

Fakultät Informatik und Automatisierung
Technische Universität Ilmenau

Überblick und Untersuchung ausgewählter Verfahren zur Dynamikreduktion

Manuela Bischoff
Matrikel-Nr. 27475
Studiengang Informatik

Hauptseminar im Fachgebiet Graphische Datenverarbeitung
Wintersemester 2002/2003

Betreuung durch Dietmar Kollhoff (ZBS Ilmenau)

Aufgabe

Heutzutage werden immer öfter Bilddaten mit einem Dynamikumfang von 10, 12 oder 16 Bit je Kanal generiert. Die möglichen Anwendungsfelder sind vielfältig: optische Messtechnik, Digitalfotografie, medizinische Bilddaten (z. B. Röntgenbilder). Dem gegenüber stehen die beschränkten Möglichkeiten der Visualisierung auf Standard-Displays, die in der Regel über 8 Bit nicht hinausgehen. Einfache Ansätze zur Lösung dieses Problems, wie das lineare Skalieren (Anzeige nur der höherwertigen Bits) und das Clipping (Begrenzung hoher Werte), führen zu unbefriedigenden Ergebnissen durch Kontrastverlust und Farbverfälschungen. Gesucht werden Verfahren, die den Dynamikumfang lokal adaptiv komprimieren, um so alle Bildbereiche in guter Qualität darstellen zu können.

Im Hauptseminar soll ausgehend von einer Literatur-Recherche zu dieser Problematik ein Überblick zu Verfahren der adaptiven Dynamikkompression von Bildern (bevorzugt Farbbildern) gegeben werden, sowie anhand der Untersuchung mehrerer ausgewählter Verfahren eine vergleichende Bewertung vorgenommen werden. Die Bewertungskriterien sind geeignet zu wählen; z. B. Güte der Kompression, Artefakte, Rechenzeitbedarf, Eignung für bestimmte Bildtypen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung und Motivation	2
1.1	Entstehung von HDR-Bildern	2
1.2	Eigenschaften des menschlichen Sehens	2
1.3	Problemstellung	3
2	Überblick über frühe Verfahren zur Dynamikreduktion	5
3	Ausgewählte Verfahren näher betrachtet	7
3.1	Quantisierungstechnik nach Schlick	7
3.2	Low Curvature Image Simplifiers (LCIS)	9
3.3	Gradient Domain High Dynamic Range Compression	11
4	Neue Verfahren der Dynamikreduktion	11
4.1	Photographic Tone Reproduction for Digital Images	12
4.2	Adaptive Gain Control for High Dynamic Range Image Display	12
4.3	Fast Bilateral Filtering	12
5	Vergleich, Zusammenfassung	13
5.1	Vergleichender Überblick der beschriebenen Verfahren	13
5.2	Zusammenfassung	15
	Literatur	16
A	Vergleichsbilder	17

1 Einführung und Motivation

Die Wahrnehmung einer realen Szene durch das menschliche Sehsystem ist ein komplexer Vorgang, der von vielen Faktoren beeinflusst wird. Dem Menschen ist das Sehen in einem Helligkeitsbereich von 10^{-6} bis 10^5 cd/m^2 . Das Festhalten einer solchen Szene als Bild, sei es digital oder analog, vermag den tatsächlichen Eindruck nur schwer widerzugeben. Herkömmliche 8-Bit-Grau- oder Farbbilder spiegeln nur einen kleinen Teil des tatsächlich für den Menschen Sichtbaren wider. Dies sind aber die Bilder, welche sich auf Standard-Displays, welche bei 8-Bit-Farbtiefe an ihre Grenzen stoßen, problemlos anzeigen lassen. Solche Bilder werden in dieser Arbeit als *Low-Dynamic-Range-Bilder*, kurz LDR-Bilder, bezeichnet. In Abschnitt 1.1 wird deutlich, in wievielen Bereichen aber heute schon sog. *High-Dynamic-Range-Bilder*, kurz HDR-Bilder, entstehen. Deren spezielle Eigenschaft ist ein höherer Dynamikumfang, z. B. 16-Bit-Graubilder oder Farbbilder mit 16 Bit pro Farbkanal. Sollen solche Bilder auf Standard-Displays visualisiert werden, so müssen spezielle Verfahren zur Reduktion der Dynamik angewendet werden.

1.1 Entstehung von HDR-Bildern

Die Bereiche, in denen HDR-Bilder entstehen, sind vielfältig. Folgende Auflistung soll einen groben Überblick geben, wie breit der Anwendungsbereich von HDR-Bildern gefächert ist:

- in der optische Messtechnik liefern immer mehr Systeme Bilder mit mehr als 8 Bit pro Farbkanal
- in der Medizintechnik
 - digitale Röntgentechnik \rightarrow Dynamikumfang 10^4
 - Mikroskopie mit hohem Dynamikumfang
- bei Leuchtdichtemessungen
 - zur Beleuchtungssituation an Arbeitsplätzen
 - im nächtlicher Straßenverkehr
 - bei Lampen und Signal-Leuchten
- in der professionelle Digitalfotografie – 10, 12, 16 Bit Dynamikumfang
- bei der Generierung „künstlicher“ Bilder (Bildsynthese, Computergrafik)

1.2 Eigenschaften des menschlichen Sehens

Das menschliche Sehsystem soll hier nicht bis in seine Details, sondern nur soweit, wie zum Verständnis nötig, beschrieben werden.

Durch Pupille und Linse fallen Lichtstrahlen auf die Netzhaut und regen dort die Sehsinneszellen, die Zapfen und Stäbchen, an. Was die Helligkeit angeht, sind die Stäbchen durch große Empfindlichkeit gekennzeichnet; damit sind sie v. a. für das Nachtsehen wichtig. Ein Farbsehen ist mit den Stäbchen nicht möglich („Nachts sind alle Katzen grau.“). Erst die Zapfen ermöglichen das Sehen von Farben und sorgen für die feine

Auflösung der wahrgenommenen Szene. Der mit den Sehsinneszellen realisierte Helligkeitsbereich erstreckt sich über 11 Größenordnungen (10^{-6} bis 10^5cd/m^2) und reicht vom Erkennen der Sterne am Nachthimmel bis hin zur Blendung/Schmerzgrenze. Zur Umsetzung dieser Sehleistung bedient sich das menschliche Sehsystem jedoch der Adaption an eine gegebene Grundhelligkeit; so spricht man z. B. vom hell- oder dunkeladaptierten Auge. Dies bringt nichts anderes zum Ausdruck, als dass der Mensch in einer Szene jeweils nur 10.000 Graustufen, an einem Ort in der Szene (also lokal adaptiv) sogar nur 100-250 Graustufen unterscheiden kann und der Rest auf ganzheitlicher Adaption des Auges beruht.

