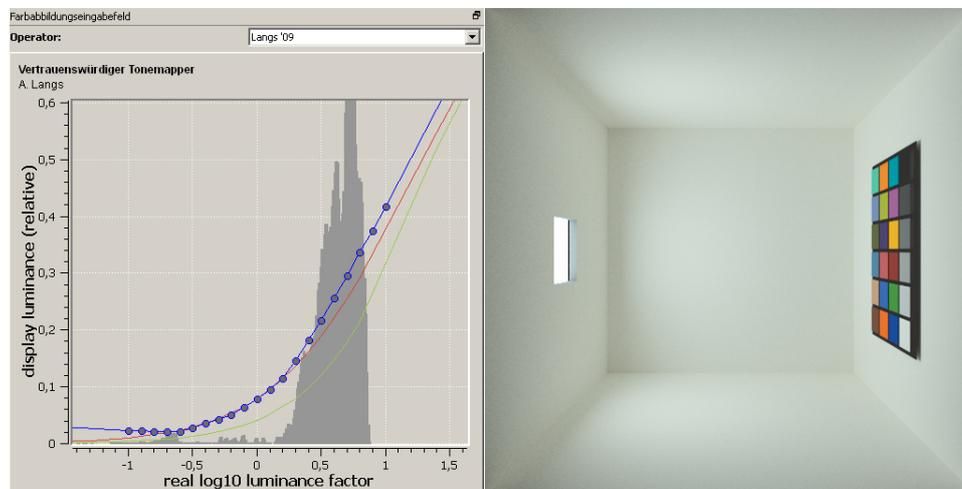


Abbildung 12: Mittelwertkurve (blau) aller (normierten) Kurven – im Vergleich: Drago (rot) und Reinhard 2002 (grün). Das zur Mittelwertkurve zugehörige LDR Bild ist rechts zu sehen.

6.2.3 „Normalbeobachterkurve“

Schon 1931 hat die internationale Beleuchtungskommission, kurz CIE, in einem Experiment mehrere Versuchspersonen Spektralfarben mittels Normfarbwerten mischen lassen. Aus diesem Experiment ging das CIE Normvalenzsystem hervor, das auch heute noch allgemein gültig und in Verwendung ist. Dadurch wurde der sogenannte *Normalbeobachter* definiert. Diese Idee wird im folgenden auch für diese Evaluation aufgegriffen. So wurden alle erstellten Kurven genommen und das arithmetische Mittel mehrerer Punkte auf der Kurve berechnet. Daraus ergibt sich eine Art Mittelwert- oder „Normalbeobachter“-Kurve (siehe Abbildung 12).

Vergleicht man diese gemittelte Kurve mit den Tonemappingkurven des Drago oder Reinhard 2002 Operators so stellt man fest, dass für die Boxszene eine große Übereinstimmung zwischen Mittelwertkurve und Dragokurve vorliegt. Zwischen $\log_{10} - 0,7$ und $\log_{10} 0,2$ ist kaum ein Unterschied zu erkennen. Der allgemeine Verlauf der Kurve ist darüber hinaus sehr ähnlich zu beiden Kurven. Daher scheinen beide Operatoren eine gute Wiedergabe der Szene als Ganzes zu liefern, wobei Reinhard 2002 insgesamt dunkler ist. Die Tester haben offensichtlich ein helleres Bild bevorzugt.

6.2.4 Kontrollpunkte

Alle Probanden hatten zu Anfang eine Kurve mit fünf Kontrollpunkten vorgegeben. Ein Kontrollpunkt befindet sich bei der minimalen Leuchtdichte bei 0, einer bei der maximalen Leuchtdichte bei 1. Die Tester bekamen den Hinweis diese Punkte nicht zu ändern. Die Tester haben insgesamt zwischen

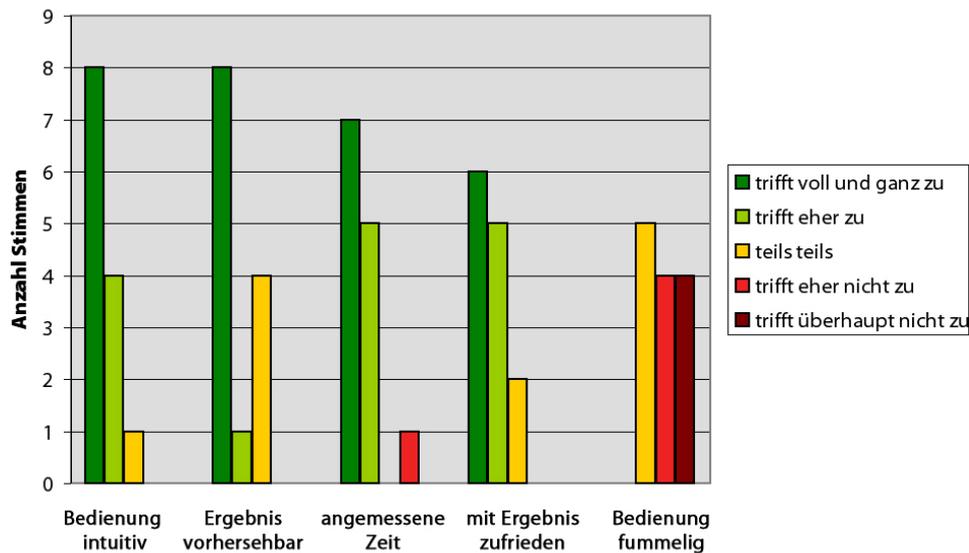


Abbildung 13: Verteilung der Antworten der allgemeine Fragen zum interaktiven Tonemapper

5 und 24 Kontrollpunkten verwendet, durchschnittlich 13. Zwei kamen mit nur fünf Punkten aus, also drei selbst gelegten, um für sie ein vertrauenswürdigeres Bild zu generieren. Je genauer man das Bild tonemappen will, je mehr Kontrollpunkte kann man verwenden. Auch wenige Punkte und eine lineare Interpolation zwischen diesen liefern bereits ein realistisches Bild. So erhält man relativ schnell einen Eindruck des Bildes und kann es ebenfalls schnell tonemappen. Das eigentliche Berechnen eines neuen LDR Bildes nach dem Ändern eines Kontrollpunktes geht ebenfalls schnell vonstatten.

