

Seminararbeit

Aktuelle Trends in der Computergrafik

„High Dynamic Range Display Systems“

Werner A. König*
Universität Konstanz

Zusammenfassung

Wieso sieht der Sonnenuntergang auf dem Bildschirm nicht der realen Szene zum Verwechseln ähnlich? Dieser Frage bzw. diesem impliziten Wunsch nähern sich Seetzen et al. [2004] mit zwei Designvarianten für High Dynamic Range Displays an. Die beiden Anzeigesysteme zeichnen sich durch beachtliche Helligkeitsextreme, und daraus resultierend, durch ein hohes Kontrastvermögen aus. In der folgenden Arbeit werden die von Seetzen et al. vorgestellten Displays in ihrer Konzeption und Umsetzung näher beschrieben, deren Vor- und Nachteile dargelegt und im Kontext verwandter Arbeiten diskutiert. Des Weiteren werden domainspezifische Themen, wie allgemeine Problematiken, verwandte Arbeiten, mögliche Anwendungsgebiete und Grundlagen der menschlichen Wahrnehmung erörtert.

Keywords: Display, Kontrast, Helligkeit, Bildbrechung

1 Motivation

Das Ziel von realitätsgetreuen Darstellungen ist es, eine reale oder fiktive Szene in einem Abbild derart wiederzugeben, so dass es vom Betrachter nicht mehr von der Wirklichkeit zu unterscheiden ist. Heutige Visualisierungstechniken wie Bildschirme, Filmprojektoren oder auch physische Bilder sind imstande, annähernd farbgetreue und detaillierte Abbildungen zu liefern, jedoch sind sie bezüglich der darstellbaren Kontrastverhältnisse immer noch sehr limitiert.

Im Alltag wird der Mensch in seiner Umgebung mit kontrastreichen Szenen konfrontiert, d.h. Szenen, in denen zum Beispiel helle Lichtquellen und dunkle Schatten zusammen im Sichtfeld des Betrachters liegen. Diese nun ohne wahrnehmbaren Verlust auf einem Display abzubilden, ist die Absicht von Helge Seetzen et al. [2004], deren Vorgehensweise in dieser Seminararbeit beschrieben wird.

Der menschliche Sehapparat kann Lichtintensitäten von 10^{-6} bis 10^{+8} cd/m^2 wahrnehmen [Hood and Finkelstein 1986]. Dieser Helligkeitsumfang ermöglicht es dem Menschen, sich in einer bewölkten Nacht im Wald, sowie bei gleißendem Sonnenschein im Schnee noch zurechtzufinden. Für das komplette Intensitätsspektrum bedarf es einer physischen Anpassung des Auges, welche zum Beispiel auch Ursache für den allgemein bekannten Effekt der kurzzeitigen Blendung nach einer Tunneldurchfahrt bei Sonnenschein ist. Ohne Adaption und damit ohne zeitliche Verzögerung kann der Sehapparat ungefähr eine Helligkeitsspannweite in der Größenordnung von 10^5 effektiv verarbeiten. Auf Grund dessen scheint dies auch ein angemessener Richtwert bezüglich des Kontrastvermögens von Displays zu sein, um für die menschliche Wahrnehmung eine genügend identische Wiedergabe einer kontrastreichen realen oder auch künstlich erzeugten Szene am Bildschirm zu gestatten.

*e-mail: werner.koenig@uni-konstanz.de, 01/458695

1.1 Problematik

Konventionelle Displays, wie Röhrenbildschirme (CRT) und Flachbildschirme (LCD), bieten derzeit üblicherweise ein maximales Kontrastverhältnis von 300:1. Im professionellen Bereich erreichen die Displays etwa 500:1 und die Kinotechnik ermöglicht durch die Belichtung der Filme sogar einen Kontrast von ungefähr 1000:1. Die genannten Spannweiten liegen trotzdem merklich unter den Möglichkeiten des menschlichen Sehapparates und bringen daher unweigerlich eine Informationsreduzierung mit sich. Im Folgenden wird die Eigenschaft „kontrastreich“ oder auch „High Dynamic Range“ (HDR) für Szenen oder Bilder verwendet, welche höhere Kontrastverhältnisse als die bisher darstellbaren, also Helligkeitsunterschiede von mehr als 10^3 Größenordnungen aufweisen.

In den letzten Jahren gab es ein vermehrtes Interesse innerhalb der wissenschaftlichen Gemeinde und auch im kommerziellen Bereich - einerseits an der verlustlosen Gewinnung und Speicherung von kontrastreichen Szenen und andererseits an deren transformierten Anzeige auf Displays mit limitiertem Kontrastvermögen.



Abbildung 1: Zwei Abbildungen aus einer computergenerierten Aufnahmeserie mit verschiedenen Belichtungseinstellungen. Je nach Belichtung sind entweder nur helle oder nur dunkle Details sichtbar [Debevec].

Debevec und Malik [1997] zeigen beispielsweise eine Methode auf, bei welcher mit konventioneller analoger oder digitaler Fotoausrüstung, durch mehrmalige Ablichtung der gleichen Szene mit unterschiedlicher Belichtungseinstellung (siehe Abbildung 1) und der anschließenden Vereinigung der hieraus gewonnenen Informationen, Bilder mit originalem Kontrastverhältnis generiert werden können. Des Weiteren werden Dateiformate wie OpenEXR [Ind 2005] entwickelt, welche die Begrenzungen bisheriger 8-bit Formate bezüglich Farb- bzw. Helligkeitsumfang aufheben, in dem sie bis zu 32-bit Fließkommawerte unterstützen. Obwohl OpenEXR höhere Helligkeitsunterschiede verarbeiten kann, ermöglicht es trotzdem eine lineare Zuweisung der Intensitäten und bietet damit auch eine

für die menschliche Wahrnehmung genügende Anzahl von Zwischenstufen. Daraus ergibt sich die Möglichkeit realitätsgetreue Bilder mit hoher Farbpräzision und originalem Kontrastverhältnis zu speichern.

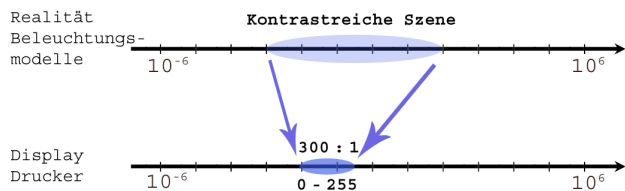


Abbildung 2: Durch die limitierten Anzeigemöglichkeiten von Display und Drucker müssen kontinuierliche Helligkeitsverteilungen kontrastreicher Szenen auf 256 diskrete Stufen mit einem Kontrast von ca. 300:1 abgebildet werden.

Um die Limitierung der konventionellen Displays in Bezug auf ihre Kontrastmöglichkeiten zu kompensieren, werden Tone-Mapping-Verfahren entwickelt (z.B. [Tumblin et al. 1999], [Durand and Dorsey 2000], [Fattal et al. 2002], [Reinhard et al. 2002] und andere), die auf verschiedenste Art und Weise versuchen, die auftretenden Helligkeiten in 8 bits bzw. 256 Stufen und auf ein Verhältnis von 300:1 zu „pressen“ (siehe Abbildung 2). Diese Verfahren machen sich zu Nutze, dass der menschliche Sehapparat sensibler auf relative als auf globale Helligkeitsunterschiede reagiert. Obwohl die Ergebnisse von ihrem ästhetischen Wert durchaus überzeugen (siehe Abbildung 3), sind die auf diesem Weg erzeugten Bilder auf Grund ihrer reduzierten Kontraste von der Realität klar unterscheidbar und verfälschen oder unterschlagen Detailinformationen.



Abbildung 3: Tone-Mapping-Verfahren: (links) Durand und Dorsey [2000], (rechts) Reinhard et al.[2002]. Die Verfahren versuchen die kontrastreichen Informationen der Belichtungsreihe (siehe Abbildung 1) an die Einschränkungen konventioneller Ausgabegeräte anzupassen.

Das Kontrastvermögen konventioneller Displays ist offensichtlich unzureichend, um den optischen Sinneseindruck eines Sonnenuntergangs oder einer Autofahrt bei Nacht mit blendendem Gegenverkehr zu vermitteln. Man beachte, dass dies nicht nur eine Frage der maximalen Intensität ist, da simples Erhöhen der Helligkeit von konventionellen Displays nur die dunklen Töne auswaschen und in ein mittleres Grau verwandeln würde [Seetzen et al. 2004].