Des Weiteren ist es dem Menschen nicht möglich, die Absolutwerte der Helligkeit einzuschätzen; alles Helligkeitssehen beruht auf der Wahrnehmung von Helligkeitsunterschieden. Ob jedoch ein solcher Unterschied wahrgenommen wird, hängt wiederum von der aktuellen Grundhelligkeit ab: je heller die Umgebung, umso größer muss der Helligkeitsunterschied sein, soll er erkannt werden. Das menschliche Augen besitzt demnach eine logarithmische Kennlinie für die Helligkeitswahrnehmung; es gilt das Weber-Fenchnersche Gesetz.

1.3 Problemstellung

Liegen Bilder im HDR-Format vor, so ist zu deren Visualisierung eine Vorbehandlung nötig. Hierbei scheint es angebracht, die Eigenschaften des menschlichen Sehsystems auszunutzen. Zunächst soll jedoch das Problem an einem Beispiel aus der Digitalfotografie verdeutlicht werden.



Abb. 1.1: (a) Aufnahmen ein und derselben Szene mit verschiedenen Belichtungszeiten
(b) Bild nach der HDR-Kompression mit dem Verfahren aus Abschnitt 3.3
Quelle der Bilder: <http://www.cs.huji.ac.il/~danix/hdr/results.html>

Abbildung 1.1(a) zeigt Aufnahmen einer Szene mit verschiedenen Belichtungszeiten. Hier ist deutlich zu erkennen, dass Details in dunklen Bereichen erst bei längerer Belichtung und damit nur in insgesamt helleren Bildern zu sehen sind. Diese Serie von Bildern lässt sich zu einem HDR-Bild zusammenfügen, welches dann sowohl die Information aus den hellen, als auch aus den dunklen Bereichen enthält. Damit erreicht es jedoch auch einen wesentlich größeren Dynamikumfang. Um dieses HDR-Bild zu visualisieren, ist es nötig den Dynamikumfang auf 8 Bit zu reduzieren. Sehr einfache und oft

standardmäßig zur Anzeige von HDR-Bildern genutzte Verfahren sind hier das *Skalieren* und das *Clipping*, welche jedoch die ursprüngliche Bildinformation stark reduzieren.



Abb. 1.2: Beispiele verschiedener Helligkeit aus einem HDR-Bild. Man erkennt, dass im helleren Bild die Details der Bleiverglasung verschwinden, wohingegen im dunklen Bild die Umgebung nahezu schwarz erscheint.

Quelle des HDR-Bildes: <http://athens.ict.usc.edu/Research/HDR/>

Clipping Hier wird der Dynamikumfang eines HDR-Bildes reduziert, indem der Wertebereich (z. B. die Grauwerte) auf ein bestimmtes Intervall festgesetzt und darüberhinausgehende Werte einfach auf den Grenzwert gesetzt werden. Dies hat zur Folge, dass, je nach Art des Clippings, die Details in dunklen und/oder hellen Bereichen völlig verschwinden. Die Bilder haben dann den Charakter derer in Abb. 1.1(a) und 1.2.

Skalieren Speziell bei der linearen Variante dieses Verfahrens kommt es zur Verringerung v. a. kleiner Kontraste bis hin zur Unsichtbarkeit. Der Wertebereich des HDR-Bildes wird hierbei auf den Bereich des gewünschten LDR-Bildes herunterskaliert.

Beide Verfahren liefern für viele Anwendungen keine zufriedenstellenden Ergebnisse. Eine Möglichkeit der Verbesserung ist die Wahl von nicht-linearem Skalieren, welches jedoch auch an seine Grenzen stößt. Ziel eines cleveren Verfahrens zur Dynamikreduktion ist ein Ergebnisbild, welches über alle Details in hellen und dunklen Bereichen verfügt (vgl. Abb. 1.1(b)) und wenig Artefakte beinhaltet.

Zur späteren Beurteilung der verschiedenen Verfahren ist es nötig, die Probleme aufzuzeigen, die sich bei der Dynamikreduktion immer wieder ergeben. Bei einfachen Verfahren kommt es neben den erwähnten Detailverlusten oftmals zu Kontrastverlust oder Farbverfälschungen. Bei komplexeren Verfahren sollte für eine Beurteilung vor allem ihre Effizienz betrachtet werden. Für lokal adaptive Verfahren ist das Vorhandensein von Halo-Artefakte (vgl. Abb. 1.3) zu untersuchen. Eine evtl. Überbetonung von Details sollte ebenfalls in die Betrachtung mit einfließen.

In Abschnitt 2 soll nun zunächst eine kurze Einteilung der Verfahren erfolgen, um im weiteren Verlauf einige grundlegende Methoden und Ansätze darzustellen. Abschnitt 3 beschäftigt sich mit einigen ausgewählten, Abschnitt 4 mit neuen, im Jahre 2002 veröffentlichten Verfahren. Mit einer vergleichenden Zusammenfassung beendet Abschnitt 5 diese Arbeit.



Abb. 1.3: Im linken Bild wurde eine Methode verwendet, die zu Halo-Artefakten führt. [Pattanaik und Yee, 2002]; „[...] (halos) around the high contrast edges ([...] for example, see the (dark) region around the lamp shades.“

2 Überblick über frühe Verfahren zur Dynamikreduktion

Folgende Übersicht klassifiziert die Verfahren der Dynamikreduktion (\triangleq HDR-Kompression) wie es in ähnlicher Weise in [Fattal u. a., 2002] beschrieben wird:

Verfahren zur HDR-Kompression

Globale Verfahren

(ortsinvariant)

TRC - tone reproduction curve

TMF - tone mapping function

- Skalieren der Helligkeitswerte

- Gamma-Korrektur

- Histogrammausgleich

Lokale Verfahren

(ortsvariant)

TRO - tone reproduction operator

TMO - tone mapping operator

- Idee angelehnt an das menschliche Sehen

- positionsabhängiger Skalierungsfaktor

- Filter

Die globalen Verfahren sind effizient und einfach in der Umsetzung und werden darüberhinaus auch bei anderen Problemen eingesetzt. Deren Schwachstelle liegt beim Detail- und Kontrastverlust. Viele, v. a. neue Verfahren hingegen setzen auf lokale Operatoren, die bzgl. des Kontrastes wesentliche Verbesserungen zeigen. Jedoch ist auch hier zu beobachten, dass viele dieser Methoden den Halo-Effekt nicht verhindern können.