6.2.5 Auswertung der allgemeinen Fragen

Im Anschluss an das Erstellen der Kurve wurden einige zusätzliche Fragen zum interaktiven Tonemapper gestellt. Die Bedienung war nach einer kurzen Einarbeitungszeit für die meisten intuitiv, dennoch fanden fünf Kandidaten die Bedienung teils fummelig. Letzteres ist auf das Setzen der Kontrollpunkte zurückzuführen, da die Übersicht bei sehr vielen Punkten in der Gesamtansicht des Plots leidet. Viele Tester verwendeten trotz Erklärung der Zoomfunktion im Plot diese nicht, weshalb das Anklicken der Punkte umso fummeliger wurde, umso mehr Punkte vorhanden sind. Die Vorerfahrung mit anderen HDR Programmen spielte keine Rolle in der Bewertung, da auch mit HDR Programmen unerfahrene Personen mit der Bedienung sehr zufrieden waren.

Die benötigte Zeit zum Erstellen der Kurve wurde ebenfalls von fast allen

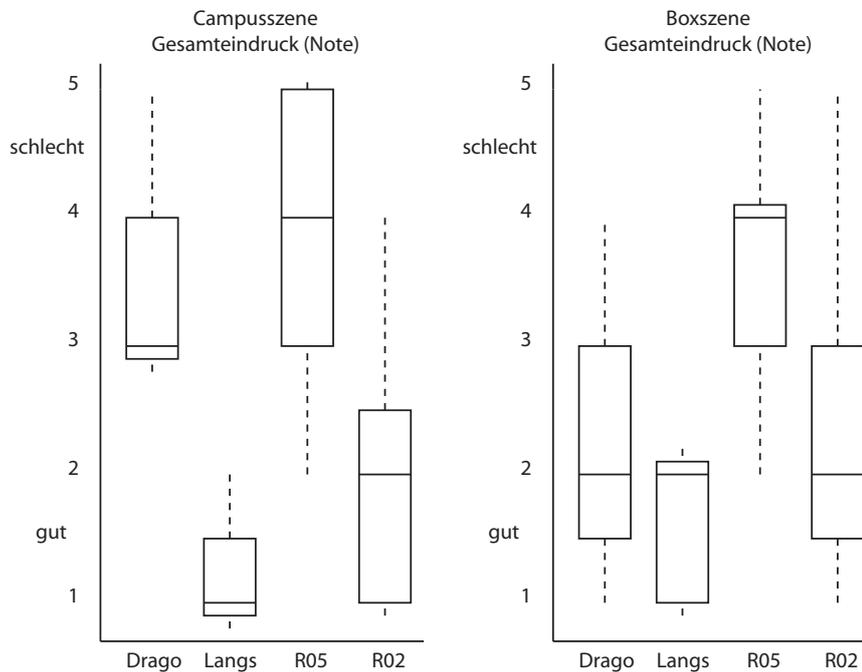


Abbildung 14: Auswertung Aufgabe 1 (links) und 3 (rechts) – Gesamteindruck mittels Schulnote zwischen 1 und 5: Box-Whisker-Plot mit Median (horizontaler mittlerer Strich innerhalb der Box), unterem und oberem Quartil, sowie Minimum und Maximum (Spannweite der abgegebenen Antworten als gestrichelte Linie)

als angemessen angesehen – nur eine Person gab an, dass diese Behauptung eher nicht stimme. Die durchschnittliche benötigte Zeit lag bei ungefähr 15 Minuten. Keiner der Tester gab vorzeitig auf.

Mit dem Ergebnis zufrieden waren 11 Personen, nur teilweise konnten sich zwei Personen mit ihrem Ergebnis anfreunden ohne vorher zu wissen, wie andere Tonemapping Operatoren dieses Bild tonemappen würden. Die Tester waren also von ihren Kurven überzeugt. Die Auswertung der dritten Aufgabe wird im nächsten Kapitel zeigen, ob die eigene Kurve dem Vergleich vorhandener Operatoren standhält.

6.3 Auswertung Aufgabe 3: Vergleich der Tonemapper

Vergleich zwischen individueller Tonemappingkurve und vorhandenen Tonemappern

Zum Abschluss wurde das Ergebnisbild, welches durch die eigene Kurve erstellt wurde, mit jenen Bilder verglichen, die durch die bereits vorhandenen Tonemapping Operatoren Drago, Reinhard 2002 und Reinhard 2005 erzeugt werden (vgl. Abbildung 15). Nach Auswertung der Noten zum Gesamteindruck ergab sich eine arithmetisch gemittelte Note von 1,7 für