1.2 Kritische Faktoren

Konventionelle Displays, wie zum Beispiel Liquid Crystal Displays (LCD) sind auf Grund ihres physikalischen Aufbaus nicht dafür geschaffen den technischen Ansprüchen einer kontrastreichen und realitätsnahen Wiedergabe zu genügen. Das uniform erzeugte Hintergrundlicht muss beim LCD zuerst zwei Polarisationsfilter und anschließend einen Farbfilter passieren, bevor es als Bild für den Menschen wahrnehmbar an der Vorderseite austritt. Dabei wird die Lichtintensität auf einen theoretischen Maximalwert von 16% reduziert. Soll beispielsweise ein komplett bildschirmfüllendes weißes Bild angezeigt werden, also alle Filter das Licht passieren lassen, weist die Austrittshelligkeit trotzdem nur maximal 16% der durch die interne Lichtquelle erzeugten Anfangshelligkeit auf. In der Praxis sind Werte um die 8% sogar als außerordentlich gut einzuschätzen. Jeder der zwei Polarisierungsfilter verringert die Intensität um jeweils 50% - zusätzlich schlägt der Farbfilter noch mit mindestens 66% zu Buche. Um nun eine hohe maximale Helligkeit zu erreichen und damit zum Beispiel einen realen Blendungseffekt zu imitieren, wird eine sehr leistungsstarke Hintergrundbeleuchtung benötigt. Dabei zeigt sich aber eine zweite limitierende Eigenschaft bisheriger LCDs. Trotz der Reduzierung der Lichtenergie um mindesten 84% für ein weißes Bild, sind die Farb- und Polarisationsfilter nicht im Stande zur Darstellung eines durchgängig schwarzen Bildes die Emission des Hintergrundlichtes komplett zu verhindern, woraus kein echtes Schwarz, sondern nur ein Grauton resultiert. Dieser Effekt wird umso schwerwiegender, je leistungsstärker die Hintergrundbeleuchtung ausgelegt ist. Eine höhere Maximalintensität wird folglich mit einem höheren Schwarzwert erkauft, wobei sich das Verhältnis von beiden, nämlich der Kontrast, aber nicht verändert.

Eine andere Limitierung der bisherigen Anzeigetechnik ist die Ansteuerung dieser mit 8 bit. Stellen wir uns zur besseren Verdeutlichung einen traumhaften Blick von einem einsamen Strand durch die schattenwerfenden Palmen auf das nächtliche Meer vor, in welchem sich der helle Mond in den anrauschenden Wellen widerspiegelt. Diese Szene weist nicht nur extreme Helligkeitsunterschiede, sondern auch eine unendliche Anzahl von Zwischentönen auf. Für die Anzeige am Bildschirm muss, wie schon in Abbildung 2 skizziert, die kontinuierliche Helligkeitsverteilung der Szene auf die Anzahl der diskreten Farb- bzw. Grautöne angepasst werden, welche von der Hardware zur Visualisierung zur Verfügung steht. Die Ansteuerung der Geräte mit 8 bit ermöglicht dem zufolge maximal 2^8 darstellbare Tonstufen für einen übertragenen Kanal. Daraus resultieren für Grauwertbilder, bei Gleichschaltung der drei Kanäle für Rot, Grün und Blau (RGB), maximal 256 Grautöne und für Farbbilder maximal $2^{24} = 16.777.216$ Farbtöne. Anhand des oben aufgeführten Beispiels ist es leicht verständlich, dass 256 Grauwerte nicht annähernd ausreichen, um den kontinuierlichen Helligkeitsraum einer gleichzeitig wahrnehmbaren Größenordnung von 10^5 realitätsnah wiederzugeben. Diese Tatsache verdeutlicht auch Abbildung 4, welche den wahrnehmbaren Farbraum (komplettes Diagramm) in Bezug zu dem offiziell definierten Farbraum für sRGB (inneres Dreieck) setzt. Farben außerhalb der sRGB-Region können nicht mit konventionellen Bildschirmen angezeigt oder mit üblichen Druckern auf Papier gebracht werden.

Zusammenfassend können drei speziell für die Wiedergabequalität von kontrastreichen Szenen ausschlaggebende Faktoren identifiziert werden:

- Absolute Helligkeit,
- Absolute Dunkelheit und
- Anzahl von distinkten Zwischenstufen.

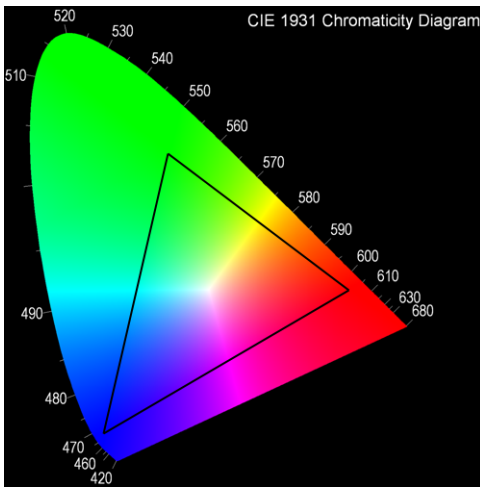


Abbildung 4: CIE 1931 Chromatizitäts-Diagramm basierend auf Guild [1931] and Wright [1928]. Inneres Dreieck spiegelt den Farbraum für sRGB wieder. Diagramm wurde erstellt mittels CIE Chromaticity Diagrams [Ear 2005].

1.3 Grundidee

Seetzen et al. beschreiben in ihrem Paper „High Dynamic Range Display Systems“ [2004] zwei von der Konzeption ähnliche Anzeigesysteme, welche in der Lage sind, Kontraste mit einem Verhältnis weit über 50.000:1 und einer maximalen Helligkeit von 2.700 cd/m^2 respektive 8.500 cd/m^2 darzustellen. Ebenfalls können sie die Ausstrahlung von Licht bei einem „Schwarzbild“ auf unter 0.05 cd/m^2 reduzieren, was ungefähr der Helligkeit einer klaren Mondnacht entspricht. Dies ist ein sehr respektable Wert, wenn man die Umgebungshelligkeit in normalen Büroräumen mit in Betracht zieht.

Die Grundidee beider Systeme beruht darauf, dass ein hochauflösendes LCD als optischer Filter verwendet wird, um ein extrem helles, aber mit geringerer Auflösung erzeugtes Bild eines zweiten Displays zu modulieren. Durch die Kombination von zwei Displays multiplizieren sich auch deren Kontrastvermögen, d.h. besitzt das erste Display einen Kontrast von $c_1 : 1$ und das zweite einen Kontrast von $c_2 : 1$, resultiert aus deren Hintereinanderschaltung ein theoretisches Kontrastvermögen von $(c_1 * c_2) : 1$. Dem Mangel an maximaler Helligkeit konventioneller Displays wird durch ein extrem helles erstes Bild entgegengewirkt. Die zwei Designalternativen unterscheiden sich in der Gewinnung dieser Grundhelligkeit und in der Modulation der anzuzeigenden Bilder.

Das erste System verwendet einen konventionellen Video-Projektor basierend auf der Digital Light Processing (DLP) Technik. Im Normalfall wird solch ein Projektor eingesetzt, um ein Bild auf eine mehrere Meter entfernte, großflächige Leinwand zu projizieren. Um auch noch aus größerer Entfernung bei normaler Umgebungshelligkeit einen satten Bildeindruck wahrnehmen zu können, sind diese Projektoren mit einer sehr leistungsstarken Lichtquelle ausgestattet. Seetzen et al. [2004] trennen für diesen Aufbau ein hochauflösendes LCD von dessen Beleuchtungseinheit und bestrahlen direkt die Hinterseite des nun transmissiven LCDs aus unmittelbarer Nähe mit dem vom Projektor generierten, intensitätsstarken Bild. Obwohl die erreichte maximale Helligkeit und das Kontrastvermögen für das System sprechen, ist dieses auf Grund der erhöhten Wärme- und Geräuschentwicklung und in Folge des Platz- und Stromanspruchs eher für Laborzwecke und nicht für den allgemeinen Einsatz beim Konsumenten geeignet.