Die Idee der Natur

Dem menschlichen visuellen System wird es durch lokale Veränderungen der Empfindlichkeit der Retina ermöglicht, Szenen mit hohem Kontrast richtig zu interpretieren. Daraus ergibt sich die Idee eines positionsabhängigen Skalierungsfaktors m zur Dynamikreduktion. Sei L_w die Leuchtstärke der ursprünglichen Szene, so ergibt sich die Intensität des Bildes L_d folgendermaßen:

$$L_d(x, y) = m(x, y) \cdot L_w(x, y)$$

Die professionelle Fotografie nutzt eine ähnliche Technik, genannt „dodging and burning“ (dt: Abwendeln und Nachbelichten); doch, wie auch die digitalen Imitationen dieses Verfahrens, zeigt diese Schwachstellen. In [Tumblin u. a., 1999] wird hierzu auf eine Methode verwiesen, welche einen Tiefpass-Filter aus den gewichteten Mittelwerten der Bildnachbarschaft anwendet, um eine an den Bildinhalt angepasste Skalierungsfunktion zu erhalten.

Diese Methode liefert hervorragende Ergebnisse in fein schattierten Bildbereichen, versagt jedoch an sehr hellen Stellen oder Kontrastkanten; dort entstehen dunkle Bänder (Halo-Effekt).

Mapping hoher Leuchtdichte auf Display-Werte (nach Schlick)

Mittels einer gebrochen-rationalen Funktion ersten Grades beschreibt Schlick in [Schlick, 1994] ein Mapping der Leuchtdichte einer kontrastreichen Szene auf die Werte eines Standard-Displays. Diese Funktion wird gleichförmig auf jedes Pixel angewendet. Spätere Versuche, durch lokale Variation der Funktionsparameter die lokale Anpassung des menschlichen Seh-Systems nachzuahmen, führten zu Halo-Effekten oder anderen Verschlechterungen. Mehr zu diesem Verfahren in Abschnitt 3.1.

Ortsvariante Skalierung nach Tanaka und Ohnishi

Diese Methode nach [Tanaka und Ohnishi, 1997] akzeptiert leichte Halo-Effekte mit der Begründung, dass diese auch in Gemälden genutzt werden, um den Eindruck von Helligkeitskanten zu vermitteln. Sie beruht auf der Reduktion von Kontrast mit Hilfe gaußförmiger Tiefpass-Filter, die ähnlich den rezeptiven Feldern der menschlichen Retina modelliert werden.

Der leichten und einfachen Umsetzbarkeit dieses Verfahrens steht ein gravierender Nachteil gegenüber: Es ist nicht garantiert, dass das Ergebnisbild dem Dynamikumfang des Zieldisplays entspricht. Somit kann eine mehrfache Hintereinanderanwendung des Algorithmus nötig werden. Die Tatsache der „gewünschten“ Halo-Effekte ist Ansichtssache und sicher auch vom konkreten Anwendungsfall abhängig.

Die Idee der „multiscale retinex“

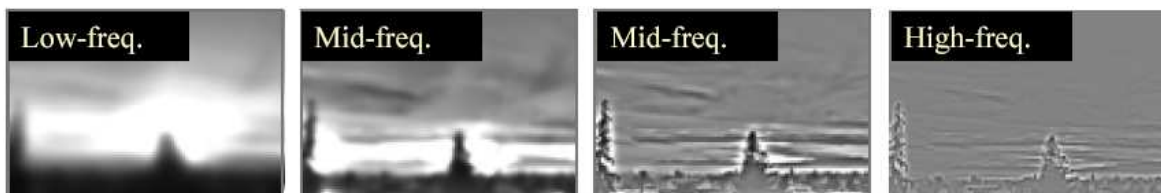


Abb. 2.1: Verschiedene Single-Scales, von nieder- bis hochfrequent

Die Retinex-Theorie nach [Jobson u. a., 1997] schätzt den Grad der Reflektion aus dem Verhältnis der Gesamthelligkeit zur lokalen Helligkeit. Jobson und Rahman nutzen hier ebenfalls gaußförmige Tiefpass-Filter, um lokale Skalierungsfaktoren zu finden. Dieses macht das Verfahren jedoch anfällig für Halo-Effekte. Jeder Bildpunkt wird durch seinen tiefpassgefilterten Wert geteilt und das logarithmierte Ergebnis wird verwendet, um eine sog. „single-scale retinex“ zu erzeugen. Die entstehenden Halo-Artefakte werden reduziert, indem eine „multi-scale retinex“ aus mehreren Single-Scale-Retinexes über eine gewichtete Summe gebildet wird. Diese verschiedenen Single-Scale-Retinexes entstehen durch unterschiedlich große Filterkerne (vgl. Abb. 2.1). Ein anschließendes Skalieren und Hinzufügen eines Offsets führt schließlich von der Multi-Scale-Retinex zum Ergebnisbild für Standard-Displays.

Leider verfälscht das Verfahren auch kleine Kontraste, die an sich ohne Probleme präzise auf Standard-Displays dargestellt werden können. Aufgrund seiner hervorragenden Ergebnisse auf einer breiten Masse von 24-Bit-Bildern eignet es sich jedoch für Anwendungen, bei denen das Erhalten von Details im Bild wichtiger ist als die Kontrasttreue. Es ist aber nicht bekannt, wie robust das Verfahren auf reellwertige Bilder mit weit höherem Dynamikumfang reagiert.

Histogrammausgleich nach Larson

Dieses Verfahren nach [Larson u. a., 1997] beruht auf einer neuen Technik des Histogrammausgleichs, wobei die Eigenschaften des menschlichen Sehsystems mit einbezogen werden. Es handelt sich um ein lokal adaptives Verfahren, welches jedoch einige Schwachstellen aufweist. Vor allem in stark beschatteten Bereichen kommt es zum Verlust der ohnehin schon verwaschenen Details. Lichtquellen erscheinen teilweise überbelichtet.

