

Herausforderungen und Qualitätssicherung beim lokalen Dimmen von LC-Displays mit seitlich angeordneten LEDs

Dissertation
zur Erlangung des Grades
des Doktors der Ingenieurwissenschaften
der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät
der Universität des Saarlandes

von
Daniel Schäfer

Saarbrücken
2017

Tag des Kolloquiums: 23.03.2018

Dekan: Univ.-Prof. Dr. rer. nat. G. Kickelbick

Mitglieder des Prüfungsausschusses:

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Chihao Xu

Berichterstatter: Dr. Andreas Karrenbauer

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. Georg Frey

Akad. Mitarbeiter: Dr. rer. nat. Tilman Sauerwald

Eidesstattliche Versicherung

Hiermit versichere ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus anderen Quellen oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet. Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form in einem Verfahren zur Erlangung eines akademischen Grades vorgelegt.

Saarbrücken, den

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter und Promotionsstudent am Lehrstuhl für Mikroelektronik der Universität des Saarlandes.

Mein besonderer Dank gilt hierbei Herrn Prof. Dr.-Ing. Chihao Xu für die Betreuung dieser Arbeit als Doktorvater und die Möglichkeit, diese Arbeit an seinem Lehrstuhl durchführen zu können. Er hat mit stets neuen Aspekten der Displayforschung mein Interesse an diesem Thema über die gesamte Dauer der Zusammenarbeit weiter erhöht. Auch die von ihm gegebenen Möglichkeiten der Teilnahme an vielen internationalen Fachkonferenzen haben mir das Forschungsthema immer wieder neu eröffnet.

Dem Leiter der Gruppe „Max Planck Center for Visual Computing and Communication“ und Senior Researcher am Max-Planck-Institut für Informatik in Saarbrücken, Dr. Andreas Karrenbauer, danke ich für die Übernahme des Zweitgutachtens. Ebenso danke ich allen Mitgliedern der Prüfungskommission.

Weiterhin danke ich allen meinen langjährigen Arbeitskollegen am Lehrstuhl für Mikroelektronik, die mir mit immer neuen Denkansätzen und Diskussionen in vielen Bereichen dieser Arbeit unterstützend zur Seite standen. Besonders genannt seien hier Marc Albrecht und Tobias Jung, die mir bereits während meiner Diplomarbeit bei allen Fragen zur Seite standen. Außerdem danke ich Maxim Schmidt und Michael Grüning für ihre Hilfe bei der Adaption des SSC-Algorithmus auf neue Prototypen und die Zusammenarbeit bei zahlreichen Veröffentlichungen. Insbesondere danke ich Yassen Dobrev und Pascal Volkert für die von ihnen gegebenen Einblicke in die OLED-Forschung und die Beantwortung vieler Alltagsfragen in ausführlichen Pausendiskussionen.

An dieser Stelle bedanke ich mich auch bei allen Studenten, die ich im Laufe der Zeit in diversen Bachelor- und Master-Arbeiten betreut habe, bzw. die mir im Rahmen ihrer Hiwi-Tätigkeit hilfreich zur Seite standen.

Ein großer Dank gebührt auch der Firma Hisense Electric, die mich im Laufe der Arbeit stets mit aktuellen Prototypen unterstützte und auch immer zur Validierung des Algorithmus bereit war.

Außerdem danke ich meinen Eltern und meiner gesamten Familie, die mich schon während meines Studiums und auch darüber hinaus immer unterstützt hat und ohne die diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Der größte Dank gebührt zuletzt meiner Frau Michaela. Sie hat mich während der ganzen Zeit unterstützt und angetrieben, gerade wenn die eigene Motivation manchmal gefehlt hat. Sie hat immer an mich geglaubt und ich danke ihr für ihre Geduld und ihr Durchhaltevermögen.

Kurzzusammenfassung

Das lokale Dimmen von LC-Displays bietet großes Potential zur Leistungseinsparung und zur Verbesserung der visuellen Qualität. Aufgrund der Besonderheiten von LC-Displays mit seitlich angeordneten LEDs entfalten Local-Dimming-Algorithmen bei diesen Displays zurzeit nicht ihre vollen Möglichkeiten. Beim Dimmen solcher Displays können viele ungewollte visuelle Artefakte auftreten. Daher wird das lokale Dimmen für solche Displays nur moderat eingesetzt. Eine Vermeidung dieser Artefakte kann es ermöglichen, das Potential des Local-Dimmings voll auszuschöpfen.

Da nur ausreichend bekannte visuelle Artefakte verhindert werden können, werden diese ausführlich analysiert und Lösungsvorschläge zur Vermeidung gegeben. Hierzu werden acht Displays mit Edge-Lit Hintergrundbeleuchtung betrachtet. Die Displays werden dabei auf statische und dynamische Artefakte untersucht und es werden Möglichkeiten genannt, wie die visuelle Qualität gesichert und gesteigert werden kann.

Um insbesondere keine Artefakte in der Darstellung künstlicher Bilder zu erzeugen, wird eine Menü-Detektion eingeführt und alle Parameter des Dimming-Algorithmus angepasst.

Durch die abschließende Optimierung der Hintergrundbeleuchtung in Bezug auf das Local-Dimming, welche Anzahl und Position der LEDs sowie die Form der LSF betrifft, kann somit ein Algorithmus vorgestellt werden, welcher die Herausforderung des lokalen Dimmens für Edge-Lit-Displays meistert und gleichzeitig die visuelle Qualität sicherstellt.

Abstract

Local dimming of LC-Displays offers a high potential for power saving and the improvement of the visual quality. Because of the particularities of Edge-Lit LC-Displays, local dimming algorithms do not yet reach best possible results. The dimming of such displays may produce unintentional visual artefacts. Therefore, the impact of local dimming for such displays is rare. Avoiding these artefacts can help local dimming to reach its full potential.

Since only sufficiently understood visual artefacts can be prevented, they are analysed and solutions are suggested. There are eight displays with Edge-Lit backlight considered. The static and dynamic visual artefacts of these displays are analysed and a description to ensure and increase the visual quality is given. Especially to avoid artefacts with artificial images, a menu detection is introduced and all parameters of a dimming algorithm are adjusted.

The final optimization of the backlight, related to the number and the position of the LEDs and the shape of the LSF, allows a local dimming algorithm, which can reach the dimming challenges of Edge-Lit displays and ensure the visual quality at the same time.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1 Motivation für Local-Dimming	1
1.2 Aufbau der Arbeit	2
2. Grundlagen	5
2.1 Menschliche Wahrnehmung	5
2.1.1 Aufbau des menschlichen Auges	5
2.1.2 Wahrnehmung von Farben	6
2.1.3 Wahrnehmung von Bewegungen	6
2.2 Anforderungen an ein „ideales“ Display	7
2.2.1 AMOLED als „ideales“ Display	10
2.3 LC-Displays	12
2.3.1 Aufbau, Vorteile und Einschränkungen	12
2.3.2 Ansprüche an die visuelle Qualität von LC-Displays	15
2.3.3 Ansätze zum Dimming und mathematisches Modell	18
3. Local-Dimming für Edge-Lit-Displays	23
3.1 Light-Spread-Function (LSF)	24
3.2 Pixelorder	29
3.3 Gamma-Anpassung beim Local-Dimming	35
3.4 Sorted-Sector-Covering-Algorithmus	38
3.4.1 Aufbau des SSC-Algorithmus	38
3.4.2 Condenser	39
3.4.3 SSC-Optimierer	45
3.4.4 Pixel-Compensation	48
3.5 Implementierung des SSC-Algorithmus	52
3.6 Zusammenfassung und Fazit	58
4. Probleme und Lösungen für statische Bilder	59
4.1 Statisches Clipping	60
4.1.1 Clipping im Displaybereich	60

4.1.2	Clipping beim Local-Dimming	62
4.1.3	Reduzierung des Clippings durch die Clipping-Suppression-Funktion (CSF)	66
4.2	Statisches Halo	70
4.2.1	Beschreibung	70
4.2.2	Ursachen des Halos bei lokal gedimmten LC-Displays	72
4.2.3	Maßnahmen zur Reduzierung des Halo-Artefakts	76
4.3	Einhalten der Farbtreue und des Farbraumes	84
4.3.1	Begrenzte Auflösung zur Kompensation	84
4.3.2	Farbabweichungen durch Abbildungsfehler in der Gamma-Funktion	89
4.3.3	Blickwinkel und Farben.....	94
4.4	Ergebnisse.....	99
5.	Sicherstellung der Videoqualität	101
5.1	LED-Flickering	101
5.1.1	Ursachen des LED-Flickering für verschiedene Backlight-Arten.....	101
5.1.2	Maßnahmen zur Reduzierung des LED-Flickering	103
5.2	Dynamisches Halo-Verhalten	111
5.2.1	Zusammenhang des dynamischen Halos und der LED-Anordnung	112
5.2.2	Gleichmäßige LED-Verteilung zur Verringerung von Halo-Artefakten.....	114
5.2.3	Bildanalyse zur Reduzierung von Halo-Artefakten.....	115
5.3	Dynamisches Clipping-Verhalten.....	117
5.4	Zusammenfassung der Ergebnisse	121
6.	Anzeigen künstlicher Bilder	123
6.1	Statische Bildartefakte in Menüs.....	124
6.2	Dynamische Bildartefakte in Menüs	128
6.3	Menü-Detektion und dynamischer LED-Minimalwert	131
6.4	Robustheit und Diskussion der Ergebnisse	138
7.	Optimierung der Hintergrundbeleuchtung von Edge-Lit-Displays	139
7.1	Unterscheidung verschiedener Edge-Lit-Varianten	140
7.2	Einfluss der Anzahl der LEDs pro Kante.....	143
7.3	Einfluss der Form der Light-Spread-Funktion.....	145
7.4	Diskussion.....	147

8. Zusammenfassung und Fazit	149
9. Ausblick.....	151
9.1 Kombination von LEDs an kurzer und langer Displayseite zur Erhöhung der Brillanz	151
9.2 Local-Dimming und HDR.....	153
A Anhang.....	155
Abbildungsverzeichnis	159
Formelzeichen und Abkürzungsverzeichnis	165
Literaturverzeichnis.....	171

1. Einleitung

1.1 Motivation für Local-Dimming

Durch den immer stärker werdenden Einsatz von LCD-Fernsehern und auch die immer größer werdende Verbreitung von Displays in jedem Lebensbereich stellt sich heute vermehrt die Frage, wie der durch die oft steigenden Bilddiagonalen auch steigende Energieverbrauch dieser Displays reduziert werden kann. Da bei LC-Displays die Hintergrundbeleuchtung bis zu 80% der gesamten Energie benötigt, ist es sinnvoll, die Energieeinsparung an der Hintergrundbeleuchtung vorzunehmen. Hierzu sind schon viele Dimming-Varianten am Markt vertreten, welche zumeist auf ein einfaches globales Dimmen der Hintergrundbeleuchtung setzen. In den meisten Produkten wird hierzu nicht einmal die Bildinformation zur Bestimmung eines neuen Backlight herangezogen, sondern lediglich Parameter wie z.B. die Umgebungshelligkeit. Die erreichbare Energieeinsparung ist dadurch stark begrenzt. Weitere Verfahren, wie das bildabhängige globale Dimmen und auch das Local-Dimming werden zwar bereits angeboten, aber zu beobachten ist, dass sich die Hersteller beim Einsatz dieser Technologie sehr stark zurückhalten. So ist die Energieeinsparung von für diese Arbeit betrachteten Testdisplays stets weit von den Ergebnissen der am Lehrstuhl für Mikroelektronik verwendeten Algorithmen entfernt. Als Grund lässt sich hierzu erkennen, dass es die Hersteller von Displays meist scheuen, negative Artefakte, welche beim Dimmen von Displays auftreten können, in Kauf zu nehmen. Sie wählen bevorzugt Varianten mit geringerem Einsparpotential um keine Bildartefakte zu riskieren.

Dies führt allerdings dazu, dass besonders beim Local-Dimming das große Potential dieses Verfahrens nicht entfaltet werden kann. So ist Local-Dimming nicht nur in der Lage den Energieverbrauch zu reduzieren; auch die visuelle Qualität des Displays kann durch einen erhöhten Kontrast und besseren Schwarzwert deutlich gesteigert werden.

Gerade diese Eigenschaften sind es aktuell auch, die den Verkauf von neuen OLED-Displays rechtfertigen, da die Kunden die großen Vorteile dieser in Bezug auf die visuelle Qualität erkennen. Die Organisation UHD¹ Alliance bildet aus diesem Grund einen Zusammenschluss von namhaften Displayherstellern, die visuellen Eigenschaften von LC-Displays durch die Vorgabe von Kriterien an die Eigenschaften von OLED-Displays anzunähern [Uhd17].

Ziel dieser Arbeit ist es, die negativen Artefakte, die beim Dimmen von insbesondere Displays mit LEDs an nur einer Displaykante auftreten, zu erkennen und zu reduzieren. Obwohl zurzeit viele dieser Displays, hauptsächlich aus Kostengründen, verkauft werden, gilt es als schwierig Dimming-Algorithmen für solche Displays zu entwickeln. Dies liegt vor allem an dem großen Einfluss, die die LEDs auf der gegenüberliegenden Displayseite haben, weshalb der Dimming-Algorithmus stets diesen Crosstalk berücksichtigen muss.

¹ Ultra-High-Definition

Der Fokus dieser Arbeit liegt besonders auf diesen Displays, da, wenn es gelingt die auftretenden Artefakte zu unterdrücken, mit modernen LC-Displays durchaus eine vergleichbare visuelle Qualität wie bei OLED-Displays erreicht werden kann.

Hierzu wird in dieser Arbeit ein Algorithmus vorgestellt, welcher es ermöglicht, die negativen Artefakte zu eliminieren und dadurch herausragende Dimming Ergebnisse liefert.

1.2 Aufbau der Arbeit

Diese Arbeit gliedert sich in 9 Kapitel, deren Aufbau im Folgenden kurz erläutert wird.

Im Kapitel 2 wird ein Überblick über die zum Verständnis dieser Arbeit nötigen Grundlagen gegeben. Hierzu wird zunächst auf die menschliche Wahrnehmung eingegangen und betrachtet wie sich diese auf die Charakteristiken eines als ideal geltenden Displays auswirkt. Weiterhin wird untersucht, in wie fern es sich bei AMOLED-Displays um „ideale“ Displays im Sinne dieser Definition handelt.

Danach wird der Aufbau von LC-Displays beschrieben, und auf deren Vorteile und Einschränkungen, sowie die Ansprüche an die visuelle Qualität derer eingegangen. Zum Abschluss des Kapitels werden Ansätze zum Dimming und die zugrundeliegenden mathematischen Modelle aufgezeigt.

Kapitel 3 behandelt die grundsätzliche Fragestellung des Problems des Local-Dimmings für Edge-Lit Displays. Anhand der Light-Spread-Function und der Pixelorder wird ein Algorithmus vorgestellt, welcher die Herausforderungen dieser Fragestellung erfüllt. Dieser Algorithmus wurde für den Einsatz in einer Hardwarerealisierung entwickelt, was sich in der folgenden Darstellung der Implementierung des Algorithmus erkennen lässt.

Im folgenden Kapitel werden Probleme und Lösungen für statische Bilder betrachtet. Hierzu wurden die drei kritischsten Artefakte bei der Betrachtung statischer Bilder behandelt. Im ersten Abschnitt werden Methoden vorgestellt, wie statisches Clipping vermieden bzw. reduziert werden kann, während diese Methoden im zweiten Abschnitt so erweitert werden, dass auch das Problem des statischen Halos vermieden werden kann. Zuletzt wird auf die Einhaltung der Farbtreue und des Farbraumes beim Local-Dimming eingegangen und gezeigt, dass Local-Dimming in der Lage ist, den Farbraum eines Displays zu vergrößern.

In Kapitel 5 werden Maßnahmen zur Sicherstellung der Videoqualität vorgestellt. Nachdem zunächst das LED-Flickering betrachtet wird, wird das in dieser Arbeit erstmals behandelte Problem des dynamischen Halo-Verhaltens genau beschrieben und analysiert; sowie eine Lösung zur Vermeidung dieses Artefakts gegeben. In einem letzten Abschnitt werden die Maßnahmen auf die Betrachtung des dynamischen Clipping-Verhaltens erweitert.

Da es bei der Betrachtung von künstlichen Bildern zu Artefakten kommen kann, widmet sich das Kapitel 6 gezielt der fehlerfreien Anzeige dieser Bilder. Die besondere Herangehensweise erklärt sich

daher, dass der Mensch besonders empfindlich im Erkennen von Artefakten in künstlichen Bildern ist, da in diesen leicht ein gewisses Muster erkannt werden kann. Um die Darstellung künstlicher Bilder zu verbessern werden zunächst die möglichen Artefakte beschrieben und danach Möglichkeiten aufgezeigt, diese durch eine Detektion von Menü-Bildern und einen dynamischen LED-Minimalwert zu verringern.

Im Kapitel 7 wird zum Abschluss noch auf die Optimierung der Hintergrundbeleuchtung von Edge-Lit Displays eingegangen. Es wird untersucht, welchen Einfluss die Anordnung der LEDs und die Form der Light-Spread-Function auf die visuellen Ergebnisse und das Power-Saving haben.

Im Anschluss wird in Kapitel 8 eine Zusammenfassung und ein Fazit gezogen und in Kapitel 9 ein Ausblick gegeben.

2. Grundlagen

In diesem Kapitel werden die Grundlagen zum Verständnis der vorliegenden Arbeit dargelegt. Zunächst wird auf die Wahrnehmung des menschlichen Auges eingegangen, danach wird der Aufbau eines typischen LC-Displays gezeigt, um im Anschluss die Ansprüche an die visuelle Qualität eines Displays darzustellen, sowie AMOLED-Displays als nahezu „ideale“ Displays diskutiert.

2.1 Menschliche Wahrnehmung

Displays werden primär dazu genutzt, Informationen darzustellen, die vom menschlichen Auge wahrgenommen werden sollen. Obwohl das Auge sehr viele Informationen verarbeiten kann, sind der menschlichen Wahrnehmung dennoch Grenzen gesetzt, die auch die Grenzen des nötigen Displayfortschritts beschreiben. So gibt es für die Displayindustrie keine Anreize bzw. Verkaufsargumente mehr, Displays mit höherer visueller Qualität herzustellen, als das menschliche Auge wahrnehmen kann. Aus diesem Grund sind solche Displays im kommerziellen Bereich nicht vertreten. Um diese Limitationen zu verstehen, wird im Folgenden zuerst auf den Aufbau des menschlichen Auges eingegangen.

2.1.1 Aufbau des menschlichen Auges

Abbildung 2-1 zeigt einen Querschnitt des menschlichen Auges. Von außen sichtbar sind hier die in der rechten Bildhälfte gezeigten Bereiche wie Iris, Hornhaut und Pupille.

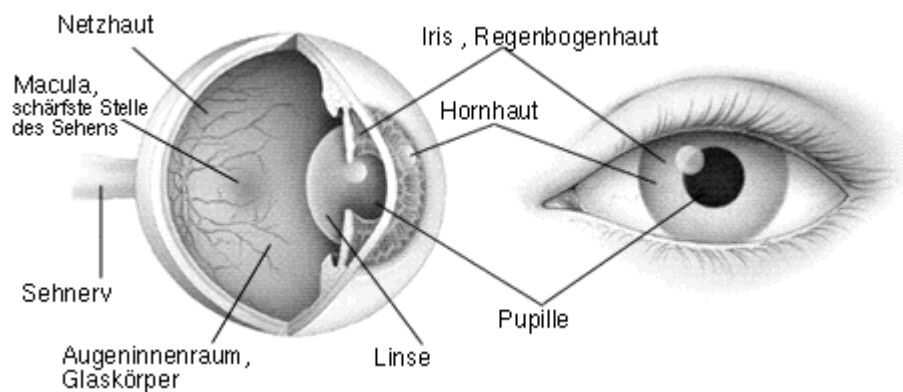


Abbildung 2-1: Das menschliche Auge [Aug17]

Der vordere Teilbereich des Auges ist zum Großteil zum Scharfstellen des Bildes als auch zur Regulierung der einfallenden Lichtmenge verantwortlich. Die Hornhaut und die Iris verformen Auge und Pupille so, dass das abzubildende Bild richtig fokussiert auf der Makula abgebildet wird. Auf der Makula befinden sich ca. 100-125 Mio. Stäbchen und ca. 5-7 Mio. Zapfen. Hierbei sind die Zapfen zur

Wahrnehmung von Farben verantwortlich und die Stäbchen zur Wahrnehmung von Helligkeitsunterschieden. Die Anzahl der Stäbchen und Zapfen auf der Makula stellt hier eine Obergrenze der Auflösung des Auges dar.

2.1.2 Wahrnehmung von Farben

Die 5-7 Mio. Zapfen unterteilen sich in drei verschiedene Zapfenarten. Je nach Zapfenart können dabei unterschiedliche Wellenlängenbereiche wahrgenommen werden. Die S-Zapfen nehmen kurze Wellenlängen, also Licht im blauen Bereich, wahr. Die M-Zapfen sind für die mittleren Wellenlängen, also grünes Licht und die L-Zapfen für das langwellige rote Licht zuständig. Dies ist auf dem in Abbildung 2-2 dargestellten Wahrnehmungsspektrum des menschlichen Auges dargestellt.

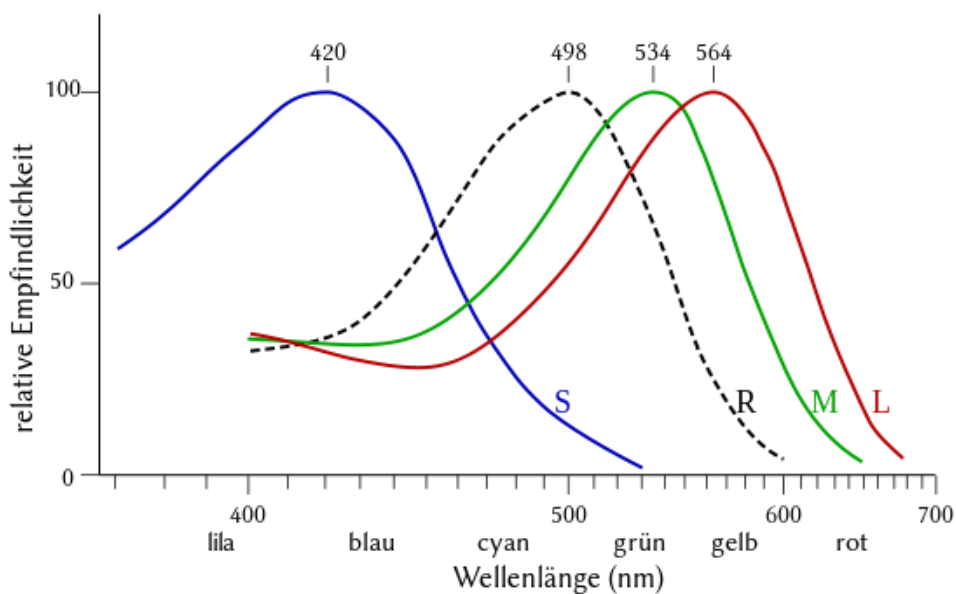


Abbildung 2-2: Wellenlängenbereiche der Zapfentypen [Wik17]

Hier ist deutlich zu erkennen, dass das Sensitivitätsmaximum der S-Zapfen bei ca. 420nm, das der M-Zapfen bei 534nm und das der L-Zapfen bei 564nm liegt. Die Empfindlichkeit der Stäbchen, welche hier mit R bezeichnet ist, verfügt über ein Maximum bei 498nm. Aus der Überlagerung dieser Sensitivitätslinien ergibt sich ein Maximum im Bereich des grünen Lichtes [Oys06]

2.1.3 Wahrnehmung von Bewegungen

Neben der Wahrnehmung von Farben ist es für das menschliche Auge auch möglich, Bewegungen sehr genau wahrzunehmen. Hierbei ermöglicht die räumliche Anordnung der Stäbchen und Zapfen auf der Makula anhand der unterschiedlichen Stellen, an welcher das Licht auf diese trifft, eine

Bewegung nachzuvollziehen. Aus diesem Grund können auch Bewegungen auf einem Display nachverfolgt werden.

Ein sehr starker Zusammenhang zur Wahrnehmung von Bewegungen besteht ebenfalls bei der Wahrnehmung von sehr schnellen Bewegungen. Diese schnellen Bewegungen führen meist dazu, dass der Betrachter für eine kurze Zeitspanne seine gesamte Aufmerksamkeit auf die Stelle lenkt, an welcher diese schnelle Bewegung aufgetreten ist. Dieses Verhalten ist evolutionär bedingt und auf das Erkennen von Gefahrensituationen in der freien Natur ausgerichtet [Mck84] [Smi94]. Allerdings kann genau dieses Phänomen zu erheblichen Schwierigkeiten beim Betrachten von Displays führen. Sollte das dargestellte Bild sich nicht absolut ruhig verhalten, was bei einem Standbild stets vorausgesetzt wird, gelingt es dem Auge, auch die kleinsten Bewegungen im Bild festzustellen. Hierbei werden schnelle Helligkeitsunterschiede besonders stark wahrgenommen, da die für die Helligkeitswahrnehmung verantwortlichen Stäbchen deutlich dichter auf der Makula sitzen als die Zapfen.

2.2 Anforderungen an ein „ideales“ Display

Mit denen in Kapitel 2.1 eingeführten Charakteristika der menschlichen Wahrnehmung wird ein Versuch unternommen, die Anforderung an ein Display für menschliche Betrachter zu definieren.

Auflösung

Das erste Displaymerkmal, das in den letzten Jahren auch von namhaften Displayherstellern sehr stark in den Vordergrund gerückt wurde, ist die Auflösung des Displays. Diese beschreibt, wie viele sich individuell ansteuerbare Bildpunkte, sogenannte Pixel, sich insgesamt auf dem Display befinden. Diese Pixel sind in der Regel in einer rechteckigen Matrix angeordnet, so dass die Auflösung eines Displays meist in der Anzahl der Spalten und der Anzahl der Zeilen eines Displays angegeben wird. Besonders im TV-Bereich ist es üblich, dass bestimmte Auflösungen von der VESA [Ves05] standardisiert werden. Somit kann entsprechendes Quellmaterial bereitgestellt werden, welches ideal auf dem Wiedergabegerät dargestellt werden kann. Solche Auflösungen sind z.B.

- Full-HD (1920x1080 Pixel)
- Ultra-HD (3840x2160 Pixel)
- 4K2K (4096x2160 Pixel)

Im Bereich Smartphone/Tablet und Laptop hat sich in den letzten Jahren der Begriff „Retina“-Auflösung sehr verbreitet. Dieser ursprünglich von Apple [Tec12] geprägte Begriff bezeichnet Auflösungen, die über eine so hohe Pixeldichte verfügen, dass die einzelnen Pixel nicht mehr vom Auge wahrgenommen werden können. Um eine Retina Auflösung zu erreichen, muss eine bestimmte Pixeldichte erreicht werden. Diese hängt vom Betrachtungsabstand ab, da bei einem größeren Abstand auch größere Pixel schlechter einzeln wahrgenommen werden können. Als typische

Pixeldichte werden hierbei oft Dichten von mehr als 200ppi (Pixel per Inch) [Zie98] angegeben. Diese Zahl wird in etwa simultan für Smartphones/Tablets und Laptops angegeben. Bei TV-Geräten sinkt die Dichte aufgrund des größeren Betrachtungsabstandes entsprechend. Typische Retina Displays haben heute z.B. Auflösungen von 1920x1080 Pixel für ein 4,7“ Display bzw. 5120x2880 für ein 27“ Laptop.

In den meisten Fällen bedeuten hierbei somit höhere Auflösungen auch eine höhere Display-Qualität, allerdings sind sehr hohe Auflösungen, je nach Anwendung des Displays, nicht mehr qualitätssteigernd, da sie nicht mehr wahrgenommen werden können.

Helligkeit

Die vom Display erzielte Helligkeit ist ein weiteres Displaymerkmal, welche stark vom Einsatz des Displays abhängt. Während Fernseher oder PC-Monitore zumeist in geschlossenen Räumen verwendet werden, müssen Smartphones und Tablets auch noch unter direktem Sonnenlicht ablesbar, und deshalb deutlich heller sein. Ähnliche Anforderungen an die Helligkeiten gelten somit auch für automotive Displays, bei welchen zu jeder Zeit eine spezifizierte Ablesbarkeit gewährleistet sein muss.

Um die gewünschte Helligkeit zu erreichen, befinden sich hinter LC-Displays zumeist Leuchtdioden, welche eine Hintergrundbeleuchtung bilden, welches durch die Pixel nur noch moduliert wird, während aktiv emittierende Displays das geforderte Licht direkt in den Pixeln emittieren.

Die Qualität eines Displays anhand der erreichten Helligkeit zu definieren bietet sich hierbei nicht an, da die geforderte Helligkeit stark vom Anwendungsbereich des Displays abhängt.

Kontrast

Ein weiterer Aspekt eines Displays ist der Kontrast. Hierbei wird zumeist unterschieden zwischen statischem und dynamischem Kontrast. Während der dynamische Kontrast das Verhältnis des hellsten Pixels und des dunkelsten Pixels zweier aufeinanderfolgenden Bilder bezeichnet, bezeichnet der statische Kontrast das Verhältnis von dunkelstem zu hellstem Pixel im aktuellen Bild [Yeh10] [Boe05]. Hierbei wird stets die reale physikalische Leuchtdichte L betrachtet.

$$K_{stat} = \frac{L_{max}}{L_{min}} \quad (2-1)$$

$$K_{dyn} = \frac{L_{max,t}}{L_{min,t\pm 1}} \quad (2-2)$$

Anhand der Formeln ist zu sehen, dass zum Erreichen eines hohen Kontrastes zwei Bedingungen erfüllt sein müssen. Es muss stets ein besonders heller Pixel vorhanden sein, aber auch ein dunkler. Da der dynamische Kontrast durch Abschalten des Displays bei schwarzen Frames einfach vergrößert

werden kann, eignet sich der statische Kontrast besser zur Charakterisierung der Qualität eines Displays. Ein „ideales“ Display zeichnet sich also dadurch aus, dass es gleichzeitig besonders helle und dunkle Pixel darstellen kann.

Brillanz

Die Brillanz ist ein nahe mit dem Kontrast verwandtes Qualitätskriterium von Displays. Brillanz beschreibt hierbei sozusagen einen lokalen Kontrast [Bar12]. Dieser lokale Kontrast wird von Betrachtern meist deutlich stärker wahrgenommen, da er sich sehr positiv auf die Qualität des dargestellten Bildes auswirkt. Die lokal hellen Punkte auf sehr dunklem Grund werden von den Betrachtern hierbei als positiv und ein schlechterer Schwarzwert in der Umgebung der hellen Spots oft als besonders störend wahrgenommen [Iwa17] [Bau10]. Hierbei wird die Brillanz umso höher, je kleiner die hellen Flächen auf dunklem Hintergrund sind. Für ein, insbesondere auch gedimmtes, Display ist es hierbei besonders wichtig, die ursprüngliche Helligkeit dieser kleinen Flächen zu erhalten.

Somit eignet sich die Brillanz als Qualitätskriterium für Displays, da durch sie gut die individuellen Charakteristiken des Displays dargestellt werden können.

Farbraum

Eine weitere wichtige Anforderung an ein Display ist die Darstellung möglichst vieler Farben. Neben der Auflösung der einzelnen Subpixel ist es hier auch wichtig, die Grundfarben möglichst rein darzustellen. Die Fläche, die im CIE-Farbraum [CIE31] zwischen den drei Darstellbaren Grundfarben aufgespannt wird, wird als der vom Display erreichbare Farbraum bezeichnet. Umso größer der Farbraum eines Displays ist, desto Farbintensiver wirkt die Darstellung, was den erreichten Farbraum ebenfalls zu einem wichtigen Parameter eines Displays macht.

Energieverbrauch

Unabhängig von den bisher genannten visuellen Eigenschaften zählt stets auch der Energieverbrauch eines Displays zu dessen Qualitätskriterien. Insbesondere je nach Anwendung ist er ein nicht zu vernachlässigendes Kriterium zur Auswahl eines Displays. So entsteht zumindest bei den meisten mobilen Anwendungen ein direkter Kompromiss zwischen der Helligkeit und somit indirekt des Kontrastes, und dem nötigen Energiebedarf, während der Energiebedarf bei z.B. TV-Geräten oder Monitoren zwar nicht komplett vernachlässigt werden darf, aber eine deutlich niedrigere Rolle hinter der visuellen Qualität des Displays spielt.

2.2.1 AMOLED als „ideales“ Display

In Bezug auf Abschnitt 2.2 soll hier das AMOLED-Display als ein „ideales“ Display dargestellt werden. Das „ideal“ ist hierbei bewusst in Anführungszeichen gesetzt, da jedes Display stets immer auch Kompromisse bezüglich der Charakteristik der Qualität eingehen muss. Nichtsdestotrotz erfüllt das AMOLED-Display die meisten bisher genannten Kriterien. Im Folgenden wird erläutert, wieso dies so ist, und welche Nachteile trotzdem beim Einsatz von AMOLED-Displays entstehen.

Bei einem AMOLED-Display handelt es sich um ein Display, in dem die einzelnen OLED-Pixel mittels einer aktiven Adressierungs-Matrix angesteuert werden. Dies bedeutet, dass alle Pixel einer Zeile parallel angesteuert werden, und mindestens zwei Transistoren sowie Kondensator pro Pixel dafür sorgen, dass angelegte Spannungspotential über die gesamte Zeit eines Bildes konstant zu halten **[Wag08]**. Dadurch leuchtet der Pixel während der gesamten Adressierungszeit des Frames. Ein wichtiger Aspekt von AMOLED-Display ist hierbei, dass die einzelnen Pixel selbst Licht emittieren, also keine Hintergrundbeleuchtung notwendig ist. Dies hat besonders auf die bereits aufgezeigten Kriterien zur Bestimmung der Qualität eines Displays einen Einfluss, da einzelne Pixel dadurch komplett abgeschaltet werden können.