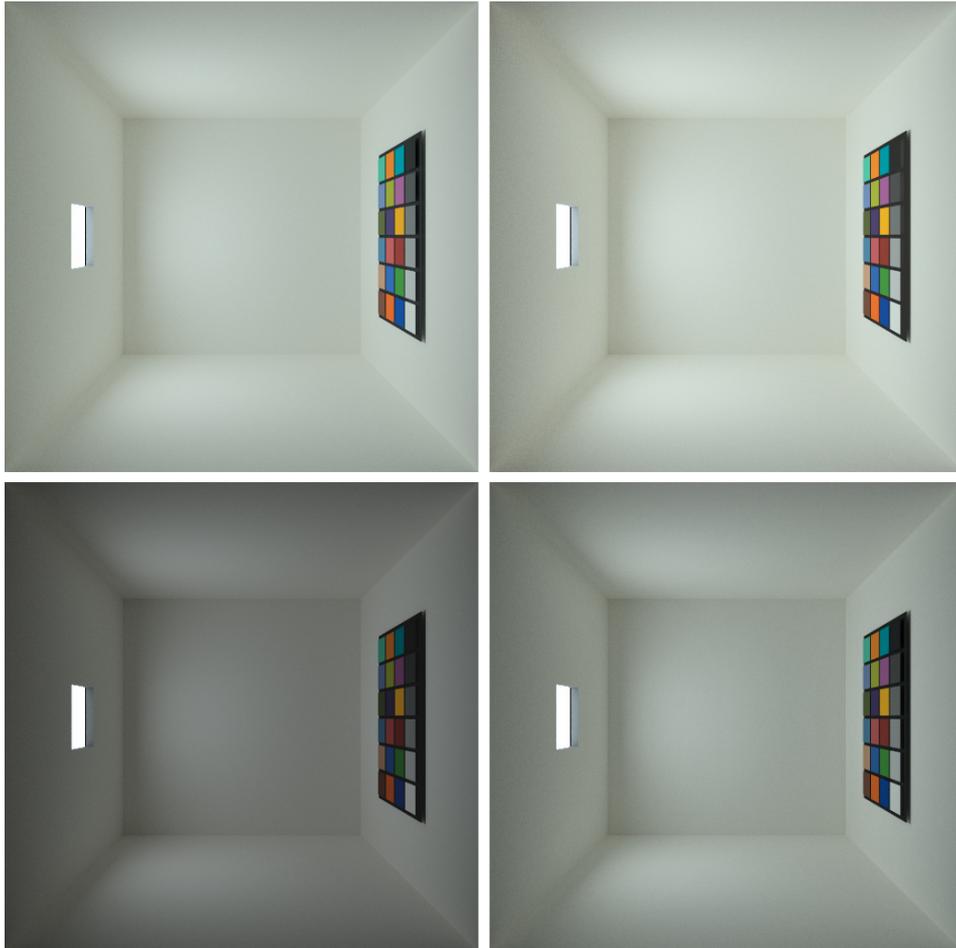


Abbildung 15: LDR Bilder der verschiedenen Tonemapper: links oben Drago, rechts oben Mittelwertkurve, links unten Reinhard 2005, rechts unten Reinhard 2002

die jeweilige individuelle Kurve, 2,3 für Drago, 2,4 für Reinhard 2002 und 3,8 für Reinhard 2005. Die Ergebnisse sind mit Vorsicht zu genießen, da die eigenen LDR Bilder vor allem nur nach der korrekten Wiedergabe des Colorcheckers bewertet wurden. Oftmals entstanden durch nicht monoton steigende Kurve Artefakte oder die weiße Box selbst wurde nicht gesondert beachtet.

Dennoch lässt dieses Ergebnis vermuten, wie groß das Potenzial einer speziell für eine Szene erstellten Kurve ist. Dies zeigte sich bereits bei der Campusszene, bei der eine extra angepasste Kurve die besten Bilder liefert. Vergleicht man beide Szenen miteinander, so konnte Drago bei der Boxszene besser überzeugen als bei der Campusszene. Reinhard 2005 konnte auch bei der Boxszene auf Grund des dunklen Ergebnisses nicht überzeugen. Hier könnte eine weitere Anpassung des *Brightness* Parameters Abhilfe schaffen, was aber wiederum Probleme bei dem Schwarzwert des Colorcheckers bedeuten könnte. Reinhard 2002 liefert wiederum ein gutes Ergebnis und ist damit von den bereits vorhandenen Operatoren der kontinuierlich am besten abschneidende Tonemapping Operator.

6.4 Gesamtbewertung

Der interaktive Tonemapping Operator wurde in der Evaluation auf zweierlei Arten ausgewertet: Zum Einen wurde mit ihm eine speziell auf die Campusszene angepasste Kurve erstellt, die dann mit ausgewählten Tonemappern verglichen wurde. Zum Anderen hat jeder Proband selbst eine Kurve für die Boxszene erstellt, die sich wiederum mit anderen Operatoren messen lassen musste. Es hat sich gezeigt, dass solch ein Operator flexibel für verschiedene Szenarien eingesetzt werden kann, da er für jedes Bild individuell eingestellt werden kann, und er damit für verschiedene Einsatzgebiete eine vertrauenswürdige Ausgabe liefern kann. Dabei muss er als global arbeitender Operator den Vergleich mit einem lokalen Operator wie dem Reinhard 2002 nicht scheuen und liefert bei einzelnen Kriterien und im Gesamteindruck bessere Ergebnisse. Die zwei getesteten Szenarien unterscheiden sich erheblich in ihrem zu reduzierenden Dynamikumfang. Insbesondere die Boxszene ist auf einen Leuchtdichtebereich von 0 bis $300 \frac{cd}{m^2}$ begrenzt und ist daher potentiell einfach zu tonemappen. Daher sehen sich die Tonemappingkurven recht ähnlich – bei wesentlich komplexeren Szenen könnte der Unterschied zwischen den Kurven größer ausfallen.

Durch die Graphendarstellung können Änderungen an der Kurve schnell im Ergebnisbild analysiert werden. Ein verbesserter Bildaktualisierungsmechanismus könnte für noch mehr Interaktivitätsgefühl sorgen, indem bereits beim Bewegen eines Kontrollpunktes das Bild aktualisiert wird und nicht erst beim Loslassen. Zusammen mit weiteren Komfortfunktionen könnte der interaktive Tonemapper noch intuitiver gestaltet werden. Es hat sich aber schon im Test gezeigt, dass das Kurvenwerkzeug nach kurzer Einar-

beitungszeit verständlich und leicht bedient werden konnte und auch ohne Expertenwissen gute LDR Bilder liefern konnte.