3 Ausgewählte Verfahren näher betrachtet

3.1 Quantisierungstechnik nach Schlick

In [Schlick, 1994] beschreibt C. Schlick ein Verfahren, welches Grauwert- und Farbbilder mit Hilfe einer gebrochen-rationalen Mapping-Funktion („tone mapping function“, TMF) auf den Dynamikbereich von Standard-Displays reduziert. Über die Idee der Gamma-Korrektur, des linearen Mapping und der menschlichen Wahrnehmung von Helligkeitsunterschieden kommt Schlick schließlich zu folgender Mapping-Funktion (für Grauwertbilder):

$$F_p(Val) = \frac{p Val}{p Val - Val + HiVal}$$

mit

Val ist Helligkeitswert im Bild, $Val \in [0, HiVal]$

$HiVal$ ist höchster Helligkeitswert im Bild

F_p ist Mapping-Funktion

$p \in [1, \infty)$ und $p = \frac{M HiVal - M LoVal}{N LoVal - M LoVal} \approx \frac{M HiVal}{N LoVal}$

$LoVal$ kleinste Helligkeit, die nicht Null ist

M dunkelster Grauwert, der nicht schwarz ist

Quantisierung $Q(Val) = \lfloor N F(Val) \rfloor$ sollte Folgendes tun: $Q(LoVal) = M$

N Anzahl der Quantisierungsschritte auf dem Display

Diese Funktion liefert im wesentlichen ähnliche Ergebnisse wie das logarithmische oder exponentielle Mapping, ist jedoch wesentlich effizienter. Ein weiterer Vorteil liegt darin, dass kaum Parameter festzulegen sind. Zur automatischen Generierung von p wird eine interaktive Methode genutzt, die es ermöglicht, die aktuelle Wahrnehmung der Helligkeit (abhängig von den Display-Einstellungen, Umgebungshelligkeit usw.) in das Mapping einfließen zu lassen. Ziel ist es den Wert M , also das dunkelste Grau, welches noch von schwarz unterschieden werden kann, zu ermitteln. Dies geschieht indem der Nutzer in einem Bild, ähnlich dem in Abb. 3.1, das dunkelste Feld anklicken muss.

Das beschriebene Quantisierungsverfahren hat uniformen Charakter, da für jeden Bildpunkt die gleiche Mapping-Funktion angewendet wird, d. h. die Quantisierung erfolgt

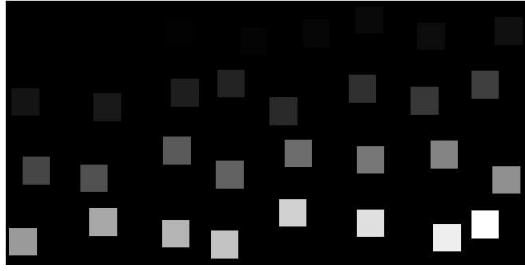


Abb. 3.1: Auswahl des dunkelsten, nicht-schwarzen Grautons

unabhängig von der Nachbarschaft des Bildpunktes. Die menschliche Wahrnehmung handhabt dies jedoch anders, denn der Sinneseindruck ist wesentlich von der Umgebung abhängig. Deshalb ist es sinnvoll, eine lokal adaptive Mapping-Funktion einzusetzen. Schlick nutzt hierzu ein *ZoVal*, welches aus der Nachbarschaft (Zone) eines Bildpunktes berechnet und zur Modifikation des Parameters p eingesetzt wird; p' ist dann der spezifische Parameter jedes Bildpunktes. Dieser berechnet sich folgendermaßen:

$$p' = p \left(1 - k + k \frac{ZoVal}{MiVal} \right) \quad \text{mit } k \in [0, 1] \text{ und } MiVal = \sqrt{LoVal HiVal}$$

wobei k den Grad der Nicht-Uniformität beschreibt, z. B. für $k = 0$ gilt, dass das Mapping uniform ist. In seinen Experimenten wählte Schlick dieses k zu 0.5.

Der letzte Punkt, der nun noch betrachtet ist, ist die Wahl einer geeigneten Ermittlung von *ZoVal*, wobei Schlick hier drei verschiedene Verfahren testete. Die Berechnung von *ZoVal* mit Hilfe von *Tiefpass-Filterung* führt zu unerwünschten Artefakten und wurde verworfen. Eine Reduzierung der Nachbarschaft auf einen Bildpunkt, was bedeutet $ZoVal = Val$, führte überraschend zu den besten Ergebnissen. Schlick bezeichnet diese Schema für *ZoVal*, welches wieder auf ein uniformes Mapping zurückführt, als *Micro-Zones*. Der dritte Versuch, die Nachbarschaft mit Hilfe von *Segmentierung* festzulegen, brachte im Verhältnis zum zusätzlichen Rechenaufwand nur minimale Verbesserungen und wurde deshalb nicht in Betracht gezogen.

Anwendung auf Farbbilder

Nach einigen Vorbetrachtungen der Möglichkeiten kommt Schlick zu folgender Lösung für die Anwendung des Verfahrens auf Farbbilder:

Für jede Farbe (Val_r, Val_g, Val_b) wird die Intensität Val wie folgt nach dem NTSC-Standard berechnet:

$$Val = 0.299 Val_r + 0.587 Val_g + 0.114 Val_b$$

Auf diese Intensität kann ohne Probleme die im vorhergehenden Abschnitt beschriebene TMF F_p angewendet werden und man erhält die neue (normalisierte) Intensität Val' . Gesucht ist nun (Val'_r, Val'_g, Val'_b) mit

$$Val' = 0.299 Val'_r + 0.587 Val'_g + 0.114 Val'_b$$

Aus den unendlich vielen Lösungen dieser Gleichung ist die zu wählen, die die geringsten Farbverfälschungen verursacht. Bezugnehmend auf weitere Publikationen zu diesem

Thema kommt Schlick zu der Aussage, dass es sinnvoll ist, die Verhältnisse zwischen den Farben beizubehalten:

$$\frac{Val'_r}{Val_r} = \frac{Val'_g}{Val_g} = \frac{Val'_b}{Val_b}$$

Ausgehend von der Annahme, dass $\max(Val_r, Val_g, Val_b) = Val_r$ ist, ergibt sich:

$$\exists(u, v) \in [0, 1]^2 : Val_g = u \cdot Val_r \text{ und } Val_b = v \cdot Val_r$$

Mit $Val = Val_r(0.299 + 0.587 u + 0.114 v)$ und $Val' = Val'_r(0.299 + 0.587 u + 0.114 v)$ erhält man

$$\begin{aligned} Val'_r &= \frac{Val'}{0.299 + 0.587 u + 0.114 v} \\ Val'_g &= u Val'_r \\ Val'_b &= v Val'_r \end{aligned}$$

zur Übertragung der Mapping-Funktion auf Farbbilder.