Die zweite Designalternative verwendet wiederum das transmissive LCD wie im ersten Versuchsaufbau, bestrahlt diesen nun aber mit einer niedrig auflösenden Matrix aus extrem hellen Light-Emitting Dioden (LED). Diese LEDs können einzeln angesprochen und in ihrer Helligkeit linear verändert werden. Daraus resultiert ein der Matrix entsprechend niedriger aufgelöstes Bild, welches aber mit hoher Intensität auf die Rückseite des hochauflösenden LCDs trifft. Die niedrigere Auflösung der LED-Matrix kann durch entsprechende Anpassung des LCD-Signals ausgeglichen werden. Dem Design kommt des Weiteren eine Erkenntnis aus der Psychophysik zugute, welche zeigt, dass sehr hoher Kontrast zwar wichtig für das globale Bild ist, aber lokal bei hoher räumlicher Frequenz nicht vom Menschen wahrgenommen wird. Die Nachteile des ersten Systems teilt die zweite Designalternative nicht. Die LEDs entwickeln nur geringe Wärmeentwicklung und benötigen daher keine geräuscherzeugende Kühlung. Weiterhin kann die LED-Matrix direkt hinter dem LCD platzsparend untergebracht werden und benötigt daher nur unwesentlich mehr Platz als die Originalbeleuchtung. Der Strombedarf ist linear zur Helligkeit des anzuzeigenden Bildes und im Mittel ähnlich dem eines konventionellen LCDs.

Weiterführend wird in den Kapiteln 5 und 6 im Detail auf den Versuchsaufbau, verwendete Komponenten, Bildberechnung und auf die Vor- und Nachteile beider Systeme eingegangen. Zuerst werden aber noch mögliche Anwendungsgebiete für kontrastreiche Displays, auch High Dynamic Range Displays (HDR Display) genannt, und verwandte Arbeiten zu den hier vorgestellten Systemen aufgezeigt. Des Weiteren werden in Kapitel 4 die grundlegenden Faktoren der menschlichen Wahrnehmung bezüglich des Systemdesigns dargelegt und diskutiert.

2 Anwendungsgebiete

Wie schon anfangs erwähnt, werden wir alltäglich mit kontrastreichen Szenen konfrontiert. Displays, die ein höheres Kontrastvermögen wie konventionelle Anzeigeräte aufweisen, sind überall dort von Vorteil, wo eine reelle Szene wiedergegeben oder eine künstliche Szene einen realen Eindruck erwecken soll. Beispiele hierfür wären zum einen die Filmindustrie, welche die gespielte oder computergenerierte Handlung für den Zuschauer Wirklichkeit werden lassen möchte (siehe Abbildung 5). Naturaufnahmen sollen in ihrer ganzen Schönheit angezeigt, Manipulationen sollen nicht durch ungenügendes Licht- und Farbvermögen der Digitaltechnik erkannt und fiktive, computergenerierte Figuren sollen so plastisch wie möglich dargestellt werden.

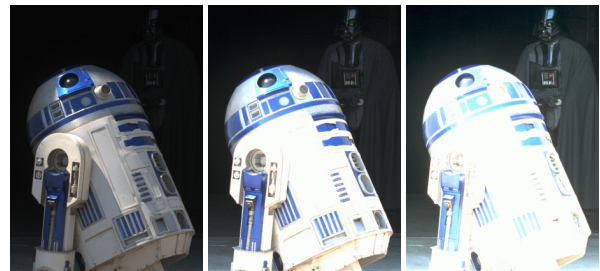


Abbildung 5: Ausschnitt aus dem Film „Krieg der Sterne“ mit verschiedenen Helligkeitsparametern. R2D2 Droide mit Lord Vader im Hintergrund [Ind05].

Die Filmbranche ist nicht der einzige Zweig der Unterhaltungsindustrie, welcher von kontrastreicheren Abbildungen profitieren kann. Immer mehr Computerspiele versuchen Blendungseffekte durch intelligente Beleuchtungsmodelle, basierend auf 16 bit Fließkomma-

berechnungen, zu simulieren. Obwohl die Bildberechnung mit hohem Kontrastverhältnis mittels 16 bit Formaten ausgeführt wird, findet bisher die schlussendliche Darstellung trotzdem wieder auf kontrastarmen Geräten statt. Würde ein Display mit größerer Helligkeitsspannweite verwendet werden, müsste die Blendung eines Actionheldes aus der Ego-Perspektive beim Verlassen eines Versteckes nicht mehr simuliert werden. Stattdessen wäre der Spieler selber genau dieser Situation ausgesetzt und würde daher reell eine kurze Anpassungszeit für seinen Sehapparat benötigen, währenddessen er geblendet und damit momentan handlungsunfähig ist.



Abbildung 6: HDR Bild der Stanford Memorial Church(links). Mit natürlichem Licht beleuchtete, synthetische Objekte(rechts) [Debevec].

Einen ähnlichen Mehrwert würde auch den Anwendungen der künstlichen Bilderzeugung zu Teil. Computergenerierte Bilder (siehe Abbildung 6) profitieren von den Berechnungen auf kontrastreichen Bildinformationen. Die finale Abbildung muss jedoch mangels besserer Alternativen wieder auf limitierten Displays betrachtet werden und büßt damit ein Großteil des Reizumfangs von Spiegelung, Licht und Schatten ein.

Ferner könnte gerade durch die Verwendung von intensitätsstarken Beleuchtungsmodellen und hohen Kontrasten beim User Interface Design die Aufmerksamkeit des Anwenders geleitet und dieser beim Ausführen seiner Aufgabe unterstützt werden. Im Aufgabenkontext wichtige Informationen oder Funktionen können durch einen höheren Kontrast hervorgehoben oder kontrastarme Farbkombinationen können verstärkt werden. Allgemein würde ein kontrastreicherer Bildschirm den Sehapparat des Menschen entlasten. Das Lesen vom bedrucktem Papier wird mehrheitlich als leichter empfunden, als das Lesen von konventionellen Displays, was unter anderem auch auf den verminderten Kontrastumfang gegenüber Buch- oder Zeitungsdruck zurückgeführt werden kann.



Abbildung 7: Links: Röntgenaufnahme eines menschlichen Schädels mit unterschiedlichen Belichtungen. Rechts: Natürliches und kontrastverstärktes Satellitenbild [NASA].

Gerade für medizinische und wissenschaftliche Visualisierungen bieten die neuen Displays erweiterte Möglichkeiten (siehe Abbildung 7). Bei medizinischen Untersuchungen mittels Computertomographen werden trotz digitaler Sensorik immer noch klassisch analoge Filme entwickelt. Diese weisen ein höheres Kontrastvermögen als die digitalen Anzeigergeräte auf und lassen auch das

Erkennen von Details, wie Haarrisse an Knochen oder Anomalien im Gewebe zu, welche am Bildschirm nur durch mehrere Visualisierungen mit verschiedenen Anzeigerparameter auszumachen sind. Dabei muss der analysierende Betrachter mental die Visualisierungen zu einem Gesamtbild vereinen, um daraus Schlüsse ziehen zu können. Mittels einer kontrastreicheren Schnittstelle zum menschlichen Wahrnehmungsapparat, wie die von Seetzen et al. [2004] vorgestellten Displays, besteht nun die Möglichkeit, mehr oder sogar alle gewonnenen Informationen dem Betrachter in einer Darstellung zugänglich zu machen. So können auch kleine Anomalien, welche sich nur durch minimale Helligkeitsdifferenzen äußern, im Kontext des gesamten Bildes erkannt werden. Auch andere wissenschaftliche Bereiche profitieren von den erweiterten Möglichkeiten der Informationsdarstellung. Beispielhaft können Visualisierungen für biologische und chemische Analysen, Erdbeobachtung oder Aufnahmen von Vorgängen in den Tiefen des Universums genannt werden.

3 Verwandte Arbeiten

Gred Ward [2002] entwickelte in Zusammenarbeit mit der University of Bristol (Großbritannien) schon im Vorfeld der hier in dieser Arbeit thematisierten kontrastreichen Displays von Seetzen et al. [2004] ein Anzeigergerät mit einem maximalen Kontrastverhältnis von 10.000:1 (siehe Abbildung 8). Der HDR Stereographic Viewer basiert auf einem optischen System des NASA Virtual Reality Systems und bietet dem Betrachter ein Sichtfeld von 120 Grad pro Auge (siehe Abbildung 9). Zwei 50 Watt Glühlampen liefern dabei eine starke, uniforme Lichtquelle, welche die vor den Linsen positionierten Filmnegative beleuchten. Der hohe Kontrast wird durch eine Kombination von jeweils zwei Negativen pro Auge erreicht, da dabei sich der Kontrastumfang multipliziert. Um Positionierungs- und Abstimmungsprobleme mit den übereinander liegenden Negativen zu umgehen, wird die Auflösung jeweils eines Films pro Auge durch eine Gauß'sche Unschärfefunktion verringert. Weiterhin besitzt dieses Negativ nur noch Grauwertinformationen, da die Helligkeiten der einzelnen Farbkanäle für die Kombination der beiden Bilder und daher für den endgültigen Gesamteindruck irrelevant sind.