7 Vergleich mit anderen Evaluationen

Die Evaluation von Tonemapping Operatoren ist ein aktives Forschungsfeld. Viele andere Veröffentlichungen haben sich ebenfalls bereits dieses Themas angenommen, von denen im Weiteren ein paar kurz vorgestellt werden.

7.1 Studien

Kuang et al. [KYL⁺06] verglich in seiner Studie sechs Operatoren, davon zwei globale Operatoren (Sigmoid Transformation [BF99] und Histogram Adjustment [WLRP97]) und vier lokale Operatoren (Retinex [FCM00], iCAM [JF03], Bilateral Fast Filter [DD02] und Photographic Tone Reproduction [RSSF02]). Ein Experiment bestand aus dem paarweisen Vergleichen von Bildern an einem LDR Bildschirm. In einem zweiten Experiment mussten Probanden Kriterien auf einer Skala bewerten. Bei beiden Tests waren die HDR Bilder ohne Referenz gegeben. Das letzte dritte Experiment benutzte invariante, konstruierte Szenen die mittels Direktvergleich bewertet werden sollten. Keiner der Operatoren arbeitet durchgängig auf allen HDR Bildern sehr gut, weshalb geschlossen wird, dass eine große Abhängigkeit von der Szene vorliegt. Die Photographic Tone Reproduction und Bilateral Fast Filter Operatoren lieferten durchschnittlich mit die besten Bilder. Auch bei der Bewertung der Kriterien schnitten diese am besten ab. Die beiden globalen Operatoren wurden bei den meisten Kriterien nicht so gut bewertet.

Eine weitere Studie von Yoshida et al. [YBMS05] untersuchte sieben Tonemapping Operatoren in einem Direktvergleich von realen Szenen und ihren getonemappten LDR Bildern dieser Szenen auf einem handelsüblichen Monitor. Die verwendeten globalen Operatoren waren unter anderem Operatoren von Pattanaik [PYG00], Ward [WLRP97] und Drago [DMMS02] sowie die lokalen Operatoren von Durand und Dorsey (Bilateral Fast Filter [DD02]), Ashikhmin [Ash02] und Reinhard [RSSF02]. Verschiedene Kriterien sollten mittels Schieberegler bewertet werden. Mehrere interessante Beobachtungen konnten so gewonnen werden:

- Globale Verfahren schaffen einen höheren Kontrast als lokale
- Lokale Operatoren erhalten mehr Details als globale
- Die Ergebnisse von Ward, Reinhard und Drago wurden am Natürlichsten eingeschätzt

- Kein einzelnes Kriterium hat einen starken Einfluss auf die Bewertung der Natürlichkeit (\approx Gesamteindruck) des Bildes

Als Letztes sei noch die Studie von Čadík et al. [ČWNA08] zu erwähnen. In einem Test wurden in einem Direktvergleich zwischen realer Szene und Monitorabbild Kriterien bewertet, in einem zweiten Test LDR Bilder ohne Referenz (Gedächtnisvergleich) pro Kriterium sortiert. Es wurden 14 Tonemapping Operatoren verwendet, darunter die meisten der bereits in den anderen Studien erwähnten. Die wichtigsten gewonnenen Ergebnisse sind:

- Globale Operatoren (und lokale, die einen guten globalen Anteil besitzen) wurden generell bei dem Kriterium der Natürlichkeit besser bewertet als solche, die Details verbessern oder überhaupt nicht auf der menschlichen Wahrnehmung beruhen
- Die besten Ergebnisse bei der Gesamtqualität der Bilder liefern die globalen Operatoren
- Kriterien, die für das gesamte Bild gelten, z.B. der allgemeine Kontrast, sind am entscheidendsten für die Gesamtqualität

Damit schlussfolgern Čadík et al., dass globale Tonemapper für wahrnehmungstreue Wiedergaben am besten geeignet sind. Lokale Operatoren sind nur dann ebenfalls gut, wenn sie einen starken globalen Anteil haben. Ein Beispiel eines solchen Operators ist Reinhard's Photographic Tone Reproduction, der zusammen mit Ward's Operator auch bei dieser Evaluation gut abschnitt.

7.2 Vergleich

Liest man sich die zuvor genannten Studien durch, so ist zu erkennen, dass Reinhard's Photographic Tone Reproduction fast immer am besten abschneidet. Auch in dieser Evaluation kann Reinhard's Operator überzeugen. Es ist anzunehmen, dass ein entsprechend eingestellter interaktiver Operator auch in den übrigen Studien gut abschneiden würde, was natürlich mit einem erheblichen Zeitaufwand einherginge, da für jedes Bild eine eigene Kurve erstellt werden müsste. Untermauert werden kann diese Vermutung durch Čadík's et al. Résumé, das besagt, dass globale Operatoren für vertrauenswürdige Ausgaben besser geeignet seien als lokale. Das Ergebnis von Kuang et al., bei dem lokale Operatoren durchweg besser abschnitten, kann nur auf das Fehlen guter globaler Operatoren zurückgeführt werden. Zu beachten ist, dass auch bei deren Experimenten der Photographic Tone Reproduction Operator gut bewertet wurde, der einen bedeutenden globalen Anteil hat. Der interaktive Tonemapper muss sich daher hinter

lokalen Operatoren nicht verstecken und kann trotz dieser zuerst vermuteten vermeintlichen Schwäche für den Einsatz zum vertrauenswürdigen Tonemapping verwendet werden.

Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Studienarbeit wurde ein interaktiver Tonemapping Operator für HDR Bilder entwickelt und evaluiert. Hierzu wurden zunächst Kriterien erarbeitet, anhand denen man die Vertrauenswürdigkeit eines LDR Bildes messen kann. Diese Kriterien wurden ebenfalls dafür verwendet, um im Vorfeld Tonemapper auszuwählen, die für die spätere Evaluation zum Vergleich dienen.

Der interaktive Tonemapper ist ein umfangreiches Kurvenwerkzeug, mit dem man die verwendete Tonemappingkurve intuitiv selbst erstellen kann. Nützliche Funktionen wie z.B. das Zoomen in den Plot oder das Speichern der Kurve erweitern den Tonemapper. Das Einfügen von Tonemappingkurven anderer Tonemapper ermöglicht den einfachen Vergleich zwischen diesen.

Für die umfangreiche Evaluation wurden zwei verschiedene Szenarien entworfen. Für einen Gedächtnisvergleich wurde eine Campusszene mittels handelsüblicher Spiegelreflexkamera mit einer Belichtungsserie aufgenommen und in einem HDR Bild gespeichert. Eine Tonemappingkurve wurde mit Hilfe des interaktiven Tonemappers sorgfältig erstellt. Die Campusszene wurde dann mit dieser Kurve und mit drei anderen Operatoren getonemapped und den Probanden der Evaluation zum Vergleich am Bildschirm vorgelegt. Ein weiteres Szenario wurde für einen Direktvergleich eigens erstellt: Eine weiße Box mit einem Colorchecker wurde gebaut und spektral vermessen. Diese Szene wurde anschließend am Computer nachmodelliert und mit einem Path-Tracer gerendert. An einem zuvor kalibrierten Monitor wurde das erhaltene HDR Bild angezeigt und sollte von den Kandidaten mit dem realen Erscheinungsbild verglichen werden. Dazu wurde von jedem Tester eine Tonemappingkurve erstellt.

Die Auswertung der Evaluation zeigte, dass eine für eine bestimmte Szene erstellte Kurve vertrauenswürdige LDR Bilder liefert und dabei als global arbeitender Operator auch bessere Ergebnisse liefern kann als ein lokaler Operator. Insgesamt erreichte der interaktive Tonemapping Operator sehr gute Bewertungen im Gesamteindruck und konnte seine Konkurrenz teils deutlich schlagen. Aus den gesammelten, von den Testern erstellten Kurven wurde eine sogenannte Normalbeobachterkurve erstellt, die mit anderen Kurven verglichen wurde. Damit wurde die Idee des CIE Normalbeobachters aufgegriffen und auf das Tonemapping übertragen. In einer weiteren Evaluation könnte man solche Normalbeobachterkurven explizit noch einmal auswerten.

Von den Testern wurden einige weitere Anregungen gegeben, wie man den interaktiven Tonemapping Operator weiter verbessern könnte. Weitere

Komfortfunktionen, wie z.B. das Reinzoomen in das LDR Bild, das Verschieben mehrerer Kontrollpunkte auf einmal oder eine Redo/Undo-Liste für das Setzen der Punkte, wurden gewünscht – hier sind kaum Grenzen gesetzt um die Bedienung weiter zu verbessern.

Alles in allem konnte der interaktive Tonemapping Operator bei den untersuchten Szenen überzeugen. Er ist ein mächtiges und gleichzeitig intuitives und komfortables Werkzeug für das Erstellen vertrauenswürdiger LDR Bilder. Damit ist er bestens geeignet um z.B. im Produktionsdesign eingesetzt zu werden, bei dem es auf eine vertrauenswürdige Ausgabe bestimmter Szenarien ankommt.

Abbildungsverzeichnis

1	Tonemapping „Pipeline“ nach [Jac07]	3
2	Belichtungsserie für die erste Testszene	9
3	Vorabergebnisse verschiedener Operatoren. Von oben links nach unten rechts (zeilenweise): Drago, Reinhard 2005, Reinhard 2002 (lokal), Ashikhmin, Fattal, Mantiuk	10
4	Hauptfenster Qtpfsgui (advanced) mit interaktivem Tonemapper	18
5	Aktivitätsdiagramm zum Verlauf des Tonemappings	20
6	Vergleichsbilder aus Aufgabe 1 – links oben: Drago, rechts oben: interaktiver Tonemapper, links unten: Reinhard 2005, rechts unten: Reinhard 2002	25
7	Aufbau Boxszene real und virtuell (Foto nachbearbeitet)	26
8	Verwendete Kurve (blau) des interaktiven Tonemappers für Aufgabe 1, sowie Kurven von Drago (rot) und Reinhard 2002 (grün). Im Hintergrund (dunkelgrau) ist das Histogramm (Verteilung der Leuchtdichten) zu sehen.	29
9	Auswertung Aufgabe 1: Box-Whisker-Plot mit Median (horizontaler mittlerer Strich innerhalb der Box), unterem und oberem Quartil, sowie Minimum und Maximum (Spannweite der abgegebenen Antworten als gestrichelte Linie)	30
10	Von den Testern erstellte Kurven: oben die Originaldaten, unten die normierten Daten (ohne Ausreißer) – Ausschnitt ist auf den realen Leuchtdichtebereich von $\log_{10} - 2$ bis $\log_{10} 1$ und den relativen Bildschirmbereich von 0 bis 0,6 begrenzt.	32
11	Erstellte Kurven (normierte Daten), getrennt nach gutem Kenntnisstand (oben) und durchschnittlichem Kenntnisstand (unten). Kenntnisstand beruht auf eigener Angabe im allgemeinen Fragenbogen	34
12	Mittelwertkurve (blau) aller (normierten) Kurven – im Vergleich: Drago (rot) und Reinhard 2002 (grün). Das zur Mittelwertkurve zugehörige LDR Bild ist rechts zu sehen.	35
13	Verteilung der Antworten der allgemeine Fragen zum interaktiven Tonemapper	36
14	Auswertung Aufgabe 1 (links) und 3 (rechts) – Gesamteindruck mittels Schulnote zwischen 1 und 5: Box-Whisker-Plot mit Median (horizontaler mittlerer Strich innerhalb der Box), unterem und oberem Quartil, sowie Minimum und Maximum (Spannweite der abgegebenen Antworten als gestrichelte Linie)	37
15	LDR Bilder der verschiedenen Tonemapper: links oben Drago, rechts oben Mittelwertkurve, links unten Reinhard 2005, rechts unten Reinhard 2002	38