Diese Möglichkeit zur Anwendung eines Verfahrens auf Farbbilder wird auch von anderen, neueren Methoden genutzt, wie z. B. vom einigen in den folgenden Abschnitten.

Vor- und Nachteile

Die Skalierungsfunktion ist schnell berechenbar und arbeitet gut, speziell auf Bildern mit starken Helligkeitspunkten. Das Verfahren ist daher praktisch und einfach anwendbar, macht aber eine komplette Vermeidung des Halo-Effektes nicht möglich.

3.2 Low Curvature Image Simplifiers (LCIS)

Das Verfahren der LCIS von [Tumblin und Turk, 1999] ist kein Tone Mapping Operator sondern ein Detail-Extrahierer, geht also einen völlig anderen Weg zur Dynamikreduktion. Die Idee ist simpel und orientiert sich an der Art und Weise wie die Bilder von Malern entstehen: vom Großen zum Kleinen, von groben Strukturen zum Detail. Um diese Methode auf ein HDR-Bild anzuwenden, ist es nötig dieses zunächst in mehreren Stufen zu vereinfachen. Dies geschieht mit Hilfe von Algorithmen, die Kanten finden und innerhalb der Bereiche verwaschen. Dazu aus Tumblin und Turk [1999]:

„We build a [...] hierarchy using multiple instances of a new low curvature image simplifier (LCIS), a partial differential equation inspired by anisotropic diffusion. Each LCIS reduces the scene to many smooth regions that are bounded by sharp gradient discontinuities, and a single parameter K chosen for each LCIS controls region size and boundary complexity. With a few chosen K values ($K_1 > K_2 > K_3 \dots$) LCIS makes a set of progressively simpler images, and image differences form a hierarchy of increasingly important details, boundaries and large features.“

Abbildung 3.2(a) gibt einen Überblick über den Ablauf des Verfahrens. Die LCIS werden auf den Logarithmus (\log_{10}) der Helligkeit angewendet; die Farbbehandlung erfolgt mit dem in Abschnitt 3.1 beschriebenen Verfahren nach [Schlick, 1994]. Die LCIS liefern mit steigendem K immer „einfachere“ Bilder, wobei für $K = 0$ das Ursprungsbild erhalten bleibt. Der LCIS mit dem größten K liefert das einfachste oder *Basis*-Bild.

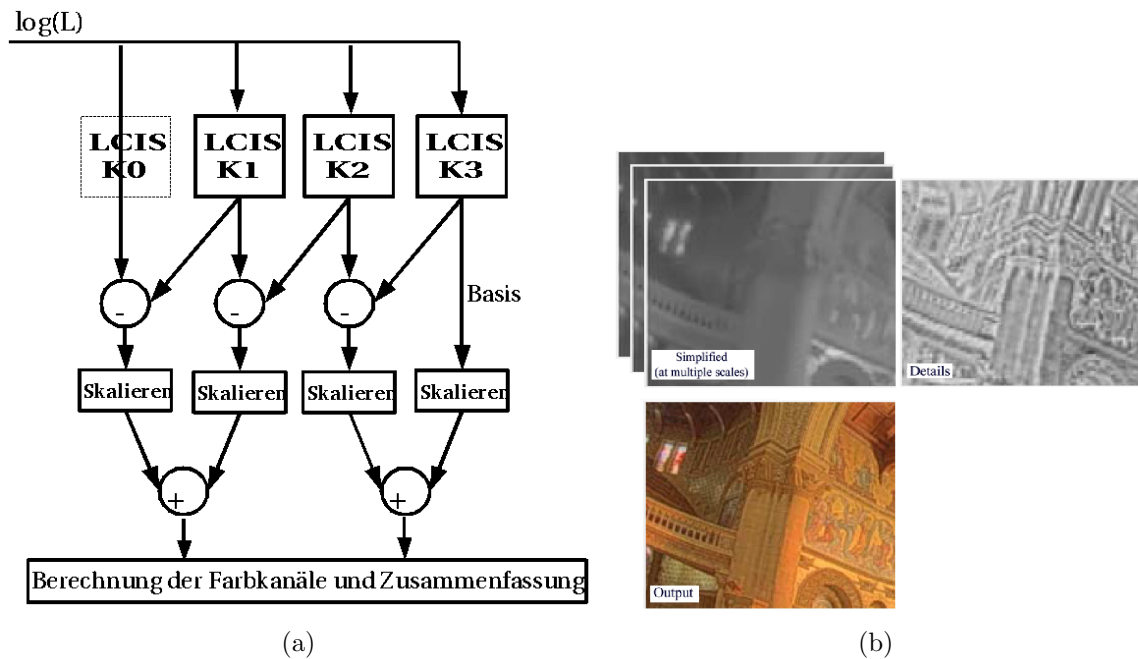


Abb. 3.2: Das Verfahren der Low Curvature Image Simplifiers (LCIS)
 (a) Ablauf für ein 4 stufiges Beispiel, gearbeitet wird auf dem Logarithmus der Helligkeit, LCIS K0 reicht Ursprungsbild durch, LCIS K3 erzeugt das am stärksten vereinfachte Bild. (b) Bilder aus verschiedenen Stufen des Verfahrens: verschieden stark vereinfachte Bilder, feinstes Detail-Bild und das Ergebnisbild

Eine anschließende Subtraktion benachbarter LCIS-Ergebnisse liefert die sog. *Detail*-Bilder, welche in Richtung des Basis-Bildes immer größer werden. Jedes dieser Bilder wird nun einer Skalierung unterzogen, wobei beim ersten Bild (mit den feinsten Details, siehe Abb. 3.2(b) oben rechts) meist mit einem Wert um 1.0 skaliert wird. Der Skalierungsfaktor des Basis-Bildes wird durch den gewünschten Kontrast des Ergebnisbildes vorgegeben. Die Skalierungsfaktoren der übrigen Detail-Bilder müssen geeignet zwischen diesen beiden Werten liegen. Die so skalierten Teilbilder werden zusammengefasst und ggf. wird ein Farbbild berechnet.

Vor- und Nachteile

Zur Betrachtung der Vor- und Nachteile dieses Verfahrens sei zunächst ein Zitat aus [Pattanaik und Yee, 2002] angebracht:

He (Tumblin) developed a method called low-curvature image simplifier (LCIS) to reduce the scene to many smooth regions bounded by the high contrast edges. This simplified scene was used for gain control and produced display images without any artifact. Unfortunately the method is complex and computation intensive, and hence is not widely used.