Die zuvor genannten Kriterien für die Qualität eines Displays beinhalten hierbei an erster Stelle die Auflösung des Displays. Stellte diese noch vor einigen Jahren, als die meisten OLED-Displays noch mittels passiver Adressierungs-Matrix angesteuert wurden, ein Problem dar, sind heute bereits viele AMOLED-Displays in Smartphones mit Auflösungen bis zu mehr als 4K2K am Markt verfügbar. Durch den Schritt von PMOLED zu AMOLED konnte hierbei die Auflösung stark erhöht werden, da diese zuvor beim PMOLED durch die Adressierzeit stark limitiert war. Außerdem haben weiterführende stetige Verbesserungen des OLED-Materials sowie der Fertigungsprozesse immer kleinere Strukturen in der Herstellung der AMOLED-Displays ermöglicht. Somit lassen sich mit AMOLED alle an die Auflösung eines Displays gestellten Kriterien erfüllen.

Der nächste Punkt der Kriterien beinhaltet die Helligkeit eines Displays. Zwar ist es prinzipiell möglich, AMOLED-Displays sehr hell zu betreiben, allerdings wird hier auch der gravierendste Nachteil von AMOLED-Displays sichtbar. Durch das aktive Emittieren des Lichtes kommt es zu einer Alterung der OLED-Pixel, welche sich bei höheren Helligkeiten schneller vollzieht. Diese Alterung äußert sich an dem AMOLED-Display dadurch, dass gealterte Pixel an Helligkeit verlieren (vgl. **[Jia15]**). Dies führt dazu, dass zwar prinzipiell hohe Helligkeiten für AMOLED-Displays möglich sind, diese jedoch praktisch zu vermeiden sind, da dadurch die Lebensdauer der Displays stark absinken würde. Auf die Lebensdauer von AMOLED-Displays wird am Ende dieses Abschnitts nochmals genauer eingegangen.

Die beiden nächsten Kriterien, Kontrast und Brillanz lassen sich bei der Betrachtung von AMOLED-Displays zusammenfassen. Obwohl zwar die Helligkeit limitiert ist, lassen sich für AMOLED-Displays hierbei stets hohe Kontrast- und auch Brillanz-Werte erreichen, da schwarze Pixel immer auch einen sehr guten Schwarzwert aufweisen. Dies liegt daran, dass ein deaktivierter Pixel kein eigenes Licht emittiert. Dies gilt unabhängig von der Position der betrachteten Pixel und ermöglicht somit auch

eine hohe Brillanz. Somit lässt sich in Bezug auf Kontrast und Brillanz ein AMOLED-Display als „ideales“ Display bezeichnen.

Das letzte genannte Kriterium umfasst den Energieverbrauch. Dieser korreliert bei AMOLED-Displays stark mit den darzustellenden Bildinhalten, da abhängig von der Helligkeit der Pixel eine unterschiedliche Energiemenge benötigt wird, um dieses Bild darzustellen. Im Allgemeinen liegt allerdings der Energieverbrauch von AMOLED-Displays in einem ähnlichen Bereich wie der Energieverbrauch von vergleichbaren LC-Displays. Während der Energieverbrauch von LC-Displays durch Dimming stark reduziert werden kann, hängt der Energieverbrauch von AMOLED-Displays stark von den Materialeigenschaften der genutzten OLED-Pixel ab. Außerdem lässt sich der Energieverbrauch teilweise durch eine geschickte Ansteuerung reduzieren (vgl. Digitale Ansteuerung von AMOLED-Displays **[Vol17]**).

Abschließend soll hier noch ein negatives Attribut von AMOLED-Displays aufgezeigt werden, Aufgrund der Alterung, also der Reduzierung der Helligkeit der einzelnen Pixel über die Laufzeit, kann es, wenn über längere Zeiten immer gleiche Bildinhalte dargestellt werden, zu einem sogenannten Einbrennen dieses Bildes kommen. Da die hellen Pixel dieses Bildes schneller an Helligkeit vorliegen als die dunklen, lassen sich später diese Konturen dauerhaft auf dem Display feststellen. Dieses Problem wird als Image-Sticking bezeichnet. Aktuell wird an Methoden geforscht, die die Auswirkungen des auftretenden Helligkeitsverlusts anhand von Data-Counting reduzieren **[Jia16]**. Auch an neuen Verfahren zur digitalen Ansteuerung, welche das Alterungsproblem beheben könnten, wird zurzeit geforscht **[Vol14]**.

Aufgrund dieser Umstände sind AMOLED-Displays nicht ohne Abstriche als „ideale“ Displays zu bezeichnen.

2.3 LC-Displays

Nachdem im letzten Abschnitt bereits das AMOLED-Display als ein in Bezug auf die Bildqualität „ideales“ Display aufgezeigt wurde, werden in diesem Abschnitt die Grundlagen von LC-Displays beschrieben. Da das in dieser Arbeit zu besprechende Thema „Herausforderungen und Qualitätssicherung beim lokalen Dimmen von LC-Displays mit seitlich angeordneten LEDs“ auf der Technologie moderner LC-Displays basiert, werden diese im Folgenden näher betrachtet.

Hierbei wird zunächst der Aufbau dieser Displays erklärt und auf die Vorteile und Einschränkungen, die sich daraus ergeben, eingegangen. Danach werden Ansätze des Dimmens eingeführt und die entsprechenden Modelle aufgezeigt.

2.3.1 Aufbau, Vorteile und Einschränkungen

Um den Aufbau eines Flüssigkristall-Displays (LC-Display, von engl. Liquid-Crystal-Display) beschreiben zu können, ist es zunächst wichtig, die Funktion einer solchen Flüssigkristall-Zelle zu betrachten. Für das fertige Display stellt jede einzelne Flüssigkristall-Zelle einen Sub-Pixel dar. Bei der Beschreibung der Funktionsweise einer Flüssigkristall-Zelle soll in dieser Arbeit nicht wesentlich auf die unterschiedlichen Arten einer Realisierung einer solchen Zelle eingegangen werden. Zur Verdeutlichung der Funktionsweise eines LC-Displays genügt es hier, die drei gebräuchlichsten Varianten von Flüssigkristall-Zellen zu nennen. Dies sind die TN-Zellen (Twisted-Nematic), die IPS-Zellen (In-Plane-Swiviching) und die VA-Zellen (Vertical-Alignment) [Lue01]. Die Funktionsweise der Zell-Typen ist hierbei ähnlich; lediglich in einigen Parametern wie z.B. Kontrast oder Blickwinkel unterscheiden sich diese. Gemeinsam haben alle Flüssigkristall-Zelltypen, dass sie in der Lage sind, die Polarisation von transmittiertem Licht zu ändern. Die Polarisation des Lichts lässt sich hierbei in Abhängigkeit von der angelegten elektrischen Spannung variieren. Um diese physikalische Eigenschaft in einem LC-Display nutzen zu können, wird eine solche Flüssigkristall-Zelle zwischen zwei, zueinander um 90° gedrehten Polarisationsfiltern angebracht. Dies ist bereits in Abbildung 2-3, welche den gesamten Querschnitt eines LC-Displays darstellt, zu sehen.

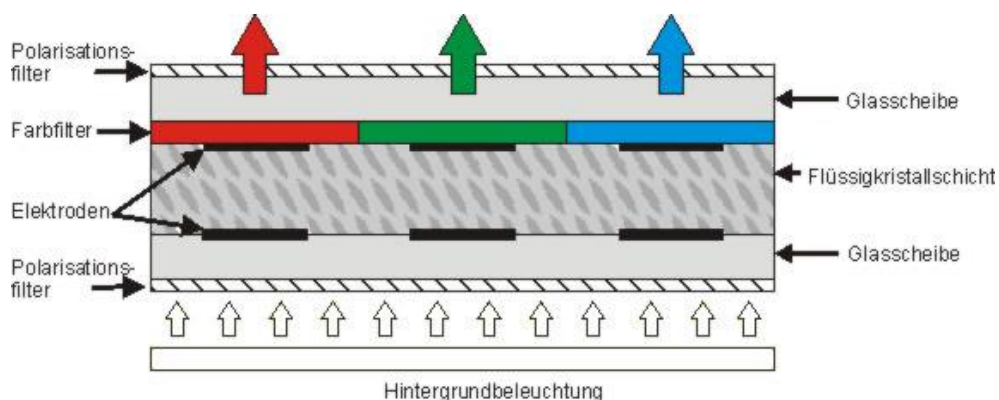


Abbildung 2-3: Aufbau eines LC-Displays [Chi10]

Die Flüssigkristall-Zellen sind durch das über die Elektroden anlegbare elektrische Feld in der Lage, das eintretende, bereits linear polarisierte Licht in der Polarisationsrichtung zu drehen. Durch den zweiten Polarisationsfilter kann stets nur ein gewisser Anteil des in der Polarisationsrichtung gedrehten Lichtes diesen passieren. In der hier gezeigten Abbildung ist genau ein Pixel des Displays zu sehen; dieser besteht aus den drei Sub-Pixeln rot, grün und blau. Um die Farbe des Pixels einstellen zu können, ist es erforderlich, dass die Transmission und somit das elektrische Feld über den Flüssigkristall-Zellen für jeweils einen Bereich des Pixels eingestellt werden kann. Durch entsprechende Farbfilter wird danach die resultierende Farbe jedes Sub-Pixels realisiert.

Dieser gesamte Aufbau wird zumeist aus Stabilitätsgründen zwischen zwei Glasscheiben montiert. Des Weiteren ist es wichtig, dass die Elektroden aus einem durchsichtigen Material bestehen, da das Licht diese auch durchdringen muss. Zumeist werden diese Elektroden heute noch aus ITO² hergestellt [Min08].

Die bis hier beschriebene Funktionsweise eines LC-Displays gilt soweit für alle verfügbaren Varianten der LC-Displays. Sie bilden ein lichtdurchlässiges Panel, welche die Transmission der Sub-Pixel durch eine elektronische Ansteuerung ändern kann. Allerdings kann dieses Flüssigkristall-Panel kein Licht emittieren; hierzu wird stets eine Hintergrundbeleuchtung benötigt. Diese ist ebenfalls in Abbildung 2-3 dargestellt.

Diese Hintergrundbeleuchtung wurde früher zumeist mit Leuchtstoffröhren direkt hinter dem Panel realisiert. Diese Anordnung der Hintergrundbeleuchtung wird daher auch heute noch Direct-Lit genannt. Um eine homogenere Hintergrundbeleuchtung zu erhalten, werden zusätzlich Diffusor-Folien zwischen die Lichtquellen der Hintergrundbeleuchtung und das LC-Panel gesetzt. Später wurden, aufgrund einer Vergrößerung des zu erreichenden Farbraumes und des Preises der Komponenten, verstärkt LEDs für die Hintergrundbeleuchtung eingesetzt. In dieser Arbeit werden ausschließlich Displays mit einer Hintergrundbeleuchtung aus LEDs betrachtet, da Displays mit Leuchtstoffröhren-Hintergrundbeleuchtung heute nicht mehr hergestellt werden.

Das Nutzen von LEDs als Hintergrundbeleuchtung ermöglicht weiterhin auch neue Anordnungsmöglichkeiten dieser im fertigen Display. So wurden aus Design- und Kostengründen Displays entwickelt, bei denen die LEDs der Hintergrundbeleuchtung seitlich neben dem LC-Panel angebracht sind. Dies bietet einerseits den Vorteil, dass insgesamt weniger LEDs für die Hintergrundbeleuchtung benötigt werden, bzw. das gesamte Display dadurch deutlich dünner werden kann. Diese neue Variante der seitlichen LED-Anordnung wird im Folgenden als Edge-Lit Hintergrundbeleuchtung bezeichnet. Abbildung 2-4 stellt den Querschnitt eines Displays mit Direct-Lit und eines Displays mit Edge-Lit Hintergrundbeleuchtung dar.

² ITO: engl. indium tin oxide: halbleitendes, transparentes Material

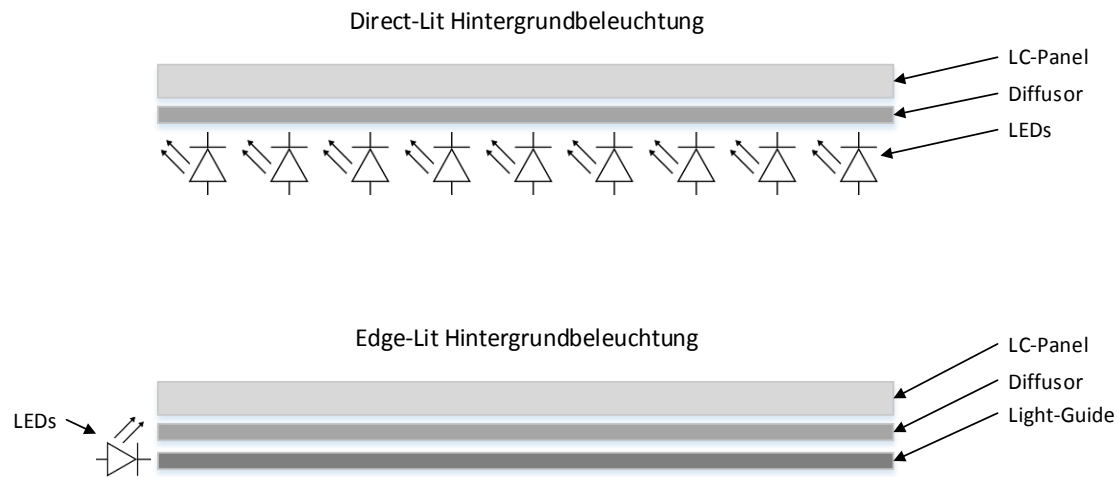


Abbildung 2-4: Querschnitt einer Direct-Lit (oben) und einer Edge-Lit (unten) Hintergrundbeleuchtung

Es ist leicht zu sehen, dass das Display mit einer Edge-Lit Hintergrundbeleuchtung deutlich dünner gestaltet werden kann. So ist bei Direct-Lit Displays zumeist ein gewisser minimaler Abstand zwischen LEDs und Panel erforderlich, um die Charakteristiken der LEDs bezüglich des Abstrahlwinkels so einzuhalten, dass ein homogenes Backlight entsteht. Dieses homogene Backlight wird bei den Edge-Lit Hintergrundbeleuchtungen durch einen so genannten Light-Guide erreicht. Dies ist eine optisch strukturierte Schicht, in welche das von den seitlich montierten LEDs emittierte Licht eingekoppelt wird. Diese Light-Guide-Schicht ist im Weiteren so strukturiert, dass möglichst über die gesamte Fläche des Displays ein gleichmäßig helles Backlight zum LC-Panel ausgekoppelt wird [Lue01].

Die weitere Entwicklung dieser Edge-Lit Hintergrundbeleuchtungen bestand darin, dass immer weniger Kanten des Displays mit LEDs ausgestattet wurden. So waren bei den ersten Displays dieser Art noch LEDs an allen vier Displaykanten angebracht. In den meisten modernen Displays sind heute allerdings zumeist nur noch LEDs an einer Displaykante angebracht. Dies hat den Vorteil, dass nochmals weniger LEDs eingesetzt werden können und dass die verbliebenen drei Displaykanten weiterhin verschmälert werden können. Deshalb ist es bei TVs heute üblich, die LEDs stets nur an der unteren, langen Displaykante zu montieren, da sie dort vom Betrachter wegen des montierten TV-Fußes kaum wahrgenommen werden, wohingegen die seitlichen und die obere Kante aufgrund der nicht nötigen LEDs sehr dünn designt werden kann. Ein ähnliches Verhalten ist auch bei Laptop-Monitoren zu sehen, wo sich ebenfalls die untere Displaykante anbietet, um dort die LEDs zu montieren. Bei Smartphones hat es sich hingegen durchgesetzt, dass die LEDs nur an einer kurzen Displaykante montiert sind, da dadurch der Rand zwischen aktiver Displayfläche und Gehäuse des Smartphones deutlich dünner werden kann.

Die großen Vorteile eines LC-Displays liegen hierbei darin, dass LC-Displays zunächst deutlich günstiger zu produzieren sind. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass sie auch einfach in großen Diagonalen produziert werden können und wie in neuen TV-Geräten sogar leicht gekrümmt verbaut

werden können [Mur98] [Bla15]. Außerdem erlaubt die Ansteuerung mittels einer aktiven Adressierungs-Matrix und Dünnschichttransistoren [Boe05] eine schnelle Bildwiderholrate, was neben einem ruhigen Bild auch den Einsatz von 3D-Technologien ermöglicht.

Allerdings hat ein LC-Display nicht nur Vorteile. Aufgrund der vielen Schichten, durch die eine Transmission des von der Hintergrundbeleuchtung erzeugten Lichtes erfolgen muss, durchdringen selbst bei höchster Transmission nur maximal ca. 30% des erzeugten Lichtes allein wegen der Farbfilter das gesamte LC-Panel [Lan07] [Wan07]. Dies führt dazu, dass die Hintergrundbeleuchtung ein sehr helles Licht erzeugen muss und dadurch auch die Energieaufnahme des gesamten Displays steigt. Da die zur Erzeugung des benötigten Lichtes geforderte Energie proportional zur Fläche des Displays ist, steigt der Energiebedarf für Displays mit großen Diagonalen besonders stark an.

Eine weitere wichtige Einschränkung der LC-Displays liegt ebenfalls im Bereich der Hintergrundbeleuchtung. Da diese stets ein helles Licht über die gesamte Fläche des Displays erzeugt, wird der Kontrast des Displays maßgeblich reduziert. Dies kommt daher, dass immer ein gewisser Anteil des Lichtes die LC-Zelle durchdringen kann. Aufgrund von Materialschwankungen werden nie alle Bestandteile des polarisierten Lichtes in der LC-Zelle so gedreht, dass sie den zweiten Polarisationsfilter nicht mehr passieren können. Dies führt dazu, dass selbst Bildbereiche, welche schwarz sein sollten, durch dieses sog. Light-Leakage nicht komplett schwarz sind, was zu einem reduzierten Kontrast führt.

Ein weiteres, verwandtes Problem, ist die teils starke Blickwinkelabhängigkeit von LC-Displays. Diese entsteht durch die vielen Schichten im Aufbau des Panels und verkleinert insbesondere für besonders flache Blickwinkel deutlich den Kontrast und den Farbraum eines LC-Panels.

Aufgrund der starken Verbreitung von LC-Displays mit LEDs an nur einer Kante der Hintergrundbeleuchtung bietet es sich an, in dieser Arbeit das Potential von Dimming-Algorithmen auf solche Displays zu untersuchen, da mit Dimming-Ansätzen die oben genannten Einschränkungen von LC-Displays teils stark reduziert werden können. Insbesondere die Energieaufnahme kann drastisch reduziert und der Kontrast stark gesteigert werden. Im folgenden Abschnitt werden einige Dimming-Ansätze vorgestellt und auf die zugehörigen Modelle eingegangen.

2.3.2 Ansprüche an die visuelle Qualität von LC-Displays

Nachdem im vorherigen Abschnitt bereits auf die Vorteile und Einschränkungen von LC-Displays eingegangen wurde, soll in diesem Abschnitt nochmal genauer darauf eingegangen werden, inwiefern LC-Displays die an sie gestellten Ansprüche an die visuelle Qualität erfüllen können. Hierzu werden im Folgenden einige ausgewählte wichtige Kriterien der visuellen Qualität diskutiert.

Auflösung

Die Auflösung eines Displays zählt mit zu dessen wichtigsten Parametern. Sie bestimmt maßgeblich den visuellen Eindruck eines Displays und dient deshalb nicht zuletzt in der Bewertung von Displays zumeist als Hauptkriterium für eine gute Displayqualität.

In den letzten Jahren wurden allerdings LC-Display so weit entwickelt, dass die Auflösung keine besondere Rolle mehr spielt, da mittlerweile ausreichend große Auflösungen erreicht werden können, die, je nach Betrachtungsabstand, vom Betrachter nicht mehr aufgelöst werden können (vgl. Abschnitt 2.2).

Insbesondere bei LC-Displays existiert allerdings noch ein weiterer negativer Effekt, welcher mit steigender Auflösung zunimmt. So führt eine gesteigerte Auflösung unweigerlich auch zu einer schlechteren Aperture-Ratio, also einem schlechteren Verhältnis von transmittierenden zu nicht transmittierenden Flächen im Display. Diese nicht transmittierenden Flächen wurden beim Aufbau des LC-Displays bisher in dieser Arbeit noch nicht betrachtet; sie beinhalten zumeist die Ränder bzw. Kanten um die einzelnen Pixel bzw. Sub-Pixel herum sowie die Pixelschaltung. Zwar werden diese Ränder mit zunehmender Auflösung und dadurch kleiner werdenden Pixeln schmaler, jedoch sinkt die Pixelfläche dennoch deutlich schneller, als die Fläche der Randbereiche. Dies führt dazu, dass bei höheren Auflösungen zunehmend mehr vom Backlight erzeugtes Licht nicht das LC-Panel passieren kann. Um trotzdem die geforderte Helligkeit eines Displays zu erreichen, ist es unausweichlich, ein helleres Backlight einzusetzen und dadurch einen höheren Energieverbrauch zu akzeptieren.

Bildwiederholrate

Die Bildwiederholrate ist ein weiterer wichtiger Parameter zur Beurteilung der Qualität eines Displays. Im Bereich der LC-Displays ist es durch die Adressierung der einzelnen Pixel in einer Aktiv-Matrix allerdings möglich, ausreichend hohe Bildwiederholraten zu erreichen. Bei einer solchen Aktiv-Matrix-Ansteuerung werden stets alle Pixelwerte einer Zeile gleichzeitig angesteuert. Der in jedem Pixel vorhandene aktive Transistor (im Falle von LC-Displays die TFTs) [Lue01] [Cri09] erhält zusammen mit einem Kondensator den angelegten Wert des Pixels so lange, bis die entsprechende Pixelzeile im nächsten Frame neu beschrieben wird. Mit kleiner werdender Kanallänge der TFTs lässt sich die Adressierzeit pro Zeile stark reduzieren, was wiederum, da die Summe der Adressierzeit aller Zeilen stets die maximale Bildwiederholrate charakterisiert, zu hohen Bildwiederholraten führt.

Die meisten aktuellen LC-Displays verfügen über Bildwiederholraten von deutlich mehr als 120Hz, was zu einem guten visuellen Eindruck führt und dadurch auch den Einsatz von LC-Displays als 3D-Displays ermöglicht.

Helligkeit

Die Helligkeit eines LC-Displays hängt maßgeblich von der verwendeten Hintergrundbeleuchtung sowie der Transmission des LC-Panels ab. Die Transmission des Panels wird einerseits durch die

verwendeten Filter (Diffusor, Polarisation, Farbfilter) und andererseits vom bereits beschriebenen Aperture-Ratio bestimmt. Da sich die Transmission eines Panels oft nicht einfach anpassen lässt, bietet es sich an, die gewünschte Helligkeit durch Modifikationen im Backlight zu erreichen. Hier erlaubt der Einsatz hellerer LEDs, trotz der geringen Transmission der LC-Panels, eine hohe Bildhelligkeit bei LC-Displays zu erreichen. Diese reicht von ca. 400 cd/m² bei TV-Geräten bis zu über 1000 cd/m² für HDR-Displays oder speziellen Displays für den Außenbereich. Somit ist es für LC-Displays zumeist leicht möglich, die von der Anwendung geforderte Helligkeit zu erreichen.

Kontrast und Brillanz

Die Betrachtung des Kontrastes sowie der Brillanz hängt bei aktiv emittierenden Displays wie z.B. AMOLED-Displays, nicht von der zu erreichenden Helligkeit des Displays ab. Anders sieht dies bei LC-Displays aus: Da die LC-Zellen durch das vorhandene erzeugte Licht der Hintergrundbeleuchtung einen Pixel nie vollständig abdunkeln können (vgl. Light-Leakage), steigt der Helligkeitswert eines schwarzen Pixels mit der Gesamthelligkeit der Hintergrundbeleuchtung. Andererseits ist eine helle Hintergrundbeleuchtung erforderlich, um die hellen, brillanten Bereiche eines darzustellenden Bildes genügend hell abzubilden. Dadurch ergibt sich direkt eine Limitierung des Kontrastes sowie auch der Brillanz, da mit steigender Helligkeit auch immer der Schwarzwert schlechter wird.

Blickwinkel

Der Blickwinkel spielt bei LC-Displays stets eine große Rolle. Einer der größten Einschränkungen von LC-Displays ist in der teils starken Blickwinkelabhängigkeit der Displays gegeben. Dies resultiert aus den vielen übereinander montierten Schichten im Aufbau des LC-Panels. Hierbei kann es bei jedem Übergang zwischen zwei Schichten zu unerwünschten Brechungen oder Reflexionen kommen, welche zu starken Verfälschungen der darzustellenden Bilder führen. Der eingeschränkte Blickwinkel von LC-Displays stellt nach wie vor eine starke Einschränkung dieser dar, weshalb die Vergrößerung des Blickwinkels in der aktuellen Forschung mit viel Aufwand betrieben wird **[Zha16] [Tan16]**.

Weiterhin besteht bei der Wahl der verwendeten LC-Technologie ein Kompromiss zwischen Blickwinkel und Kontrast. So verfügen IPS-Panel zwar über hohe Blickwinkel, allerdings nur über einen geringen Kontrast von ca. 1:1000. VA-Panel im Gegensatz bieten mit 1:4000 hohe Kontraste, allerdings ist der Blickwinkel stark begrenzt.

Farbraum

Der Farbraum eines LC-Displays wird nicht, wie bei aktiv emittierenden Displays, durch die Farbwerte der Primärfarben der drei Sub-Pixel bestimmt, sondern durch die bereits in der zumeist weißen Hintergrundbeleuchtung enthaltenen Farbkomponenten. Da es sich bei der Hintergrundbeleuchtung zumeist um LEDs handelt, ist dadurch automatisch der zu erreichende maximale Farbraum eines LC-Displays limitiert. Durch neue Ansätze wird derzeit versucht, mittels Q-Dot-Filmen das Spektrum der

LED-Hintergrundbeleuchtung zu vergrößern [Lee16], um einen höheren Farbraum des Displays zu erreichen.

2.3.3 Ansätze zum Dimming und mathematisches Modell

Im vorherigen Abschnitt wurde gezeigt, dass LC-Displays die meisten an sie gestellten Ansprüche in Bezug auf die visuelle Qualität einhalten können. Ein großes Defizit besteht bei LC-Displays lediglich in dem Erreichen von hohen Kontrasten und auch hoher Brillanz, was zumeist auf einen schlechten Schwarzwert zurückzuführen ist. Wie bereits beschrieben, liegt der Grund dieses schlechten Schwarzwertes an dem auf der gesamten Rückseite des LC-Panels emittierten Lichts der Hintergrundbeleuchtung. Im Folgenden wird beschrieben, wie durch einen gezielteren Einsatz der Hintergrundbeleuchtung vor allem der Schwarzwert erhöht und somit auch der Energieverbrauch eines LC-Displays reduziert werden können. Diese verschiedenen Arten der bildabhängigen Manipulation der Hintergrundbeleuchtung werden im Folgenden als Dimming bezeichnet. Zunächst wird in dieser Arbeit auf das Global-Dimming eingegangen und im Anschluss an die Grundlagen des Local-Dimmings das zugrundeliegende mathematische Modell eingeführt.

Global-Dimming

Beim Global-Dimming handelt es sich um den einfachsten Fall des Dimmens. Hierbei werden stets alle LEDs der Hintergrundbeleuchtung mit dem gleichen Wert betrieben. Dies ermöglicht eine vereinfachte Betrachtung des Dimmings, da für das gesamte Bild nur ein variabler Wert für das gesamte Backlight gefunden werden muss. Aus diesem Grund ist es für das Global-Dimming auch nicht erforderlich, die Einflüsse, die jede einzelne LED auf die einzelnen Pixel hat, zu kennen. Auch besteht nicht die Gefahr, dass durch Modifikationen im Backlight das resultierende Bild Inhomogenität aufweisen kann.

Um ein fehler- und verlustfreies gedimmtes Bild zu erhalten, bietet es sich an, die LEDs der Hintergrundbeleuchtung so weit zu reduzieren, dass das erzeugte Licht gerade noch zur Abdeckung der geforderten Helligkeit des hellsten Pixels im Bild genügt. Hierzu wird zur Berechnung des Backlights B der Quotient aus dem Pixel mit dem größten Wert $\max(i_p)$ sowie der für das Display maximal darstellbaren Helligkeit $i_{p,max}$ gebildet und mit dem maximal möglichen Backlight B_{max} multipliziert.

$$B = B_{max} * \frac{\max(i_p)}{i_{p,max}} \quad (2-3)$$

Im weiteren Verlauf des Global-Dimmings wird, wie es noch in Formel (2-8) beschrieben wird, die Transmission aller Pixel angepasst.

Da auf diese Weise ein Dimmen nicht mehr möglich ist, wenn auch nur ein einziges weißes, bzw. maximal helles Pixel im Bild vorhanden ist, wird beim Global-Dimming meist ein Kompromiss

zwischen Informationsverlust in den hellen Pixeln und dem Dimming eingegangen. So wird zumeist der nominelle maximale Pixelwert bestimmt, in dem hierfür der niedrigste Wert i_{max} einer bestimmten Anzahl der hellsten Pixel P übernommen wird. Ein Einstellen des Backlights gemäß Formel (2-3) hat dann zur Folge, dass alle Pixel, die heller sind als i_{max} , lediglich mit dem maximalen Pixelwert i_{max} erscheinen, und somit in diesen Pixeln ein Informationsverlust entsteht.

Dieser Effekt kann durch eine Änderung der Abbildungskennlinie der Transmission der einzelnen Pixel verringert werden. Eine solche Abbildungskennlinie ist in Abbildung 2-5 dargestellt.

In dem hier gezeigten Fall wurde ein Knickpunkt von $Q = 192$ gesetzt. Dies bedeutet, dass die Kennlinie für Eingangswerte größer als dieser Wert über eine niedrigere Steigung verfügt; was zwar zu einer niedrigeren Helligkeitsauflösung in diesem Bereich führt, allerdings den Informationsverlust in den hellsten Pixeln verhindert. Damit die Abbildungskennlinie nach wie vor den maximalen Eingangswert auf den maximalen Ausgangswert abbildet, ist eine höhere Steigung der Kennlinie im Bereich kleiner als Q gefordert. Die genaue Berechnung dieser Kennlinie soll hier allerdings nicht weiter betrachtet werden. Eine genaue Analyse, mit auch einer an die Bildinhalte angepassten Variation der hellsten Pixel, sowie des Knickpunktes findet sich in [MSc15].

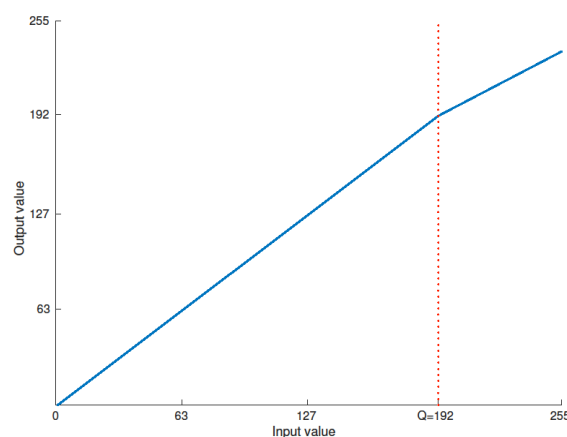


Abbildung 2-5: Abbildungskennlinie der Pixelhelligkeiten im Global-Dimming [MSc15]

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass mittels Global-Dimming bereits Verbesserungen im Kontrast bzw. auch der Brillanz und somit des Energieverbrauchs erreicht werden können, allerdings sind diese Verbesserungen stark limitiert. Dies lässt sich leicht an Beispielen erkennen, welche z.B. über eine dunklere und eine hellere Seite verfügen. In diesen Fällen kann, sofern die Hintergrundbeleuchtung lokal verteilt gestaltet wurde, das Local-Dimming sein volles Potential entfalten. Im folgenden Abschnitt wird auf die Grundlagen des Local-Dimmings eingegangen.

Grundlagen des Local-Dimmings

Das Local-Dimming ist die logische Weiterentwicklung des Global-Dimming. Im Gegensatz zu einem global konstanten, gedimmten Wert für die LEDs der Hintergrundbeleuchtung wird im Local-Dimming jeder einzeln ansteuerbaren LED ein eigener Wert zugewiesen. Dies führt unweigerlich zu einer höheren Komplexität, da zum Berechnen dieser individuellen LED-Werte stets auch der Einfluss jeder LED auf die Pixel des Displays bekannt sein muss.

Dieser Einfluss einer LED auf die Pixel des Displays lässt sich im einfachsten Fall, welcher hier als Beispiel dienen soll, bei LC-Displays mit Direct-Lit Hintergrundbeleuchtung anhand eines festgelegten Pixelbereichs bestimmen, auf welchen die aktuell betrachtete LED einen Einfluss hat. In der Regel ist das eine feste Anzahl von Pixeln, welche direkt über der LED sind. Um den Wert dieser LED zu bestimmen, kann für alle Pixel dieses Bereiches ein ähnliches Verfahren wie beim bereits beschriebenen Global-Dimming angewendet werden. Das heißt, es wird versucht, einen LED-Wert zu finden, der der Helligkeit der maßgebenden Pixel im zugehörigen Bereich entspricht. Wird dies auf alle LEDs der Direct-Lit Hintergrundbeleuchtung angewendet, erhält jede einzelne LED durch die unterschiedlichen Bildinformationen in den Bereichen einen individuellen LED-Wert [Xu16].