Literatur

- [Ash02] Michael Ashikhmin. A tone mapping algorithm for high contrast images. In P. Debevec and S. Gibson, editors, *13th Eurographics Workshop on Rendering*, pages 145–155. The Eurographics Association, 2002.
- [BF99] G.J. Braun and M.D. Fairchild. Image lightness rescaling using Sigmoidal contrast enhancement functions. *IS&T/SPIE Electronic Imaging '99, Color Imaging: Device Independent Color, Color Hardcopy, and Graphic Arts IV*:96–105, 1999.
- [ČWNA08] Martin Čadík, Michael Wimmer, Laszlo Neumann, and Alessandro Artusi. Evaluation of HDR tone mapping methods using essential perceptual attributes. *Computers & Graphics*, 32:330–349, 2008.
- [DD02] F. Durand and J. Dorsey. Fast bilateral filtering for the display of high-dynamic-range images. In *Proceedings of ACM SIGGRAPH 2002, Annual Conference Series*, pages 257–266, 2002.
- [DM97] Paul E. Debevec and Jitendra Malik. Recovering high dynamic range radiance maps from photographs. In *SIGGRAPH '97: Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 369–378, New York, NY, USA, 1997. ACM Press / Addison-Wesley Publishing Co.
- [DMAC03] F. Drago, K. Myszkowski, T. Annen, and N. Chiba. Adaptive logarithmic mapping for displaying high contrast scenes. *Computer Graphics Forum*, 22:419–426, 2003.
- [DMMS02] Frederic Drago, William L. Martens, Karol Myszkowski, and Hans-Peter Seidel. Perceptual evaluation of tone mapping operators with regard to similarity and preference. Online unter <http://www.mpi-inf.mpg.de/resources/hdr/TMO/DragoTechRep.pdf>, 2002. [Letzter Aufruf: 27.09.2009].
- [DR05] Kate Devlin and Erik Reinhard. Dynamic range reduction inspired by photoreceptor physiology. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 11:13–24, 2005.
- [FCM00] B. Funt, F. Ciurea, and J. McCann. Retinex in matlab. In *Proceedings of the IS&T/SID Eighth Color Imaging Conference: Color Science, Systems and Applications*, pages 112–121, 2000.
- [FLW02] Raanan Fattal, Dani Lischinski, and Michael Werman. Gradient domain high dynamic range compression. In *SIGGRAPH '02*:

- Proceedings of the 29th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 249–256, New York, NY, USA, 2002. ACM.
- [Fod04] Andreas Fode. Robuste Generierung von High Dynamic Range Bildern. Online unter <http://www.uni-koblenz.de/~cg/Diplomarbeiten/DiplomarbeitAFode.pdf>, 2004. [Letzter Aufruf: 27.09.2009].
- [FPSG96] James A. Ferwerda, Sumanta Pattanaik, Peter Shirley, and Donald P. Greenberg. A model of visual adaptation for realistic image synthesis. In Holly Rushmeier, editor, *SIGGRAPH 96 Conference proceedings*, Annual Conference Series, pages 249–258. Addison Wesley, August 1996.
- [Fri07] Verena Friedrich. Programmevaluation. Online unter http://www.evalguide.ethz.ch/program_evaluation/analyse_data_prog/analyse_data/level_measurement, 2007. [Letzter Aufruf: 27.09.2009].
- [IG04] Mehlika Inanici and Jim Galvin. Evaluation of high dynamic range photography as a luminance mapping technique. Online unter <http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/841925-QBBn0i/native/841925.pdf>, 2004. [Letzter Aufruf: 27.09.2009].
- [Jac07] Axel Jacobs. High dynamic range imaging and its application in building research. *Advances in Building Energy Research*, 1(1):177–202, 2007.
- [JF03] G.M. Johnson and M.D. Fairchild. Rendering hdr images. *IS&T/SID 11th Color Imaging Conference, Scottsdale*, pages 36–41, 2003.
- [Koc09] Jörg Koch. Color confidence in computer graphics, 2009.
- [KYL⁺06] Jiangtao Kuang, Hiroshi Yamaguchi, Changmeng Liu, Garrett M. Johnson, and Mark D. Fairchild. Evaluating hdr rendering algorithms. Online unter <http://www.cis.rit.edu/fairchild/PDFs/PAP24.pdf>, 2006. [Letzter Aufruf: 27.09.2009].
- [Löf03] Eva Maria Löffler. Messverfahren zur Bestimmung der relativen spektralen Empfindlichkeit von Digitalkamerasystemen. Online unter <http://www.anagramm.de/neu/download/pdf-d/Loeffler.pdf>, April 2003. [Letzter Aufruf: 28.09.2009].