Es wird deutlich, dass der Berechnungsaufwand den gravierensten Nachteil dieses Verfahrens darstellt und es damit für die meisten Anwendungen ungeeignet ist. Dennoch soll hier erwähnt werden, dass es die Möglichkeit einer sehr starken Dynamikreduktion bietet und dabei selbst feine Details erhält, teilweise jedoch überbetont.

3.3 Gradient Domain High Dynamic Range Compression

Ausgehend von der Tatsache, dass menschliches Sehen nicht von absoluter Helligkeit, sondern viel mehr von lokalen Helligkeitsunterschieden geprägt ist, entwickelten [Fattal u. a., 2002] das *Gradient Domain HDR-Compression*-Verfahren. Die Idee dieser Methode baut auf die Tatsache, dass starke Änderungen der Helligkeit in HDR-Bildern sich zwar bei der Skalierung des Bildes wieder als starke Helligkeits-Gradienten niederschlagen müssen, deren Umfang aber ohne weiteres reduziert werden kann, ohne dass für das menschliche Auge ein Informationsverlust entsteht. Die großen Gradienten sollen also detektiert und vermindert werden. Auch dieses Verfahren arbeitet zunächst auf dem Logarithmus der Helligkeit ohne Farbbetrachtung. Folgendes Zitat aus [Fattal u. a., 2002] soll kurz einen Einblick in die dann folgenden Schritte geben:

„Real-world images contain edges at multiple scales. Consequently, in order to reliably detect all of the significant intensity transitions we must employ a multi-resolution edge detection scheme. However, we cannot simply attenuate each gradient at the resolution where it was detected. This could result in halo artifacts around strong edges,[...]. Our solution is to propagate the desired attenuation from the level it was detected at to the full resolution image. Thus, all gradient manipulations occur at a single resolution level, and no halo artifacts arise.“

Die sich anschließende Berechnung der Farbkanäle aus den neuen Helligkeitswerten erfolgt in Anlehnung an das Verfahren nach [Schlick, 1994] aus Abschnitt 3.1. Folgende Gleichung macht die hier genutzte Variante deutlich:

$$C_{out} = \left(\frac{C_{in}}{L_{in}} \right)^s L_{out}$$

mit

$C = R, G, B$

L_{in} ist Helligkeit vor der Kompression

L_{out} ist Helligkeit nach der Kompression

s kontrolliert die Farbsättigung (in [Fattal u. a., 2002] zwischen 0.4 und 0.6)

Vor- und Nachteile

Die Gradient Domain HDR-Kompression hat die Eigenschaft, den Halo-Effekt von vornherein zu vermeiden. Details im Bild bleiben erhalten und werden nicht überbetont. Diese Methode ermöglicht des Weiteren, auch dank der Schnelligkeit der Berechnung, den Einsatz zur Verbesserung von LDR-Bildern. Als eine der neuen Methoden mangelt es an dieser Stelle noch an vergleichenden Betrachtungen und dies kann zunächst nur informal anhand von Beispielen erfolgen (vgl. Abschnitt 5).

4 Neue Verfahren der Dynamikreduktion

In diesem Abschnitt sollen kurz die im Jahre 2002 veröffentlichten, neuen Verfahren zur Dynamikreduktion vorgestellt werden. Als erste wäre hier das bereits in Abschnitt 3.3 beschriebene Verfahren der **Gradient Domain HDR-Compression** zu erwähnen. Im Folgenden wird kurz auf drei weitere Methoden eingegangen.

4.1 Photographic Tone Reproduction for Digital Images

Die Idee zu dieser Methode entstammt der professionellen Fotografie und verwendet daher auch ein dort bekanntes Verfahren, das *Dodging and Burning*. Dies wird jedoch nicht als solches alleine angewendet, sondern folgt auf ein vorheriges Helligkeitsmapping. Damit haben [Reinhard u. a., 2002] ein einfaches und effizientes Verfahren entwickelt, welches einem informalen Vergleich an Beispielbildern stand hält (vgl. Abschnitt 5).

4.2 Adaptive Gain Control for High Dynamic Range Image Display

Das Verfahren nach [Pattanaik und Yee, 2002] nutzt eine lokale Gewichtsfunktion, die vom Grad der Helligkeitsänderung zwischen den umgebenden Bildpunkten abhängig ist; des Weiteren werden für die lokale Nachbarschaft nur Bildpunkte eingesetzt, die in der Helligkeit nicht um mehr als Faktor 5 vom aktuell betrachteten Bildpunkt abweichen. Damit wird der Einfluss extremer Helligkeitswerte vermieden, welcher in anderen Verfahren zum unerwünschten Halo-Effekt führt.

4.3 Fast Bilateral Filtering

Diese Methode des *Fast Bilateral Filtering* nach [Durand und Dorsey, 2002] ist eine Methode, deren Anwendungsgebiete noch über die Dynamikreduktion hinausgehen. Zur Anwendung auf HDR-Bilder greift sie die Idee der LCIS aus Abschnitt 3.2 auf. Für die Erzeugung von LDR-Bildern nutzt sie aber nur *ein* Basis-Bild und *ein* Detail-Bild. Das Basis-Bild enthält hier, wie auch bei den LCIS, keine Details. Nur dieses wird in seinem Dynamikumfang reduziert.

Der wesentliche Bestandteil dieses Verfahrens ist aber das Bilaterale Filter, ein nicht-lineares Filter, welches dazu dient kleine Änderungen im Bild (Rauschen und Details) zu verwaschen, aber große Unstetigkeiten (Kanten) zu erhalten. Mit Hilfe dieses Filters wird das Basis-Bild berechnet; das Detail-Bild entsteht aus der Division der Helligkeit des HDR-Bildes durch das Basis-Bild. Das Detail-Bild wird im Dynamikumfang nicht reduziert. Zur Erzeugung eines LDR-Bildes werden Basis- und Detail-Bild wieder miteinander kombiniert. Die Anwendung auf Farbbilder erfolgt in ähnlicher Weise wie schon bei den LCIS in Abschnitt 3.2 nach [Schlick, 1994].

5 Vergleich, Zusammenfassung

5.1 Vergleichender Überblick der beschriebenen Verfahren

Dieser Abschnitt befasst sich mit dem Vergleich der in Abschnitt 3 und 4 beschriebenen Verfahren, stellt Ergebnisbilder gegenüber und gibt einen tabellarischen Überblick.