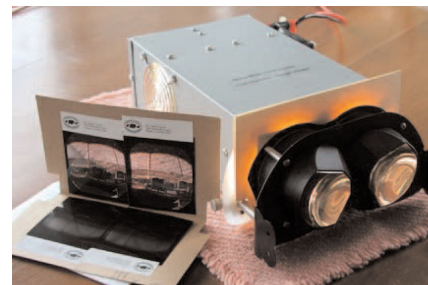


Abbildung 8: HDR Stereographic Viewer, Ledda et. al [2003].

Der HDR Stereographic Viewer wurde 2004 in einer Studie von Ledda et. al [2004] mit dem von Seetzen et al. [2004] vorgestellten High Dynamic Range Displays verglichen und der Realität gegenübergestellt. In dem vorgestellten Testszenario konnten die Probanden mehrheitlich keine signifikanten Unterschiede bezüglich des visuellen Sinneseindrucks zwischen beiden Systemen und zwischen System und Realität feststellen. Auf Grund der Konzeption des HDR Viewers bietet er zwar ein Sichtfeld von 120 Grad, ist aber nur für statische Bilder und für einen einzelnen Betrachter geeignet. Greg Ward ist nicht nur der Entwickler vom HDR Stereographic Viewer, sondern ist auch an der Entwicklung der High

Dynamic Range Displays von Seetzen et al. beteiligt und gleichzeitig Co-Autor des Papers „High Dynamic Range Display Systems“ [2004]. Die Parallelitäten in der Konzeption der Systeme sind daher nicht zufällig, sondern fußen auf der Kooperation von Sunnybrook Technologies, der University of British Columbia und der York University.

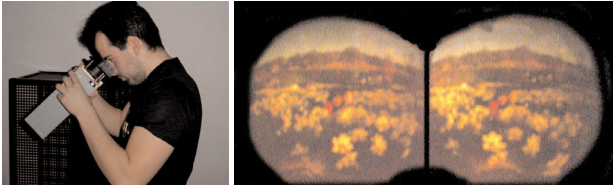


Abbildung 9: Anwendung und stereographische Sicht des HDR Stereographic Viewer, Ledda et. al [2003].

4 Menschliche Wahrnehmung

Die menschliche Wahrnehmung ist höchst komplex und in ihrer Funktionsweise noch nicht vollständig verstanden. Dennoch geben uns empirische Befunde und psychophysiologische Theorien praktische Hilfsmittel zur Hand, um nicht nur die volle Leistungsfähigkeit der Kognition auszunutzen und visuelle oder auditive Schnittstellen an genau diesen Richtwerten zu evaluieren und entsprechend zu optimieren, sondern erst das Wissen um die Schwachstellen des Wahrnehmungsapparats ermöglicht es uns reelle Empfindungen beim Menschen durch künstliche Reize hervorzurufen. Beispielhaft sind hierfür die Wahrnehmung einer Abfolge von Einzelbildern als bewegten Film durch Überschreitung der zeitlichen Limitierung visueller Wahrnehmung oder an das Drucken bzw. Anzeigen von verschiedenen Farben, welche durch die räumliche Nähe und den Abstand vom Betrachter zu einem Farbeindruck verschmelzen (Tristimulus Theorie von Helmholtz).

So wissen wir, dass der visuelle Wahrnehmungsapparat fähig ist, Lichtintensitäten von 10^{-6} bis 10^{+8}cd/m^2 zu empfinden [Hood and Finkelstein 1986]. Dabei ist jedoch zu beachten, dass diese Spannweite nicht gleichzeitig verarbeitet werden kann, sondern vereinfacht betrachtet, eine Verschiebung des Wahrnehmungsbereiches und damit eine Anpassung des Auges benötigt, mit der eine zeitliche Verzögerung einhergeht. Für das normale Einsatzszenario eines Displays, welches die Anzeige von bewegten Inhalten mit einschließt, ist daher die gleichzeitig wahrnehmbare Größenordnung von 10^5 Lichtintensitäten ausschlaggebend. Darüber hinaus wird die schlussendliche visuelle Empfindung von der räumlichen Nähe der Intensitätsdifferenzen entscheidend beeinflusst.

4.1 Lokaler Kontrast

Einen genauen Grenzwert zu beziffern, unter welchem noch lokale Kontrastunterschiede klar und ohne Artefakte wahrgenommen werden, ist schwer möglich, was auch die unterschiedlichen Angaben in wissenschaftlichen Veröffentlichungen widerspiegeln. Dennoch kann angenommen werden, dass dieser Kontrastwert bei ungefähr 150:1 liegt [Vos 1984]. Höhere Intensitätsunterschiede mit unmittelbarer räumlicher Nähe lassen die Region undeutlich und verschwommen erscheinen. Dieser Effekt erklärt sich durch die Tatsache, dass bei harten Übergängen zwischen hell und dunkel die eintreffende Lichtenergie auf der Retina gestreut wird (siehe Abbildung 10). Moon et. al [1945] sprechen bei diesem Phänomen von einer Streuung von mindestens 4% der Lichtenergie, welche von

der hellen Seite auf die dunkle mit einfließt und damit nicht nur den wirklichen Kontrast vermindert, sondern auch die Formen verschwimmen lässt. Seetzen et al. [2004] nennen sogar eine Reduzierung des sichtbaren Kontrasts um den Faktor 12 bei einem unmittelbaren Kantenkontrast von 150:1. Den beschriebenen Effekt kann man sich gut bei einem direkten Blick in die Sonne vergegenwärtigen. Obwohl die Sonne eine ähnliche Form wie der Mond aufweist, unterscheiden sich ihre wahrgenommenen Formen enorm. Bei Vollmond kann eine klar abgegrenzte Scheibe identifiziert werden, wohingegen die Sonne durch den extremen Kontrast zum Himmel verschwommen erscheint und erst mit einer starken Sonnenbrille klarer in ihrer Form wird. Für das Design von kontraststarken Displays bringt diese Ungenauigkeit des Auges den Vorteil, dass eine gewisse Unklarheit bei hohen Kontrasten akzeptiert werden kann, solange diese durch den beschriebenen Effekt überdeckt wird und damit für den Menschen nicht wahrnehmbar ist.

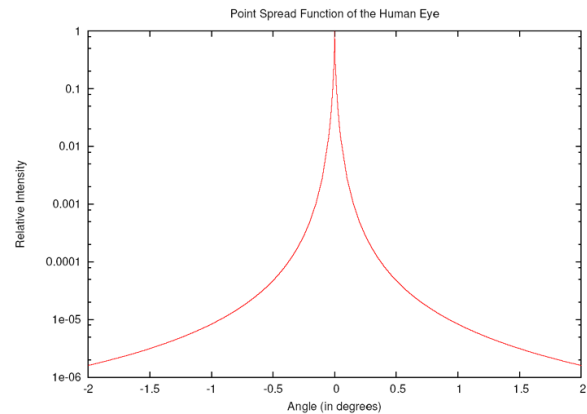


Abbildung 10: Streuung der Lichtenergie des menschlichen Auges in Abhängigkeit zur relativen Intensität nach Moon et al. [1945].

4.2 Wahrnehmbare Kontraststufen

Ein weiterer Kennwert für das Leistungsvermögen des menschlichen Sehapparats ist die Anzahl von wahrnehmbaren Helligkeitsstufen in Abhängigkeit zur maximalen Intensitätsstärke. Die Natur und damit unsere visuelle Umgebung konfrontiert uns mit einem kontinuierlichen Farb- bzw. Helligkeitsspektrum. Will man nun diese genügend genau nachbilden oder imitieren, sollte das Anzeigegerät zumindest die gleiche Anzahl von diskreten Helligkeitsstufen entsprechend über das Spektrum verteilt darstellen können, wie das menschliche Wahrnehmungssystem erkennen kann. Nur so werden Treppenartefakte oder ähnliche Quantisierungsfehler in Abbildungen von kontinuierlichen Farbverläufen vermieden.