- [May08] Horst Otto Mayer. Zu Beginn das Eis brechen – Wissenswertes zur Fragebogenentwicklung. Online unter <http://www.economag.de/magazin/2008/5/95+Zu+Beginn+das+Eis+brechen>, 2008. [Letzter Aufruf: 27.09.2009].
- [Mül08] Stefan Müller. Vorlesung "Photorealistische Computergaphik": Tone-Mapping. Online unter http://userpages.uni-koblenz.de/~cg/ws0809/pcg/12_ToneMapping_2.pdf, 2008. [Letzter Aufruf: 30.09.2009].
- [MMS05] Rafał Mantiuk, Karol Myszkowski, and Hans-Peter Seidel. A perceptual framework for contrast processing of high dynamic range images. In *APGV '05: Proceedings of the 2nd symposium on Applied perception in graphics and visualization*, pages 87–94, New York, NY, USA, 2005. ACM Press.
- [PG09] Axel Pratzner and Klaus Gurr. Fragebogen, Internet Umfragen, Online Survey - einfach Umfragen durchführen. Online unter <http://www.fragebogen.de/aufbau-der-antworten-bei-fragebogen.htm>, 2009. [Letzter Aufruf: 27.09.2009].
- [PYG00] Jack E. Pattanaik, Sumanta N. and Tumblin, Hector Yee, and Donald P. Greenberg. Time-dependent visual adaptation for realistic image display. In *Proceedings of ACM SIGGRAPH 2000*, Annual Conference Series, pages 47–54. ACM Press / ACM SIGGRAPH / Addison Wesley Longman, July 2000.
- [RSSF02] Erik Reinhard, Michael Stark, Peter Shirley, and James Ferwerda. Photographic tone reproduction for digital images. In *ACM Transactions on Graphics*, volume 21, pages 267–276, New York, NY, USA, 2002. ACM.
- [RWPD09] Erik Reinhard, Greg Ward, Sumanta Pattanaik, and Paul Debevec. *High Dynamic Range Imaging*. Elsevier, 2009.
- [Saw06] Nils Sawade. Entwicklung eines High Dynamic Range Verarbeitungsprogramms. Online unter http://www.uni-koblenz.de/~cg/Studienarbeiten/SA_Sawade.pdf, 2006. [Letzter Aufruf: 27.09.2009].
- [Wik09a] Wikipedia. Boxplot — Wikipedia, Die freie Enzyklopädie. Online unter <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Boxplot&oldid=64753011>, 2009. [Letzter Aufruf: 28.09.2009].
- [Wik09b] Wikipedia. Likert-Skala — Wikipedia, Die freie Enzyklopädie. Online unter <http://de.wikipedia.org/w/index.php?>

- title=Likert-Skala&oldid=60599927, 2009. [Letzter Aufruf: 21.09.2009].
- [Wik09c] Wikipedia. Quartile — Wikipedia, The Free Encyclopedia. Online unter <http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Quartile&oldid=311640782>, 2009. [Letzter Aufruf: 28.09.2009].
- [WLRP97] Gregory Ward Larson, Holly Rushmeier, and Christine Piatko. A visibility matching tone reproduction operator for high dynamic range scenes. In *SIGGRAPH '97: ACM SIGGRAPH 97 Visual Proceedings: The art and interdisciplinary programs of SIGGRAPH '97*, page 155, New York, NY, USA, 1997. ACM.
- [YBMS05] Akiko Yoshida, Volker Blanz, Karol Myszkowski, and Hans-Peter Seidel. Perceptual evaluation of tone mapping operators with real-world scenes. In Bernice E. Rogowitz, Thrasyvoulos N. Pappas, and Scott J. Daly, editors, *Human Vision and Electronic Imaging X, IS&T/SPIE's 17th Annual Symposium on Electronic Imaging (2005)*, volume 5666 of *SPIE Proceedings Series*, pages 192–203, San Jose, USA, January 2005. SPIE.

Anhang

Aufgaben- und Fragebogen der Evaluation

Name: _____

Hallo!

Vielen Dank noch einmal, dass du an diesem Test für meine Studienarbeit zum Thema „Vertrauenswürdiger HDR Tonemapping“ teilnimmst.

Deine Daten werden selbstverständlich nur anonymisiert und nur in meiner Studienarbeit verwendet.

Falls zwischenzeitlich Fragen auftauchen, so scheue dich nicht zu fragen!

Möchtest du später über das Ergebnis des Tests informiert werden, so trage bitte deine E-Mail Adresse ein!

Du kannst mich für spätere Fragen unter allangs@uni-koblenz.de erreichen.

E-Mail-Adresse für Ergebnisse, wenn gewünscht: _____

Ein paar kurze Fragen zu dir

Hast du dich schon einmal mit dem Thema High Dynamic Range und/oder Tonemapping beschäftigt?

ja, mit _____

nein

Wenn ja, wie schätzt du deinen Wissensstand auf diesem Gebiet ein?

sehr gut gut durchschnittlich wenige Kenntnisse

Leidest du unter Farbfehlsichtigkeit?

ja

nein

Hast du schon einmal ein Programm/Tool zum Thema HDR/Tonemapping verwendet?

ja, und zwar _____

nein

Hast du schon einmal das Programm *Qtprfsgui* verwendet?

ja

nein

Aufgabe 1

Du siehst am Bildschirm 4 Bilder, die jeweils den gleichen Bildausschnitt unseres Campus zeigen. Das Bild entstand an einem sonnigen, wolkenlosen Nachmittag.