Dies führt dazu, dass LEDs, welche sich hinter hellen Bildbereichen befinden, deutlich heller betrieben werden, als LEDs hinter dunklen, oder gar schwarzen Bildbereichen. Aus diesem Grund ist die erzielbare Verbesserung des Kontrastes und der Energieeinsparung deutlich höher als bei Global-Dimming Ansätzen. Eine Verbesserung der Brillanz hängt hierbei stark von der Anzahl der LEDs der Hintergrundbeleuchtung ab. Da zur Brillanz maßgeblich ein hoher Kontrast in einem räumlich kleinen Bereich bezeichnet wird, lässt sich dieser auch mit Local-Dimming nicht beliebig erhöhen. So ist im einfachsten Fall eine helle Linie auf dunklem Grund vorstellbar, welche genau über einer LED der Hintergrundbeleuchtung verläuft. In diesem Fall müsste diese LED hell eingeschaltet werden, was den Schwarzwert der umliegenden Fläche und somit den lokalen Kontrast sowie die Brillanz reduziert.

Das hier schematisch eingeführte Verfahren für Local-Dimming von Direct-Lit Displays lässt sich allerdings nicht direkt auf das Local-Dimming von Edge-Lit Displays übertragen, da bei Edge-Lit Displays die Bereiche der zugehörigen LEDs nicht geometrisch zugeordnet werden können. Außerdem überlappen sich diese Bereiche stärker als bei Direct-Lit Displays, was in einem Local-Dimming-Algorithmus gesondert berücksichtigt werden muss. Diese Überlappung der Einflussbereiche wird als LED-Crosstalk bezeichnet.

Im folgenden Abschnitt wird ein mathematisches Modell aufgezeigt, welches diese Umstände berücksichtigt und als Grundlage des in Kapitel 3 beschriebenen SSC-Algorithmus dient.

Mathematisches Modell des Local-Dimmings

Ziel eines jeden Dimming-Algorithmus ist es stets, dass von der Hintergrundbeleuchtung erzeugte Licht so stark zu minimieren, und trotzdem sicherzustellen, dass jedes Pixels seine geforderte Helligkeit erreicht. Die geforderte Helligkeit eines Pixels wird im Folgenden als i_p und die vom Backlight erzeugte Helligkeit in diesem Pixel als B_p bezeichnet. Somit muss in jedem Pixel p gelten:

$$i_p \leq B_p \quad (2-4)$$

Die vom Backlight erzeugte Helligkeit eines Pixels ergibt sich für alle Displays aus der Summe des von allen einzelnen LEDs N_{LED} erzeugten Lichtes zu:

$$B_p = \sum_{l=1}^{N_{LED}} b_p(l) \quad (2-5)$$

Die Helligkeit einer einzelnen LED in einem Pixel des Displays b_p ergibt sich aus dem relativen Einfluss a_p und dem Wert v dieser LED auf das Pixel zu:

$$b_p(l) = a_p(l) * v(l) \quad (2-6)$$

Um abschließend das Backlight soweit wie möglich abzdunkeln, und somit auch ein Maximum am Energiebedarf des Displays einzusparen, muss die Summe aller LED-Werte minimal sein. Dieses Problem lässt sich in ein lineares Programm der Form

$$\min \left\{ \sum_{l=1}^{N_{LED}} v(l) : B_p > i_p \right\} \quad (2-7)$$

überführen [Alb09] [Alb10a] [Xu16].

Dieses lineare Programm ermöglicht es, die Helligkeit des Backlights auf ein Minimum zu reduzieren und trotzdem in jedem Pixel die geforderte Helligkeit zu erreichen. Gleichzeitig liefert die Lösung dieses linearen Programms die maximale Energieeinsparung für ein gegebenes Bild.

Um durch das Dimmen des Backlights nicht das Bild im gesamten abzdunkeln, ist es weiterhin erforderlich, die Transmission der Pixel t_p soweit zu erhöhen, dass der betrachtete Pixel auch die geforderte Helligkeit i_p erreicht. Hierzu gilt:

$$t_p = \frac{i_p}{B'_p} \quad (2-8)$$

Hierbei gibt B'_p den prozentualen Wert des Backlight in Bezug zu einem ungedimmten Backlight an. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass alle Bildbereiche auch trotz Dimming nicht an Helligkeit verlieren. Nur durch den Erhalt der Helligkeit in hellen Bildbereichen ist es überhaupt möglich, den Kontrast sowie die Brillanz eines gedimmten Bildes zu steigern.

Das hier gezeigte Modell findet immer die ideale Lösung zur Minimierung des Energieverbrauchs, allerdings ist es nicht geeignet, gleichzeitig den maximalen Kontrast bzw. die größte Brillanz zu erreichen. Um den Kontrast eines Bildes zu verbessern, ist es aufgrund der Definition des Kontrastes nötig, die Differenz zwischen hellstem und dunkelstem Pixel zu maximieren. Hierfür gilt die Gleichung:

$$\max\{|(t_{p1} * B_{p1}) - (t_{p2} * B_{p2})| : B_p > i_p\} \quad (2-9)$$

Hierbei geben $p1$ und $p2$ zwei beliebige Pixel des Displays an. Weiterhin muss die Bedingung, dass in allen Pixeln stets die geforderte Helligkeit zur Verfügung stehen muss, für alle Pixel p gelten.

Eine ähnliche lineare Gleichung lässt sich hierbei für die Maximierung der Brillanz des gedimmten Bildes aufstellen. Hierbei bezeichnen q und $q + 1$ immer zwei benachbarte Pixel und P gibt die Gesamtanzahl der Pixel an.

$$\max\left\{\sum_{q=1}^{P-1} |(t_q * B_q) - (t_{q+1} * B_{q+1})| : B_q > i_q\right\} \quad (2-10)$$

Auch hier gilt weiterhin die bekannte Randbedingung zur Lösung der linearen Gleichung. Ziel dieser Arbeit wird es sein, den SSC-Local-Dimming Algorithmus so weit zu verbessern, dass alle hier genannten Kriterien möglichst gut erfüllt werden können.

Im folgenden Kapitel wird der Sorted-Sector-Covering-Algorithmus vorgestellt. Dieser Algorithmus wurde auf der Basis des hier gezeigten Modells speziell für eine Hardwarerealisierung in LC-Displays mit Edge-Lit Hintergrundbeleuchtung angepasst. In den darauffolgenden Kapiteln werden die Herausforderungen, die dabei entstanden, dargestellt und Lösungswege aufgezeigt.

3. Local-Dimming für Edge-Lit-Displays

Die in Abschnitt 2.3.2 genannten Ansprüche an die visuelle Qualität von LC-Displays können von handelsüblichen Displays, wie sie in Kapitel 2.3 beschrieben wurden, nur unzureichend erfüllt werden. Zwar sind auf dem Markt einige TV-Geräte und auch andere Displays mit Dimming-Algorithmen erhältlich und der Einsatz von QDot-Filmen kann vor allem den Farbraum erhöhen [Lee16], aber die Dimming-Algorithmen erreichen oft nicht die von den Endverbrauchern gewünschten Ergebnisse. Insbesondere bezüglich Schwarzwert und Kontrast bestehen starke Defizite. Um diese Mängel zu eliminieren, wurde am Lehrstuhl für Mikroelektronik der Universität des Saarlandes der Sorted-Sector-Covering-Algorithmus (SSC-Algorithmus) entwickelt [Alb10]. Mit diesem Algorithmus können insbesondere die Ergebnisse des Local-Dimmings verschiedenster Displays, insbesondere von Displays mit Edge-Lit-Hintergrundbeleuchtung, verbessert werden. In Kapitel 3.2 wird genauer auf den Aufbau und den Ablauf des Sorted-Sector-Covering-Algorithmus eingegangen. Um die Funktionsweise dieses Algorithmus und die besonderen Anforderungen an einen Algorithmus, welcher sowohl für Direct-Lit als auch für Edge-Lit-Hintergrundbeleuchtungen geeignet ist, besser zu verstehen, wird in Kapitel 3.1 die sogenannte Light-Spread-Function (LSF) eingeführt.

3.1 Light-Spread-Function (LSF)

Unter der Light-Spread-Function wird die Funktion verstanden, welche die Ausbreitung des von einer LED emittierten Lichtes auf alle Pixel des Displays beschreibt. Dies führt zu einer in jedem Pixel des Displays definierten Funktion, welche die Helligkeit dieses Pixels $b_{i,j}$ in einer Helligkeitseinheit, zumeist cd/m^2 , enthält. Hierbei beschreiben die Indizes i und j jeweils die Zeile bzw. die Spalte des aktuell betrachteten Pixels. Da die Hintergrundbeleuchtung eines LC-Displays aus N LEDs besteht, sind zur Speicherung der Information des Backlights $N * i * j$ gemessene und gespeicherte Helligkeitswerte nötig. Mittels geeigneter Messtechnik ist es möglich, die Anzahl der Messung auf die Anzahl der LEDs der Hintergrundbeleuchtung zu reduzieren. Diese Messungen wurden am Lehrstuhl für Mikroelektronik stets mit der ELDIM UMaster [Eld17] durchgeführt. Da dieses Messgerät nicht nur die Helligkeit in einem Spot aufnimmt, sondern über eine Auflösung von 3300×2500 Pixel verfügt, sind zum Messen der LSF nur so viele Aufnahmen nötig, wie das Display über LEDs in der Hintergrundbeleuchtung verfügt. Eine solche Aufnahme ist im linken Teil von Abbildung 3-1 dargestellt. Die Pixelwerte aller Pixel werden, um solche Aufnahmen zu erzeugen, stets auf weiß gesetzt, um eine Transmission von 100% zu erreichen. Um trotz der im Vergleich zur Displayauflösung geringeren Auflösung des Messgerätes für jeden Pixel einen Helligkeitswert zu erhalten, wurden die gemessenen Werte mittels Matlab auf die jeweilige Displayauflösung skaliert. In dem im linken Teil von Abbildung 3-1 gezeigten Beispiel handelt es sich um ein Display mit einer Auflösung von 720×1280 Pixeln und insgesamt 7 LEDs an der kurzen Displaykante. Die geringere Auflösung ist für das weitere Vorgehen im Sorted-Sector-Covering-Algorithmus vertretbar, da die räumliche Frequenz einer LSF sehr gering ist. Insbesondere im Vergleich der räumlichen Frequenz eines kondensierten Bildes (vgl. Abschnitt 3.4) ist die räumliche Frequenz der LSF deutlich niedriger.

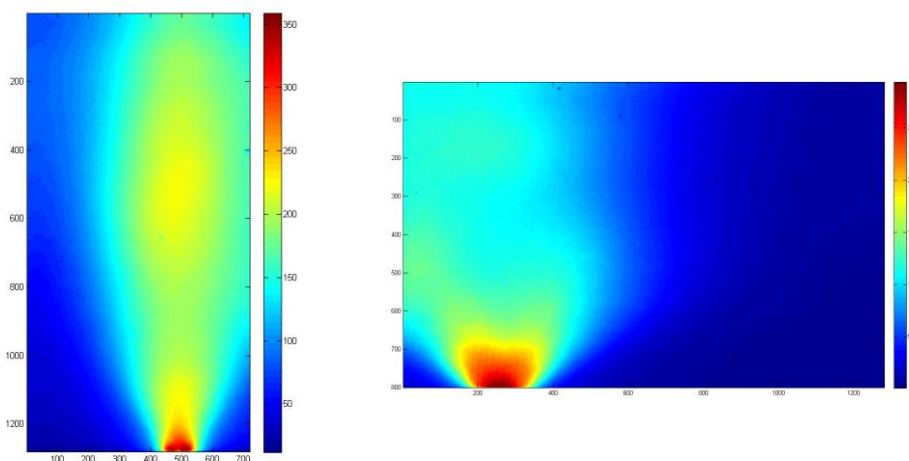


Abbildung 3-1:Links: Helligkeitsverteilung einer LED in cd/m^2 für ein Display mit LEDs an der kurzen Displaykante; rechts: Helligkeitsverteilung einer LED in cd/m^2 für ein Display mit LEDs an der langen Displaykante

Ein weiteres Beispiel einer solchen Helligkeitsverteilung ist im rechten Teil der Abbildung 3-1 gezeigt. Hierbei handelt es sich um ein Display mit einer Auflösung von 1280 x 800 Pixeln und insgesamt 12 LEDs an der langen Displaykante.

Anhand dieser zwei Beispiele ist ersichtlich, dass die Angabe der reinen Helligkeit in jedem Pixel zur weiteren Berechnung eines idealen Backlights für einen Local-Dimming-Algorithmus nicht geeignet ist, da sich die maximal erreichbare Helligkeit, je nach Display, erheblich unterscheiden kann. Allein für diese zwei gezeigten Beispiele sind die Unterschiede beträchtlich; für das erste gezeigte Display beträgt die maximale Helligkeit einer LED in einem Pixel für die gezeigte LED 359 cd/m^2 und für das zweite Display 294 cd/m^2 .

Dass diese Tatsache nicht der einzige Grund ist, weshalb die Helligkeitsverteilung der LEDs zu einer LSF normiert werden müssen, zeigt Abbildung 3-2. Diese Abbildung zeigt abermals das erste dargestellte Display in diesem Kapitel mit LEDs an der kurzen, unteren Displaykante. Der Unterschied zu Abbildung 3-1 besteht darin, dass hier alle LEDs der Hintergrundbeleuchtung des Displays eingeschaltet, sowie alle Pixel auf weiß eingestellt sind. Für das menschliche Auge erscheint das Display dadurch auch weiß, während die Messung der Helligkeit die teils eklatanten Unterschiede in der Helligkeit erkennen lässt. Im Zentrum werden Helligkeitswerte von weit über 1100 cd/m^2 gemessen, während in den äußersten Ecken nur noch Werte von knapp unter 300 cd/m^2 gemessen werden. Selbst größere Bereiche in der Nähe der unteren Kante erreichen nur Helligkeitswerte von ca. 500 cd/m^2 . Dies ist für LC-Displays mit Edge-Lit-Beleuchtung eine oft zu beobachtende Tatsache, da zumeist am Rand nur eine LED Einfluss auf die angrenzenden Pixel hat. Für das fertige Display stellt dieser Umstand kein Problem dar, da das menschliche Auge gerade im sehr hellen, weißen Bereich die Helligkeitsunterschiede ohnehin nicht wahrnehmen kann (vgl. Abschnitt 2.1).

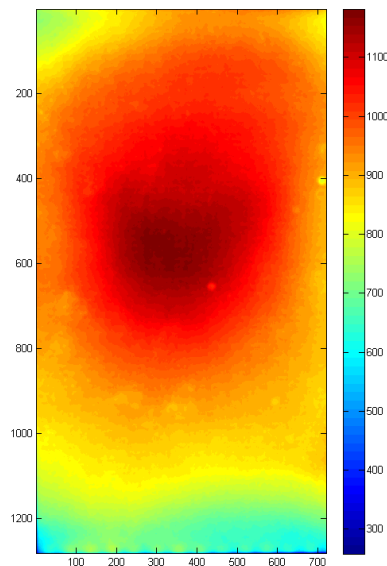


Abbildung 3-2: Hintergrundbeleuchtung eines LC-Displays mit LEDs an der unteren Displaykante bei eingeschaltetem Backlight in cd/m^2

An dieser Stelle ist ein kurzer Vorgriff auf Dimming-Algorithmen, die in Abschnitt 3.4 näher beschrieben werden, nötig. Das erste Ziel eines Dimming-Algorithmus ist es, die LED-Hintergrundbeleuchtung eines LC-Displays so zu bestimmen, dass die Summe, der durch die LEDs fließenden Ströme, minimal ist und trotzdem in jedem Pixel des Displays die vom Bild geforderte Helligkeit erreicht wird (vgl. Abschnitt 2.3.3). Diese zu erreichende Helligkeit hängt, wie in Abbildung 3-2 ersichtlich, erheblich von den Eigenschaften des Displays und somit von der Position des betrachteten Pixels ab. Die in dieser Abbildung gezeigten Randpixel können, unabhängig welcher Dimming-Algorithmus zu Grunde liegt, niemals heller leuchten, als sie es im gezeigten All-On-Bild tun. Somit gilt es, um einen Zielwert für den Dimming-Algorithmus zu erhalten, bereits in der LSF den maximal erreichbaren Helligkeitswert für jedes Pixel festzulegen. Hierfür bietet sich die maximal in diesem Pixel zu erreichende Helligkeit an, da, wie bereits erwähnt, unabhängig vom Algorithmus, an dieser Stelle keine größere Helligkeit erreicht werden kann. Somit wird im Folgenden für die LSF die Summe der einzelnen LED-Helligkeiten als Maximum angenommen (Formel (3-1)).

$$b_{i,j,max} = \sum_{l=1}^{N_{LED}} b_{i,j}(l) \quad (3-1)$$

Hierbei bezeichnen die Koordinaten i und j die Position des Pixels und l die LED, welche die entsprechende Helligkeit b beiträgt. N_{LED} gibt die Anzahl der LEDs in der Hintergrundbeleuchtung an. Diese maximale Helligkeit eines jeden Pixels bildet im Folgenden die Grundlage zur Berechnung der Helligkeitsverteilung. Im Weiteren ist es nicht mehr von Bedeutung, welcher absolute Helligkeitswert ein Pixel erreicht, sondern nur noch, ob er die für ihn mögliche Helligkeit erreichen kann. Somit ist es auch nicht erforderlich, zu eruieren, wie viel Helligkeit in absoluten Zahlen die einzelnen LEDs erzeugen. Viel wichtiger ist daher, den Anteil an Helligkeit, die eine LED zu der maximalen Helligkeit dieses Pixels beitragen kann, anzugeben. Dieser anteilige Einfluss $a_{i,j}$ beschreibt für jeden Pixel, welchen Anteil die aktuell betrachtete LED l zu der Gesamthelligkeit des Pixels beitragen kann (Formel (3-2)).

$$a_{i,j}(l) = \frac{b_{i,j}(l)}{b_{i,j,max}} \quad (3-2)$$

Eine daraus gebildete Einflussmatrix A existiert für jede LED der Hintergrundbeleuchtung des Displays und wird zur Berechnung des gedimmten Backlights genutzt. Im linken Teil der Abbildung 3-3 sind diese relativen Einflüsse einer LED nochmals für das bereits bekannte Display mit der Auflösung von 720 x 1280 Pixeln dargestellt. Hierbei ist ersichtlich, dass der maximale Einfluss, den diese LED auf einen Pixel haben kann, 57,3% beträgt. Im Vergleich hierzu ist im rechten Teil der Abbildung 3-3 der Einfluss einer LED eines Direct-Lit-Displays dargestellt. Für dieses Display ist ein maximaler Einfluss einer LED von nur 19,1% möglich.

Bei der bloßen Betrachtung dieser beiden Einflüsse und eines Vergleiches zwischen Edge-Lit und Direct-Lit lässt sich an dieser Stelle noch nicht erkennen, weshalb ein Algorithmus speziell für Edge-Lit-Displays ausgelegt sein muss. Ein Faktor zwei im Einfluss eines Pixels, bei zwei beispielhaft gewählten Displays, rechtfertigt noch keinen eigenständigen Dimming-Ansatz für Edge-Lit-Displays.

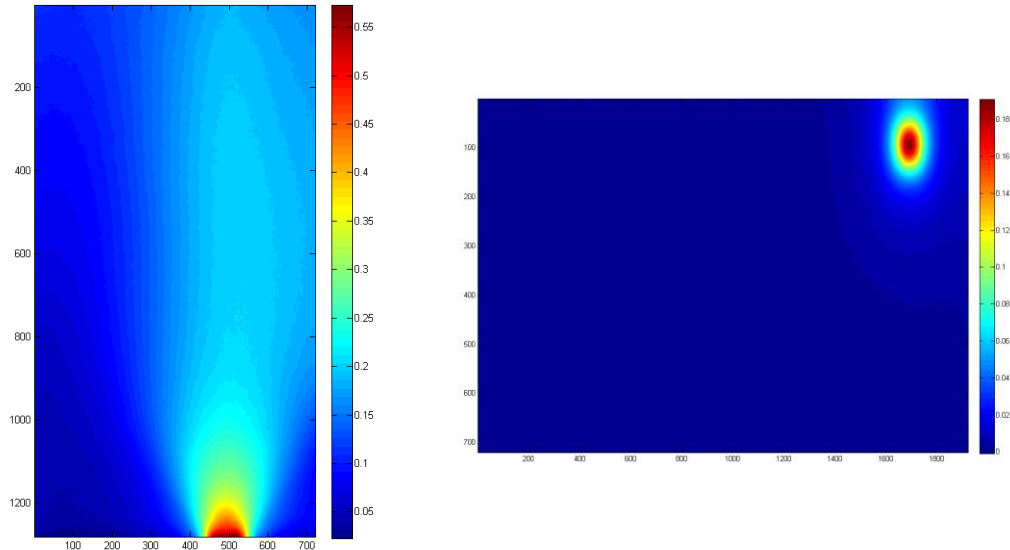


Abbildung 3-3: Links: Relative Einflüsse einer LED eines Edge-Lit-Displays; rechts: Relative Einflüsse einer LED eines Direct-Lit-Displays

Die Notwendigkeit eines speziellen Edge-Lit-Dimming-Algorithmus wird schnell klar, wenn statt des maximalen Einflusses einer LED auf einen Pixel die Anzahl der Pixel, auf welche eine betrachtete LED zusätzlich einen Einfluss hat, betrachtet wird. Wie zu erwarten, deckt hier eine LED eines Edge-Lit-Displays deutlich mehr Pixel des Displays ab, als eine LED eines Direct-Lit-Displays. In Abbildung 3-4 ist für alle acht betrachteten Displays (vgl. Anhang) die Anzahl der Pixel dargestellt, auf welche eine LED einen Mindesteinfluss hat. Diese Mindesteinflüsse betragen hierbei $[0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3]$ Prozent. Es ist deutlich zu erkennen, dass, je nach Display, weit über 20% der Pixel von je einer LED zu mehr als z.B. 15% ausgeleuchtet werden. Diese Kennzahl sieht für das bereits betrachtete Direct-Lit-Display anders aus. Für dieses werden lediglich 5,7% der Pixel mit einem Mindesteinfluss von z.B. 15% ausgeleuchtet.

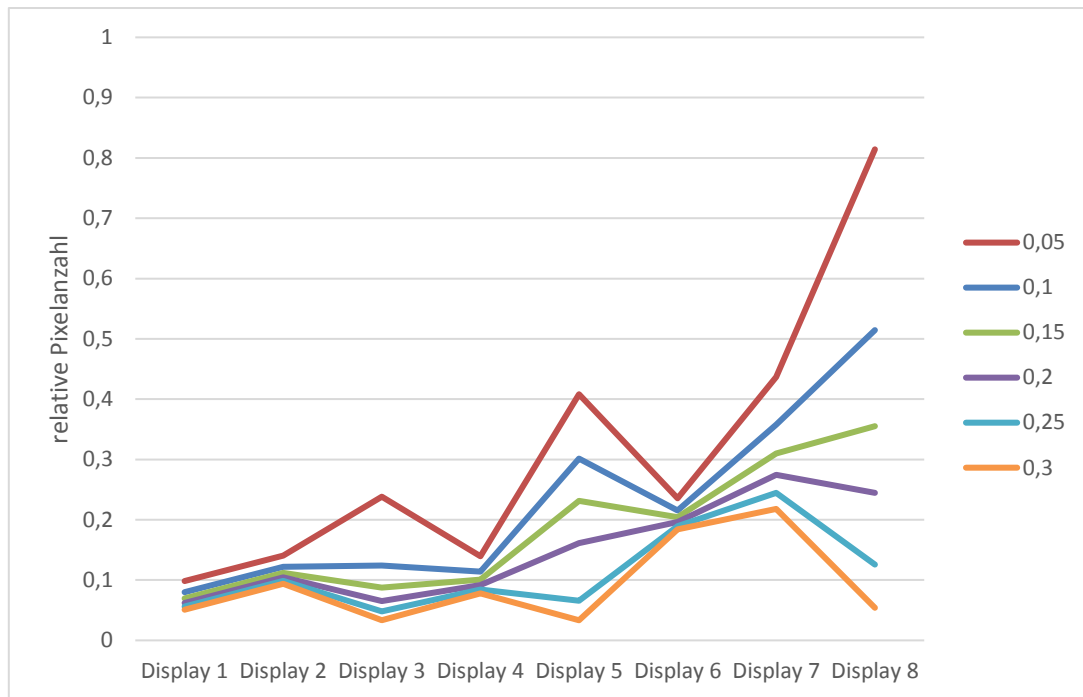


Abbildung 3-4: Anzahl Pixel, auf die eine LED Einfluss hat unter Betrachtung der genannten Mindesteinflüsse

Aufgrund dessen ist es für Algorithmen, welche für Edge-Lit-Displays geeignet sein sollen, von besonderer Bedeutung, stets mehrere LEDs gleichzeitig zur Erhöhung eines Pixels zu berücksichtigen. Das bloße Betrachten einer einzigen LED, wie dies unter Umständen bei Direct-Lit-Displays möglich ist, ist daher bei Edge-Lit-Displays nicht möglich bzw. nicht sinnvoll. Außerdem ist es bei Edge-Lit-Displays immer nötig, die LSF jeder einzelnen LED komplett zu betrachten, da diese spezifisch abhängig vom betrachteten Display ist, wohingegen bei Direct-Lit-Displays die LSF von LEDs anhand von gespeicherten Informationen einiger weniger LEDs angenähert werden kann. [MSc17] [Emm13]. Ein Ansatz, wie die Einflüsse für Edge-Lit-Displays ohne großen Hardwareaufwand gespeichert werden können und wie der Sorted-Sector-Covering-Algorithmus den Crosstalk der LEDs nutzen kann, wird in den nächsten beiden Abschnitten dargelegt.

3.2 Pixelorder

In diesem Abschnitt wird auf das Speichern der LSF eingegangen. Dabei geht es nicht ausschließlich um die reine Datenstruktur für einen Hardwareaufbau mit FPGA; vielmehr wird in diesem Abschnitt die Grundlage für den Sorted-Sector-Covering-Algorithmus gelegt. Durch das geschickte Ablegen und Speichern der LSF ist es möglich, den Rechenaufwand des Algorithmus zur Laufzeit deutlich zu reduzieren. Hierzu ist es nötig, die LSF so zu prozessieren, dass der eigentliche Dimming-Algorithmus möglichst viele Informationen bereits aus den gespeicherten Daten herauslesen kann. Eine auf diese Weise prozessierte LSF wird im Folgenden als Pixelorder bezeichnet.

Der Begriff Pixelorder ergibt sich hierbei aus der Tatsache, dass, als wesentliche neue Information, eine Reihenfolge der Pixel mit abgespeichert wird. Der Name Pixelorder ist hierbei leicht trügerisch, da es sich, wie im Folgenden noch gezeigt wird, nicht um eine Ordnung der eigentlichen Pixel handelt, sondern um eine Anordnung der sogenannten Condenser-Pixel. Diese Condenser-Pixel werden in Abschnitt 3.4.2 genauer eingeführt. An dieser Stelle genügt es zu wissen, dass in einem Condenser-Pixel mehrere reale Pixel zusammengefasst werden. Üblicherweise enthält ein Condenser-Pixel die Information aus bis zu 32×32 bzw. 64×64 realen Pixeln. Die Condenser-Größe wird hierbei so gewählt, dass ein Display stets aus etwa 500 bis 1000 Condenser-Pixeln besteht. Diese Zahl der Condenser-Pixel bestimmt die Anzahl der Einträge der Pixelorder. Die Anzahl wurde anhand der räumlichen Frequenz der LSF von Edge-Lit-Displays mit 6 bis 24 LEDs bestimmt. Auf diese Weise ist stets sichergestellt, dass die räumliche Frequenz der LSF niedriger als die räumliche Frequenz des kondensierten Bildes ist.

In der in Abschnitt 3.1 beschriebenen LSF liegen bereits alle Informationen, welche zur Erzeugung der Pixelorder notwendig sind. In einem ersten Schritt wird die Auflösung der LSF für jede LED auf die für das entsprechende Display gewählte Condenser-Auflösung gebracht. Konkret bedeutet dies, dass in der LSF jeweils z.B. 64×64 Pixel zu einem kondensierten LSF-Pixel zusammengefasst werden. An dieser Stelle wird nochmals ersichtlich, dass die Auflösung der ELDIM UMaster von 3300×2500 Pixel **[Eld17]** ausreichend hoch ist. Bei den in dieser Arbeit betrachteten Displays werden hierzu meist Condenser-Auflösungen von ca. 30×17 Condenser-Pixeln verwendet. Die genaue Bedeutung und auch, wieso die Wahl auf diese Auflösung fällt, wird in Abschnitt 3.4.4 nochmals näher beschrieben. Im Weiteren wird hier zur Beschreibung der Pixelorder von einem Display mit 30×17 Condenser-Zellen ausgegangen. Dies führt zu einer Pixelorder mit einer Länge von 510 Einträgen.

In Abbildung 3-5 ist eine solche kondensierte LSF für ein Display dargestellt, welches je 6 LEDs an beiden kurzen Kanten besitzt. Zum Kondensieren muss hierbei stets der Minimalwert der zugrundeliegenden Pixel in der Zelle betrachtet werden, da nur so sichergestellt werden kann, dass der spätere Algorithmus auch wirklich die geforderte Helligkeit in jedem Pixel erreicht. Durch die Kondensierung auf den Minimalwert wird in der späteren Berechnung für jedes Pixel niemals ein Einfluss angenommen, welcher größer als der der realen LED auf dieses reale Pixel ist. Diese Vorgehensweise führt zwar zu einem leicht erhöhten Energieverbrauch der Dimming-Algorithmen, stellt aber in Kombination mit dem im nächsten Kapitel vorgestellten Sorted-Sector-Covering-

Algorithmus die einzige Möglichkeit dar, stets genügend Helligkeit im realen Backlight zu garantieren. Eine optimale Berechnung könnte zweifelsohne mit der LSF in der vollen Displayauflösung durchgeführt werden, allerdings ist mit diesen Auflösungen kein Algorithmus möglich, welcher die in Abschnitt 3.5 genannten Forderungen bzgl. Timing und Hardwareaufwand erfüllen könnte.

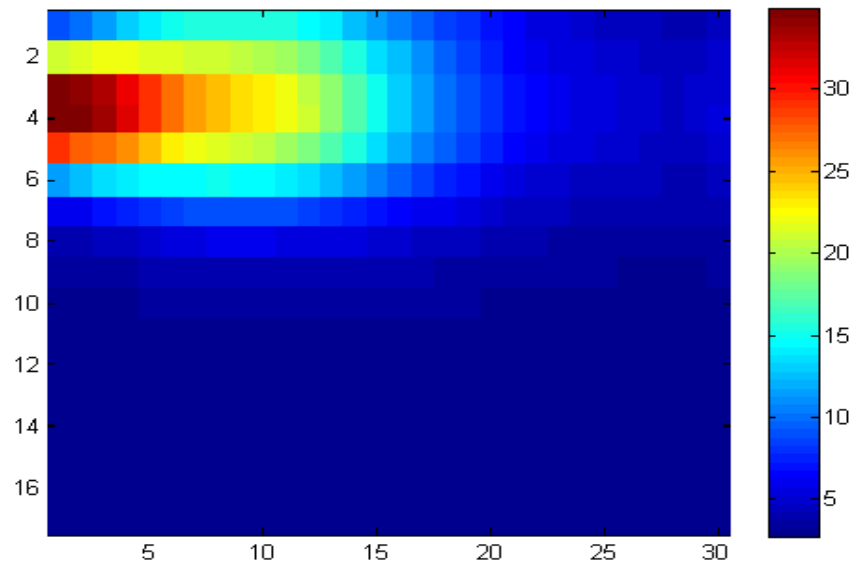


Abbildung 3-5: kondensierte LSF eines Displays mit je 6 LEDs an beiden kurzen Displaykanten
(relativer Einfluss in Prozent)

Auch nach der Reduzierung der Auflösung der LSF bleibt, nach wie vor für jede LED des Displays, ein kondensiertes Pixel, in welchem diese betrachtete LED den größten relativen Einfluss zur geforderten Helligkeit in diesem Displaybereich besitzt. Ein sogenanntes kondensiertes Pixel mit maximalem Einfluss. Im gezeigten Beispiel beträgt dieser maximale Einfluss 36,2% für die gezeigte dritte LED.

Um die weitere Anordnung der Einflusswerte in der Pixelorder näher beschreiben zu können, muss an dieser Stelle kurz die grundlegende Funktionsweise des SSC-Optimierers erwähnt werden. Ziel dieses Teils des Dimming-Algorithmus ist es, die LEDs der Hintergrundbeleuchtung sukzessive so zu erhöhen, dass nach mehreren Iterationen die Helligkeit über dem gesamten Display ausreichend für das darzustellende Bild ist, aber niemals mehr Helligkeit erzeugt werden muss als nötig wäre.

Mit diesem Vorgehen des SSC-Cores ist klar, dass es sinnvoll ist, die LEDs, welche den größten relativen Einfluss auf einen Pixel haben, zuerst zu erhöhen. Durch den Crosstalk, welche diese LED auch auf andere, benachbarte Pixel hat, wird stets auch Licht für weitere Pixel erzeugt.

Somit stellt die Pixelorder eine Art des Greedy-Algorithmus [Cor09] dar, da sie dem SSC-Algorithmus stets schrittweise den Folgezustand vorgibt, welcher den größten Nutzen verspricht. Dadurch bietet sich an, die Pixel, und somit die LEDs, so abzarbeiten, wie auch die relativen Einflüsse geordnet sind. Das heißt, zu Beginn des Algorithmus die Pixel/LED-Kombinationen abzarbeiten, welche die

höchsten relativen Einflüsse aufweisen, und zuletzt die Kombinationen zu bearbeiten, welche die geringsten relativen Einflüsse aufweisen. Dies hat den Vorteil, dass die letzten Pixel/LED-Kombinationen unter Umständen bereits abgedeckt sind bzw. nicht mehr viel erhöht werden müssen, da durch den Crosstalk der vorherigen LEDs große Bereiche der geforderten Helligkeit des Bildes bereits erreicht sind.