In der Psychologie wird in diesem Kontext von „Just Noticeable Differences“ (JND) gesprochen – der kleinste nachweisbare Helligkeitsunterschied bei einem gegebenen Helligkeitslevel. Die Anzahl der JNDs über das gesamte Helligkeitsspektrum eines Displays berechnet, definiert somit auch die Mindestanforderung für eine genügend gute Wiedergabe (siehe Abbildung 11). Basierend auf dem Modell von Barten [1993] kann für das projektorbasierte Display (siehe Kapitel 5) 962 JND Stufen und für das LED-basierte Display (siehe Kapitel 6) 1139 JND Stufen berechnet werden. Das Ziel von Seetzen et al. [2004] ist natürlich mindestens diese Anzahl von Helligkeitsstufen über den gesamten Intensitätsbereich verteilt durch ihre Systeme anzubieten. Im Folgenden werden nun beide Designs näher erläutert und betreffend den aufgezeigten Anforderungen diskutiert.

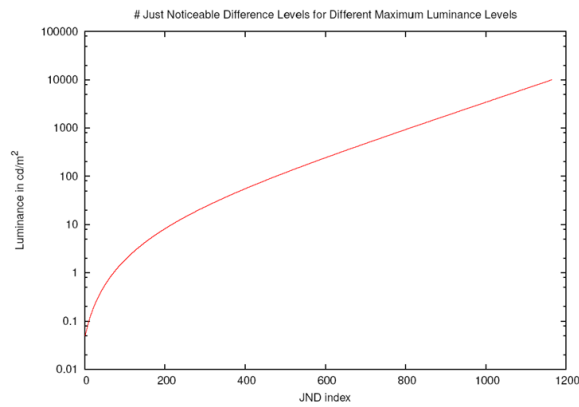


Abbildung 11: Anzahl der noch wahrnehmbaren Helligkeitsstufen in Abhängigkeit zur maximalen Intensität nach Barten [1993].

5 Projektorbasiertes Display

Konventionelle LCD-Bildschirme haben auf Grund ihrer Konzeption verschiedene Limitierungen, welche schon in Kapitel 1.2 eingehend beschrieben wurden. Die durch bisherige Displays erreichten Helligkeiten stehen den in der Realität auftretenden Intensitäten bei Weitem nach. Ebenso kann eine Emission von Licht auch bei einem schwarzen Bild nicht komplett verhindert werden, woraus ein Grau anstatt dem gewünschten Schwarz resultiert. Darüber hinaus bieten sie im Sinne der JNDs eine nicht genügende Anzahl von distinkten Helligkeitsstufen für ihren Intensitätsbereich an.

Seetzen et al. [2004] erweitern bei dieser Designalternative einen konventionellen LCD mit einem weiteren Helligkeitsfilter, um durch die Kombination zweier Lichtmodulatoren die Energie effektiver filtern zu können. Beim Schwarzmodus kann so trotz voller Lichtstärke der Hintergrundbeleuchtung ein extrem dunkles Schwarz erreicht werden. Die Verwendung einer leistungsstärkeren Beleuchtung ermöglicht es nun, nicht wie beim konventionellen Display die Helligkeitsspannweite nur zu verschieben, sondern durch die bessere Filterung die Spannweite auszudehnen.

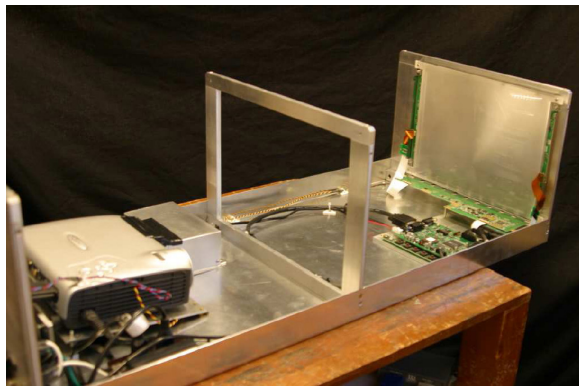


Abbildung 12: Aufnahme des Versuchsaufbaus des projektorbasierten High Dynamic Range Display von Seetzen et al. [2004].

5.1 Versuchsaufbau

Für die praktische Umsetzung wird bei diesem System ein konventioneller Video-Projektor, basierend auf der Digital Light Processing (DLP) Technik verwendet, welcher leistungsstarke Lichtquelle und den ersten Modulator in sich vereint (siehe Abbildung 13). Das so erzeugte Bild des Projektors wird durch eine Fresnellinse gebündelt, parallelisiert und trifft dann auf die Hinterseite des LCDs. Die Beleuchtungseinheit und zugehörige optische Komponenten des LCDs wurden entfernt, so dass nun das modulierte Licht des Projektors auf den ersten Polarisierungsfilter des LCDs treffen kann. Hier findet nun durch die Polarisierungsfilter und den Farbfilter die zweite Modulation statt. Schlussendlich verteilt ein gewöhnlicher LCD Diffusor das parallelisierte Licht, um einen besseren Sichtwinkel zu ermöglichen (siehe Abbildung 13).

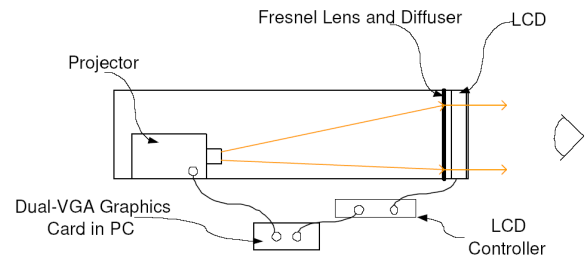


Abbildung 13: Schematische Darstellung der projektorbasierten Alternative des High Dynamic Range Displays von Seetzen et al. [2004].

Zwecks höherer Maximalleistung wurde das Farbrad des Projektors vom Typ Optoma DLP EzPro737 entfernt – die schlussendliche Farbmodulation findet folglich durch den Farbfilter im LCD statt. Der so veränderte Projektor besitzt nun eine Lichtstärke von 2400 Lumen und einen unveränderten Kontrast von 800:1. Das 15" Farb-LCD vom Typ Sharp LQ150X1DG0 besitzt eine XGA Auflösung und wird durch einen EarthVision AD2 LCD Kontroller angesteuert, welcher eine direkte VGA-Verbindung erlaubt. Der LCD weist in seiner Ausgangsform einen Kontrast von 300:1 auf. Projektor, optische Einheit und LCD sind in einem Gehäuse angebracht und können in ihrer Anordnung feinjustiert werden. Da eine perfekte Abstimmung bis auf Pixelebene trotz Feinjustierung nicht möglich ist, wird das Bild des Projektors mit einer Unschärfefunktion manipuliert und damit getrübt, um Artefakte am endgültigen Bild, wie Moiré-Muster, zu vermeiden bzw. zu kompensieren.

Auf Grund der Kombination der Modulatoren von Projektor und LCD sollte das Gesamtsystem ein Kontrastvermögen gleich der Multiplikation der beiden Einzelkontraste ($c_1 * c_2$): 1, also 240.000:1 aufweisen. Dieser theoretische Wert wird durch Imperfektionen des optischen Systems und Nicht-Linearität der Komponenten auf einen gemessenen Wert von 54.000:1 gemindert. Im Gegensatz zum bisherigen System ist der gemessene Kontrastwert sehr beeindruckend. Auch die gemessene maximale Helligkeit von 2700 cd/m^2 und minimale von 0.01 cd/m^2 unterstreichen die außerordentliche Leistungsfähigkeit dieses Systems. Angesteuert werden Projektor und LCD mit 8-bit Kontrollern. Würden beide sich durch eine perfekt lineare Ausgabefunktion auszeichnen, wären theoretisch 256^2 , also 17.000 distinkte Helligkeitslevel möglich. Für den Helligkeitsbereich des projektorbasierten Systems kann ein Wert von 962 JNDs berechnet werden. Trotz der Nicht-Linearität der Geräte ist die Anzahl der darstellbaren Intensitätsstufen weit größer als der Kennwert von 962 JNDs und daher leistungsfähiger als der menschliche Wahrnehmungsapparat.

5.2 Bildberechnung

Wenn man davon ausgehen würde, dass die Ausgabefunktionen von Projektor und LCD perfekt linear sind und beide Geräte den gleichen Kontrast bieten, könnte man die Controller der beiden Modulatoren einfach mit der Wurzel \sqrt{I} der zu projizierenden Intensität I ansteuern. Da diese Annahmen leider für den Versuchsaufbau nicht zutreffen, müssen die entstehen Artefakte durch eine Berücksichtigung dieser bei der Intensitätsberechnung kompensiert werden. Grundlage hierfür sind die empirisch ermittelten Ausgabefunktionen von Projektor und LCD (siehe Abbildung 14) und die Streuungsfunktion, welche durch die Projektion des Lichts auf die Rückseite des LCDs verursacht wird.