Bitte beurteile für jedes Bild die folgenden Kriterien:

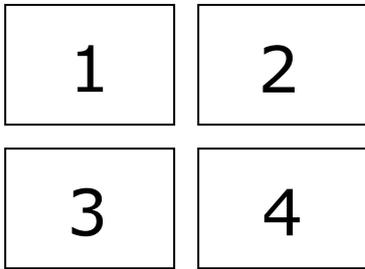


Bild 1

	Zu gering/wenig		Genau richtig		Zu hoch/viel
Helligkeit	<input type="radio"/>	—	<input type="radio"/>	—	<input type="radio"/>
Kontrast	<input type="radio"/>	—	<input type="radio"/>	—	<input type="radio"/>
Details im Schatten	<input type="radio"/>	—	<input type="radio"/>	—	<input type="radio"/>
Details im Glanzlicht (in der Sonne)	<input type="radio"/>	—	<input type="radio"/>	—	<input type="radio"/>
Gesamteindruck (Note)	1	2	3	4	5
	<input type="radio"/>	—	<input type="radio"/>	—	<input type="radio"/>

Bild 2

	Zu gering/wenig		Genau richtig		Zu hoch/viel
Helligkeit	<input type="radio"/>	—	<input type="radio"/>	—	<input type="radio"/>
Kontrast	<input type="radio"/>	—	<input type="radio"/>	—	<input type="radio"/>
Details im Schatten	<input type="radio"/>	—	<input type="radio"/>	—	<input type="radio"/>
Details im Glanzlicht (in der Sonne)	<input type="radio"/>	—	<input type="radio"/>	—	<input type="radio"/>
Gesamteindruck (Note)	1	2	3	4	5
	<input type="radio"/>	—	<input type="radio"/>	—	<input type="radio"/>

Bild 3

	Zu gering/wenig		Genau richtig		Zu hoch/viel
Helligkeit	○	○	○	○	○
Kontrast	○	○	○	○	○
Details im Schatten	○	○	○	○	○
Details im Glanzlicht (in der Sonne)	○	○	○	○	○
	1	2	3	4	5
Gesamteindruck (Note)	○	○	○	○	○

Bild 4

	Zu gering/wenig		Genau richtig		Zu hoch/viel
Helligkeit	○	○	○	○	○
Kontrast	○	○	○	○	○
Details im Schatten	○	○	○	○	○
Details im Glanzlicht (in der Sonne)	○	○	○	○	○
	1	2	3	4	5
Gesamteindruck (Note)	○	○	○	○	○

Aufgabe 2a

Verwende das zweite Programm in der Taskleiste für die folgende Aufgabe!

Schau nun neben dich: du siehst eine Box mit einem so genannten Colorchecker.

Verwende den Operator *Langs09* um das geöffnete Bild farbabbzubilden (tonemappen) – und zwar so, dass es der nebenstehenden Szene entspricht!

Im Plot sind auf der x-Achse die *Leuchtdichten (Helligkeiten)* des Bildes (\log_{10} luminance) abgetragen, auf der y-Achse den darauf abgebildeten *Farbhelligkeitswert*.

Speichere (links unten unter Einstellungen Farbabbildung) anschließend (wenn du mit deinem Ergebnisbild zufrieden bist) deine Kurve unter folgendem Namen ab:

Nachname-Aufg2a.txt

Bevor du loslegst, beachte bitte noch folgendes:

Präge dir die reale Szene gut ein und beginne dann die Aufgabe. Dein Auge muss sich an die veränderte Beleuchtungssituation des Monitors anpassen.

Wenn du die Bildschirmausgabe mit der realen Szene vergleiche möchtest, präge dir bitte wiederum die Szene ein und adaptiere dich erneut an den Bildschirm ehe du fortfährst.

Versuche ein „Hin- und Herschwenken“ zu vermeiden!

Kleine Bedienungsanleitung:

- In den Plot reinzoomen: Rechtsklicken (halten) und Rahmen ziehen
- Aus dem Plot rauszoomen: Shift-Taste oder Strg-Taste gedrückt halten und Rechtsklicken
- Um nur den y-Wert des ausgewählten Punktes zu verändern, halte die Shift-Taste gedrückt und wähle den Punkt mit einem Linksklick an
- Um eine bestimmte Helligkeit im Bild zu verändern, wähle jene Stelle im Bild mit einem doppelten Linksklick aus – ein Punkt im Plot wird am entsprechenden x-Wert erzeugt

Aufgabe 2b

Du hast nun den Langs09 Operator mit seinem Kurvenwerkzeug ausgiebig testen können. Bitte beantworte nun noch folgende Fragen:

	Trifft voll und ganz zu		Teils teils		Trifft überhaupt nicht zu
Die Bedienung des Langs09 Operators war intuitiv verständlich	○	—	○	—	○
Das Ändern der Kurve erzeugte eine vorhersehbare Veränderung im Bild	○	—	○	—	○
Mit Hilfe der Kurve konnte man das Bild in angemessener Zeit farbabbilden (tonemappen)	○	—	○	—	○
Mit den Ergebnisbildern des Langs09 Operators war ich im Allgemeinen sehr zufrieden	○	—	○	—	○
Das Anpassen der Kurve war fummelig	○	—	○	—	○

Aufgabe 3

Du hast nun das Bild mit deiner eigenen Kurve farbabgebildet.

Wende nun folgende Operatoren (mit Standardeinstellungen) jeweils in einem neuen Fenster auf das gleiche Bild an:

- a) Reinhard02
- b) Reinhard05
- c) Drago

Bitte gib für jedes Bild nun deine Beurteilung ab was den Gesamteindruck angeht:

Reinhard02 Ergebnisbild

Gesamteindruck (Note) 1 2 3 4 5

○──────────○──────────○──────────○──────────○

Reinhard05 Ergebnisbild

Gesamteindruck (Note) 1 2 3 4 5

○──────────○──────────○──────────○──────────○

Drago Ergebnisbild

Gesamteindruck (Note) 1 2 3 4 5

○──────────○──────────○──────────○──────────○

Langs09 Ergebnisbild (eigene Kurve)

Gesamteindruck (Note) 1 2 3 4 5

○──────────○──────────○──────────○──────────○

Hier ist nun noch Platz für weitere Kommentare und Anregungen, gerne auch speziell zum Langs09 Operator!

Vielen Dank für deine Hilfe!