So einfach diese Vorgehensweise erscheint, enthält sie doch ein Problem, welches sich im späteren Verlauf dieser Arbeit zeigen wird. Da oft die LEDs in den Ecken des Displays andere Einflüsse haben, als die LEDs, die sich zentral auf einer Displaykante befinden, kommt es bei diesem Ansatz zu dem Problem, dass nicht alle LEDs gleich oft betrachtet werden (vgl. Abbildung 3-6).

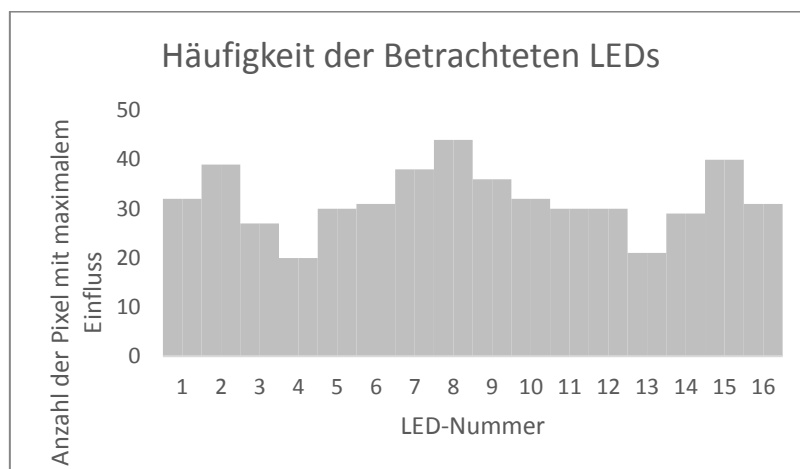


Abbildung 3-6: Häufigkeit der Betrachteten LEDs

Dies stellt, rein analytisch, kein Problem dar, da auf diese Weise auf jeden Fall die LED-Verteilung ermittelt wird, für welche der Energieverbrauch minimal ist. Es führt aber dazu, dass zwangsläufig die LED, die öfter betrachtet wird, im Ergebnis, unabhängig vom anzuzeigenden Bild, immer tendenziell heller sein wird, als die LEDs, welche seltener betrachtet werden. Dies liegt daran, dass die öfter betrachteten LEDs unter Umständen zu mehreren Pixeln zugeordnet sind, bei welchen im schlechtesten Fall jeweils ein großer Helligkeitsunterschied durch die gerade betrachtete LED abgedeckt werden muss.

Dies führt zu einer ungleichmäßigen Belastung der LEDs, was zu einer vorzeitigen Alterung der Vorzugs-LEDs führt. Bei einem längeren Betrieb dieses Displays würde zwangsläufig die Helligkeit dieser LEDs abnehmen, und, da diese im Algorithmus bevorzugt zur Einhaltung der geforderten Helligkeit des Bildes betrachtet werden, wird auch die geforderte gesamte Bildhelligkeit mit fortschreitender Betriebsdauer nicht mehr eingehalten werden können.

Ein weiteres Problem der bevorzugt behandelten LEDs besteht darin, dass es zu sichtbaren Artefakten im Bild kommen kann, wenn stets einzelne LEDs bevorzugt werden. Gerade bei homogenen Bildinhalten, wo alle LEDs mehr oder weniger gleich hell sein sollten, sind solche

Unterschiede, hervorgerufen durch bevorzugte LEDs im Algorithmus, leicht wahrnehmbar und stören die Qualität des gedimmten Bildes.

Aus diesem Grund wurde die Pixelorder in dieser Arbeit so weiterentwickelt, dass sich, aus der Abarbeitung dieser, keine bevorzugten LEDs ausmachen lassen. Der einfachste Ansatz, dies zu realisieren, führt darüber, dass eine LED erst wieder als LED mit dem höchsten relativen Einfluss gewählt werden darf, wenn zuvor mindestens alle anderen LEDs einmal gewählt wurden. Somit gilt für alle $n \in N$:

$$P_n = p_{i,j} | L(p_{i,j}) \neq \{L(P_{n-N_{LED}}) \dots L(P_{n-1})\} \cap a(p_{i,j}) \geq a(P_{n-1}) \quad (3-3)$$

Mit:

P_n : Pixel dass sich in der Pixelorder auf Position n befindet

$p_{i,j}$: Pixel mit den Koordinaten i, j

$L(P_n)$: LED mit dem größten einfluss im Pixel P_n

$a(p_{i,j})$: maximaler Einfluss einer LED im Pixel $P_{i,j}$

N_{LED} : Anzahl der LEDs im Backlight

N : Anzahl der Pixel

Durch diesen in dieser Arbeit entwickelten Ansatz wird zwar nicht für jedes Bild der absolut niedrigste Energieverbrauch gefunden, aber die Probleme bei der Darstellung künstlicher Bilder, welche in Kapitel 6 nochmals näher beschrieben und gelöst werden, können durch diese Maßnahme bereits deutlich reduziert werden. Der hier entwickelte Ansatz ermöglicht bereits eine deutliche Verbesserung in der Qualität des Local-Dimming und lässt sich ohne weiteren Hardwarebedarf sehr einfach in das bestehende Local-Dimming-System integrieren.

Die resultierenden Häufigkeiten der betrachteten LEDs sind in Abbildung 3-7 gezeigt.

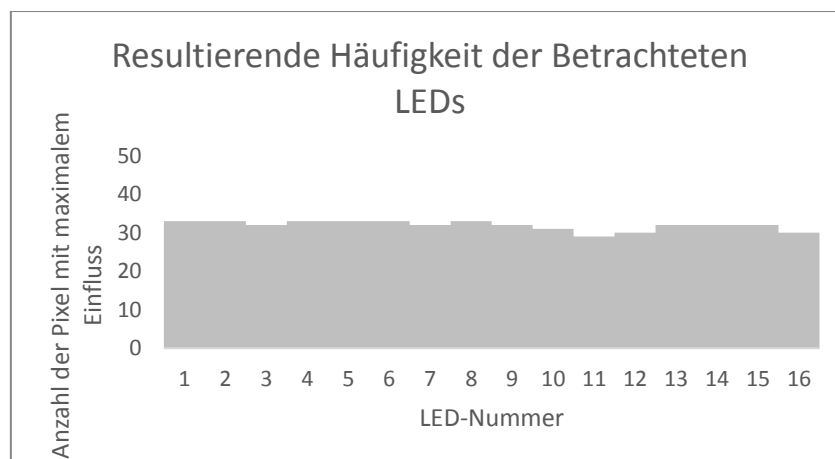


Abbildung 3-7: Resultierende Häufigkeit der Betrachtung einer LED

Wie zuvor beschrieben, werden diese Condenser-Pixel der Reihenfolge nach als Pixelorder in einer Liste gespeichert. Die resultierende Reihenfolge der einzelnen Pixel ist beispielhaft in Abbildung 3-8 dargestellt.

1	5	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	7	3
9	13	...	...	...	...	...	...	...	N-10	...	...	...	...	...	...	...	...	15	11
...	...	...	...	...	...	...	...	...	N-8	N-3	N-7	...	...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...	N-6	N-4	N	N-2	N-11	...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...	N-9	N-1	N-5	...	...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	N-12	...	...	...	...	...	...	...	...	...
12	16	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	14	10
4	8	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	6	2

Abbildung 3-8: Reihenfolge der Condenser-Pixel in der Pixelorder

Um die Zugehörigkeit jedes maximalen relativen Einflusses im Nachhinein nochmal gewährleisten zu können, ist es erforderlich, dass, zusätzlich zum Einfluss, auch die Nummer des kondensierten Pixels, sowie die Nummer der LED, welche diesen Einfluss im betrachteten Pixel hat, mitgespeichert werden. Die Struktur einer solchen Pixelorder ist in Abbildung 3-9 dargestellt.

Pixelorder #	Pixel # (P)	LED # (L)	Einfluss (a)
1	$P(a_{P=\max, L(P)=\max})$	$L(a_{P=\max, L(P)=\max})$	$a_{P=\max, L(P)=\max}$
2	$P(a_{P=\max-1, L(P)=\max})$	$L(a_{P=\max-1, L(P)=\max})$	$a_{P=\max-1, L(P)=\max}$
3	$P(a_{P=\max-2, L(P)=\max})$	$L(a_{P=\max-2, L(P)=\max})$	$a_{P=\max-2, L(P)=\max}$
⋮	⋮	⋮	⋮
N-1	$P(a_{P=\min+1, L(P)=\max})$	$L(a_{P=\min+1, L(P)=\max})$	$a_{P=\min+1, L(P)=\max}$
N	$P(a_{P=\min, L(P)=\max})$	$L(a_{P=\min, L(P)=\max})$	$a_{P=\min, L(P)=\max}$

Abbildung 3-9: Schematische Darstellung der Pixelorder (erster Teil)

Mithilfe dieser Pixelorder ist es möglich, die Komplexität des vorgestellten Dimming-Algorithmus zu verringern, da bereits wesentliche Schritte des Algorithmus in der Pixelorder enthalten sind. Im Algorithmus selbst ist es zur Laufzeit lediglich erforderlich, diese Pixelorder abzuarbeiten. Wie sich in Abschnitt 3.4 zeigen wird, reichen allerdings die bisher enthaltenen Informationen noch nicht aus, um das gesamte Backlight des Displays zu repräsentieren. Es ist ersichtlich, dass, um den Crosstalk

der einzelnen LEDs zu berücksichtigen, stets die aktuelle Helligkeit in jedem kondensierten Pixel bekannt sein muss. Um diesen zu berücksichtigen, ist es erforderlich, zu jedem einzelnen kondensierten Pixel auch die Einflüsse aller anderen LEDs auf genau diesen betrachteten Pixel zu speichern.

Dabei stellt es sich als sinnvoll heraus, auch die Einflüsse der anderen LEDs in der gespeicherten Pixelorder in absteigender Reihenfolge zu speichern. Dies hat den Vorteil, dass später im Algorithmus auf die LED mit dem zweithöchsten relativen Einfluss auf das betrachtete Pixel zurückgegriffen werden kann, sofern die LED mit dem höchsten Einfluss alleine nicht ausreichen sollte, das Pixel komplett auszuleuchten. Um stets die aktuelle Helligkeit des Pixels zur Laufzeit des Algorithmus zu wissen, kann hierzu jeder aktuelle LED-Wert mit dem Einfluss der LED auf das betrachtete Pixel multipliziert und anschließend diese Werte summiert werden. Der Aufbau der fertigen Pixelorder ist in Abbildung 3-10 dargestellt.

Pixelorder #	Pixel # (P)	LED # (L)	Einfluss (a)	LED # (L)	Einfluss (a)	LED # (L)	Einfluss (a)	LED # (L)	Einfluss (a)
1	$P(a_{\text{Pixel } 1, \text{ LSF} \text{ max}})$	$L(a_{\text{Pixel } 1, \text{ LSF} \text{ max}})$	$a_{\text{Pixel } 1, \text{ LSF} \text{ max}}$	$L(a_{\text{Pixel } 1, \text{ LSF} \text{ max}-1})$	$a_{\text{Pixel } 1, \text{ LSF} \text{ max}-1}$	...	...	$L(a_{\text{Pixel } 1, \text{ LSF} \text{ min}})$	$a_{\text{Pixel } 1, \text{ LSF} \text{ min}}$
2	$P(a_{\text{Pixel } 2, \text{ LSF} \text{ max}})$	$L(a_{\text{Pixel } 2, \text{ LSF} \text{ max}})$	$a_{\text{Pixel } 2, \text{ LSF} \text{ max}}$	$L(a_{\text{Pixel } 2, \text{ LSF} \text{ max}-1})$	$a_{\text{Pixel } 2, \text{ LSF} \text{ max}-1}$	...	...	$L(a_{\text{Pixel } 2, \text{ LSF} \text{ min}})$	$a_{\text{Pixel } 2, \text{ LSF} \text{ min}}$
3	$P(a_{\text{Pixel } 3, \text{ LSF} \text{ max}})$	$L(a_{\text{Pixel } 3, \text{ LSF} \text{ max}})$	$a_{\text{Pixel } 3, \text{ LSF} \text{ max}}$	$L(a_{\text{Pixel } 3, \text{ LSF} \text{ max}-1})$	$a_{\text{Pixel } 3, \text{ LSF} \text{ max}-1}$	...	...	$L(a_{\text{Pixel } 3, \text{ LSF} \text{ min}})$	$a_{\text{Pixel } 3, \text{ LSF} \text{ min}}$
i	i	⋮	i	⋮	i	⋮	i	⋮	i
N-1	$P(a_{\text{Pixel } N-1, \text{ LSF} \text{ max}})$	$L(a_{\text{Pixel } N-1, \text{ LSF} \text{ max}})$	$a_{\text{Pixel } N-1, \text{ LSF} \text{ max}}$	$L(a_{\text{Pixel } N-1, \text{ LSF} \text{ max}-1})$	$a_{\text{Pixel } N-1, \text{ LSF} \text{ max}-1}$	...	...	$L(a_{\text{Pixel } N-1, \text{ LSF} \text{ min}})$	$a_{\text{Pixel } N-1, \text{ LSF} \text{ min}}$
N	$P(a_{\text{Pixel } N, \text{ LSF} \text{ max}})$	$L(a_{\text{Pixel } N, \text{ LSF} \text{ max}})$	$a_{\text{Pixel } N, \text{ LSF} \text{ max}}$	$L(a_{\text{Pixel } N, \text{ LSF} \text{ max}-1})$	$a_{\text{Pixel } N, \text{ LSF} \text{ max}-1}$	...	...	$L(a_{\text{Pixel } N, \text{ LSF} \text{ min}})$	$a_{\text{Pixel } N, \text{ LSF} \text{ min}}$

Abbildung 3-10: Schematische Darstellung der Pixelorder (vollständig)

Durch diesen Aufbau der Pixelorder kann viel Rechenaufwand, der zur Sortierung der LSF nötig ist, bereits im Voraus durchgeführt werden und muss nicht erst vom Algorithmus zur Laufzeit ermittelt werden. Weiterhin bietet sich die Struktur dieser Pixelorder auch für eine Hardwareimplementierung an. Der Speicherplatz ist vergleichbar mit dem reinen Abspeichern der LSF, jedoch zahlt sich in einer Hardwareimplementierung der vereinfachte Algorithmus besonders aus, da eine geringere Komplexität des Algorithmus hier vor allem die möglichen Kosten eines IC³s erheblich reduzieren kann. Die einfache Struktur der listenförmigen Abarbeitung legt es hierbei nahe, dass der Algorithmus in Form von Zustandsautomaten und geeigneten Zählern in einem Hardware IC realisiert werden kann (vgl. Abschnitt 3.5).

³ IC: engl. integrated circuit: integrierte Schaltung

3.3 Gamma-Anpassung beim Local-Dimming

Die Gamma-Anpassung ist ein wichtiges Element jedes Algorithmus, welcher nicht direkt im TCON⁴ untergebracht ist. Um die Notwendigkeit dieser Gamma-Anpassung zu verstehen, wird im folgenden Abschnitt näher auf dieses Thema eingegangen.

Die Gamma-Kurve ist eine Kennlinie, welche den Zusammenhang zwischen den anzuzeigenden Bilddaten p_{in} und der physikalischen Ausgabe der Leuchtdichte p_{out} eines Displays darstellt. Sie entspricht somit also der Wahrnehmung des menschlichen Auges. Dieser Zusammenhang wird im Weber-Fechner-Gesetz [Ros96] zusammengefasst; es besagt, dass bei einem exponentiellen Anstieg der Reizstärke die Empfindung im Sinnesorgan nur linear zunimmt. Dies gilt mit Ausnahmen besonders geringer oder hoher Leuchtdichten [Lak12].

Eine übliche Gamma-Kurve, die angewendet wird um diesen Zusammenhang auszugleichen, ist hierzu in Abbildung 3-11 dargestellt.

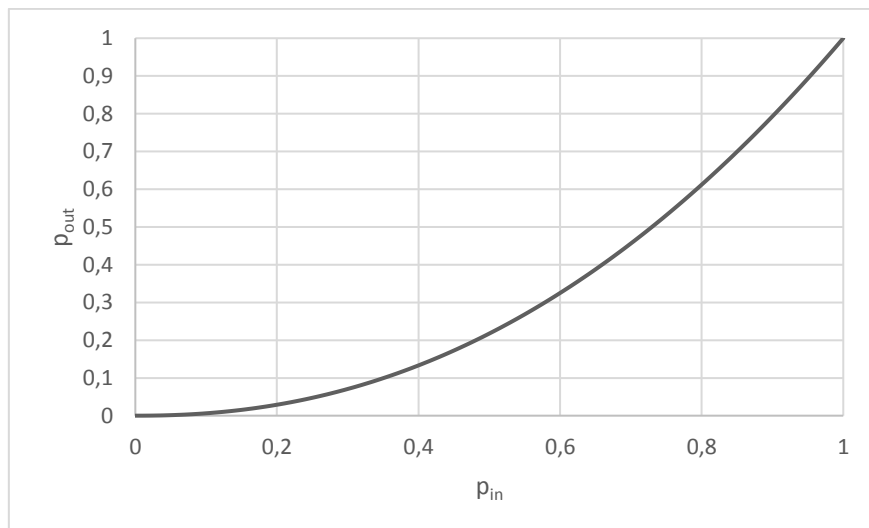


Abbildung 3-11: Beispielhafte Gamma-Kurve

Vereinfacht wird eine Gamma-Kurve berechnet zu:

$$p_{out} = p_{in}^{\gamma} \quad (3-4)$$

Hierbei werden üblicherweise Gamma-Werte von ca. 2,2 gewählt, wobei aber auch deutliche Abweichungen möglich sind, da bei der Auswahl von Displays die Wahrnehmungsparameter, wie z.B. Brillanz, eine höhere Priorität haben als die physikalische Korrektheit. So ist beispielsweise die Gamma-Kurve für einige TV-Geräte im unteren Bereich als linear definiert; dies soll eine höhere

⁴ TCON: engl. Timing-Controller: Synchronisiert und steuert die Spalten- und Zeilentreiber eines Displays

Auflösung in diesem Bereich ermöglichen. Während die Exponentialfunktion im Bereich nahe null sehr flach verläuft, hat der lineare Anteil hier eine deutlich höhere Steigung. Beide korrespondieren hierbei mit der Wahrnehmung des menschlichen Auges, so dass im dunklen Bereich mehr Werte abgebildet werden können als im hellen Bereich. Bei linear steigenden Eingangswerten steigert sich die physikalische Helligkeit im Display exponentiell, was wiederum zu einer wahrgenommenen linearen Helligkeitssteigerung führt. In der Praxis werden die Gamma-Kurven mittels LUT⁵ realisiert, so dass die Hersteller ihre eigenen Funktionen implementieren können. Die Wahl der Gamma-Kurve ist hierbei stets auch eine Frage der Vorlieben. Bei der Wahl von unterschiedlichen Gamma-Kurven für unterschiedliche Farben lässt sich durch die Manipulation dieser Kurven das resultierende Bild stark beeinflussen. Da diese Kurven meistens mittels einer Hardware-Realisierung in einem IC fest im Display implementiert sind, und von außen nicht angepasst werden können, ist es nötig, die bereits im Display implementierte Gamma-Kurve in einem Local-Dimming-Algorithmus zu berücksichtigen, um überhaupt auf die richtige Leuchtdichte dimmen zu können.

Integration der Gamma-Korrektur in Local-Dimming-Algorithmen

Da ein Dimming-Algorithmus stets auf den physikalischen und damit linearen Helligkeitsdaten arbeitet, stellt die bereits im Display implementierte Gamma-Kurve ein Problem dar. Um die bereits im Display integrierte Kurve zu berücksichtigen und die Datenrate zu senken, werden von der Bildquelle keine linearen Helligkeitsdaten zum Display gesendet, was zu Problemen führen kann, da der Dimming-Algorithmus mit den Eingangsdaten des Displays arbeitet (vgl. Abbildung 3-12).

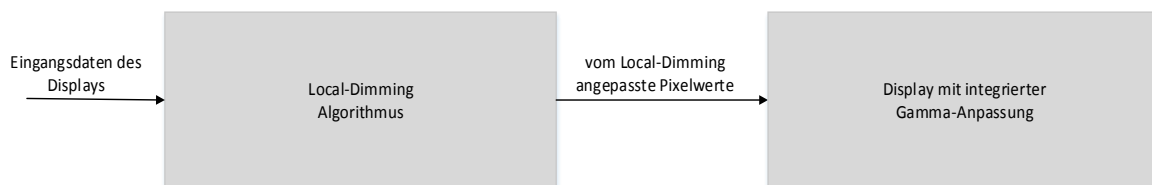


Abbildung 3-12: Local-Dimming ohne Gamma-Anpassung

Da das Local-Dimming dazu dient, LED-Werte zu berechnen, die maßgeblich die physikalische Helligkeit des Backlights bestimmen, kommt es bei dieser Implementierung eines Algorithmus zu Fehlern, da die Helligkeit der LEDs in linear physikalischen Dimensionen arbeitet, während die Bilddaten auf nicht linearer Wahrnehmung basieren und deshalb einer Gamma-Korrektur unterzogen werden. Dies führt zwangsläufig zu falschen Bilddaten nach dem Local-Dimming.

⁵ Look-Up-Table

Um dies zu umgehen, ist eine Gamma-Korrektur der Eingangswerte des Local-Dimming-Algorithmus nötig. Um zu verhindern, dass hierdurch nicht bei der Darstellung auf dem Display erneut eine Gamma-Anpassung vorgenommen wird, müssen die Ausgangswerte des Local-Dimming-Algorithmus mit einer inversen Gamma-Kurve transformiert werden. Eine solche Transformation würde somit bei deaktiviertem Local-Dimming-Algorithmus das Ausgangssignal im Vergleich zum Eingang nicht ändern. Der resultierende Signalfluss ist in Abbildung 3-13 gezeigt.

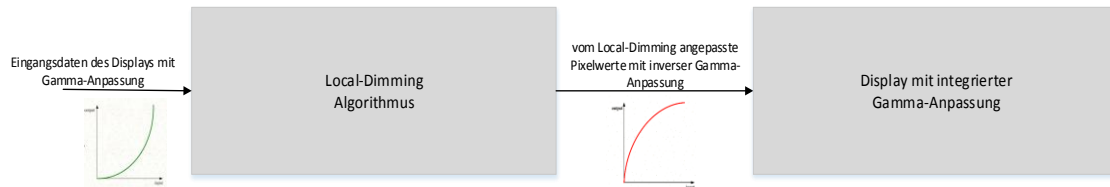


Abbildung 3-13: Local-Dimming mit Gamma-Anpassung

Durch diese Maßnahme ist es möglich, im Local-Dimming-Algorithmus mit auf der Wahrnehmung basierenden Pixel- und LED-Werten zu arbeiten. Um bei diesen Transformationen keine Abweichungen von der ursprünglichen Gamma-Kurve des Displays zu erzeugen, wird die ursprüngliche Gamma-Kurve zunächst mit hoher Auflösung gemessen.

Da die gemessene Gamma-Kurve von den Display-Herstellern anhand einer LUT frei gewählt wurde und in den meisten Fällen nicht direkt invertierbar ist, muss für die gemessene Kurve mittels Curve-Fitting eine Annäherung gefunden werden. Dadurch können auch Messfehler im flachen, dunklen Bereich der Kurve ausgeglichen werden. Wichtig ist hier zu erwähnen, dass geringe Abweichungen zwischen der gefitteten Kurve und der gemessenen, realen Kurve des Displays bereits zu Änderungen bei der Anzeige führen. Da diese Änderungen, im Vergleich zu den durch nicht zueinander passenden Ein- und Ausgangskurven des Local-Dimming-Algorithmus sehr gering sind, wird stets bei den hier verwendeten Algorithmen die gefittete Gamma-Kurve als Eingangskurve gewählt.

Mit der Wahl dieser Eingangskurve ist es möglich, die exakt inverse Ausgangskurve zu nutzen. Dies ist insofern wichtig, da es zu störenden Abweichungen, gerade im dunklen Bereich, kommen kann, wenn diese beiden Kurven sich nicht exakt aufheben. Dies ist einfach nachzuvollziehen, da gerade im dunklen Bereich kleine Abweichungen schon große relative Fehler bei der Ausgabe verursachen können.

Da zum exakten Speichern der Gamma-Kurve viel Speicher erforderlich ist, und die Bildqualität mit der Qualität der Gamma-Anpassung stark korreliert, wird in Abschnitt 4.3.2 ein Verfahren vorgestellt, wie der Speicherbedarf der Gamma-Kurven reduziert werden kann.

3.4 Sorted-Sector-Covering-Algorithmus

Der Sorted-Sector-Covering-Algorithmus (SSC-Algorithmus) zeichnet sich aufgrund der physikalischen Modellierung dadurch aus, dass er für alle bekannten Arten von Displays eingesetzt werden kann. Die auf dem Markt verbreiteten Local-Dimming-Algorithmen eignen sich meist nur für bestimmte, sehr einfache, Ausführungen in der Hintergrundbeleuchtung des Displays, da meistens der Crosstalk der LEDs nicht für alle Pixel betrachtet wird. Auf Basis der, im vorherigen Kapitel vorgestellten, Pixelorder kann der SSC-Algorithmus dieses Problem mit verhältnismäßig geringem Rechenaufwand lösen. Im Folgenden wird der dieser Arbeit zugrundeliegende SSC-Algorithmus näher beschrieben.

3.4.1 Aufbau des SSC-Algorithmus

In diesem Abschnitt wird auf den Aufbau des SSC-Algorithmus eingegangen. Er besteht im Wesentlichen aus drei Bestandteilen: dem Condenser, dem SSC-Optimierer sowie der Pixel-Compensation [Jun11] [Sch13]. Diese drei Bestandteile sind schematisch in Abbildung 3-14 dargestellt.

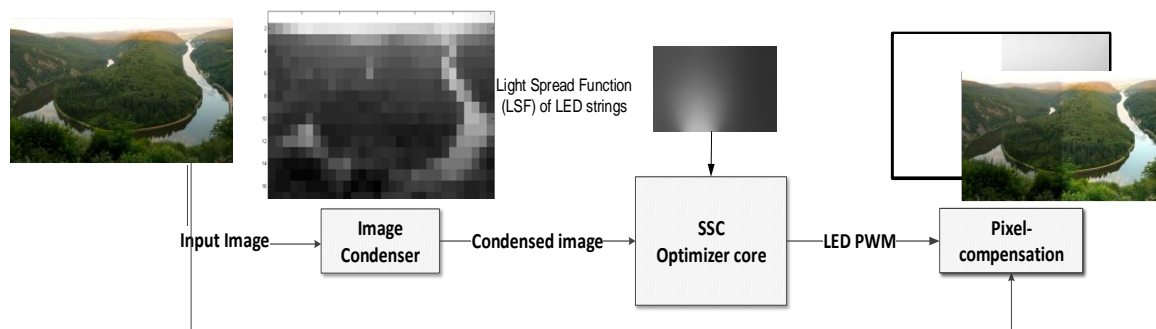


Abbildung 3-14: Schematischer Aufbau des SSC-Algorithmus

Wie hier zu sehen, wird das ursprünglich darzustellende Bild als Input für den Condenser genutzt. Der Condenser dient hierbei dazu, das Bild in der Auflösung zu reduzieren. Je nach gewählter Kondensierungsfunktion ist der Condenser maßgeblich für die zu erreichende Bildqualität und auch für das zu erreichende Power-Saving (auch Energieeinsparung genannt) zuständig. Die genaue Funktionsweise des Condensers wird in Abschnitt 3.4.2 genauer erläutert.

Der SSC-Optimierer stellt das Kernstück des Algorithmus dar. Dort wird aus dem bereits im Condenser erzeugten kondensierten Bild und der in Abschnitt 3.2 vorgestellten Pixelorder die optimale Verteilung der LEDs berechnet. Die genaue Funktion, und welche Parameter zur Beeinflussung der Dimming-Qualität im SSC-Optimierer getroffen werden können, werden in Abschnitt 3.4.3 beschrieben.

Der letzte der drei großen Blöcke des SSC-Algorithmus ist die sogenannte Pixel-Compensation. Hier wird auf Grundlage der vom SSC-Optimierer berechneten LED-Werte, sowie der Pixelorder und dem Originalbild, berechnet, wie die einzelnen Pixelwerte des auszugebenden Bildes geändert werden müssen, um die vorgegebene Leuchtdichte durch eine Erhöhung der Transmission bei gedimmtem Backlight zu erreichen.

Die Funktion der Pixel-Compensation wird in Abschnitt 3.4.4 näher beschrieben.

3.4.2 Condenser

Der Condenser stellt den ersten Block des gesamten SSC-Algorithmus dar. Er ist maßgeblich für die zu erreichende Bildqualität und auch das zu erreichende Power-Saving verantwortlich. Die Funktion des Condensers, das Reduzieren der Bildinhalte, ist allerdings auch für die gesamte Funktion des SSC-Algorithmus unerlässlich, da nur auf diese Weise die benötigten Rechenschritte in der zur Verfügung stehenden Zeit durchgeführt werden können.

Hiermit ist auch schon die grundlegende Funktion des Condensers benannt: Er reduziert die Auflösung des zu prozessierenden Bildes. Hierfür wird das Bild in meist quadratische Condenser-Zellen aufgeteilt. Auf alle Pixel innerhalb dieser Zelle wird eine Condenser-Funktion angewendet (vgl. Formel (3-5)).

$$C_{k,l} = f(p_{i,j}) \quad (3-5)$$

Im Folgenden bezeichnet $C_{k,l}$ eine Condenser-Zelle in der k-ten Zeile und der l-ten Spalte des Bildes. $p_{i,j}$ bezeichnet den Wert eines betrachteten Pixels in der i-ten Zeile und der j-ten Spalte des Displays. Eine wichtige Rolle hierbei spielt die Größe der Condenser-Zellen. Die Zellen sollten nicht zu groß gewählt werden, um die Einflüsse der enthaltenen Pixel zur Zelle nicht zu gering werden zu lassen und die Form der LSF bestmöglich berücksichtigen zu können. Andererseits führt eine zu geringe Größe der Condenser-Zellen unmittelbar zu einem höheren Hardwareaufwand.

Ein weiterer Grund, welcher gegen zu kleine Zellen spricht, ist die Tatsache, dass das Power-Saving, fast unabhängig von der gewählten Condenser-Funktion, sinkt, je kleiner die Zellen werden. Dies liegt daran, dass einzelne Zellen mit hohen Werten später im Algorithmus stets berücksichtigt werden müssen. Bei kleineren Zellen ist es ersichtlich, dass mehr Zellen mit hohen Werten entstehen, da einzelne hohe Pixelwerte direkt den Wert der gesamten Zelle erhöhen. Um dies teilweise zu umgehen, wurde in dieser Arbeit ein neuer automatischer Condenser entwickelt, auf den später genau eingegangen wird.

An dieser Stelle ist es wichtig, darauf hinzuweisen, dass es für die nächsten Schritte im Algorithmus, den SSC-Optimierer sowie die Pixelkompensation unerlässlich ist, dass die Anzahl der Zellen eines kondensierten Bildes auch der Anzahl der Pixel in der kondensierten LSF der Pixelorder entsprechen. Dadurch wird im SSC-Optimierer genau jeder kondensierten Zelle auch ein Einflusswert aus der

Pixelorder zugeordnet. Auf die genaue Funktionsweise des SSC-Optimierers wird in Abschnitt 3.4.3 genauer eingegangen.

Da die Größe der Condenser-Zellen maßgeblich von der Größe der Pixel der kondensierten LSF abhängt, bestimmt mitunter der Gradient des Helligkeitsverlaufs der LEDs die optimale Größe der Zellen. Hier gilt insbesondere bei Edge-Lit-Displays für die Größe der Pixel der kondensierten LSF, dass diese der zumeist geringen räumlichen Frequenz der LSF angepasst werden muss.

Für die meisten Displays mit einer HD- bzw. 4K2K- Auflösung hat sich deshalb eine Condenser- sowie LSF-Zellgröße von 64 x 64 bzw. 128 x 128 Pixeln als optimal herausgestellt. Dies führt zu einer Condenser-Auflösung von 17 x 30 Condenser-Zellen pro Bild. Diese Condenser-Zellen werden im Folgenden, falls nicht direkt auf die internen Funktionen der Zellen eingegangen wird, als Condenser-Pixel bezeichnet.

Aufgrund des weißen Backlights ist für die weitere Prozessierung des kondensierten Bildes im SSC-Optimierer nur die Helligkeit der Pixel, nicht aber der Farbton, von Bedeutung. Da sich die Farbe erst aus den Farbfiltern und der jeweiligen Transmission ergibt, wird bei jeder Kondensierung stets der maximale Pixel der drei für die Farbkanäle stehenden Subpixel gewählt.

$$C_{k,l} = f(\max(p_{i,j,rot}, p_{i,j,grün}, p_{i,j,blau})) \quad (3-6)$$

Im Folgenden wird auf drei Arten der Kondensierungsfunktion eingegangen; zuerst die beiden naheliegenden Funktionen des Mittelwertes bzw. des Maximalwertes. Als drittes wird auf die neu entwickelte automatische Condenser-Funktion eingegangen, welche versucht, für jedes Bild einen Kompromiss bezüglich Power-Saving und Bildqualität im kondensierten Bild zu erzeugen.

Mittelwert-Condenser

Der Mittelwert-Condenser stellt die einfachste Form der Kondensierung eines Bildes dar. Hierfür wird als Wert der Condenser-Zelle der Mittelwert aller enthaltenen Pixel N_{Zelle} der Zelle bestimmt.

$$C_{mw} = \frac{\sum_{n=1}^{N_{Zelle}} p_{i,j}}{N_{Zelle}} \text{ für } i, j \in k, l \quad (3-7)$$

Um die Unterschiede zwischen den einzelnen Condenser-Funktionen zu beschreiben, wird das in Abbildung 3-15 gezeigte Bild verwendet.