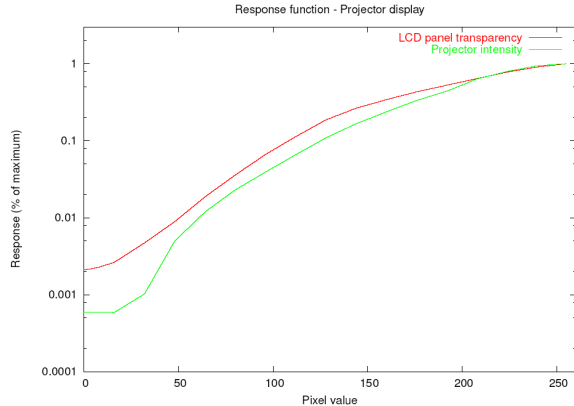


Abbildung 14: Ausgabefunktion des LCD-Panels und des DLP-Projektors laut Seetzen et al. [2004].

Wie Abbildung 15 skizziert, soll die Intensität der Wurzel \sqrt{I} (2) der originalen Intensität I (1) durch den Projektor dargestellt werden. Um die Nicht-Linearität des Projektors auszugleichen, wird \sqrt{I} mit der inversen Ausgabefunktion multipliziert $r_1^{-1}(\sqrt{I})$ (3). Der Projektor erzeugt nun ein Bild mit der Intensität $r_1(r_1^{-1}(\sqrt{I})) = \sqrt{I}$, wobei durch die Projektion das Bild um die Streuungsfunktion p_1 verändert an der Rückseite des LCDs auf den zweiten Modulator trifft. Um diese Veränderung zu simulieren, wird die Streuungsfunktion mit der Wurzel aus der Bildintensität multipliziert (4) und zur Kompensation des Artefakts die ursprüngliche Intensität durch den simulierten Fehler dividiert (5). Dies bildet nun die Bildintensität für den LCD und wird wiederum mit der inversen Ausgabefunktion multipliziert (6). Visuelle Beispiele für die Bildberechnung sind in Abbildung 16 zu sehen.

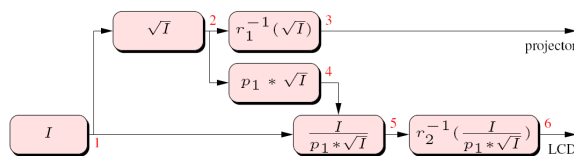


Abbildung 15: Berechnungsalgorithmus für den projektorbasierten HDR Display von Seetzen et al. [2004].

5.3 Systemdiskussion

Das projektorbasierte High Dynamic Range Display überzeugt durch hohen Kontrast über einen weiten Helligkeitsbereich und ei-

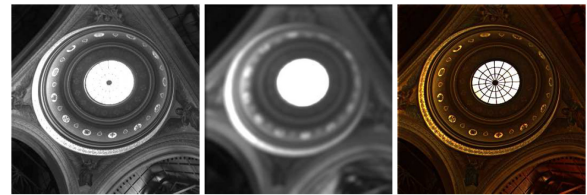


Abbildung 16: Bildintensitäten verschiedener Berechnungsschritte. Links: Wurzel der Bildintensität. Mitte: Durch Streuungsfunktion getrübt Bild des Projektors. Rechts: Kantenverstärktes LCD Bild, welches die Artefakte der Projektion kompensieren soll.

ne genügende Anzahl von distinkten Intensitätsstufen. Leider gehen damit auch verschiedene Nachteile einher. Die Verwendung von konventionellen Endverbrauchergeräten als Komponenten für den Versuchsaufbau ist einerseits sehr praktisch, da keine neuartigen Spezialteile entwickelt werden müssen, andererseits summieren sich dadurch auch die Anschaffungskosten auf. Zusätzlich zum konventionellen LCD muss ein möglicher Anwender noch einen Projektor beschaffen, um als Selbstbastler die Vorzüge eines HDR Displays genießen zu können.

Die Anzahl und die Ausmaße der Komponenten spiegeln sich auch in der Platzbeanspruchung des Versuchsaufbaus wider. Der Projektor muss mit genügendem Abstand auf den LCD platziert werden, um die volle Fläche des LCDs beleuchten zu können. Daher scheint diese Designalternative weniger für den Schreibtisch oder das Wohnzimmer geeignet zu sein. Auch die durch die starke Lichteinheit produzierte Abwärme und daraus resultierend, der Geräuschpegel, der durch die Kühlung der Geräte entsteht, sind eher hinderlich bei der Übertragung des Neujahrskonzertes im trauten Heim.

Des Weiteren muss der Projektor unabhängig von dem darzustellenden Bild immer die volle Beleuchtungsleistung liefern und erzeugt dabei nicht nur Abwärme, sondern konsumiert auch eine beachtliche Menge an Strom. Schlussendlich benötigt der Versuchsaufbau durch die getrennt angesteuerten Modulatoren zwei unabhängige VGA-Signale und damit die doppelte Bandbreite konventioneller Displays. Obwohl diese Nachteile den Erfolg des projektorbasierten HDR Displays im privaten Einsatz eher verhindern werden, bietet diese Designalternative einem Forschungslabor beispielsweise einen relativ einfachen Zugang zu einem qualitativ hochwertigen, kontrastreichen Anzeigegerät.

6 LED-basiertes Display

Die zweite Designalternative von Seetzen et al. [2004] für ein kontrastreiches Anzeigegerät ist in der Konzeption dem projektorbasierten HDR Display sehr ähnlich, jedoch scheint die Umsetzung eleganter und mehr dem Anforderungsprofil angepasst zu sein. Es entspricht mehr dem Wunsch, ein Display mit einem von der Realität nicht mehr zu unterscheidenden Darstellungsvermögen, ohne störende Nebeneffekte, für einen zumutbaren Preis, für die tägliche Arbeit auf dem Schreibtisch oder für die abendliche Zerstreuung im Wohnzimmer stehen zu haben (siehe Abbildung 17).

6.1 Versuchsaufbau

Das Konzept, den Kontrast durch eine verbesserte Modulation intensitätsstarker Lichtenergien zu erhöhen, kommt auch beim LED-basierten Display zum Einsatz. Allerdings wird in dieser Designal-

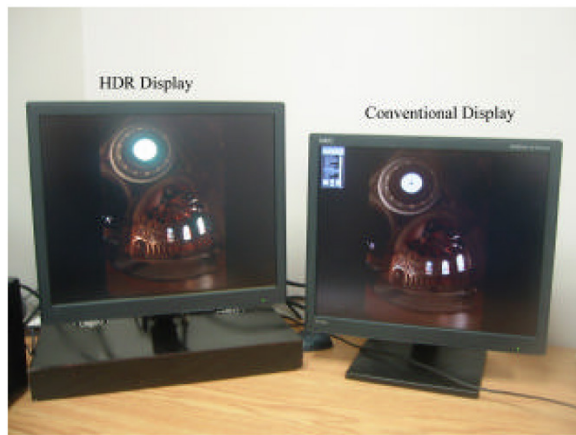


Abbildung 17: LED-basiertes HDR Display (links) im direkten Vergleich zu einem vergleichbaren konventionellen Display (rechts).

ternative ein intelligenteres Beleuchtungsmodell verwendet. Nur wenn hohe Intensitäten in einem Bild darzustellen sind, macht es auch Sinn, maximale Helligkeiten zu erzeugen. Im Gegensatz zum projektorbasierten HDR Display, bei welchem der Projektor immer die volle Lichtstärke produziert und dunkle Töne erst durch eine Kombination zweier Modulatoren entstehen können, wird beim LED-basierten Ansatz eine Beleuchtungseinheit aus einer Matrix von einzeln ansteuerbaren LEDs verwendet, welche unabhängig von einander, je nach Anforderung in ihrer Lichtstärke, verändert werden können.

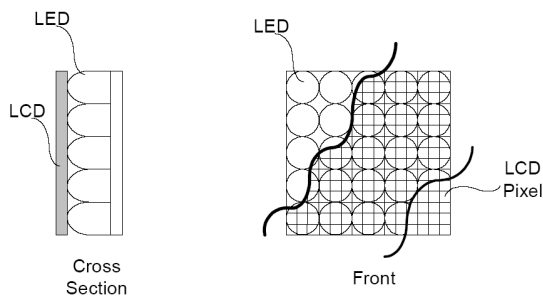


Abbildung 18: Layout der hinter dem LCD-Panel angebrachten LED-Matrix. Beim Prototypen wird eine hexagonale Struktur verwendet.