Eines der vorgegebenen Kriterien für einen Vergleich war die Anwendung auf Farbbilder. Hierzu ist zu sagen, dass alle Verfahren diese Möglichkeit haben oder schon dafür entwickelt wurden. Der größte Teil greift, wie mehrfach erwähnt, auf die in [Schlick, 1994] vorgestellte Methode zurück. In Abbildung A.3 sind in der Farbgebung schwache Unterschiede zu erkennen. Vor allem der Histogrammausgleich nach Larson und die Photographic Tone Reproduction schwächen das Rot im Bild stark ab und lassen die Bilder im Vergleich zu den anderen eher blass erscheinen. Ähnlich blass wirkt das Bild A.1(b) der LCIS im Vergleich zu den anderen. Im Großen und Ganzen ist die Farbwiedergabe der Verfahren jedoch gut.

Der Aufwand für die Berechnung der reduzierten Bilder ist vor allem bei den neuen Verfahren gering. Auffallend komplex und aufwändig ist die Methode der LCIS, welche mit 8 freien Parameter die besten Ergebnisse durch trial-and-error liefert und für die meisten Anwendungen nicht in Frage kommt.

Was Detail- und Kontrasttreue anbelangt, unterscheiden sich die einzelnen Verfahren zum Teil. Vor allem der Histogrammausgleich nach Larson neigt dazu, Details zu verwaschen, wohingegen die LCIS Details sehr gut hervorheben. Leider führt dies teilweise zur Überbetonung der feinen Strukturen, was den Bildern der LCIS-Methode ein unrealistisches Aussehen verleiht. Vergleicht man die Ausschnitte in Abbildung A.2, so ist zu erkennen, dass Photographic Tone Reproduction und Bilaterales Filtern die kleinsten Details nicht wiedergeben können. Der Kontrast im Lichtfenster jedoch wird am besten von der Gradient Domain HDR-Kompression und dem Bilateralen Filtern umgesetzt.

Im Gesamteindruck der Bilder schneiden der Histogrammausgleich (vgl. Abb. A.3(e)) und die LCIS (vgl. Abb. A.1(b) und A.3(b)) am schlechtesten ab, wobei beim Histogrammausgleich v. a. die Überbetonung der Lichtquelle negativ auffällt. Ein Halo-Effekt ist in den vorliegenden Bildern nicht zu erkennen, aber die Gradient Domain HDR-Kompression und das Bilaterale Filter zeigen in den Lichtstrahlen Hell-Dunkel-Schattierungen (vgl. Abb. A.3(a) und A.3(c)), was deren ansonsten gutes Ergebnis etwas beeinträchtigt.

Die folgende tabellarische Übersicht fasst noch einmal alles zusammen und bezieht noch weitere Verfahren aus dieser Arbeit mit ein.

Methode	Aufwand, Berechnung	Detailtreue	Kontrasttreue	Halo-Effekt	Probleme
Dodging and Burning	einfach, schnell	-	-	ausgeprägt	in hellen Bereichen und an Kanten
Ortsvariante Skalierung nach Tanaka und Ohnishi	einfach, schnell	-	-	schwach, gewünscht	garantiert nicht Dynamikumfang des Zieldisplays
Multiscale Retinex nach Jobson	mittel	sehr gut	schlecht	gut reduziert	Verfälschung auch kleiner Kontraste
Histogrammausgleich nach Larson 1997	mittel	mäßig	mäßig	wenig	Verwaschen und Verlust von Details, Überbetonung von Lichtquellen
LCIS nach Tumblin und Turk	8 freie Parameter, aufwändig	sehr gut	mäßig	nur in stark komprimierten Bildern	Überbetonung von Details
Quantisierung nach Schlick	einfach, schnell	gut	gut	schwach vorhanden	
Gradient Domain HDR-Compression	mittel	sehr gut	sehr gut	keiner	
Photographic Tone Mapping	einfach, schnell	gut	gut	-	
Adaptive Gain Control for HDR Image Display	einfach, schnell	gut	gut	keiner	
Fast Bilateral Filtering nach Durand und Dorsey	einfach, schnell	gut	sehr gut	keiner	

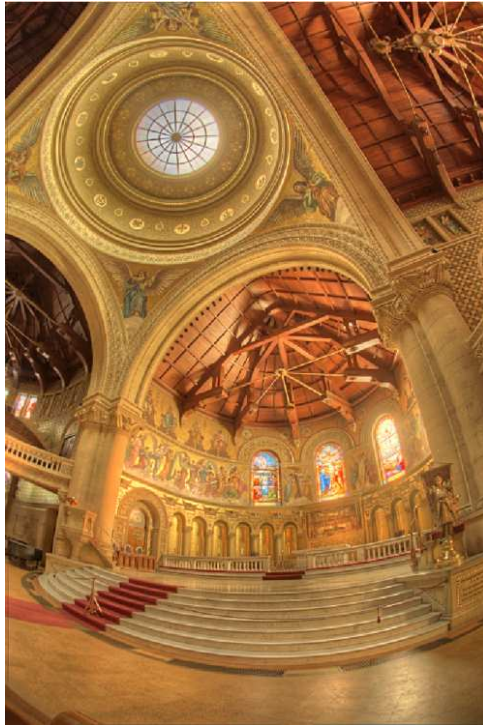
5.2 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurden verschiedene Verfahren zur Dynamikreduktion betrachtet und verglichen. Beginnend bei der Notwendigkeit für solche Verfahren, über die anfänglichen Bemühungen und Probleme, bis hin zur aktuellen Entwicklung wurden einzelne Verfahren ausgewählt und kurz beschrieben. Diese Arbeit kann bei weitem nicht das ganze Spektrum der Verfahren abdecken, gibt aber einen Eindruck, wie vielfältig die Ansätze sein können und was zum gewünschten Erfolg führt. Beim Vergleich konnte zum Teil auf die angegebenen Publikationen zurückgegriffen werden, zum anderen wurden Beispielbilder gegenübergestellt. Der Überblick über die im Jahre 2002 publizierten Methoden macht deutlich, dass die Entwicklung solcher Verfahren noch nicht abgeschlossen ist und immer wieder Neuerungen und Verbesserungen bedarf. Am Ende steht im konkreten Anwendungsfall immer ein Abwägen zwischen Aufwand und Nutzen im Vordergrund und bestimmt die Wahl des Verfahrens.