Abbildung 3-15: Beispielbild zur Verdeutlichung der Condenser-Funktionen

Ein mit dieser Mittelwert-Condenser-Funktion kondensiertes Bild ist in Abbildung 3-16 dargestellt.

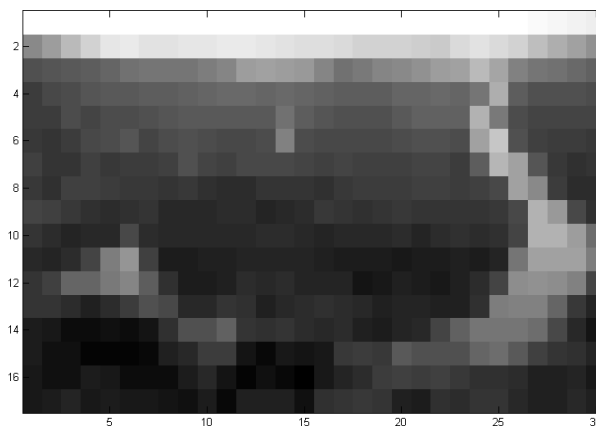


Abbildung 3-16: Mit Mittelwert-Condenser kondensiertes Bild

In dieser Abbildung ist deutlich zu erkennen, dass in großen hellen Flächen, wie z.B. dem Himmel, die Helligkeit des Bildes auch im kondensierten Bild ersichtlich ist. Im Bereich unten links (in den Bäumen) ist zu sehen, dass dort einige Condenser-Zellen sehr dunkel erscheinen. Dies führt dazu, dass das durch den SSC-Optimierer erzeugte Licht unter Umständen nicht zur vollständigen Ausleuchtung aller Pixel in diesem Bereich ausreicht (bspw. kleine helle Blätter).

Diese Condenser-Funktion wurde stets für alle Displays implementiert, um damit eine untere Schranke des zu erreichenden Power-Savings erhalten zu können. Durch den Crosstalk der weiteren LEDs eines Edge-Lit-Displays werden zumeist alle Pixel ausgeleuchtet. Ein noch tieferer Condenser-Wert würde zwangsläufig zu hohem Clipping und dem Nichterreichen der geforderten Leuchtdichten im resultierenden Bild führen.

Maximalwert-Condenser

Während mit dem Mittelwert-Condenser ein unterer Wert für das Power-Saving festgelegt wird, dient der Maximalwert-Condenser dazu, die gewünschte Leuchtdichte für alle Pixel zu erreichen. Das Power-Saving ist hierbei zwangsläufig deutlich niedriger als beim Mittelwert-Condenser, da bereits

ein helles Pixel in einer Condenser-Zelle den Wert dieser gesamten Zelle auf den hellen Pixelwert setzt. Die Kondensierungsfunktion des Maximalwert-Condensers ist in Formel (3-8) angegeben.

$$C_{max} = \max(p_{i,j}) \text{ für } i, j \in k, l \quad (3-8)$$

Das in Abbildung 3-15 gezeigte Testbild, kondensiert mit der Maximalwert-Condenser-Funktion, ist in Abbildung 3-17 zu sehen.

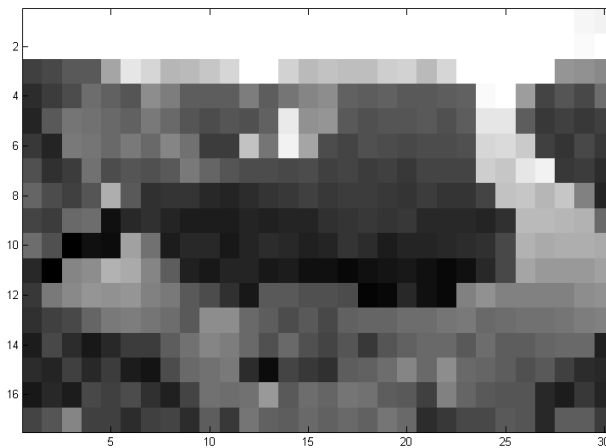


Abbildung 3-17: Mit Maximalwert-Condenser kondensiertes Bild

Es ist direkt zu sehen, dass dieses kondensierte Bild deutlich heller ist als das mit der Mittelwert-Funktion kondensierte Testbild. Dies führt zu einem höheren Energieverbrauch und stellt auch das minimale Power-Saving eines Bildes dar. Zwischen diesen beiden Methoden der Kondensierungsfunktion sind beliebige Abstufungen vorstellbar. Eine Funktion, die sich als besonders zielführend herausgestellt hat, wird im Weiteren näher beschrieben.

Automatik-Condenser

Der Automatik-Condenser wurde in dieser Arbeit bezüglich des automatischen Condensers von **[Alb10a]** weiter verbessert. Alle bisherigen State-of-the-Art-Ansätze zur automatischen Bildkondensierung beruhen darauf, dass die Werte innerhalb der Zelle durch eine möglichst geschickte Funktion so abgebildet werden, dass möglichst kein Clipping in dieser Zelle entsteht und gleichzeitig nicht zu viel Licht im Backlight erzeugt wird. Bei Betrachtung von Edge-Lit-Displays fällt auf, dass einzelne Zellen nicht einzeln betrachtet werden können, da LEDs einen Einfluss auf sehr viele Pixel und somit Zellen des Displays haben (vgl. Abschnitt 3.1). Daraus folgt, dass das Power-Saving für ein Bild nicht von den Werten einzelner Zellen abhängt, sondern vom Zusammenspiel aller Condenser-Zellen. Durch den großen Einfluss der einzelnen LEDs kann es sonst passieren, dass eine einzelne Zelle mit hohem Wert das Ergebnis für das gesamte Bild negativ beeinflusst.

Aus diesem Grund wurde eine neue Condenser-Funktion entwickelt, welche den Wert der Condenser-Zelle in Abhängigkeit der gesamten durchschnittlichen Bildhelligkeit ermittelt. Die Grundlage für diese automatische Funktion bilden der Mittelwert-Condenser sowie der Maximalwert-Condenser. Die Funktion wird so gewählt, dass der automatisch ermittelte Condenser-Wert immer zwischen diesen beiden Werten liegt. Dies lässt sich einfach dadurch erklären, dass Condenser-Werte größer als die Maximalwert-Condenser-Werte nicht mehr sinnvoll sind, da durch die Grundeigenschaften des Maximalwert-Condensers das gedimmte Bild bereits in allen Bereichen mit der geforderten Leuchtdichte abgebildet wird. Der Mittelwert-Condenser als untere Schranke ergibt sich daraus, dass eine einfache Implementierung möglich ist und die Ergebnisse mit diesem Condenser zumeist eine meist ausreichende Qualität aufweisen. Allerdings ist auch zu beobachten, dass für einige Bilder der Mittelwert-Condenser nur ungenügend geeignet ist und deshalb auch keine Condenser-Werte verwendet werden sollten, die noch niedriger als die vom Mittelwert-Condenser berechneten Werte sind. Somit gilt für die neue automatische Condenser-Funktion:

$$C_{auto} = C_{MW} + f_{auto} * (C_{max} - C_{MW}) \quad (3-9)$$

Somit bestimmt der Faktor f_{auto} , ob der Maximalwert oder der Mittelwert der Condenser-Zelle den Wert des neuen Condensers dominieren. Für den Faktor f_{auto} gilt hierbei stets

$$0 < f_{auto} < 1 \quad (3-10)$$

Der Faktor f_{auto} soll im Folgenden den bereits von **[Alb10a]** etablierten Automatik-Condenser mit dem hier neuen Ansatz der Abhängigkeit von der Gesamtbildhelligkeit vereinen. Hierfür werden zwei Ansätze verwendet, welche jeweils eine untere Schranke des Condenser-Wertes definieren, welcher für die gegebenen Bildeigenschaften ein gedimmtes Bild ohne sichtbare Artefakte erzeugt. Hierfür wird zunächst der aus **[Alb10a]** bekannte Automatik-Condenser in die neue Formel integriert. Der sich daraus ergebende Faktor bildet in gewisser Weise die räumliche Frequenz der Betrachteten Condenser-Zelle ab und korreliert somit auch mit der zu erwartenden Brillanz in dieser Zelle. Für diesen Faktor gilt:

$$f_{freq} = 1 - k * (C_{max} - C_{MW}) \quad (3-11)$$

Als charakteristische Größe für den Kontrast und die Brillanz der Condenser-Zelle dient in diesem Fall die Differenz zwischen Maximal- und Mittelwert-Condenser. Der Parameter k bestimmt hierbei wie stark sich dieser Faktor auf den gesamten Condenser auswirkt. Weiterhin gilt;

$$0 < f_{freq} < 1 \quad (3-12)$$

Somit ist k auch immer direkt abhängig vom Wertebereich der Condenser. Die hieraus resultierenden Ergebnisse korrelieren sehr stark mit dem oft in **[Alb10a]** genutzten $\Delta/2$ -Condener, der laut **[Xu16]** zu guten Ergebnissen führt. Für diesen gilt:

$$C_{(\Delta/2)} = C_{MW} + \frac{(C_{max} - C_{MX})}{2} \quad (3-13)$$

Als Nachteil dieses Automatik-Condensers sei zu nennen, dass die Ergebnisse bei dunklen, aber trotzdem brillanten Bildern oft nicht zufriedenstellend sind. Ein typisches Beispiel hierfür ist ein Sternenhimmel mit sehr kleinen hellen Sternen vor dunklem Hintergrund. In diesem Fall steigt für einige Zellen die Frequenz stark, was zu hohen Condenser-Werten dieser Zellen führt. Zwar sind diese Werte nötig, um die physikalisch geforderte Leuchtdichte in den hellen Bereichen abzudecken, allerdings ist eine solch hohe Helligkeit bei brillanten Bildern nicht nötig, da diese durch den hohen Kontrast ohnehin vom menschlichen Auge nicht wahrgenommen werden kann. Selbst mit reduzierter Helligkeit an den brillanten, hellen Bildbereichen wirkt das gedimmte Bild nach wie vor brilliant. Dies ergibt ein großes Potential zum Power-Saving, da gerade diese wenigen hellen Condenser-Zellen das gesamte Power-Saving maßgeblich verschlechtern.

Um solche dunklen, brillanten Bilder zu erkennen, wird die Condenser-Funktion um einen weiteren Faktor erweitert. Dieser basiert auf der durchschnittlichen Helligkeit des gesamten Bildes. Für diesen zweiten Faktor gilt:

$$\begin{aligned} f_{BL} &= \max(0; 1 - k1 * (B - B1)) && \text{für } B1 < B \\ f_{BL} &= 1 && \text{für } B1 \geq B \end{aligned} \quad (3-14)$$

Hierbei repräsentiert B die mittlere Helligkeit des Bildes. Diese wird im Ablauf des Dimming-Algorithmus stets vom vorherigen Bild übernommen. Bei einer Framerate von mindestens 50Hz ist diese Methode, mit Werten aus dem letzten Frame zu arbeiten, bei Dimming-Algorithmen weit verbreitet. Hierauf wird in Abschnitt 3.5 nochmals näher eingegangen. Die Parameter $k1$, sowie $B1$ dienen zur Einstellung des Condensers. $B1$ gibt hierbei einen Schwellwert für die mittlere Bildhelligkeit an und mittels $k1$ lässt sich der Einfluss dieser Condenser-Komponenten auf den gesamten Automatik-Condenser einstellen. Die Parameter dienen hierbei auch stets zum Einstellen einer gewünschten Bildqualität bzw. eines gewünschten Power-Savings.

Um im Folgenden stets die für die menschliche Wahrnehmung ausreichende Helligkeit sowie gleichzeitig ein hohes Power-Saving zu erreichen, gilt:

$$f_{auto} = \min(f_{BL}, f_{freq}) \quad (3-15)$$

Der somit resultierende Automatik-Condenser lässt sich leicht in Hardware realisieren und kann durch das Einbeziehen der mittleren Bildhelligkeit des vorherigen Bildes die Schwachstellen des Automatik-Condensers von **[Alb10a]** ausgleichen und dadurch bei gleicher Bildqualität ein deutlich

höheres Power-Saving erreichen. Für die meisten im Folgenden beschriebenen Sachverhalte wurde somit dieser hier neu entwickelte Automatik-Condenser verwendet.

3.4.3 SSC-Optimierer

Der SSC-Optimierer stellt das zentrale Element des Dimming-Algorithmus dar. Aufgrund der Methodik, die bereits in die Berechnung der Pixelorder integriert wurde, kann der eigentliche SSC-Optimierer relativ schlank ausfallen. Der Input des Optimierers sind die Werte der Condenser-Pixel (bisher auch Condenser-Zellen), sowie die Pixelorder. Weiterhin liegt dem Optimierer eine Abstufung von Schwellwerten zu Grunde, welche iterativ abgearbeitet werden. Dies führt zu einem Algorithmus mit mehreren Iterationen, wobei in jeder Iteration jedes kondensierte Pixel genau einmal betrachtet wird [Sch13].

Hierbei wird in jedem Schritt das aktuelle Backlight anhand der aktuellen LED-Werte sowie der Einflüsse der Zeile der Pixelorder für das aktuell betrachtete kondensierte Pixel $a_{k,l}(L)$ betrachtet. Hierzu wird jeweils das aktuelle Backlight des gerade betrachteten Pixel berechnet zu:

$$B_{k,l} = \sum_{L=1}^{N_{LED}} a_{k,l}(L) * LED(L) \quad (3-16)$$

Wobei N_{LED} die Anzahl der LEDs und $LED(L)$ den Wert der LED L repräsentiert. Aus dem berechneten Backlight und dem in der ersten Spalte in der Pixelorder gespeicherten Einfluss der LED mit dem maximalen relativen Einfluss an dieser Stelle ($L = 1$) lässt sich leicht die Helligkeit Δ berechnen, welche zur Abdeckung des Wertes des Pixels $i_{k,l}$ benötigt wird. k und l geben hierbei stets die Koordinaten des aktuellen Pixels an.

$$\Delta = \frac{B_{k,l} - i_{k,l}}{a_{k,l}(L = 1)} \quad (3-17)$$

Dieser Wert Δ wird im nächsten Schritt zur aktuell betrachteten LED hinzu summiert, wobei gilt:

$$\begin{aligned} LED(L) &= LED(L) + \Delta && \text{für } (LED(L) + \Delta) \leq LED_{max} \\ LED(L) &= LED_{max} && \text{für } (LED(L) + \Delta) > LED_{max} \end{aligned} \quad (3-18)$$

Dieser neu berechnete LED-Wert wird im Weiteren zur Berechnung des folgenden LED-Wertes beim nächsten betrachteten Pixel aus der Pixelorder hinzugezogen. Durch die sukzessive Abarbeitung der Pixelorder werden, bis zum Erreichen des letzten kondensierten Pixels, alle LEDs, unter jeweiliger Betrachtung des entstehenden Crosstalks durch die anderen LEDs, erhöht.

Das Crosstalk kann hierbei noch stärker berücksichtigt werden, wenn das verwendete Eingangsbild über mehrere Iterationen hinweg zur Bestimmung der LED-Werte stark abgedunkelt wird. Konkret

werden hierzu Schwellwerte α eingeführt, welche in den Iterationen (i) vom aktuellen Pixelwert subtrahiert werden. Dadurch erfolgt die Erhöhung der LEDs langsamer über mehrere Iterationen und der Crosstalk wird besser berücksichtigt. Somit ergibt sich das Δ in einer Iteration i zu:

$$\Delta_i = \frac{B_{k,l} - i_{k,l} - \alpha_i}{a_{k,l}(L = 1)} \quad (3-19)$$

Eine sinnvolle Größenordnung für diese Schwellwerte α ist bei 7 Iterationen und einer Auflösung der Pixelwerte von 8Bit (0-255):

$$\alpha = [100, 60, 25, 15, 7, 5, 0] \quad (3-20)$$

Somit wird in der letzten Iteration stets kein Schwellwert α mehr abgezogen, was dazu führt, dass die vom Condenser geforderte Helligkeit nach der letzten Iteration auch erfüllt wird.

Da die Hardware-Strukturen zum Berechnen des Backlights auf Condenser-Auflösung somit bereits im hier beschriebenen SSC-Optimierer vorhanden sind, bietet es sich an, im Anschluss an die Optimierung eine weitere Iteration durchzuführen, welche das resultierende Backlight als Vorbereitung für den nächsten Schritt der Pixel-Compensation berechnet und speichert. Dies erspart eine erneute Berechnung des Backlights in der Pixel-Compensation und kann somit die Hardwarekosten erheblich reduzieren.

Um späteren Problemen vorzugreifen, wurde im SSC-Optimierer bereits ein räumlicher Faktor zwischen den LEDs implementiert. Es wird sich zeigen (vgl. Abschnitt 4.2 und Kapitel 6), dass die vom SSC-Optimierer berechneten LED-Verteilungen zumeist für eine optimale visuelle Qualität des resultierenden Bildes zu hohe Gradienten aufweisen. Um die LED-Verteilung zu glätten, werden Faktoren zwischen den LEDs eingeführt, welche nicht überschritten werden dürfen. (vgl. Abschnitt 4.2). Da durch ein nachträgliches Anwenden dieser Faktoren auf die bereits berechneten LEDs, um die visuelle Qualität nicht zusätzlich zu gefährden, LED-Werte nur anheben darf, hat dies zur Folge, dass das Power-Saving erheblich sinken kann.

Es hat sich als sinnvoll herausgestellt, diese Faktoren bereits bei der Berechnung im SSC-Optimierer anzuwenden. In Kombination mit der iterativen Abarbeitung der Schwellwerte bildet sich, unter Einbeziehung des entsprechenden Crosstalk, eine Lösung, in der die LED-Verteilung stets die angegebenen Faktoren zwischen den LEDs berücksichtigt und das Power-Saving nahezu erhalten bleibt.

Als geeignete Faktoren c_s haben sich hierbei Werte in der Größenordnung von ca. 1,5 herausgestellt. Somit gilt für eine betrachtete LED_n :

$$\frac{LED_{n\pm 1}}{c_s} \leq LED_n \leq c_s * LED_{n\pm 1} \quad (3-21)$$

Eine weitere, bereits im SSC-Optimierer vorgegriffene Funktion, ist eine zeitliche Filterung der ermittelten LED-Werte. Die zeitliche Filterung wird bei sich bewegenden Objekten im lokal gediminten Bildinhalt notwendig (vgl. Kapitel 5). Wie bei den räumlichen Filtern, gilt bei den zeitlichen Filtern der gleiche Aspekt des erhöhten Power-Savings, wenn die Werte der LEDs iterativ in den Iterationen des SSC-Optimierers angepasst werden. Auch hier stellt dies eine optimale Ausbeute des Crosstalks aller im Display relevanten LEDs dar.

Im Algorithmus werden die zeitlichen Faktoren so umgesetzt, dass, zu jeder Zeit, für jede LED, bereits ein Minimalwert sowie ein Maximalwert berechnet ist. Es gilt somit für eine beliebige LED_n :

$$LED_{n,min} < LED_n < LED_{n,max} \quad (3-22)$$

Bei Beachtung dieser Bedingungen liefert der SSC-Optimierer Werte für jede LED, sowie die in der letzten Iteration berechneten Helligkeitswerte des Backlights, welches für die berechnete LED Verteilung im Display erwartet werden. Dieses sog. virtuelle Backlight liegt hierbei in der Condenser-Auflösung vor, da keine Einflusswerte mit höheren Auflösungen in der Pixelorder gespeichert sind. Ein solches vom SSC-Optimierer berechnetes Backlight in Condenser-Auflösung ist in Abbildung 3-18 dargestellt. Es handelt sich bei diesem Beispiel um ein Full-HD Displays mit jeweils 8 LEDs an jeder seitlichen Displaykante. Diese sogenannten Sample-Points des Backlights werden in einem Sample-Point-Speicher abgelegt.

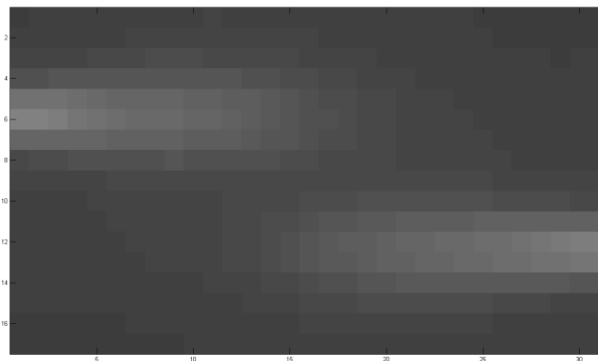


Abbildung 3-18: Vom SSC-Optimierer berechnetes Backlight in SP-Auflösung

Die hier vorgestellten Erweiterungen des SSC-Algorithmus wurden aufgrund des hohen Interesses der Industrie bereits als Patent in China angemeldet **[Alb15]**

Auf Basis der berechneten Backlight-Helligkeit der Sample-Points ist es im nächsten Schritt möglich, die Eingangswerte der Pixel so zu manipulieren, dass die reduzierte Helligkeit im Backlight durch eine erhöhte Transmission der Flüssigkristallzellen ausgeglichen wird. Die genaue Funktionsweise der Pixel-Compensation wird im nächsten Abschnitt beschrieben.

3.4.4 Pixel-Compensation

Die Pixel-Compensation dient dazu, die Werte der Pixel des Eingangsbildes so zu manipulieren, dass die reduzierte Helligkeit im Backlight durch die erhöhte Transmission der Flüssigkristalle wieder ausgeglichen wird.

Die erzeugte Helligkeit der LEDs, welche mit den vom SSC-Optimierer berechneten LED-Werten angesteuert werden, ist gerade ausreichend, um das von den Pixeln im Originalbild durchgelassene Licht zu erhalten, wenn die Flüssigkristalle das gesamte vom Backlight erzeugte Licht passieren lassen. Somit ist es nötig, jedes Pixels bei der Ausgabe des Bildes auf das neue, gedimmte Backlight anzupassen. Da jedes Pixel auf diese Weise kompensiert werden muss, aber in der Pixelorder nur die relativen Einflüsse der LEDs zu den Condenser-Pixeln gespeichert sind, können nur die Leuchtdichten des Backlights in Condenser-Auflösung berechnet werden. Es ist somit erforderlich, den Wert der Helligkeit der einzelnen Pixel aus den gegebenen Helligkeitswerten zu interpolieren. Um die Interpolationsfehler möglichst gering zu halten, sind die Zellen der kondensierten LSF nicht genau deckungsgleich mit den Condenser-Zellen. Diese Verschiebung der Zellen ist in Abbildung 3-19 dargestellt. Hierbei ist zu sehen, dass die Condenser-Zellen nun nicht mehr vollständig im Bild liegen, sondern dieses um einige Zeilen bzw. Spalten überschreiten. Dies muss in der Berechnung der Condenser-Werte berücksichtigt werden, da dadurch in den einzelnen Condenser-Zellen am Rand und in den Ecken des Bildes weniger reale Pixel enthalten sind. Der Vorteil dieser Maßnahme liegt darin, dass dadurch immer der gemessene Einfluss einer Zelle und somit auch die berechneten Backlight-Sample-Points immer zentral in einer Condenser-Zelle befinden. Außerdem liegen die gemessenen Einflusswerte dadurch direkt auf dem Rand bzw. der Ecke des Displays, was die möglichen Fehler in diesen Bereichen, in denen die LSF oft starke Steigungen aufweist, reduziert.

Die Aufspannung der Condenser-Zellen über den Bildrand hinaus bietet hierbei zusätzlich einen weiteren Vorteil. Durch den Überstand am Rand, ist es einfach möglich, verschiedene Display-Auflösungen in den vorgegebenen Condenser-Auflösungen abzubilden, da die Anzahl der überstehenden Pixel flexibel angepasst werden kann. Um eine einheitliche Hardwarerealisierung beizubehalten, war es in dieser Arbeit auch üblich, selbst dann die Condenser-Zellen über den Rand überstehen zu lassen, wenn die Condenser-Auflösung und die Display-Auflösung ein ganzzahliges Vielfaches erlaubt hätten. Dies führt im bereits dargestellten Beispiel mit Full-HD-Auflösung zu Condenser-Auflösungen von 18 x 31 Zellen, was zu 558 Einträgen in der Pixelorder führt.

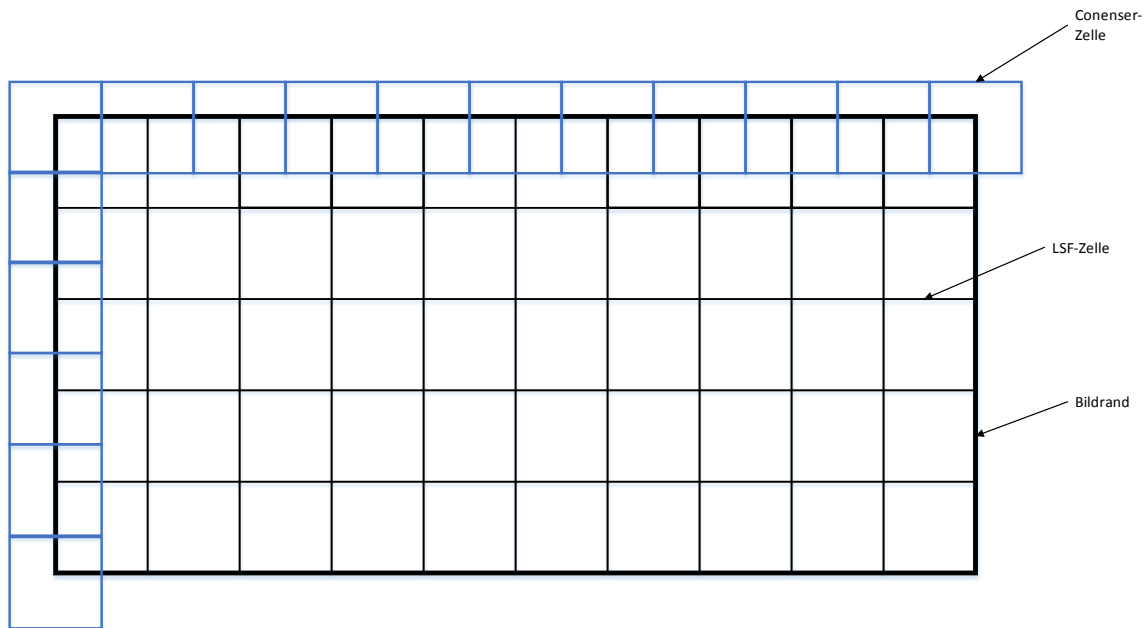


Abbildung 3-19: Verschiebung zwischen Condenser-Zellen und LSF-Zellen

Zur Interpolation der Helligkeit in jedem Pixel werden die Helligkeiten aus den vier umliegenden Ecken aus dem Sample-Point-Speicher ausgelesen. Eine LSF-Zelle mit den zugehörigen vier Einflusswerten an den Ecken der Zelle ist in Abbildung 3-20 dargestellt.

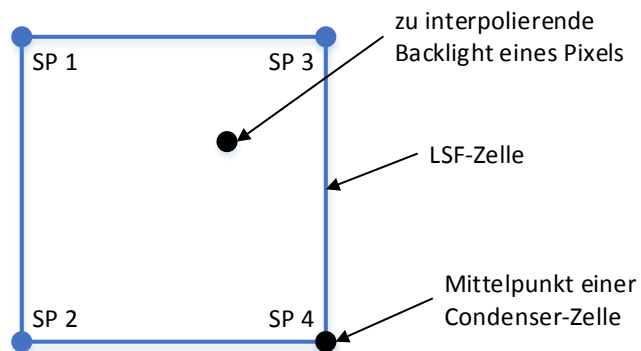


Abbildung 3-20: Interpolieren der LSF

Die vier Helligkeitswerte in den Ecken der Zelle sind somit die vom SSC-Optimierer berechneten Helligkeiten in der letzten Iteration, in welcher keine der LEDs mehr angehoben wurde. Aus den vier Eckpunkten wird während der Pixel-Compensation eine Helligkeit für jedes Pixel $p_{i,j}$ berechnet. Hierzu wird eine einfache bilineare Interpolation [Pre92] verwendet. Für den daraus berechneten neuen Transmissionswert $t_{(i,j)}$ jedes Pixels gilt weiter:

$$t_{i,j} = \frac{p_{i,j}}{b'_{i,j}} \quad (3-23)$$

Da für diese Operation das relative Backlight b' eines Pixels in Displayauflösung (i, j) benötigt wird, aber das Backlight bisher nur in Sample-Point-Auflösung (k, l) bereitliegt, wird der Wert des geforderten Backlights aus den vier Eckpunkten einer Zelle interpoliert. Für die Helligkeit der vier Eckpunkte einer Zelle gilt dann unter Berücksichtigung aller LEDs N_{LED} :

$$SP_n = \sum_{L=1}^{N_{LED}} a_{k,l}(L) * LED(L) \quad \text{mit } n \in \{1,2,3,4\} \quad (3-24)$$

Für die interpolierte Pixel-Helligkeit gilt dann:

$$b_{i,j} = f(SP_1, SP_2, SP_3, SP_4, i, j) \quad (3-25)$$

Bei der Kompensation ist weiterhin darauf zu achten, dass der neue Wert des Pixels nicht größer sein kann, als der vom System bedingte maximal mögliche Wert. Somit gilt:

$$t_{i,j} \leq t_{max} \quad (3-26)$$

Da die Summe der Einflüsse in jedem Pixel immer kleiner oder gleich 100% der maximal erreichbaren Helligkeit ist, gilt weiterhin stets:

$$t_{i,j} \geq p_{i,j} \quad (3-27)$$

Ein auf diese Weise kompensiertes Bild ist im linken Teil der Abbildung 3-21 dargestellt.



Abbildung 3-21: links: Kompensierte Pixelwerte; rechts: Ursprüngliche Pixelwerte vor der Pixel-Kompensation

Zum Vergleich ist im rechten Teil der Abbildung 3-21 nochmals das Originalbild dargestellt. Es ist deutlich zu sehen, dass die von der Pixel-Kompensation berechneten Transmissionswerte $t_{i,j}$ größer sind als die ursprünglichen Pixelwerte $p_{i,j}$. Bei den hier gezeigten Bildern handelt es sich um

Beispielbilder, die auf einem 4K-Display mit insgesamt 24 LEDs an der unteren Displaykante erzeugt wurden.

Die kompensierten Transmissionswerte der Pixel wurden auf Basis des vom SSC-Optimierer berechneten Backlights in Sample-Point-Auflösung erzeugt. Bevor diese auf einem angeschlossenen Display dargestellt werden können, müssen sie wie in Abschnitt 3.3 beschrieben einer inversen Gamma-Anpassung unterzogen werden.

In den folgenden Kapiteln wird gezeigt, dass es maßgeblich zu einer gesteigerten Bildqualität beitragen kann, wenn zur Kompensation nicht das reale simulierte Backlight genutzt wird, sondern dieses Backlight unter Berücksichtigung entsprechender Rahmenbedingungen zu einem virtuellen Backlight berechnet wird. Dies kann besonders das zu erwartende sichtbare Clipping drastisch reduzieren (vgl. Abschnitt 4.1.2 und 4.3).

3.5 Implementierung des SSC-Algorithmus

Im Rahmen dieser Arbeit wird das Ziel verfolgt, den Local-Dimming-Algorithmus mittels einer Hardwarebeschreibungssprache zu realisieren. Dieses Ziel entstand aus dem Wunsch, die gedimmten und prozessierten Bilder auch in Echtzeit auf einem Display abspielen zu können. Besonders bei modernen Displays mit sehr hohen Auflösungen ist eine Berechnung des Dimmings in Software nicht mehr möglich, wenn eine Framerate von mindestens 50Hz erreicht werden soll. Zur Realisierung eines solchen Prototypen, welcher den Echtzeit-Betrieb eines Displays mit Dimming-Algorithmen ermöglicht, bieten sich FPGAs an.

Ein FPGA ist ein IC, dessen logische Funktion mittels einer Hardware-Synthese-Software programmiert werden kann [Bai11]. Zur Beschreibung des Algorithmus werden hierbei die gleichen Hardwarebeschreibungssprachen genutzt, welche auch bei der Entwicklung moderner ICs eingesetzt werden. Am Lehrstuhl für Mikroelektronik wird hierfür die Sprache Verilog sowie die Software ISE von Xilinx [Xil17] und zumeist auch FPGAs der Firma Xilinx [Xil17a] verwendet.

Eine große Herausforderung bei der Implementierung eines Dimming-Algorithmus in einem FPGA stellen, neben der begrenzt zur Verfügung stehenden Kapazität, stets die Ein- und Ausgänge des Systems dar. So werden schon beim Betrieb von Full-HD-Panels hohe Frequenzen in der Datenübertragung erreicht. Um die genaue Übertragung eines Bildes von der Bildquelle, meist eines TV-Decoders oder Laptops, zum TCON zu beschreiben, werden im Folgenden zwei unterschiedliche Übertragungsprotokolle vorgestellt.

LVDS/FPD-Link

Die Abkürzung LVDS steht hierbei für „Low Voltage Differential Signal“. Diese Art der Übertragung ist ein wichtiger Standard zur Übertragung von Bilddaten. Zur Übertragung werden Differenzsignale verwendet, um Umgebungseinflüsse möglichst auszublenden. Zur Übertragung von Bildern gibt es spezielle Protokolle (FPD-Link), welche die einzelnen Bits der zu übertragenden Pixel auf mehrere sogenannte Kanäle aufteilt (bspw. [Ti14]). Eine solche Aufteilung der Pixel-Bits auf LVDS Kanäle ist in Abbildung 3-22 gezeigt. Um diese LVDS-Kanäle in einem FPGA lesen zu können, müssen spezielle I/O Pins des FPGA genutzt werden, welche über schnelle Deserialisierer verfügen. Bei der Ausgabe der bearbeiteten LVDS-Streams gilt hierbei dasselbe; es können nur Pins genutzt werden, welche über schnelle Serialisierer verfügen.