Wiederum wird ein transmissiver LCD – ein LCD, dessen Hintergrundbeleuchtung entfernt wurde – verwendet, auf dessen Rückseite direkt die LED-Matrix in einer hexagonalen Struktur angebracht ist (siehe Abbildung 18). Diese besteht bei dem thematisierten Prototypen aus 760 LEDs mit jeweils einer Leistung von einem Watt. Die 12mm LEDs vom Typ Lumiled Luxeon (LXHL-PW01) können auf 1024 über den ganzen Helligkeitsbereich verteilten Intensitätsstufen betrieben werden. Das so ausgestattete 18,1" LCD vom Typ L.G. Phillips mit einem ursprünglichen Kontrast von 500:1 und einer Auflösung von 1280 x 1024 Pixel erreicht bei einem komplett weißen Bild eine gemessene maximale Helligkeit von 8.500 cd/m^2 und einen minimalen Schwarzwert von null, da in diesem Falle die LEDs kein Licht mehr produzieren.

Bei einem Schachbrettmuster kann dies nicht so elegant gelöst werden, da die LED-Matrix eine geringere Auflösung als die des LCDs aufweist und daher die LEDs mehrere Pixel des LCDs bestrahlen. Zusätzlich überlagert sich das Licht der LEDs lokal, da keine opti-

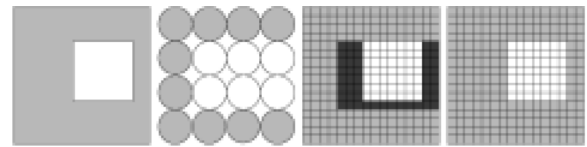


Abbildung 19: Ausgleich der Auflösungsunterschiede durch entsprechende Modulation des LCD-Bildes. Von links nach rechts: Gewünschtes Bild, LED-Bild, LCD-Bild und resultierendes Bild.

sche Trennung zwischen den LEDs angebracht ist. Daher kann bei einem Schachbrettmuster der Fall eintreten, dass ein LED gleichzeitig zwei nebeneinander liegende Pixel unterschiedlich – eines mit maximaler und das andere mit minimaler Intensität – beleuchten soll. Diese Problematik kann durch eine entsprechende Aufhellung oder Abdunklung des LCD-Bildes soweit gelöst werden, dass hier immer noch eine minimale Helligkeit von 0.03 cd/m^2 für den Schwarzanteil des Schachbrettmusters erreicht werden kann (siehe Abbildung 19).

6.2 Bildberechnung

Beim Begutachten des Berechnungsverfahrens für den LED-basierten HDR Display in Abbildung 20 wird schnell ersichtlich, dass sich nicht nur Konzeption von erster und zweiter Designalternative, sondern auch deren Bildberechnung ähnelt. Ein Unterschied wurde schon im letzten Kapitel angedeutet, welcher durch die Beleuchtung mehrerer LCD-Pixel durch eine oder mehrere LEDs entsteht. Die daraus resultierende Streuungsfunktion und die hexagonale Anordnung der Matrix müssen in der Berechnung der Intensitäten für das LCD-Bild mitberücksichtigt werden. Zu diesem Zweck wird eine zusätzliche Berechnungsstufe (2a) eingeführt, welche die Intensitäten pro einzelner LED ermittelt. Die Bildauflösung wird auf die geringere Matrix-Auflösung reduziert und die Streuungsfunktion pro LED berücksichtigt. Ein exaktes Ergebnis für die Intensitäten zu berechnen ist auf Grund des Rechenaufwandes für eine interaktive Darstellung nicht praktikabel. Daher wird eine Lösung durch eine einfache Gauss-Seidel Iteration über die angrenzenden LED-Pixel approximiert. Die Werte können bei diesem Prototypen optimalerweise direkt von den LED-Kontrollern verarbeitet werden.

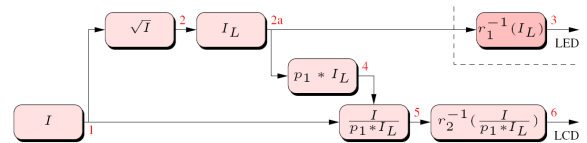


Abbildung 20: Berechnungsalgorithmus für den LED-basierten HDR Display von Seetzen et al. [2004].

6.3 Systemdiskussion

Das LED-basierte Display kann den schon an sich beeindruckenden projektorbasierten Versuchsaufbau noch in seiner Leistungsfähigkeit überflügeln. Der Helligkeitsumfang von 0.03 bis 8.500 cd/m^2 deckt das Display mit einem Kontrast von über 100.000:1 und über 10.000 ansprechbaren Helligkeitsstufen ab. Die Anzahl der für diesen Intensitätsbereich distinkt vom Menschen wahrnehmbaren Levels ist mit 1.139 JNDs durch die Fähigkeiten des Displays um einen Faktor von ungefähr 10 übertroffen.

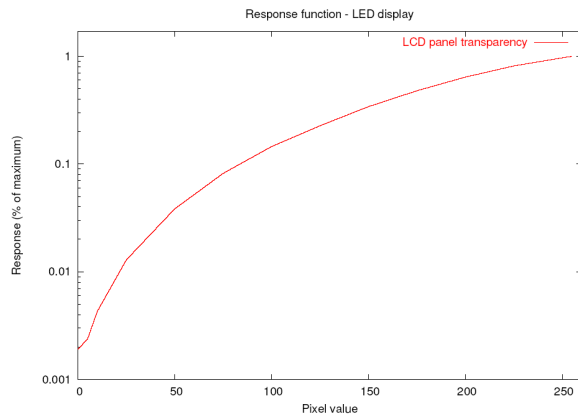


Abbildung 21: Ausgabefunktion des LCD-Panels für das LED-basierte HDR Display. Die Ausgabefunktion für die LEDs ist linear und wird daher hier nicht dargestellt.

Dieses Leistungsvermögen wird jedoch nicht durch gravierende Nachteile gegenüber konventionellen Displays erkauft. Die LED-Matrix auf der Rückseite des Displays beansprucht unwesentlich mehr Platz als die konventionelle Beleuchtungseinheit. Bisher ist die Kontrollerelektronik in einer zusätzlichen Blackbox untergebracht, kann aber in naher Zukunft direkt im Gehäuse platzsparend integriert werden. Auch der Stromverbrauch ähnelt dem eines konventionellen Systems. Obwohl jedes der 760 LEDs einen maximalen Energieaufwand von einem Watt hat und sich dadurch theoretisch einen maximalen Gesamtaufwand von 760 Watt ergibt, tritt dieser Fall statistisch gesehen eher selten auf, da auch durchschnittliche kontrastreiche Bilder nur einzelne Intensitätsspitzen aufweisen, welche lokal eine volle Ausleuchtung benötigen.

Des Weiteren geben die LEDs konzeptionsbedingt keine kritische Abwärme ab, wodurch eine zusätzliche Kühlung mit entsprechender Geräuschentwicklung vermieden werden kann. Die Ansteuerung der LEDs benötigt kein eigenes VGA-Signal und kann mit dem Signal für den LCD übertragen werden. Dies ermöglicht einen Einsatz des HDR Displays an einem konventionellen PC ohne eine physische Änderung, was sicherlich dienlich für die Verbreitung auf dem privaten und kommerziellen Marktsegment ist. Hierfür ist natürlich der Preis auch ein entscheidender Faktor. Das LED-basierte HDR Display braucht im Gegensatz zum projektorbasierten Display keinen zusätzlichen Projektor, sondern kommt mit kostengünstigen LEDs aus der Großserienfertigung aus. Die Kosten für LEDs, Controller und Fertigung minimieren sich bei erhöhter Auflage, wodurch davon ausgegangen werden kann, dass in naher Zukunft auf dem Markt HDR Displays im gleichen Preissegment wie konventionelle LCDs vertrieben werden.

Der einzige aufführbare Nachteil der LED-basierten Version im Vergleich zum projektorbasierten System ist ein etwas aufwendigeres Berechnungsverfahren. Dieses Argument hat sich aber durch die rasante Weiterentwicklung der Grafikhardware und deren immense Rechenleistungen weitestgehend entkräftigt.

7 Schlussfolgerung und Ausblick

Konventionellen Anzeigeräte sind mit einem üblichen Kontrast von 300:1 und einer maximalen Helligkeit von ungefähr 300 cd/m^2 nicht fähig, die Vielfältigkeit natürlicher Szenen identisch abzubilden. Der für den Menschen wahrnehmbare Helligkeitsbereich von

ungefähr 10^{-6} bis 10^{+8} cd/m^2 muss folglich bei bisherigen Anzeigesystemen auf das Leistungsvermögen des Gerätes angepasst werden, was bei kontrastreichen Szenen eine erhebliche Reduzierung der Abbildungsqualität mit sich bringt.