Literatur

- [Durand und Dorsey 2002] DURAND, Frédo ; DORSEY, Julie: Fast Bilateral Filtering for the Display of High Dynamic Range Images. In: *Proceedings of SIGGRAPH*, 2002. – <http://graphics.lcs.mit.edu/~fredo/PUBLI/Siggraph2002/>
- [Fattal u. a. 2002] FATTAL, Raanan ; LISCHINSKI, Dani ; WERMAN, Michael: Gradient Domain High Dynamic Range Compression. In: *ACM Transactions on Graphics (Proc. ACM SIGGRAPH 2002)*, 2002. – <http://www.cs.huji.ac.il/~danix/hdr/>
- [Jobson u. a. 1997] JOBSON, D. J. ; RAHMAN, Z. ; WOODSELL, G. A.: A Multiscale Retinex for Bridging the Gap Between Color Images and the Human Observation of Scenes. In: *IEEE Transactions on Image Processing*, 1997, S. 965–976
- [Larson u. a. 1997] LARSON, G. W. ; RUSHMEIER, H. ; PIATKO, C.: A Visibility Matching Tone Reproduction Operator for High Dynamic Range Scenes. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 3 (1997), Nr. 4, S. 291–306. – citeseer.nj.nec.com/wardlarson97visibility.html
- [Pattanaik und Yee 2002] PATTANAİK, S. N. ; YEE, Hector: Adaptive Gain Control for High Dynamic Range Image Display. In: *Proceedings of SIGGRAPH*, 2002. – <http://www.cs.ucf.edu/~sumant/publications/SCCG2002.pdf>
- [Reinhard u. a. 2002] REINHARD, E. ; M.STARK ; P.SHIRLEY ; FERWERDA, J.: Photographic Tone Reproduction for Digital Images. In: *Proceedings of SIGGRAPH*, 2002. – <http://www.cs.utah.edu/~reinhard/cdrom/tonemap.pdf>
- [Schlick 1994] SCHLICK, Christophe: Quantization Techniques for Visualization of High Dynamic Range Pictures. In: *5th Eurographics Workshop on Rendering, Darmstadt, 1994*, S. 7–20. – <http://citeseer.nj.nec.com/schlick94quantization.html>
- [Tanaka und Ohnishi 1997] TANAKA, T. ; OHNISHI, N.: Painting-Like Image Emphasis Based on Human Vision Systems. In: *EUROGRAPHICS* (1997), S. C253–C260
- [Tumblin u. a. 1999] TUMBLIN, J. ; HODGINS, J. K. ; GUENTER, B: Two Methods for Display of High Contrast Images. In: *ACM Transactions on Graphics* 18 (1999), Nr. 1, S. 56–94. – <http://www.graphics.cornell.edu/~jet/publications.html>
- [Tumblin und Turk 1999] TUMBLIN, Jack ; TURK, Greg: LCIS: A Boundary Hierarchy for Detail-Preserving Contrast Reduction. In: *Siggraph 1999, Computer Graphics Proceedings*. Los Angeles : Addison Wesley Longman, 1999, S. 83–90. – citeseer.nj.nec.com/454680.html oder <http://www.cs.northwestern.edu/~jet/HiContrast99.html>

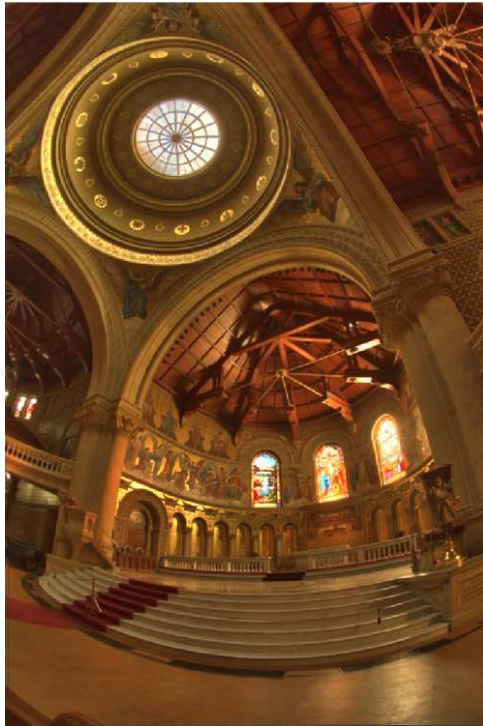
A Vergleichsbilder



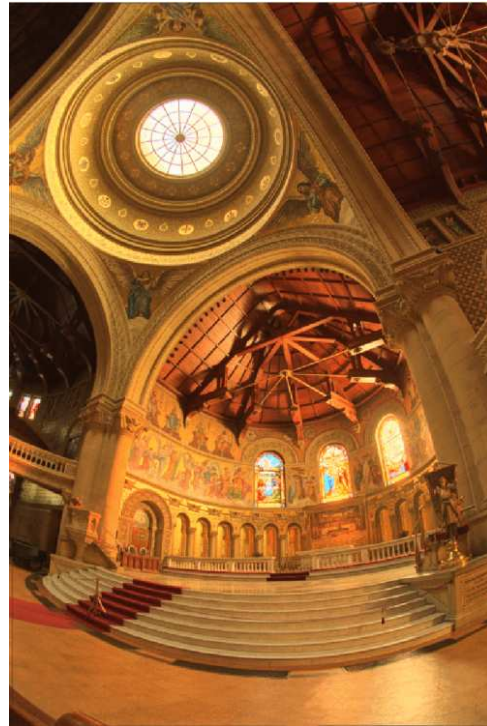
(a) Gradient Domain HDR-Compr.



(b) Low Courvature Image Simplifiers



(c) Bilateral Filtering



(d) Photographic Tone Reproduction

Abb. A.1: Ergebnisbilder zum Memorial-Bild



(a) Gradient Domain HDR-Compression

(b) Low Curvature Image Simplifiers



(c) Bilateral Filtering

(d) Photographic Tone Reproduction

Abb. A.2: Ausschnitt aus den Bildern in Abb. [A.1](#)



(a) Gradient Domain HDR-Compression

(b) Low Courvature Image Simplifiers

(c) Bilateral Filtering



(d) Photographic Tone Reproduction

(e) Histogrammausgleich nach Larson

Abb. A.3: Ergebnisbilder verschiedener Verfahren



(a) Gradient Domain HDR-Compression



(b) Low Courvature Image Simplifiers



(c) Bilateral Filtering



(d) Photographic Tone Reproduction



(e) Histogrammausgleich nach Larson

Abb. A.4: Ausschnitte aus den Bildern in [Abb. A.3](#)