Die für diese Arbeit implementierten Hardwarerealisierungen basiert meist auf einer LVDS-Übertragung der Bilddaten, da diese mit verhältnismäßig geringem Aufwand realisiert werden kann, und dadurch auch gängige Übertragungsmedien wie z.B. HDMI direkt genutzt werden können, da auch dort eine LVDS-Übertragung der Daten genutzt wird [Fre16].

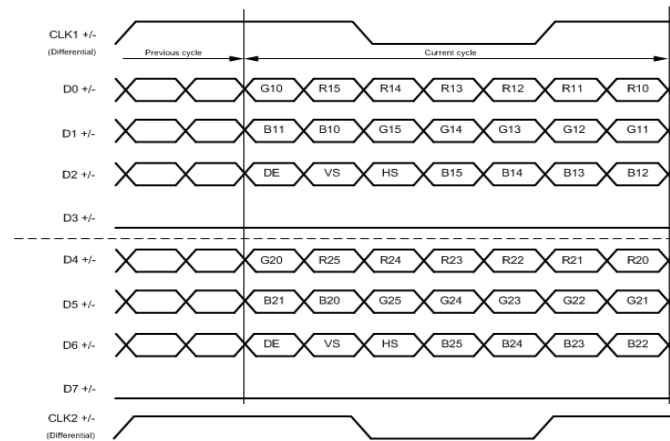


Abbildung 3-22: Beispielhaftes LVDS Schema [Ti14]

V-by-1

V-by-1 stellt einen, auf LVDS aufbauenden, Übertragungsstandard für Bilddaten dar. Er wurde von der Firma THine [Thi14] entwickelt, um insbesondere hochauflösende Bildinhalte zu übertragen. Hierbei werden die zu Übertragenden Daten in mehrere Kanäle parallel aufgeteilt. Da die genaue Vorgehensweise hierbei durch eine Lizenz von THine geschützt ist, war es im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich, V-by-1 Datenströme direkt im FPGA zu verarbeiten. Um dennoch diesen Übertragungsstandard nutzen zu können, der sich mittlerweile besonders zur Übertragung von 4K-Video-Übertragungen im TV-Bereich durchgesetzt hat, wurde in Zusammenarbeit mit Hisense eine Platine entwickelt, welche THine-Chips nutzt, die das V-by-1 Signal in LVDS Daten umsetzen können. Diese Chips werden hierbei in Decoder- als und in Encoder-Richtung verwendet [Thi14].

Pixelweise Übertragung der Bilddaten

Unabhängig, welches Protokoll der Übertragung zu Grunde liegt, werden mehr oder weniger Pixel parallel übertragen. Aus diesem Grund ist es notwendig, dass vor allem der Condenser und die Pixel-Compensation des SSC-Algorithmus nach dem Pipeline-Prinzip arbeiten. Dies bedeutet, dass in jedem Takt, in dem ein neues Pixel am Eingangsport des Condensers anliegt, ein fertig berechnetes Pixel am Ausgang der Pixel-Compensation bereitliegen muss. Hierbei ist es unerlässlich, dass eine gewisse Verzögerung durch die Durchlaufzeit der Stufen des Algorithmus entsteht, was nicht weiter zu Problemen führt, solange der Eingang und der Ausgang mit der gleichen Frequenz betrieben werden. Diese Pipeline ist für den Condenser sowie für die Pixel-Compensation in Abbildung 3-23 grafisch dargestellt.

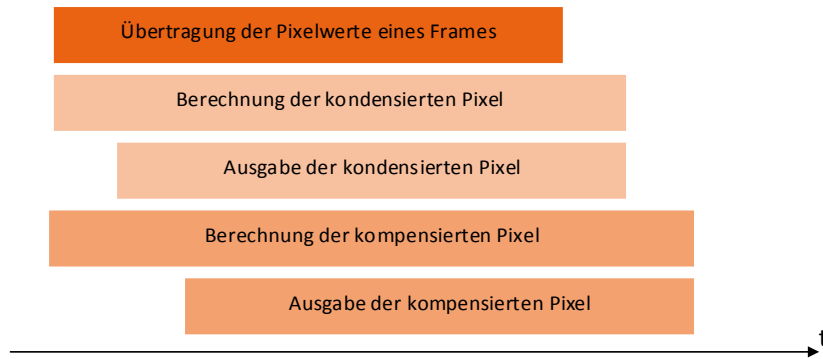


Abbildung 3-23: Pipeline-Prozessierung für Condenser und Pixel-Compensation

Hierbei ist zu erkennen, dass es nicht möglich ist, dass der Condenser sowie die Pixel-Compensation parallel für das gleiche Bild arbeiten. Wie in Abschnitt 3.4.4 beschrieben, basiert die Pixel-Compensation auf vom SSC-Optimierer berechneten Backlight-Werten, welcher wiederum die Werte des Condensers benötigt, um die entsprechende LED-Verteilung zu berechnen. Da der Condenser aber erst eine gewisse Anzahl von Takten nach dem letzten Pixel des Bildes, welches von der Bildquelle gesendet wird, die Condenser-Werte fertig prozessiert hat, kann die Berechnung des SSC-Optimierers erst dann beginnen. Im Idealfall ist die Betriebsfrequenz des SSC-Optimierers hoch genug, dass die LED-Verteilung sowie das berechnete Backlight in der Blanking-Zeit, also der Zeit zwischen zwei Frames, in der keine Bilddaten übertragen werden, berechnet werden können. Eine solche Blanking-Zeit existiert immer zwischen zwei Bildern; sie entspricht zumeist der Größenordnung der Adressierzeit einiger weniger Zeilen des Bildes. Da es für die Pixel-Compensation nur möglich ist, gleichzeitig zu einem übertragenen Bild zu arbeiten, muss in diesem Fall die Pixel-Compensation direkt mit dem ersten Pixel des nächsten Frames beginnen. Der Ablauf ist nochmals in Abbildung 3-24 dargestellt.

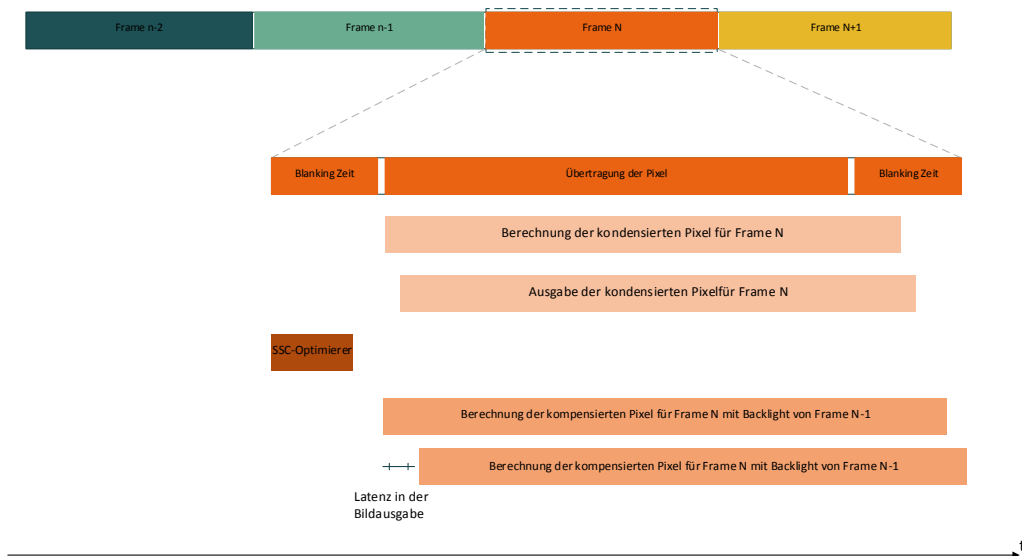


Abbildung 3-24: Zeitlicher Ablauf des gesamten SSC-Algorithmus

Bei Betrachtung dieses Diagramms fällt auf, dass die Pixel-Compensation zur Berechnung der neuen Transmission nicht auf dem Backlight des aktuellen Frames basiert, sondern auf dem Backlight des vorherigen Frames. Dies ließe sich durch den Einsatz eines Frame-Buffers beheben, also eines Speichers, welcher das gesamte Bild für eine gewisse Zeitspanne zwischenspeichert. Da ein solcher Buffer aufgrund der Komplexität in einer FPGA-Implementierung kaum möglich ist und da sich bisher keine negativen Artefakte in der hier gezeigten Vorgehensweise dargestellt haben, wird in dieser Arbeit stets auf einen Frame-Buffer verzichtet. Für eine mögliche Implementierung in einem ASIC⁶ wäre ein solcher Frame-Buffer ohnehin so teuer, dass er nicht realisiert werden könnte. Durch Bildwiederholraten von mehr als 50Hz und der Tatsache, dass sich aufeinander folgende Bilder zumeist in Bezug auf die Helligkeit stark ähneln, ist ein Frame-Buffer an dieser Stelle nicht nötig.

Unter Umständen kann es allerdings zu verkürzten Blanking-Zeiten bei bestimmten Display-Auflösungen kommen. Dies kann dazu führen, dass die Blanking-Zeit nicht für die Berechnung der LED-Verteilung im SSC-Optimierer ausreicht und somit die Ergebnisse erst zur Laufzeit des folgenden Frames bereitliegen. Um solche Displays trotzdem nutzen zu können, bieten sich zwei Lösungswege für dieses Problem an. Der Einfachste besteht darin, dass der Start der Pixel-Compensation um ein weiteres Frame verzögert wird. Dies hat zur Folge, dass die prozessierten Bilder dann auf dem Backlight des vorletzten Frames basieren.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Reihenfolge der Pixelorder so anzupassen, dass die für die Kompensation der ersten Zeilen benötigten Helligkeitswerte des Backlights rechtzeitig zur Verfügung stehen, während die verbleibenden Backlight-Werte noch parallel zur Pixel-Compensation berechnet werden. Da diese Methode erheblich in die Ordnung der Pixelorder eingreift, sinkt somit auch die Qualität der zu erwartenden Ergebnisse: Da in der Pixelorder nicht die optimale Reihenfolge eingehalten werden kann, ist mit einem deutlich niedrigeren Power-Saving zu rechnen.

Aus diesem Grund, und auch, weil ansonsten keine negativen Artefakte zu erwarten waren, wurde für diese Arbeit bei Verwendung von Displays mit sehr kurzen Blanking-Zeiten der Ausgang der Pixel-Compensation um zwei Frames verzögert.

Prozessierung von Displays mit hohen Pixel-Frequenzen

Die Implementierung des Dimming-Algorithmus wurde darauf ausgelegt, dass alle Komponenten funktionieren, wenn mit jedem Takt der sogenannten Pixel-Clock ein weiterer Pixelwert übertragen wird. Dies wurde mit einer maximalen Pixel-Clock von bis zu 150MHz für eine Full-HD Auflösung in einem Xilinx Spartan 6 FPGA sowie einem Xilinx Kintex 7 FPGA **[Xil17a]** erfolgreich implementiert.

Bei höheren Auflösungen erhöht sich die Frequenz der Pixel-Clock, was zur Folge hat, dass die Pixelfrequenz für die einzelnen Bestandteile des Algorithmus zu schnell wird, da die einzelnen Komponenten wie Multiplier oder Divider über maximal mögliche Betriebsfrequenzen verfügen. Um dieses Problem zu umgehen, ist es üblich, die Pixel eines Bildes in mehreren sogenannten Pipes

⁶ ASIC: engl. application-specific integrated circuit

parallel zu übertragen (entspricht auch teilweise den Kanälen der V-by-1 Übertragung). Dies hat zur Folge, dass der gesamte Algorithmus auf jede einzelne Pipe angewendet werden und die Ergebnisse kombiniert werden müssten. Da dies den Hardwareaufwand stark vergrößert hätte und die Kombination der Ergebnisse, insbesondere das bestimmen der richtigen LED-Werte, schwierig würde, wird im Folgenden eine Methode vorgestellt, die es ermöglicht, den Hardwareaufwand für solche Displays mit mehreren Pixel-Pipes verhältnismäßig gering zu halten. Hierzu wurde der sogenannte Even-Odd-Combiner entwickelt. Der Name ergibt sich hierbei daraus, dass zumeist die Pixel eines Frames aufgeteilt werden in gerade und ungerade Spaltenzahlen des anzuzeigenden Bildes. Er stellt eine Vorprozessierung für den eigentlichen Algorithmus dar und kombiniert dabei die Pixel-Pipes, so dass der eigentliche Algorithmus für eine beliebige Anzahl an Pipes und somit auch für hohe Pixel-Frequenzen eingesetzt werden kann. Die Funktionsweise dieses Even-Odd-Combiners ist in Abbildung 3-25 dargestellt.

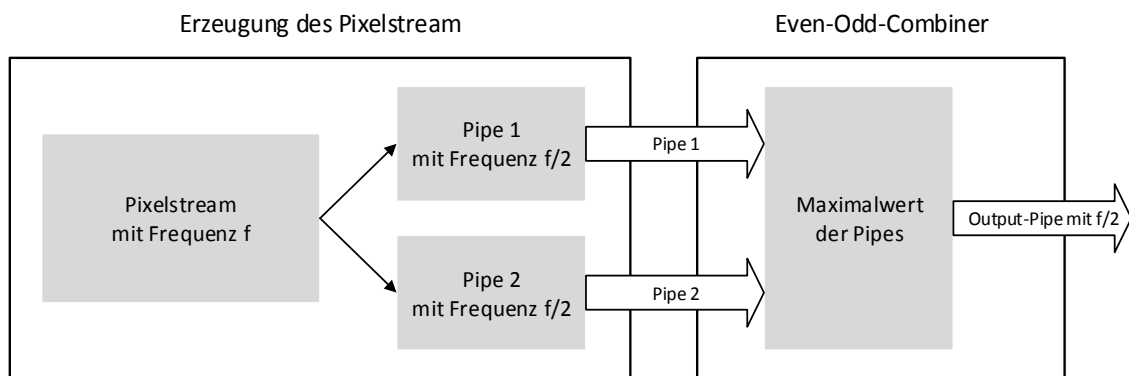


Abbildung 3-25: Even-Odd Combiner

Durch die Wahl des Maximalwertes der Pipes ist in diesem Fall sichergestellt, dass vom SSC-Algorithmus immer genügend Licht zum Abdecken der zu erreichenden Helligkeit erzeugt wird. Während es, sowohl beim Condenser als auch beim SSC-Optimierer auf diese Weise möglich ist, mit der reduzierten Auflösung und Frequenz zu arbeiten, lässt sich dies auf die Pixel-Compensation nicht anwenden, da nach wie vor jeder Pixel aus allen Pipes kompensiert werden muss. Aus diesem Grund muss für Hardwaredesigns mit hohen Auflösungen zumeist auch die Pixel-Compensation verdoppelt werden; da es, wie bereits erwähnt, nicht möglich ist die Frequenz innerhalb der Pixel-Compensation zu erhöhen. Der schematische Ablauf ist in Abbildung 3-26 gezeigt.

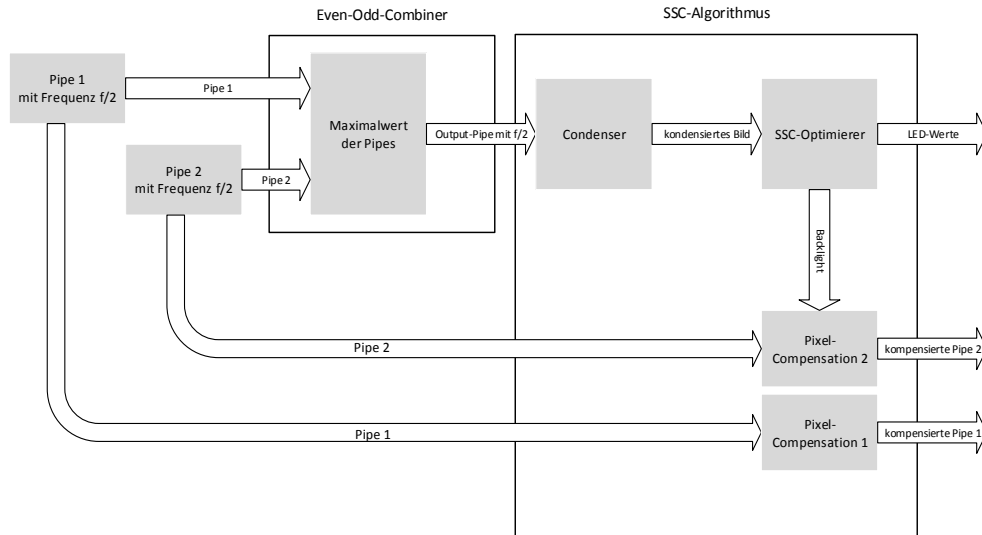


Abbildung 3-26: Schematischer Aufbau des SSC-Algorithmus bei Eingangsbildern mit mehreren Pipes

Hardwarebedarf

Der resultierende Algorithmus wurde auf ein Xilinx Kintex7 FPGA (xc7k325t-2ffg900) [Xil17a] synthetisiert. Da es sich bei diesem FPGA um ein FPGA im gehobenen Preissegment handelt, sind entsprechend viele „Slice Registers“ zur Programmierung im FPGA vorhanden. So nutzt der effizient programmierte SSC-Algorithmus von den insgesamt verfügbaren 407600 „Slice Registers“ nur 31632 aus. Dies entspricht einer FPGA Auslastung der „Slice Registers“ von ca. 7%.

Da ein FPGA-Design allerdings nicht nur Register enthält sondern zur Speicherung von Daten auch Memory und LUTs sowie auch kombinatorische Logik, und nicht alle Slices in einem FPGA stets komplett ausgenutzt werden können führt dies bei einer Ausnutzung von 16% der LUTs und 4% des Memorys zu einer gesamten Auslastung des FPGAs von ca. 25%. Diese Zahl beinhaltet allerdings auch „Slices“, welche nicht in ihrem vollen Funktionsumfang genutzt werden, da ein „Slice“ stets Register und LUTs enthält [Bai11].

Da sich nach [Ros16] ein Flächenfaktor von 20 bis 40 zwischen einer FPGA-Implementierung und einer Realisierung als ASIC existiert, lässt sich sagen, dass es möglich ist, den SSC-Algorithmus auch kostengünstig in ASICs zu realisieren.

3.6 Zusammenfassung und Fazit

In diesem Kapitel wurde die Implementierung eines Algorithmus, welcher das lokale Dimmen von Edge-Lit Displays ermöglicht, vorgestellt. Hierbei wurde zunächst auf die Unterschiede in der Light-Spread-Function eingegangen und somit aufgezeigt, weshalb das in Abschnitt 2.3.3 gezeigte Modell für Local-Dimming Algorithmen nicht direkt auf Edge-Lit-Displays angewendet werden kann.

Um diese Unterschiede in der LSF und der somit deutlich größere Crosstalk der LEDs untereinander im Dimming-Algorithmus zu berücksichtigen, wurde zunächst eine sogenannte Pixelorder eingeführt und erzeugt.

Diese Pixelorder steht hier maßgeblich für die größte Änderung und auch Verbesserung des Algorithmus in Bezug auf **[Alb10]** und **[Jun11]**. Die Pixelorder ermöglicht auf elegante Weise den Rechenaufwand zur Bestimmung der zu erhöhenden LED sozusagen aus dem eigentlichen Algorithmus auszulagern. Der Rechenaufwand zum Erstellen der Pixelorder fällt hierbei für jedes Display nur einmal an, und muss, da die Ergebnisse sehr speichersparend abgelegt werden können, auch nicht echtzeitfähig sein. Dies ermöglicht es, den SSC-Optimierer in der Hardware-Implementierung sehr schlank zu halten und dadurch auch mit einem insgesamt geringeren Hardwarebedarf auszukommen. Durch die bewusst gewählte Abarbeitungsreihenfolge der LEDs innerhalb der Pixelorder kann zudem eine ungleichmäßige Belastung und somit Alterung ansonsten bevorzugt betrachteter LEDs vermieden werden. Dies gewährleistet eine höhere Homogenität des Backlights über die Lebensdauer des Displays und kann somit die Lebensdauer sogar erhöhen.

Weiterhin wurde der von **[Alb10a]** vorgestellte Automatik-Condenser in Bezug auf das zu erwartende Power-Saving deutlich verbessert, ohne dass dadurch wahrnehmbare Artefakte im gedimmten Bild entstehen. Außerdem wurde durch die Verbesserung der LED-Faktoren im SSC-Optimierer die Voraussetzung geschaffen, die in den folgenden Kapiteln beschriebenen Probleme effizient zu lösen und gleichzeitig die Homogenität des gedimmten Bildes maßgeblich zu verbessern.

Die Hardware-Implementierung mit den Verbesserungen und Anpassungen im Algorithmus ermöglicht im Folgenden eine genaue Betrachtung, Analyse und Lösung der Problemstellungen der folgenden Kapitel.

4. Probleme und Lösungen für statische Bilder

Wie in Kapitel 2 und 3 dargestellt, ist ein Algorithmus zum lokalen Dimmen der Hintergrundbeleuchtung bei LC-Displays sehr gut geeignet, um die hohen Anforderungen zu erfüllen, die heute an moderne Displays gestellt werden. Neben den bereits erwähnten Verbesserungen, wie beispielsweise ein verbesserter Kontrast und somit besserer Schwarzwert, sowie ein geringerer Energieverbrauch, kann es beim Einsatz von Local-Dimming-Algorithmen zu nicht erwünschten Artefakten kommen, welche die Vorteile von Local-Dimming zunichtemachen können, da sich negative Wahrnehmungen viel stärker auf das Bewusstsein auswirken, als positive Verbesserungen. In diesem Kapitel soll auf einige dieser Artefakte eingegangen und gezeigt werden, wie diese behoben werden können.

Insbesondere wird beschrieben, weshalb diese Probleme besonders bei lokal gediminten Systemen auftreten und meist im ungediminten Betrieb von Displays nicht wahrgenommen werden.

Im Folgenden werden drei dieser Artefakte näher erläutert. Als erstes wird auf statisches Clipping eingegangen, welches entstehen kann, wenn das Backlight an einigen Stellen des Displays zu dunkel ist. Im Anschluss wird auf das sogenannte „Halo“-Artefakt eingegangen. Dieses Artefakt, bei dem sozusagen die Light-Spread-Function der LED durch das Light-Leakage sichtbar wird, kann besonders dann entstehen, wenn benachbarte LEDs sehr unterschiedlich hell betrieben werden. Im letzten Abschnitt dieses Kapitels wird auf die Einhaltung der Farbtreue bei gediminten Systemen, und wie durch Local-Dimming der Farbraum eines Displays vergrößert werden kann, eingegangen.

4.1 Statisches Clipping

Clipping ist ein in der Bildverarbeitung weit verbreitetes Phänomen. Es tritt nicht nur, wie in dieser Arbeit von besonderer Bedeutung, bei der Darstellung von Bildern auf Displays auf, sondern kann schon bei der Aufnahme von Fotos entstehen.

Clipping entsteht, wenn die Auflösung der Bilddaten nicht ausreicht, um alle Details des Bildes aufzunehmen. Dies führt dazu, dass, entweder im dunklen oder im hellen Bereich der Auflösung, Informationen verloren gehen. Bei der Aufnahme von Fotos ist dieses Phänomen leicht zu erklären. Während der Dynamikumfang des menschlichen Auges ca. $1:10^6$ [Lev11] beträgt, verfügen moderne Kameras nur über einen Blendenbereich von ca. 12 Blendenstufen. Dies führt zu einem Dynamikumfang der Kamera von ca. 1:4096. Es ist ersichtlich, dass somit nicht alle Details des aufzunehmenden Bildes richtig erfasst werden können. Als Resultat werden meistens alle sehr dunklen Stellen des Bildes als schwarz, bzw. alle sehr hellen Stellen als weiß erfasst. Am auffälligsten ist dies zumeist an hellen Stellen, wie z.B. in den Konturen hellerer Wolken. Ein solches Clipping in Wolken ist im linken Teil der Abbildung 4-1 gezeigt. Ein Clipping im dunklen Helligkeitsbereich ist im rechten Teil der Abbildung 4-1 gezeigt.



Abbildung 4-1: Links: Clipping im hellen Bereich; recht: Clipping im dunklen Bereich

Hier verhindert das helle Fenster im Hintergrund eine hinreichende Auflösung im dunklen Bereich, weshalb viele Details in der Bildmitte nicht zu erkennen sind.

4.1.1 Clipping im Displaybereich

Anders als in der Fotografie tritt Clipping für gewöhnlich im Displaybereich bei der Anzeige der Bilder nicht, oder nur unter bestimmten Bedingungen auf. Die meisten modernen Anzeigegeräte verfügen

über eine Farbtiefe von 8 bis 10 Bit pro Farbkanal. Dies bedeutet, dass bei einem Gamma-Wert von 2 maximal ein Dynamikbereich von ca. $1:10^6$ abgedeckt werden kann. Da dies bekannt und auch durch die Beschaffenheit des menschlichen Auges konstant ist, verfügen die meisten Speicher- und Übertragungsformate für Bilder auch lediglich über maximal 8 bis 10 Bit Farbtiefe.

Eine Ausnahme bilden hier die neuen „High-Dynamic-Range“ (HDR) genannten Displays, welche Bilder mit höheren Farbtiefen wiedergeben können; dies erfordert aber meist spezielle Dateiformate bzw. spezielle Arten der Bildübertragung [Did08], welche bereits über eine höhere Auflösung verfügen und von normalen Displays nicht angezeigt werden können.

Clipping bei der Bildanzeige kann allerdings in hellen Bereichen auftreten, wenn das Backlight des betrachteten Displays gedimmt wird. Dies ist bereits in Ansätzen beim globalen Dimmen zu sehen [MSc15] [Bho12], obwohl zumeist das Backlight nur soweit abgedunkelt wird, bis das hellste Pixel noch korrekt dargestellt werden kann. Oft wird allerdings, um mehr Leistung einzusparen, das Backlight so weit gedimmt, bis eine bestimmte Prozentzahl der hellsten Pixel nicht mehr genügend Licht erhalten (vgl. Abschnitt 2.3.3 und [MSc15]). Dies führt somit sofort zu einem wahrnehmbaren Clipping in diesen Pixeln. Ein solches Bild ist im linken Teil der Abbildung 4-2 dargestellt. In diesem Beispiel wurde vom Global-Dimming-Algorithmus das oberste Prozent der hellsten Pixel geclippt. Das Resultat ist im Zentrum der Wolke deutlich sichtbar. Das zugehörige Originalbild ist im rechten Teil der Abbildung 4-2 gezeigt. Die hier gezeigten Bilder sind Beispielbilder, die auf einem 4K-Display mit insgesamt 24 LEDs an der unteren Displaykante erzeugt wurden.

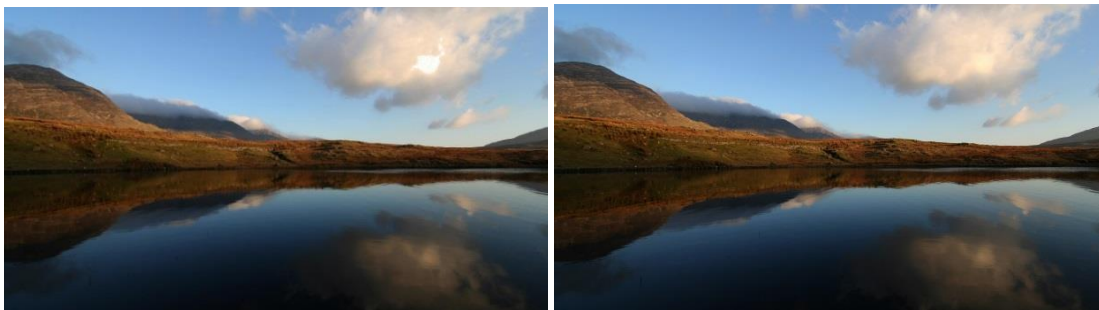


Abbildung 4-2: links: Beispiel für Clipping im hellen Bereich der Wolken; rechts: zugehöriges Originalbild

Bei dem hier gezeigten Clipping handelt es sich somit um ein bewusst vom Algorithmus zugelassenes Clipping; es wird zu Gunsten des Power-Savings auf die detailgetreue Auflösung der hellsten Pixel verzichtet. Oft ist dieses Clipping für den Betrachter nicht einmal sichtbar. Das Clipping wird erst signifikant sichtbar, wenn viele unterschiedliche, aber trotzdem helle Pixel-Werte auf einer begrenzten Fläche auftreten; wie in diesem Beispielbild im Zentrum der Wolke. Sind die geclippten Pixel hingegen über das gesamte Bild verteilt, kann das Clipping vom Betrachter nicht wahrgenommen werden, da lediglich einige Pixel dunkler erscheinen, aber nirgends im Bild Informationen verloren gehen. Ein Beispiel für ein solches verteiltes Clipping, welches vom Betrachter nicht wahrgenommen werden kann, ist typischerweise ein Sternenhimmel. Selbst wenn

die kleinen, hellen Sterne deutlich dunkler als im Originalbild sind, diese also stark ins Clipping gehen, kann dieses Clipping vom Betrachter ohne direkten Vergleich mit dem Originalbild kaum wahrgenommen werden.

Diese Eigenschaft der menschlichen Wahrnehmung macht sich der SSC-Algorithmus zu Nutze, um durch gezieltes, zugelassenes und unkritisches Clipping das Power-Saving erhöhen zu können. Weiterhin löst dieses Vorgehen den Kompromiss zwischen Power-Saving und clippingfreien Bildern, welcher bei Local-Dimming stets vorhanden ist. Durch das Zulassen von unsichtbarem Clipping kann mit dem Power-Saving auch der Kontrast erhöht werden. Dies wird im folgenden Abschnitt näher erläutert.

4.1.2 Clipping beim Local-Dimming

Clipping in einem Local-Dimming-Algorithmus entsteht, wenn das lokal gedimmte Backlight an hellen Bildstellen des darzustellenden Bildes nicht genügend Licht zur Verfügung stellt. Im Folgenden wird näher untersucht, wie es trotz optimiertem SSC-Algorithmus zu Clipping kommen kann, und wieso dieses teilweise gewollt ist.

Clipping durch die Wahl des Condenser-Modus

Zu akzeptablem, vorherbestimmtem Clipping im SSC-Algorithmus kann es bereits durch die Wahl des Condenser-Modus kommen. Wie in Abschnitt 3.4.2 gezeigt, decken der Mittelwert-Condenser sowie der automatische Condenser-Modus nicht immer die geforderte Helligkeit jedes Pixels im resultierenden kondensierten Pixel ab. Hierbei liegt es in der gewollten Funktion dieser beiden Condenser-Modi, dass einzelne helle Pixel nicht immer im kondensierten Pixel repräsentiert werden können. Dies geschieht durch die geschickte Wahl der beschriebenen Condenser-Funktionen, welche Clipping nur in wenigen Pixeln zulassen (vgl. Abschnitt 3.4.2). Beim Mittelwert-Condenser ist es leicht nachzuvollziehen, dass der Wert des gesamten kondensierten Pixels steigt, wenn viele helle Pixel in der Condenser-Zelle vorhanden sind.

Aufgrund der bereits im kondensierten Bild nicht berücksichtigten Helligkeit der einzelnen Pixel kommt es zwangsläufig während der Prozessierung durch den SSC-Optimierer und die Pixel-Compensation zu Clipping in diesen Pixeln. Hierbei handelt es sich zumeist um ein, anhand der bewusst gewählten Condenser-Funktion, gewolltes Clipping, um das Power-Saving und den Kontrast zu erhöhen.

Clipping durch die Prozessierung im SSC-Optimierer

Eine kritischere Ursache für Clipping im SSC-Algorithmus ist ein Clipping, welches erst durch die vorgegebene Prozessierung des SSC-Optimierers entsteht. Unter optimalen Bedingungen sollte hier vom SSC-Optimierer stets die vom Condenser durch die kondensierten Pixel geforderte Helligkeit erreicht werden. Dies wird, in der am Lehrstuhl für Mikroelektronik implementierten Variante des Algorithmus, nicht immer sichergestellt. Um die Laufzeit des SSC-Optimierers zu begrenzen, werden zur Berechnung des Backlights während den Iterationen des SSC-Optimierers nur die zwei LEDs mit dem größten Einfluss auf das aktuell betrachtete kondensierte Pixel betrachtet. Dies entspricht dem Greedy-Prinzip, da von diesen beiden LEDs der größte Nutzen beim Lösen des Optimierungsproblems zu erwarten ist. Der Rest des zur Ausleuchtung des kondensierten Pixels benötigten Lichtes stammt von den restlichen LEDs, welche durch Inhalte anderer kondensierter Pixel erhöht werden. Dieses von anderen LEDs stammende Licht wird im Folgenden als Crosstalk-Licht bezeichnet. Durch dieses Vorgehen möglicherweise entstehendes Clipping wird bewusst akzeptiert, um im Gegenzug das Power-Saving sowie den Kontrast zu maximieren.

Der linke Teil der Abbildung 4-3 zeigt ein Testbild in der Auflösung 1280 X 720 welches einen hellen Spot mit einer Helligkeit von 40% der maximalen Helligkeit enthält. Im rechten Teil dieser Abbildung ist das zugehörige Backlight dargestellt. In diesem Fall wurde nur die zugehörige LED mit dem maximalen Einfluss in den Pixeln mit dem hellen Spot erhöht. Da diese dritte LED des Panels mit insgesamt sieben LEDs an der kurzen Displayseite an der Stelle des Spots nur einen Einfluss von 20% hat und die geforderten 40% der maximalen Bildhelligkeit eine mit einem Gamma-Wert von 2,0 korrigierte Backlight Helligkeit von ca. 16% des maximal möglichen Backlights erfordert, wurde die dritte LED des Panels auf ca. 80% des Maximalwertes eingestellt. Die übrigen sechs LEDs bleiben ausgeschaltet.