Die in dieser Arbeit thematisierten Designalternativen für High Dynamic Range Displays von Seetzen et al. [2004] bieten nun erstmals Darstellungswerte, welche nahe an die Möglichkeiten der menschlichen Wahrnehmung herankommen oder diese sogar überflügeln. Das projektorbasierte Display schöpft aus der Kombination von leistungsstarkem Projektor und konventionellem LCD einen gemessenen Kontrast von 54.000:1 und eine maximale Intensität von 2.700 cd/m^2 . Mit dieser Leistung gehen aber auch Nachteile in Form von hohem Platz- und Strombedarf, Abwärme- und Geräuschentwicklung und einem durch den zusätzlichen Erwerb des Projektors für das private Marktsegment unattraktiven Gesamtpreis einher. Des Weiteren werden zur Ansteuerung des Displays zwei unabhängige VGA-Signale benötigt, welche von einem Standard-PC üblicherweise nicht zur Verfügung gestellt werden und somit speziell nachgerüstet werden müssen.

Die zweite Designalternative umgeht elegant die Nachteile des projektorbasierten HDR Displays durch die Verwendung einer aktiven LED-Matrix als intelligente Beleuchtungseinheit. Die extrem intensitätsstarken LEDs ermöglichen einen maximalen Helligkeitswert des Gesamtsystems von 8.500 cd/m^2 und ein Kontrastvermögen von über 100.000:1 auf. Der hohe Kontrast ergibt sich unter anderem auch durch einen sehr niedrigen Schwarzwert von 0.03 cd/m^2 , welcher ungefähr der Helligkeit einer klaren Mondnacht entspricht. Das Kontrastvermögen des Displays relativiert sich in Folge dessen für übliche Arbeitsumgebungen, da hier schon von einer Grundhelligkeit von mehr als 1 cd/m^2 auszugehen ist. Trotz dieser kleinen Einschränkung lässt das LED-basierte Display eine Anzeigequalität zu, welche ohne Bedenken als realitätsgetreu in Bezug auf Kontrast und Helligkeit bezeichnet werden kann.

Obwohl die kanadische Firma Sunnybrook [Sun 2005] als Spin-off der akademischen Kooperation von Seetzen et al. den LED-basierten Prototypen nun laut Webseite zur Marktreife geführt hat und kommerziell vertreibt, gibt es noch diverse Ansatzmöglichkeiten, das System in seiner Konzeption und Auslegung zu optimieren.

Beim bisherigen System werden weiße LEDs für die aktive Matrix verwendet und durch den Farbfilter des LCDs nachträglich farblich moduliert. Würde man die weißen LEDs durch jeweils eine mehrfarbige oder drei einzelne LEDs in rot, grün und blauen ersetzen, könnte das Display bis zu 98% des wahrnehmbaren Farbraums abdecken [Ohtsuki et al.]. Konventionelle LCD erreichen bisher etwa eine Abdeckung von 66% des NTSC Farbraums.

Des Weiteren könnte die Berechnung der Bildintensitäten für LED-Matrix und LCD-Modulator und damit die Kompensation von Artefakten – verursacht durch die Streuung der Energie und Nicht-Linearität der LCD-Ausgabe – direkt von der Kontrollereinheit des Displays ausgeführt werden. In Folge dessen könnte das Grafiksystem des PCs oder anderer Signalquellen entlastet und die Fließkommawerte unmittelbar dem HDR Display übergeben werden.

Das Leistungsvermögen der High Dynamic Range Displays eröffnet, wie schon in Kapitel 2 erläutert, für verschiedenste Anwendungsdomänen ungeahnte Möglichkeiten. Direkte Vergleichsstudien von Tone-Mapping-Verfahren können nun durchgeführt werden, visuelle medizinische Analysen werden präziser und deren Details einfacher wahrnehmbar und der LCD-Fernseher wird zunehmend mit dem Fenster verwechselt.

Dieses Anzeigekonzept ist ein weiterer, wichtiger Schritt hin zu einer Technik, die die Fähigkeiten des Benutzers bis zu einem Höchstmaß hin unterstützt und damit ihn in seiner Wahrnehmung

mung entlastet. Evaluationsstudien bezüglich der Anwenderbelastung beim Lesen eines Textes vom Papier und vom HDR Display würden sicherlich interessante Ergebnisse liefern. Jedoch werden auch kontraststarke Displays den (Alp-)Traum von einem papierlosen Büro nicht wahr werden lassen.

Literatur

- BARTEN, P. 1993. Spatio-temporal model for the contrast sensitivity of the human eye and its temporal aspects. In *In Proc. SPIE*.
- DEBEVEC PAUL, ICT GRAPHICS LAB. 2005. *University of Southern California, Los Angeles, USA*. <http://www.debevec.org>.
- DEBEVEC, P. E., AND MALIK, J. 1997. Recovering high dynamic range radiance maps from photographs. In *SIGGRAPH '97: Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 369–378.
- DURAND, F., AND DORSEY, J. 2000. Interactive tone mapping. In *Proceedings of the Eurographics Workshop on Rendering Techniques 2000*, Springer-Verlag, London, UK, 219–230.
- EARL F. GLYNN II, OVERLAND PARK, KS, USA. 2005. *CIE Chromaticity Diagrams*. <http://www.efg2.com>.
- FATTAL, R., LISCHINSKI, D., AND WERMAN, M. 2002. Gradient domain high dynamic range compression. In *SIGGRAPH '02: Proceedings of the 29th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, ACM Press, 249–256.
- GUILD, J. 1931. *The Colorimetric Properties of the Spectrum*, vol. A230. Philosophical Trans. Royal Soc. London, 149–187.
- HOOD, D. C., AND FINKELSTEIN, M. A. 1986. *Handbook of Perception and Human Performance*, sensory processes and perception ed. John Wiley and Sons, New York, ch. 5: Sensitivity to light.
- INDUSTRIAL LIGHT AND MAGIC. 2005. *OpenEXR, high dynamic-range image file format*. <http://www.openexr.org>.
- LEDDA, P., WARD, G., AND CHALMERS, A. 2003. A wide field, high dynamic range, stereographic viewer. In *GRAPHITE '03: Proceedings of the 1st international conference on Computer graphics and interactive techniques in Australasia and South East Asia*, ACM Press, New York, NY, USA, 237–244.
- LEDDA, P., CHALMERS, A., AND SEETZEN, H. 2004. Hdr displays: a validation against reality. In *In IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics 2004*.
- MOON, P., AND SPENCER, D. 1945. The visual effect of nonuniform surrounds. In *Journal of the Optical Society of America* 35, 233–248.
- NASA. 2005. *National Aeronautics and Space Administration, USA*. <http://www.nasa.gov>.
- OHTSUKI, H., NAKANISHI, K., MORI, A., SAKAI, S., YACHI, S., AND TIMMERS, W. 18.1-inch xga tft-lcd with wide color reproduction using high power led-backlighting. In *In Proc. Society for Information Display International Symposium*.
- REINHARD, E., STARK, M., SHIRLEY, P., AND FERWERDA, J. 2002. Photographic tone reproduction for digital images. In *SIGGRAPH '02: Proceedings of the 29th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, ACM Press, New York, NY, USA, 267–276.
- SEETZEN, H., HEIDRICH, W., STUERZLINGER, W., WARD, G., WHITEHEAD, L., TRENTACOSTE, M., GHOSH, A., AND VOROZCOVS, A. 2004. High dynamic range display systems. *ACM Trans. Graph.* 23, 3, 760–768.
- SUNNYBROOK TECHNOLOGIES INC. 2005. *Vancouver, British Columbia, Canada*. <http://sunnybrooktech.com>.
- TUMBLIN, J., HODGINS, J. K., AND GUENTER, B. K. 1999. Two methods for display of high contrast images. *ACM Trans. Graph.* 18, 1, 56–94.
- VOS, J. 1984. Disability glare - a state of the art report. In *CIE Journal* 3, 39–53.
- WARD, G. 2002. A wide field, high dynamic range, stereographic viewer. In *Proceedings of PICS 2002*.
- WRIGHT, W. D. 1928. *A Re-Determination of the Trichromatic Coefficients of the Spectral Colors*, vol. 30. Trans. Optical Soc. London, 141.