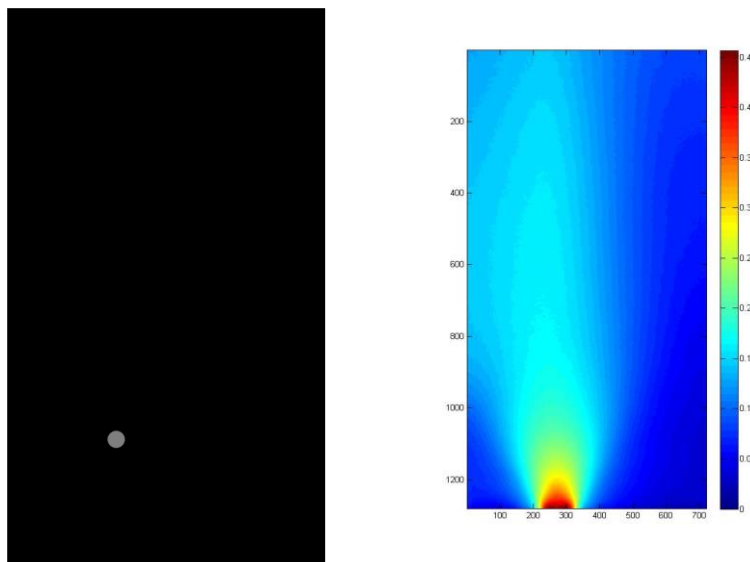


Abbildung 4-3: Links: Testbild mit hellem Spot von 40% der maximalen Helligkeit und schwarzem Hintergrund; rechts: Resultierendes Backlight ohne Crosstalk mit einem LED-Wert von 80% des Maximums

In Abbildung 4-4 ist im linken Teil ein ähnliches Testbild zu sehen. Der Unterschied zum vorherigen Testbild besteht nur darin, dass hier der gesamte Hintergrund des Bildes auf einen Helligkeitswert von 30% des Maximalwertes gesetzt wurde.

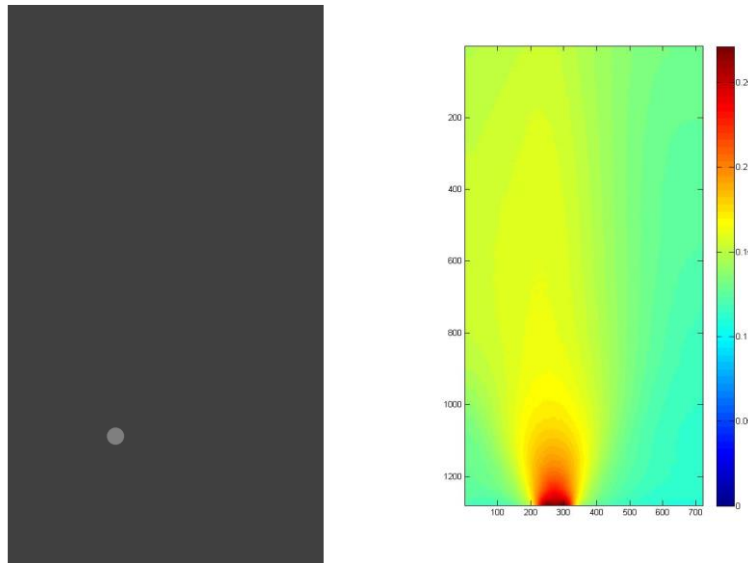


Abbildung 4-4: Links: Testbild mit hellem Spot von 40% und Hintergrund mit 30% der maximalen Helligkeit und schwarzem Hintergrund; rechts: Resultierendes Backlight mit der betreffenden LED auf 40% und den restlichen LEDs auf 10% des Maximums

Durch den Helligkeitswert des Hintergrundes von 30% ergibt sich durch das bereits gewählte Gamma von 2,0 ein globaler LED-Wert von ca. 10%, welcher für alle LEDs gilt. Um weiterhin den hellen Spot abzudecken und die dort geforderte Helligkeit von ca. 16% der maximalen Backlight Helligkeit zu erreichen, ist es durch den Crosstalk der verbleibenden sechs LEDs nur noch nötig, die betrachtete LED auf einen Helligkeitswert von 40% des Maximums zu erhöhen. Hierbei ist deutlich zu sehen, dass es durch den iterativen Aufbau des SSC-Algorithmus, welcher das Crosstalk-Licht aller LEDs nutzt, nicht erforderlich ist, die geforderte Helligkeit nur mit den beiden LEDs mit dem höchsten Einfluss im aktuellen Pixel alleine abdecken zu müssen.

Weitere Testreihen ergaben, dass das bereits erwähnte Erhöhen der zwei LEDs mit dem höchsten Einfluss auf das aktuell betrachtete kondensierte Pixel im SSC-Optimierer den besten Kompromiss zwischen garantierter Helligkeitsabdeckung und auftretendem Clipping darstellt. In diesem Fall kommt es nur selten zu Clipping, da durch die zwei erhöhten LEDs bereits ein Großteil der Helligkeit abgedeckt wird. Andererseits werden durch diese Wahl auch gute Power-Saving Werte erreicht. Es hat sich ergeben, dass das Erhöhen der LED mit dem drittgrößten Einfluss das Power-Saving bereits deutlich reduziert, da der Einfluss dieser LED auf das betrachtete kondensierte Pixel relativ gering ist, und dadurch diese dritte LED sehr stark erhöht werden muss. Um dies genauer zu begründen, ist in Abbildung 4-5 dargestellt, welche Pixel zu welchem Prozentsatz von den LEDs mit dem größten Einfluss abgedeckt werden.

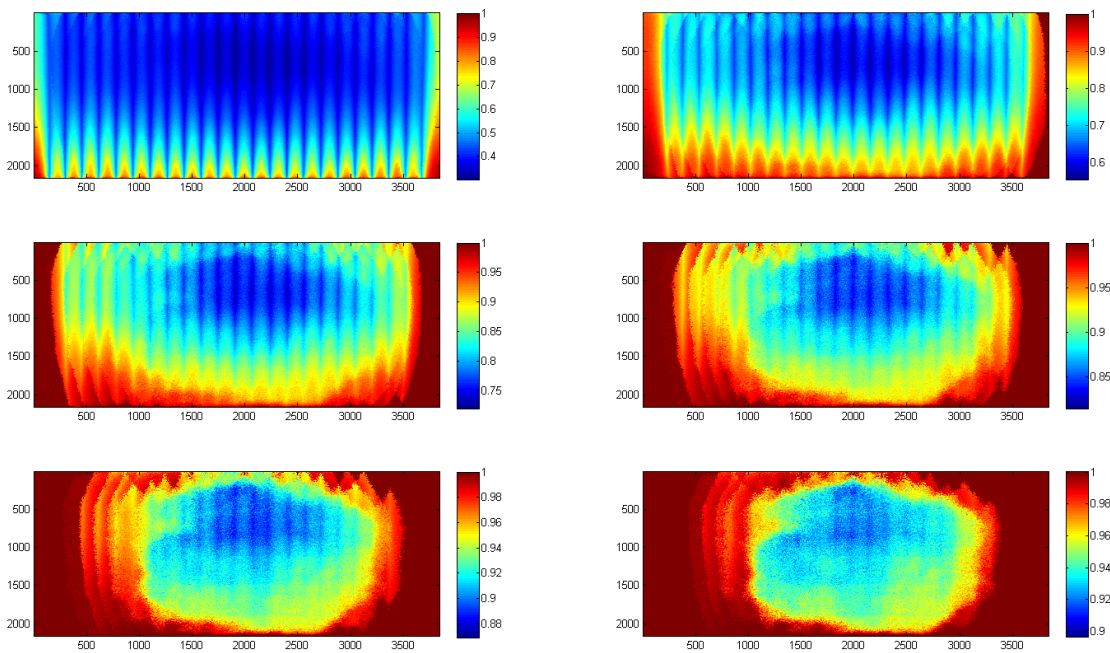


Abbildung 4-5: Summe des Einflusses der LEDs mit dem größten Einfluss auf die jeweiligen Pixel. Oben links: LED mit größtem Einfluss; oben rechts: zwei LEDs mit größten Einfluss; bis; unten rechts: 6 LEDs mit größtem Einfluss

Zur Erstellung dieser Diagramme wurde die Light-Spread-Funktion eines Displays mit 24 LEDs an der langen unteren Displayseite genutzt. Dies lässt sich an den oberen Diagrammen anhand der vertikalen Strukturen noch erkennen. Von oben links bis unten rechts betrachtet stellen diese Diagramme jeweils die Einflüsse auf die Pixel des 4K2K-Displays dar, welchen eine bestimmte Anzahl betrachteter LEDs mit dem größten relativen Einfluss auf diese haben. Begonnen wird oben links mit nur der Betrachtung LED mit dem größten Einfluss. Im letzten Diagramm (unten rechts) werden die Einflüsse der 6 LEDs mit dem größten Einfluss in jedem Pixel addiert. Die Wahl fiel bei diesem Diagramm beispielhaft auf das Display mit 24 LEDs am unteren Displayrand; weitere Untersuchungen ergeben auch für andere für diese Arbeit genutzten Displays ein ähnliches Verhalten.

In Abbildung 4-5 ist zu erkennen, dass bereits beim Erhöhen der beiden LEDs mit dem größten Einfluss in jedem Pixel des Displays mindestens 55% der Helligkeit abgedeckt werden kann. Es ist weiterhin zu sehen, dass, abgesehen von einer kleinen Fläche in der Mitte des Displays, die Helligkeit der Pixel zu deutlich größeren Teilen als diesen 55% abgedeckt ist. So sind z.B. am unteren Rand, sowie am linken und rechten Rand, des Displays bereits ca. 90% der geforderten Helligkeit von den zwei LEDs mit dem größten Einfluss in diesen Pixeln abgedeckt. Auch ein Großteil der zentralen Fläche ist bereits zu ca. 75% abgedeckt. Diese Prozentzahlen suggerieren evtl., dass, je nach Bereich des Displays, noch bis zu 45% der geforderten Helligkeit nicht abgedeckt werden kann, aber es sei angemerkt, dass sich die angegebenen Zahlen auf die maximale Helligkeit dieser Pixel beziehen. Diese Helligkeit wird also nur gefordert, wenn Objekte mit sehr hoher Helligkeit in diesen Bereichen

abgebildet werden müssen. Weiterhin führt ein Bild mit hoher mittlerer Helligkeit zwangsläufig zur Erhöhung vieler LEDs, was die Nutzung des Crosstalk-Lichtes dadurch ermöglicht.

Bei Betrachtung von Abbildung 4-5 ist ersichtlich, dass ein Berücksichtigen von mehr als zwei LEDs zur direkten Berechnung des Backlights im SSC-Optimierer nicht sinnvoll ist, da sich die prozentuale Abdeckung der Helligkeit der Pixel nur unwesentlich weiter erhöht. Besonders ist zu beobachten, dass die ohnehin schon stark betrachteten Displayränder sich weiter vergrößern. Im Zentrum des Displays ist nur eine kleine Erhöhung der Abdeckung zu sehen. Zwar ist im letzten Diagramm, in welchem die sechs LEDs mit dem größten Einfluss im jeweiligen Pixel betrachtet werden, zu sehen, dass deutlich mehr Pixel fast vollständig bereits in der SSC-Optimierung abgedeckt werden können; dies geht allerdings zu Lasten des Power-Saving, da viel Crosstalk-Licht entsteht, was in den weiteren Optimierungsiterationen nicht mehr benötigt wird.

Aus diesen Gründen wurde im Folgenden stets mit der Erhöhung der beiden LEDs mit dem größten Einfluss im betrachteten Pixel gearbeitet.

4.1.3 Reduzierung des Clippings durch die Clipping-Suppression-Funktion (CSF)

Eine Möglichkeit zur Reduzierung des statischen Clippings bietet die sogenannte „Clipping-Suppression-Funktion“. Diese Maßnahme wurde zusammen mit Dr.-Ing. Tobias Jung Bereits in [Sch12] und [Jun14] vorgestellt. Im Gegensatz zu den bisher gezeigten Methoden zielt die Clipping-Suppression-Faktor-Methode auf die Unterdrückung von sichtbarem Clipping durch eine lokale Abdunkelung des Bildes ab. Da die bisher gezeigten Arbeiten maßgeblich auf ein gesteigertes Power-Saving durch die Verwendung der Clipping-Suppression eingehen, wird dieses Verfahren an dieser Stelle nochmals erläutert, um auch die hohen visuellen Verbesserungsmöglichkeiten dieser Methode darzustellen. Die Grundidee der Clipping-Suppression-Faktor-Methode besteht darin, möglichst auf Pixelebene zu erwartendes, sichtbares Clipping vorherzusagen. Um das sichtbare Clipping vorherzusagen, wird zunächst die Frequenz der Helligkeit der Pixel innerhalb einer Condenser-Zelle bestimmt. In Abbildung 4-6 sind zwei Querschnitte durch beispielhafte Condenser-Zellen dargestellt.

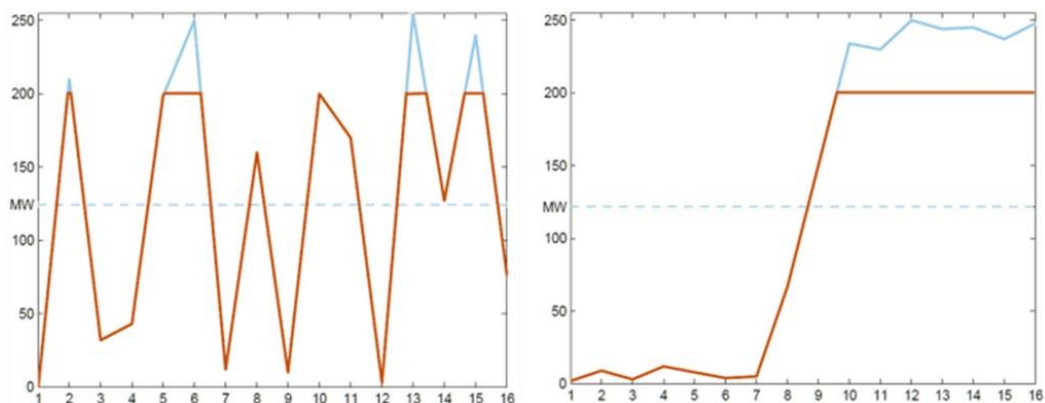


Abbildung 4-6: Links: Hochfrequente Zelleninhalte mit geringem Risiko für sichtbares Clipping; rechts: Zellinhalt mit niedriger Frequenz und dadurch hohem Risiko für sichtbares Clipping [Sch12]

Anhand dieser Diagramme lässt sich einfach erklären, dass Zellen, welche in Bezug zur Helligkeit hochfrequente Pixel beinhalten (links), deutlich anfälliger für sichtbares Clipping sind, als Zellen mit geringer Helligkeitsfrequenz (rechts). Die blaue Kurve gibt hierbei jeweils den Helligkeitsverlauf des Originalquerschnitts an, die rote Kurve ein hypothetisches Clipping auf dem Helligkeitsniveau von 200. Die Helligkeit der Pixel in diesem Diagramm ist in einem 8-Bit-Wertebereich angegeben. Obwohl der Mittelwert bei beiden Zellen identisch ist, wird aufgrund des abgeschnittenen Informationsgehaltes in der linken Zelle, diese auch deutlich anfälliger für sichtbares Clipping sein.

Ein weiterer Aspekt zur Vorhersage von Clipping in einer Zelle ist die Gesamthelligkeit der Zelle. In Abbildung 4-7 ist ein zu untersuchendes Originalbild dargestellt. Es lässt sich leicht erkennen, dass mittels der Frequenzanalyse (unten links, $F_{i,j}$) und der Helligkeit der Pixel in der Wolke, die zu erwartende Clipping-Dichte (unten rechts, $H_{i,j}$) richtig vorhergesagt werden kann.

Aus diesen Werten, kombiniert mit dem Wert des Maximalwert-Condensers $C_{max,i,j}$ dieser Zelle, lässt sich ein Faktor, der sogenannte Clipping-Suppression-Faktor (CSF), ableiten.

Dabei gilt:

$$CSF_{i,j} = f(F_{i,j}, H_{i,j}, C_{max,i,j}) \geq 1 \tag{4-1}$$

Die Indizes i und j beschreiben hierbei die Position im kondensierten Bild. Im weiteren Verlauf dient dieser Faktor dazu, einen virtuellen Einfluss $a_{i,j}^{virtual}$ zu berechnen, welcher sich aus dem CSF , multipliziert mit dem ursprünglichen Einfluss aller LEDs $a_{i,j}$ in diesem Backlight-Sample-Point, ergibt.

$$a_{i,j}^{virtual} = CSF_{i,j} \cdot a_{i,j} \geq a_{i,j} \tag{4-2}$$

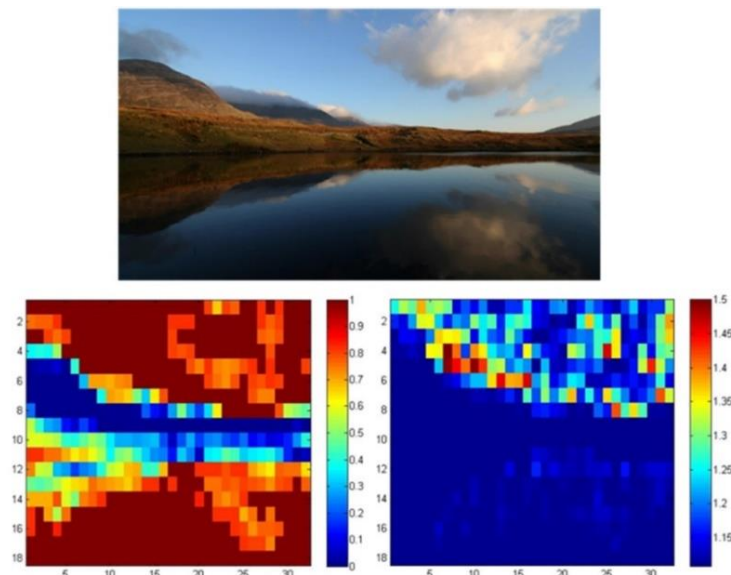


Abbildung 4-7: Vorhersage von sichtbarem Clipping; oben: Originalbild; links unten: Frequenzanalyse; rechts unten: Clipping Dichte [Sch12]

Aus diesen neuen Einflusswerten für die Sample-Points ergibt sich, wie bereits aus dem Abschnitt Pixel-Compensation bekannt, ein virtuelles Backlight $b_{i,j}^{virtual}$ zu:

$$b_{i,j}^{virtual} = \sum_{l=1}^{N_{LED}} a_{i,j}^{virtual}(l) \cdot LED(l) \quad (4-3)$$

Wobei N_{LED} die Anzahl der LEDs angibt. Wird dieses neue, virtuelle Backlight für die weitere Pixel-Compensation wie in Abschnitt 3.4.4 beschrieben, verwendet, ergibt sich an den für Clipping kritischen Bereichen des Bildes ein virtuell erhöhtes Backlight.

Um den Verlauf dieses virtuellen Backlights zu glätten, werden die resultierenden Sample-Points des virtuellen Backlights zunächst mit mehreren Iterationen eines Gauß-Filters [Erh08] gefiltert. Das Ergebnis dieser Vorgehensweise ist eine lokal erhöhte virtuelle Helligkeit, wie sie sonst nur bei Direct-Lit-Displays erreicht werden kann. Mit dieser Methode ist es möglich, auch helle Spots in Bildern auf Edge-Lit-Displays clippingfrei bzw. ohne sichtbares Clipping darzustellen.

Da es sich bei dem Backlight allerdings nur um ein zur internen Berechnung genutztes, virtuelles Backlight handelt, erscheint der Bereich, in dem das Backlight erhöht wurde, im resultierenden Bild dunkler als im Original, da die einzelnen Pixel nicht weit genug kompensiert werden, um die geforderte Helligkeit zu erreichen. Eine intelligente Wahl des maximalen CSF-Faktors ermöglicht es aber, mit dieser Methode Resultate zu erzielen, welche zwar etwas dunkler als das Original, aber deshalb ohne sichtbares Clipping auskommen. Dies hat den Vorteil, dass in diesem Fall keine Bilddetails verloren gehen. In Abbildung 4-8 ist das Beispielbild mit dem resultierenden sowie dem virtuellen Backlight dargestellt.

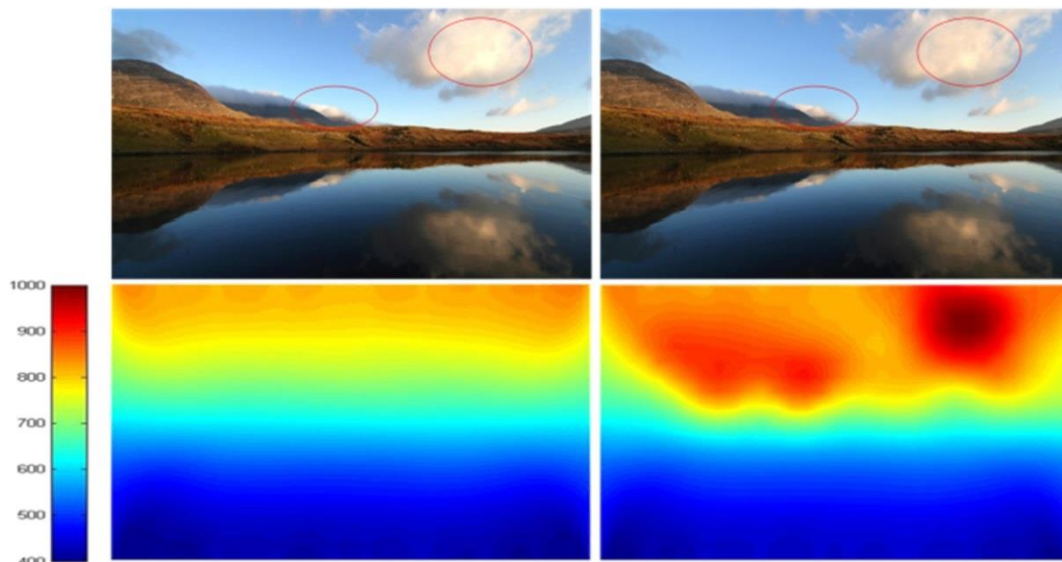


Abbildung 4-8: Clipping-Suppression-Funktion; links: Lokal gedimmtes Bild mit zugehörigem Backlight; rechts: mit CSF gedimmtes Bild mit zugehörigem virtuellem Backlight [Sch12]

Besonders im Backlight des rechten Teils, welches mit dem *CSF* multipliziert wurde, ist eine deutlich erhöhte Helligkeit im Bereich der Wolke und der Berggipfel (beide markiert) zu erkennen. Ebenso ist zu sehen, dass genau diese Bereiche in der linken Betrachtung mit regulärer Pixel-Compensation von starkem Clipping betroffen sind. Durch die, dem Direct-Lit ähnlichen, lokal erhöhten Werten des virtuellen Backlights lässt sich dieses Clipping verhindern.

4.2 Statisches Halo

4.2.1 Beschreibung

Halo ist ein weit verbreitetes, unerwünschtes Artefakt, das beim lokalen Dimmen der Hintergrundbeleuchtung auftritt. Ein Halo ist hierbei ein heller Bereich, welcher aufgrund der gedimmten Hintergrundbeleuchtung um ein darzustellendes helles Objekt erscheint. Der Grund hierfür liegt in der Beschaffenheit der Flüssigkristall-Pixel, welche stets auch für sehr dunkle eingestellte Pixelwerte einen Teil des sehr hellen Hintergrundlichtes passieren lassen (Light-Leakage). Dieses Artefakt tritt besonders bei dunklen Bildern auf, welche wenige, kleine helle Elemente beinhalten [Gru16]. Typische Beispielbilder hierfür sind Sternenhimmel oder Aufnahmen eines Mondes über nächtlichem Himmel. Ein solches Bild ist im Original in Abbildung 4-9 gezeigt.



Abbildung 4-9: Bild ohne Halo bei Plasma oder OLED-Displays

Zu sehen ist eine dunkle Landschaft, welche von einem hellen Vollmond beleuchtet wird. Das gezeigte Originalbild entspricht auch der Ansicht des Bildes auf einem Plasma- oder OLED-Display. Da diese Displayarten aus Licht emittierenden Pixeln aufgebaut sind, wird wirklich nur an solchen Pixeln Licht erzeugt, wo es auch benötigt wird.

Da beim Dimmen der LC-Displays das Backlight nur mit geringer räumlicher Auflösung angepasst werden kann, erscheinen dunkle Bereiche um helle Elemente heller, als die weitere dunkle Umgebung. In Abbildung 4-10 sind Halo-Artefakte für Direkt-Lit- und Edge-Lit-Displays dargestellt. Es handelt sich hierbei um ein Edge-Lit-Display mit LEDs an der unteren Displaykante.

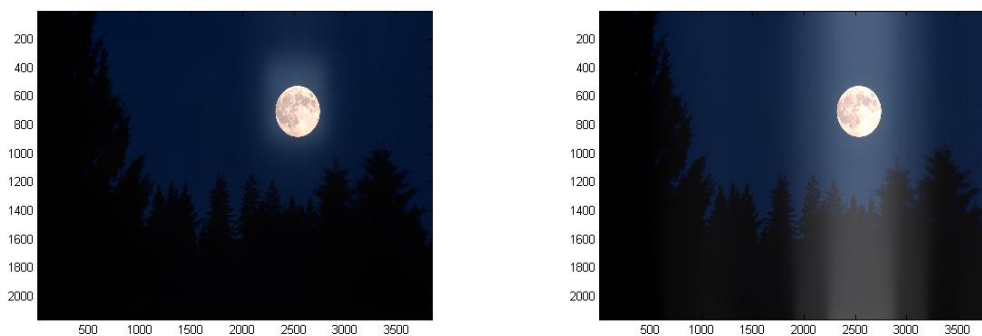


Abbildung 4-10: Links: Halo-Artefakt bei einem Direct-Lit-Display; rechts: Halo-Artefakt bei einem Edge-Lit-Display (verstärkt dargestellt)

Bei Betrachtung des Halos eines Direct-Lit-Displays wird auch die Namensgebung ersichtlich, da sich ein heller Kranz um ein Objekt bildet. Das rechte Bild zeigt deutlich, dass ein Halo bei einem Edge-Lit-Display als deutlich störender wahrgenommen werden kann, da durch die geringere Anzahl an LEDs direkt bei wenigen aktiven LEDs ein größerer Bereich des Displays beleuchtet wird.

Halo ist ein Artefakt, welches ausschließlich beim lokalen Dimmen der Hintergrundbeleuchtung auftritt und muss deshalb vom sogenannten Clouding unterschieden werden. Als Clouding wird die sichtbare Einkopplung der Hintergrundbeleuchtung in den Light-Guide, welcher sich hinter dem LC-Panel befindet, bezeichnet. Clouding ist im Gegensatz zu Halo nicht bildabhängig, und auch im ungedimmten Zustand sichtbar. Abbildung 4-11 zeigt das auftretende Clouding besonders in den Ecken des Displays sehr deutlich. Bei dem gezeigten Display handelt es sich um ein Display mit LEDs an beiden kurzen Displaykanten, weshalb das Clouding zur Bildmitte hin auch abnimmt.



Abbildung 4-11: Clouding eines Edge-Lit-TVs mit LEDs an beiden kurzen Displaykanten

Dieses Clouding entsteht meist durch mechanische Verspannungen in den Flüssigkristallen. Zu diesen Verspannungen kann es während der Montage des Panels in den Rahmen des Displays kommen. Aus diesem Grund ist das Clouding besonders bei Edge-Lit-Displays zu sehen, da hier sehr leicht, besonders an den Kanten, hohe mechanische Spannungen auftreten können. Weiterhin kann es bei Ungenauigkeiten in der Montage zu Problemen bei der Einkopplung des Lichtes in den Light-Guide kommen. Da eine solche Einkopplung in den Light-Guide bei Direct-Lit-Displays nicht nötig ist kann diese Ursache des Cloudings bei Direct-Lit-Displays ausgeschlossen werden.

Im weiteren Verlauf dieses Abschnittes wird nicht mehr auf das Clouding eingegangen, da es nicht vom Bildinhalt abhängt, und somit nicht unmittelbar von einem Dimming-Algorithmus beeinflusst werden kann. Anders sieht dies beim Halo aus: Hier lässt sich ein direkter Zusammenhang zwischen darzustellendem Bildinhalt und Auftreten des Halos ausmachen. Aus diesem Grund werden im Folgenden die Ursachen für Halo herausgearbeitet und in Abschnitt 4.2.3 Methoden vorgestellt, welche den Halo, besonders bei Edge-Lit-Displays, drastisch reduzieren können.

Abschließend sei an dieser Stelle vermerkt, dass jegliche Maßnahmen des Dimmings, ob global oder lokal, aufgrund des dunkleren Backlights auch stets ein evtl. vorhandenes Clouding des Displays reduzieren.

4.2.2 Ursachen des Halos bei lokal gedimmten LC-Displays

Da die Pixel eines LC-Displays stets eine Hintergrundbeleuchtung benötigen, ist es bei diesen Displays im Gegensatz zu z.B. OLED-Displays nicht möglich, in jedem Pixel ausschließlich das benötigte Licht für diesen Pixel bereitzustellen. In der Regel ist die Hintergrundbeleuchtung eines Flüssigkristalldisplays in den meisten Pixeln heller als nötig, da dies oft die einzige Möglichkeit ist, genügend Licht hinter jedem einzelnen Pixel bereitzustellen.

Im ungedimmten Zustand ist diese Hintergrundbeleuchtung sehr homogen und die Helligkeit des Bildes kann durch die unterschiedlichen Transmissionen der einzelnen Flüssigkristall-Pixel eingestellt werden. Da aber auch dunkle Pixel immer einen gewissen Anteil des Lichtes passieren lassen, das sogenannte Light-Leakage, erscheinen auch dunkle Pixel heller. Geschieht dies homogen mit dem gleichen Hintergrundlicht hinter dem gesamten Display, ist der Unterschied für das Auge nicht wahrnehmbar. Nur der Kontrast zwischen dunklem Hintergrund und den hell herausstechenden Elementen ist begrenzt.

Anders sieht es aus, wenn beim Local-Dimming nur die LEDs der Hintergrundbeleuchtung eingeschaltet werden, deren Licht auch wirklich für die Ausleuchtung des anzuzeigenden Bildinhaltes benötigt wird. Bei einem Direct-Lit-Backlight sind dies, für das in Abbildung 4-9 gezeigte Bild, die LEDs direkt hinter dem Mond. Diese LEDs werden mit sehr hohen Werten betrieben, während für die umliegenden LEDs sehr geringe Werte ausreichend sind. Ein resultierendes Backlight für ein Direct-Lit-Display mit 7 x 19 LEDs als Hintergrundbeleuchtung ist in Abbildung 4-12 dargestellt.

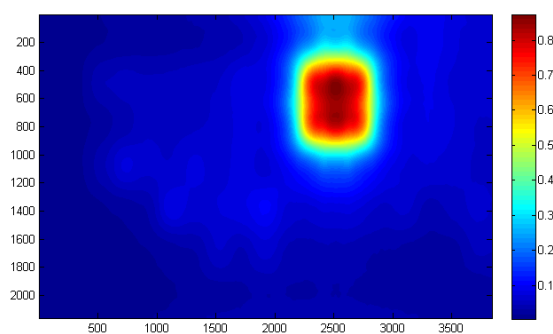


Abbildung 4-12: Resultierendes Backlight eines Direct-Lit-Displays für das gezeigte Beispielbild

Es ist deutlich zu erkennen, dass nicht nur Licht direkt hinter dem Mond erzeugt wird, sondern dass auch Licht in zum Mond benachbarten Bereichen des dunklen Himmels entsteht. Um dies weiter zu verdeutlichen, werden im Folgenden zwei Querschnitte des Backlights durch das in Abbildung 4-9 gezeigte Testbild betrachtet. Die Position der Schnittlinien ist in Abbildung 4-13 gezeigt.

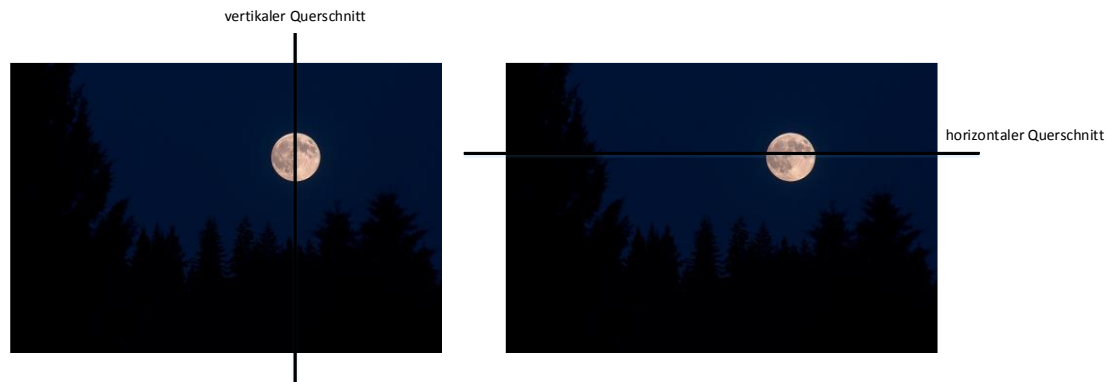


Abbildung 4-13: Links: vertikale Querschnittslinie durch das Backlight; rechts: horizontale Querschnittslinie durch das Backlight

Es wird zunächst der horizontale Querschnitt des Direct-Lit-Displays in Abbildung 4-14 dargestellt. In diesem Querschnitt wird deutlich, dass, anhand des Gaußförmigen Profils einer einzelnen LED (blau), durch eine Überlagerung des Lichtes mehrerer LEDs niemals die exakte Form des geforderten Helligkeitsverlaufs des Mondes (schwarz) erreicht werden kann. Aus diesem Querschnitt lässt sich auch erkennen, dass in dem resultierenden Backlight (rot) ein heller, nach außen dunkler werdender Kranz um das helle Objekt entsteht.

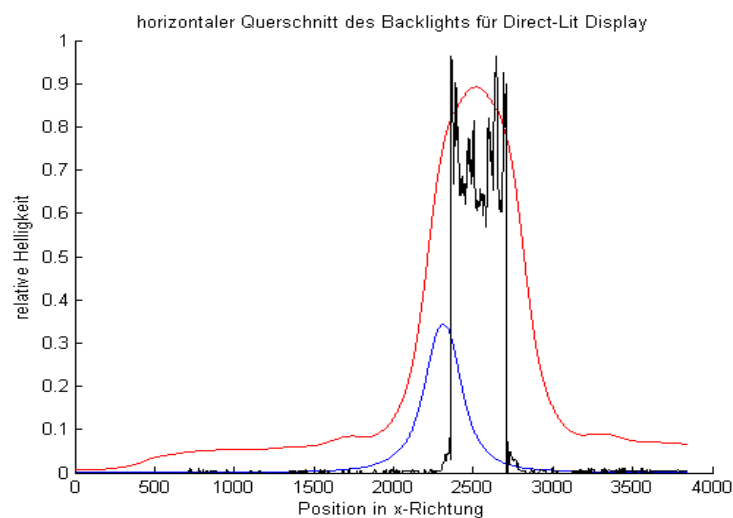


Abbildung 4-14: Verdeutlichung des Halos bei einem Direct-Lit-Backlight (horizontaler Querschnitt). Schwarz: TFT-Wert, Rot: Backlight, Blau: Backlight einer LED

Das Helligkeitsprofil eines horizontalen Querschnitts durch ein Edge-Lit-Display mit LEDs an der unteren Displaykante ist in Abbildung 4-15 dargestellt. Zunächst wirken das Profil des Direct-Lit und das des Edge-Lit ähnlich. Dies liegt an der Schnittrichtung orthogonal zur Ausbreitungsrichtung der LEDs im Edge-Lit-Display. Auffallend ist beim Edge-Lit direkt, dass über nahezu das gesamte Bild eine höhere Grundhelligkeit durch das Light-Leakage der aktivierten LEDs vorhanden ist.

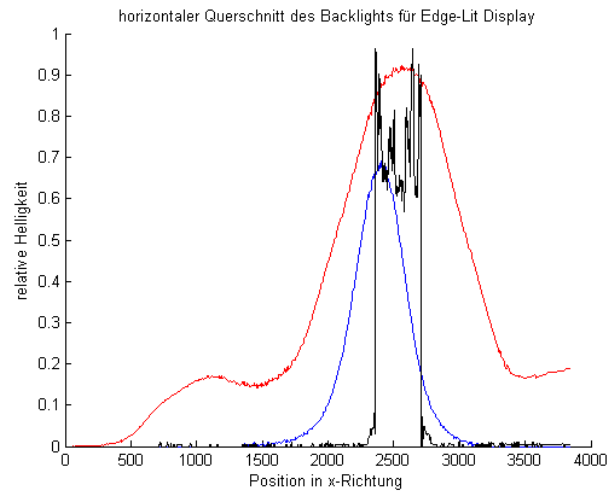


Abbildung 4-15: Verdeutlichung des Halos bei einem Edge-Lit-Backlight (horizontaler Querschnitt). Schwarz: TFT-Wert, Rot: Backlight, Blau: Backlight einer LED

Bevor auf die Möglichkeiten eingegangen wird, diesen Halo zu reduzieren, wird zunächst das Erscheinen des Halos im vertikalen Querschnitt beider Displays näher untersucht. Hierzu ist zunächst in Abbildung 4-16 der vertikale Querschnitt durch das Direct-Lit-Backlight gezeigt.

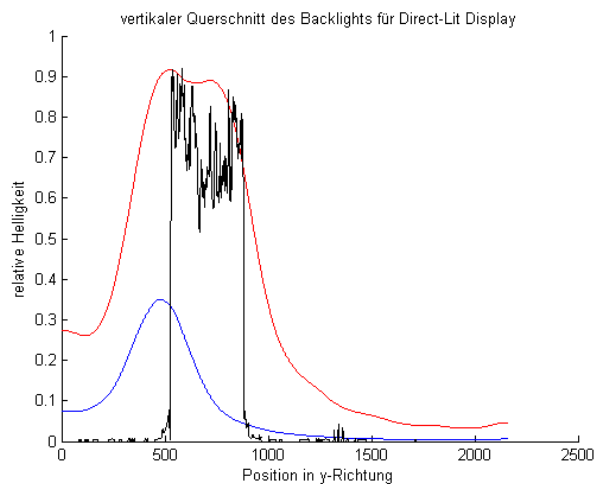


Abbildung 4-16: Verdeutlichung des Halos bei einem Direct-Lit-Backlight (vertikaler Querschnitt). Schwarz: TFT-Wert, Rot: Backlight, Blau: Backlight einer LED

Wie zu erwarten ist durch die Symmetrie des Direct-Lit-Backlights kein wesentlicher Unterschied zum horizontalen Querschnitt zu erkennen.

Bei der folgenden Betrachtung des vertikalen Querschnitts des Edge-Lit-Backlights ist direkt ein viel größerer Bereich des Displays durch das Licht einzelner LEDs beleuchtet. Dies liegt maßgeblich an der Richtung des Querschnitts parallel zur Ausbreitung des Lichtes der LEDs. Dadurch verteilt sich das Licht über die gesamte Höhe des Displays und erreicht an vielen Stellen schon hohe Werte. Ein Grund dafür ist die deutlich geringere Anzahl der LEDs bei Edge-Lit-Displays im Vergleich zu Direct-Lit-

Displays. Aber auch die gravierend unterschiedliche Light-Spread-Funktion (vgl. Abschnitt 3.1) lässt, durch die stärker Beleuchtung großer Displayteile, das Halo bei solchen Displays ausgeprägter erscheinen [Ich10]. Zum Vergleich ist das resultierende Backlight des bereits in Abbildung 4-9 gezeigten Bildes in Abbildung 4-17 dargestellt.

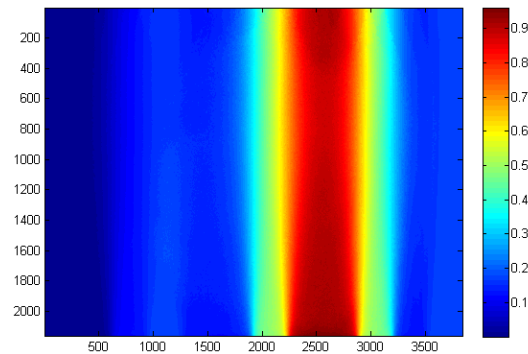


Abbildung 4-17: Resultierendes Backlight eines Edge-Lit-Display mit LEDs an der unteren Displaykante für das in Abbildung 4-9 gezeigte Beispielbilder

Auch hier ist zu erkennen, dass ein deutlich größerer, im Originalbild eigentlich dunkler, Bildbereich durch den hohen Wert der zu dem hellen Objekt gehörenden LED zu stark hinterleuchtet wird. Da die LEDs, welche Einfluss auf das helle Objekt haben, am unteren Rand des Displays sitzen, ist es sogar fast zwangsläufig der Fall, dass am Displayrand sogar mehr Hintergrundlicht erzeugt wird, als direkt hinter dem hellen Objekt, wo die Helligkeit benötigt wird. Dies geschieht hier, wie zumeist bei Edge-Lit-Displays, nicht nur an der Kante an der die LEDs angebracht sind, sondern durch Spiegelungen des Lichtes, auch an der gegenüberliegenden Kante. Dies wird in Abbildung 4-18 wiederum durch einen, diesmal senkrechten, Querschnitt durch den Mond veranschaulicht.

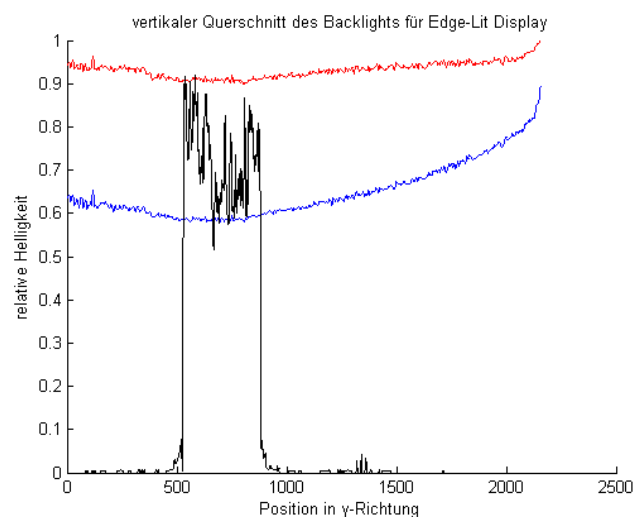


Abbildung 4-18: Verdeutlichung des Halos bei einem Edge-Lit-Backlight (vertikaler Querschnitt). Schwarz: TFT-Wert, Rot: Backlight, Blau: Backlight einer LED

Wie bereits beim Direct-Lit-Display gesehen, wird auch bei dem hier betrachteten Edge-Lit-Display mit LEDs an der unteren Display-Kante, in den dunklen Bildbereichen zu viel Helligkeit erzeugt. Um allerdings ein Clipping in diesem hellen Bereich zu vermeiden, ist es unerlässlich, diese hohe Helligkeit zu erzeugen, denn bereits durch die eine LED mit dem größten Einfluss im Bereich des Mondes wird die Helligkeit dort signifikant erhöht.

Während das Halo bei Direct-Lit-Displays, abhängig von der Light-Spread-Function des betrachteten Displays, nur in unmittelbarer direkter Umgebung heller Bildinhalte auftritt, ist dies für den Betrachter weniger störend. Das Auge ist beim Betrachten dieser Stelle auf die hohe Helligkeit, hier des Mondes, eingestellt und kann die kleinen Unterschiede in den dunklen Pixeln der umliegenden Bereiche nicht auflösen. Anders sieht dies beim Edge-Lit-Display aus; in unmittelbarer Umgebung des Mondes ist die Helligkeitsauflösung des Auges zwar ebenfalls beeinflusst, allerdings werden die in der Helligkeit erhöhten dunklen Pixel, in diesem Bild besonders am unteren Rand, vom Betrachter als besonders störend wahrgenommen, wenn er sich ausschließlich diesem Bildbereich widmet. Bei Displays mit besonders hohem Light-Leakage kann dies so weit führen, dass die aus dem Light-Leakage resultierenden Helligkeitsunterschiede in dem Lichtkegel der betreffenden LED höher sind als die Helligkeitsunterschiede benachbarter Pixel im Originalbild. Dies führt unter anderem zu einem Verlust von Details in diesem Bildbereich und die Aufmerksamkeit des Betrachters wird komplett auf den zu hellen Lichtkegel der hohen LED gelenkt. Um diesen Effekt zu reduzieren, wurden mehrere Ansätze entwickelt, die LED-Verteilung gleichmäßiger zu berechnen, ohne dass das erzielte Power-Saving zu sehr beeinträchtigt wird. Auf einige dieser Erweiterungen des SSC-Algorithmus wird im folgenden Abschnitt näher eingegangen. Hierbei steht stets im Vordergrund, ein möglichst hohes Power-Saving zu erreichen und die Bildqualität zu verbessern. Im Rahmen dieser Arbeit wird hierbei besonders auf die Unterdrückung des Halo-Artefakts bei Edge-Lit-Displays eingegangen.

4.2.3 Maßnahmen zur Reduzierung des Halo-Artefakts

Wie bereits in Abschnitt 4.2.2 gezeigt, können bei Edge-Lit-Displays leicht Halo-Artefakte entstehen. Als Ursache wurde ebenfalls in Abschnitt 4.2.2 bereits ein zu hoher Gradient in dem durch die gedimmte LED-Verteilung entstehenden Backlight festgestellt. Maßnahmen, um das Halo zu reduzieren, zielen daher stets auf eine Verringerung des Helligkeitsgradienten im Backlight ab. Diese Helligkeitsgradienten im Backlight lassen sich auf unterschiedliche Weise beeinflussen: Eine erste Möglichkeit findet sich in einer Anpassung des Light-Guides, welcher das von den LEDs emittierte Licht über die Fläche des Displays verteilt. Da in dieser Arbeit ein besonderes Augenmerk auf Edge-Lit-Displays liegt, wird im Folgenden das Halo-Verhalten von Direct-Lit-Displays nicht weiter behandelt, da auch die im Folgenden vorgestellten Eingriffe in die Modellierung des Light-Guides für Direct-Lit-Displays nicht zielführend sind. Dies lässt sich erklären, da Halo bei Direct-Lit-Displays entsteht, weil eine zu geringe Anzahl LEDs in der Hintergrundbeleuchtung verbaut ist. Dadurch ist es nie genau möglich, die Übergänge zwischen hellen und dunklen Bildbereichen, insbesondere wenn es sich um runde Objekte handelt, genau abzubilden. Vereinfacht lässt sich daher an dieser Stelle sagen,

dass eine Verringerung des bei Direct-Lit-Displays auftretenden Halos durch eine Erhöhung der LED-Anzahl, bzw. einer höheren LED-Dichte im Backlight entgegengewirkt werden kann.

Im Gegensatz zu Direct-Lit-Displays erscheint die Reduzierung des Halos bei Edge-Lit-Displays schwieriger; dies liegt am Grundprinzip der Beleuchtung des Displays. Anders als bei Direct-Lit-Displays, gibt es bei Edge-Lit-Displays nicht zwangsläufig zur LED gehörende, festgelegte Pixelbereiche und die LEDs beleuchten meist deutlich größere Flächen des Displays, als dies bei Direct-Lit-Displays der Fall ist. Dies liegt unter anderem daran, dass in Edge-Lit-Displays deutlich weniger, separat ansteuerbare LEDs verbaut werden. Im Gegensatz zu Direct-Lit-Displays ist bei Edge-Lit-Displays eher ein Erhöhen des Halos mit Erhöhen der LED-Anzahl zu erwarten. Dies lässt sich durch die geänderte Form der Light-Spread-Function erklären, da diese mit mehreren LEDs deutlich steiler modelliert werden kann. Daher stellt die Variation des Light-Guides eine erste Maßnahme zur Reduzierung des Halos dar. Der Light-Guide (vgl. Kapitel 2.3) ist eine dünne Folie im Aufbau des LC-Displays, welche für die Verteilung des von den LEDs emittierten Lichts über das Display verantwortlich ist. Der Light-Guide entscheidet hierbei maßgeblich über die Form der resultierenden Light-Spread-Function. So kann, je nach Art des Light-Guides, ein eher schmaler oder breiter Lichtkegel entstehen (vgl. Abbildung 4-19).

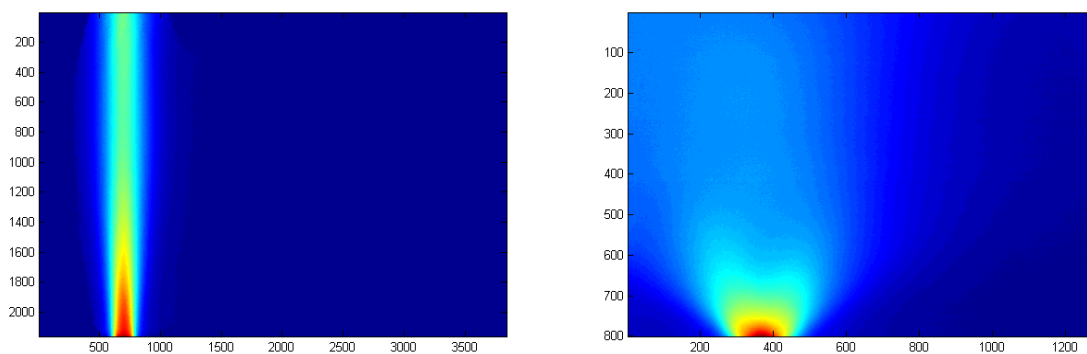


Abbildung 4-19: Unterschiedliche Light-Spread-Functions durch unterschiedliche Light-Guide; links eine schmale LSF (Display mit 24 LEDs an der langen Seite); rechts breite LSF (Display mit 12 LEDs an der langen Seite)

Es lässt sich hier leicht erkennen, dass das Halo bei der schmalen LSF nur einen kleineren Bereich des Displays erfüllt, daher aber deutlich höhere Gradienten aufweisen kann. Bei dem Display mit der rechten Light-Spread-Function wird das Halo mehr über das Display verteilt, und fällt in der Regel geringer aus, da sich die Einflüsse mehrerer LEDs in vielen Bereichen des Displays überschneiden und somit der Crosstalk der einzelnen LEDs besser genutzt werden kann.

In der Praxis stellt die Änderung des Light-Guides in der Regel keine befriedigende Lösung des Halo-Problems dar, da meist nach Local-Dimming-Lösungen für bereits realisierte Displays gesucht wird. Ein nachträgliches Ändern des Light-Guides ist in diesen Fällen nicht möglich; daher wird im weiteren Verlauf dieses Abschnitts auf Maßnahmen eingegangen, welche sich bei bereits fertig entwickelten Displays noch umsetzen lassen. Die Optimierung des Light-Guides wird in Kapitel 7 nochmals

aufgegriffen, um zu untersuchen, welche Light-Spread-Functions am besten für Local-Dimming geeignet sind.

Eine Möglichkeit der Reduzierung des Halos wurde auch schon in [Jun13] und [Alb11] vorgestellt. Die dort gezeigten Methoden hatten aber stets den Nachteil, dass die nötige Korrelation der Bildinhalte komplexe Algorithmen zur Folge hatte, und somit nicht Hardware-sparend implementiert werden konnten. Im Folgenden werden Hardware-sparende Alternativen aufgezeigt.

Begrenzung der Abweichung zwischen benachbarten LEDs

Die erste Maßnahme zur Reduzierung des Halo-Artefakts liegt in einer Verringerung des Helligkeitsgradienten, der durch das Dimming entstandenen Hintergrundbeleuchtung. Dies lässt sich am einfachsten mit Begrenzungen zwischen benachbarten LEDs realisieren, da es einfach ersichtlich ist, dass hohe Sprünge in der LED-Verteilung auch hohe Gradienten im resultierenden Backlight hervorrufen. Hierfür gilt die Formel:

$$LED_{n\pm 1} * \frac{1}{c_s} < LED_n < LED_{n\pm 1} * c_s \quad (4-4)$$

Hierbei gilt LED_n als die betrachtete LED und c_s ist ein gewählter Faktor. Dieser Ansatz führt in Abhängigkeit des Faktors c_s zu teilweise stark reduzierten Halo Artefakten. Speziell für den Sonderfall $c_s = 1$ (Global-Dimming) verschwindet der Halo komplett. Allerdings werden in diesem Fall, sofern ein heller Bildinhalt im Bild vorhanden ist, alle LEDs sehr weit auf das gleiche Level erhöht. In diesem Fall ist dann zwar kein Halo mehr zu erkennen, aber der Schwarzwert des Bildes leidet ebenfalls drastisch, da auch viele LEDs erhöht werden, welche nicht zwangsläufig zum Ausleuchten des Bildinhaltes benötigt werden, sondern nur erhöht werden, um die Bedingung zur Vermeidung des Halos einzuhalten. Ebenfalls führt ein Faktor von 1 dazu, dass das Power-Saving des Bildes sich stark reduziert. Andernfalls besitzen zu hoch gewählte Faktoren nicht das Potential, die auftretenden Halo-Artefakte ausreichend stark zu unterdrücken. In der Praxis haben sich hierbei für Long-Edge-Displays Faktoren von ca. 1,5 – 1,8 als gute Wahl herausgestellt. Für Short-Edge-Displays muss aufgrund der meist geringeren LED-Anzahl der Faktor etwas geringer gewählt werden; es haben sich Werte von ca. 1,3- 1,5 als gut herausgestellt. In Abbildung 4-20 ist eine Aufnahme eines Long-Edge-Displays zu sehen. Die linke Seite der Abbildung zeigt das Problem des starken Halos ohne Nutzung eines Faktors zur räumlichen Filterung der LED Werte. Besonders im Bereich der Schnauze und des Auges des Hundes ist eine sehr starke Halo-Bildung zu sehen. In der rechten Hälfte der Abbildung 4-20 wurde der Faktor auf 1,4 gesetzt. Hier ist immer noch bei genauer Betrachtung ein leichtes Halo-Artefakt zu erkennen; allerdings wird dieses vom Betrachter deutlich weniger wahrgenommen.



Abbildung 4-20: Verringertes Halo durch LED Faktoren; links starkes Halo ohne Faktoren; rechts: stark reduziertes Halo bei einem Faktor von 1,4 [Gru16]

Die dazugehörige Verteilung der LED-Werte ist in Abbildung 4-21 nochmals dargestellt. Auch hier ist deutlich zu sehen, dass sich die Helligkeit des Backlights bei Nutzung des Faktors deutlich sanfter entlang der Displaykante ändert.

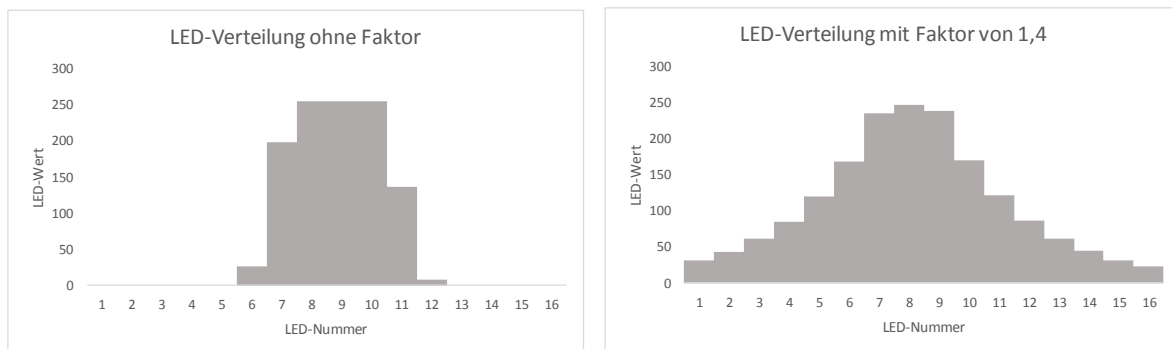


Abbildung 4-21: LED-Verteilung des gedimmten Bildes; links: ohne LED Faktor; rechts: LED Faktor von 1,4

Allerdings ist auch zu sehen, dass die LEDs am linken und rechten Bildrand, bei Verwendung des Faktors, noch leicht eingeschaltet sind. Dies geht besonders bei dieser Aufnahme des schwarzen Hundes stark zu Lasten des im Bild erreichbaren Kontrastes. Ein weiterer Nachteil dieser Methode ist das reduzierte Power-Saving, was auch bereits an der LED-Verteilung aus Abbildung 4-21 leicht zu erkennen ist. Der Algorithmus erreicht bei diesem Bild, beispielsweise ohne Nutzung der LED-Faktoren, ein Power-Saving von 72%; mit den genutzten Faktoren von 1,4 sinkt das erreichte Power-Saving deutlich auf 57%.

In der Praxis haben sich die LED-Faktoren stets positiv auf das erzielte Ergebnis ausgewirkt, so dass in fast allen implementierten Algorithmen ein Faktor zwischen den LEDs gewählt wurde. Die Vorteile der Methode überwiegen hierbei meist deutlich gegenüber den bereits oben erwähnten Nachteilen, wie einem schlechteren Kontrast, sowie einem schlechteren Power-Saving. In den meisten Fällen steht, vor allem bei großen TV-Geräten mit Edge-Lit-LED-Anordnungen, die visuelle Qualität des Displays mehr im Vordergrund, als ein etwas höheres Power-Saving. Die mit dieser Maßnahme einhergehende Kontrastverschlechterung, in Bezug auf ein Dimming ohne Faktoren zwischen den

LEDs, lässt sich auf das bereits in 4.2.1 eingeführte Clouding zurückführen und stellt somit eine hardwarebedingte Displayeigenschaft (Light-Leakage) dar, welche algorithmisch nicht komplett behoben, aber im Vergleich zum ungedimten Bild deutlich verbessert werden kann.

Die einzige Möglichkeit, den Schwarzwert an den Seiten des Bildes zu erhalten, besteht darin, den Maximalwert in der Bildmitte zu reduzieren. Dies erfolgt in der Regel durch Anpassungen am Condenser (vgl. Abschnitt 3.4.2). Der Einsatz des Mittelwert-Condensers statt des Maximalwert-Condensers senkt besonders in diesem Bild die Helligkeit in der Bildmitte stark ab. Dies ermöglicht zwar eine Reduzierung des Halos an den Bildrändern, der Kontrast wird hierdurch allerdings auch nicht zusätzlich erhöht.

Eine Besonderheit dieser Methode besteht bei Displays mit LEDs an mehreren Kanten wie z.B. an zwei sich gegenüberliegenden langen oder kurzen Displaykanten. In diesem Fall ist es nicht zielführend, LED-Faktoren zwischen allen LEDs festzulegen. So ist eine Inhomogenität, ausgelöst von stark unterschiedlichen, sich gegenüberliegenden LEDs vom Auge nicht als das typisches Halo-Artefakt wahrnehmbar. Dies entspricht wiederum eher einem sichtbaren Light-Leakage und somit einem Clouding an der Displayseite, an welcher die LEDs über hohe Werte verfügen. Da bei sich gegenüberliegenden LEDs der LED-Faktor keinen Vorteil bringt, kann auf ihn an diesen Stellen, also an den Übergängen zwischen den LED-Nummern, welche den Sprung von der einen zur anderen Displayseite repräsentieren, verzichtet werden. Somit ist es möglich, durch die Entkopplung der einzelnen Displayseiten, den Kontrast an zumindest einer Displayseite weiterhin hoch zu halten und das Power-Saving dadurch zu erhöhen.

Da im Algorithmus stets alle LEDs nur durch ihre Nummer, nicht aber durch ihre absolute Position im Display, repräsentiert sind, wurde ein weiterer Vektor mit der Länge der LED-Nummer-Übergänge eingeführt, welcher durch ein binäres Setzen der einzelnen Positionen angibt, ob der gewählte LED-Faktor für den Übergang zwischen den LEDs gilt. Somit ist es möglich, jederzeit jeden LED-Übergang zwischen allen LEDs im Display zu unterbrechen.

Globaler, minimaler LED-Wert zur Verringerung des Halos

Da es insbesondere bei niedrigen LED-Werten zu hohen relativen Unterschieden zwischen benachbarten LEDs kommt, und diese oft als besonders störend wahrgenommen werden, bietet es sich an, die relativen Unterschiede zwischen benachbarten LEDs zu verringern. Die einfachste Möglichkeit hierzu besteht in einem leichten Erhöhen aller LED-Werte, was unmittelbar die relativen Unterschiede verringert. In einer Hardware-Implementierung entspricht dies dem Setzen eines globalen, minimalen LED Wertes für alle LEDs des Displays.

Dies reduziert, wie es scheint, wieder das zu erreichende Power-Saving; allerdings ist der Effekt des reduzierten Power-Saving deutlich geringer als vermutet. Dies liegt an der Ausnutzung des Crosstalks im SSC-Algorithmus (vgl. Abschnitt 3.4.3). Durch den speziell angepassten Ablauf des SSC-Optimierers kann so bei der Berechnung der erforderlichen LED-Werte bereits die Helligkeit berücksichtigt werden, was auch besonders in den hellen, für das Entstehen eines Halos kritischen Bereichen eines

Bildes schon für eine Grundhelligkeit sorgt. Als sinnvoller Wert des globalen LED-Minimums hat sich ein Minimalwert in der Größenordnung von 10% des maximalen LED-Wertes herausgestellt. Somit gilt stets:

$$LED_n \geq LED_{min} \quad (4-5)$$

Durch den minimalen LED-Wert von 10% ergibt sich hier direkt eine maximale Kontrasterhöhung um den Faktor 10, was allerdings bereits einer hohen Kontrasterhöhung entspricht, welche, bedingt durch weitere Parameter des Local-Dimmings, ohnehin nur selten erreichbar wäre.

Wie bereits erwähnt, ist es hierbei wichtig, den minimalen LED-Wert bereits als Initialwert für die Berechnung des Backlights im SSC-Optimierer zu verwenden. Eine nachgelagerte Erhöhung aller LEDs nach der Berechnung der Dimming-Verteilung auf diesen Minimalwert kann nur zu unzureichenden Ergebnissen führen, da in diesem Fall der Crosstalk nicht mehr ausgenutzt werden kann, und die gewonnenen Verbesserungen in der Homogenität und der Reduzierung des Halos zu Lasten des Power-Savings und somit auch des Schwarzwertes gehen.

Der minimale LED-Wert ist besonders bei statischen Bildern sinnvoll, welche über mehrere helle Spots im Bild verfügen und somit eine sehr wellenförmige LED-Verteilung erzeugen würden. Beispiele hierfür sind z.B. Sternenhimmel oder funkelnde Wasserflächen unter Sonnenlicht. Ein weiteres Beispiel anhand eines Bildes mit Planeten ist in Abbildung 4-22 zu sehen.

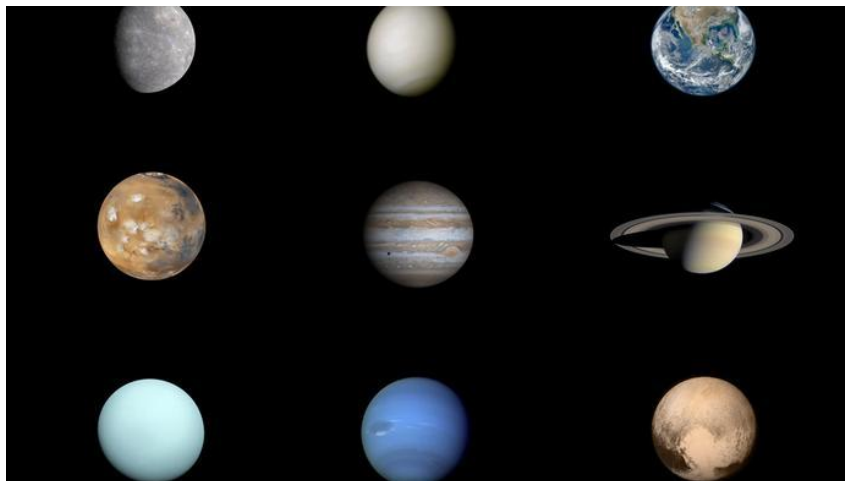


Abbildung 4-22: Beispielbild zur Betrachtung der Vorteile des globalen, minimalen LED-Wertes

Betrachtet wird weiterhin das Display mit der bereits in Abbildung 4-20 gezeigten, sehr schmalen LSF eines Displays mit 24 LEDs an der unteren Displaykante. Die dadurch entstehende Helligkeitsverteilung ist in Abbildung 4-23 dargestellt.

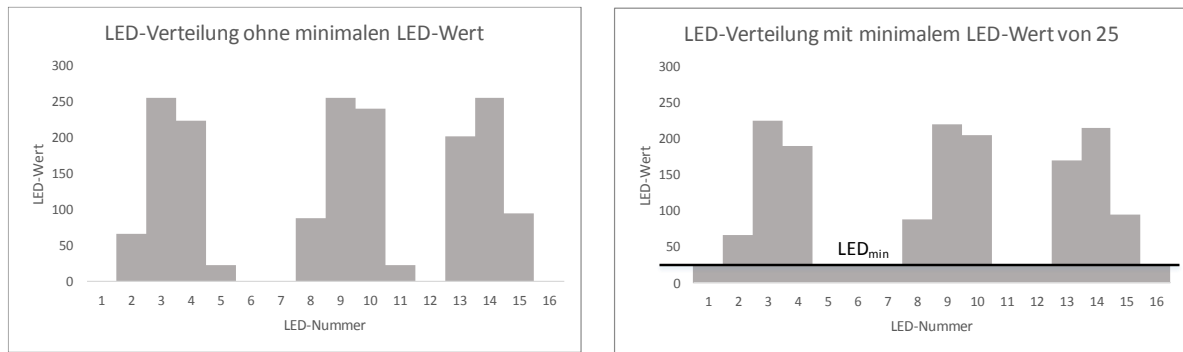


Abbildung 4-23: LED-Verteilung für Abbildung 4-22; links: Ohne minimalen LED-Wert; rechts: 10% minimaler LED-Wert (25)

Es ist zu erkennen, dass auch durch diese Maßnahme der Halo reduziert werden kann, da vor allem die Differenz zwischen hellen und dunklen Backlight-Helligkeiten deutlich reduziert werden kann. Besonders durch das gezielte Erhöhen aller LEDs zu Beginn des SSC-Optimierers geht dies unter Umständen kaum zu Lasten des Power-Savings, da die von den LEDs auf dem Minimalwert erzeugte Helligkeit im Algorithmus berücksichtigt wird, und auch, wie hier ersichtlich, der Maximalwert der den hellen Bildbereichen zugeordneten LEDs reduziert werden kann. So wird in diesem Fall ohne minimalen LED-Wert ein Power-Saving von 42% und mit dem gezeigten Minimalwert von 10% des maximalen LED Wertes ein Power-Saving von 40% erreicht.

Gegenüberstellung von LED-Faktoren und globalen, minimalen LED-Werten

Bei den Implementierungen in verschiedenen Prototypen hat sich eine Kombination aus beiden Ansätzen als sinnvoll erwiesen. Der Effekt des globalen, minimalen LED-Wertes ist hierbei besonders für Displays mit Light-Spread-Functions geeignet, welche das Licht eher in breiteren Kegeln über das Display verteilen. In diesem Fall erhöht sich das Crosstalk-Licht, das eigentlich für das aktuelle Bild nicht benötigten, aber trotzdem durch die auf Minimalwert erhöhten LEDs, auf die hellen Bildbereiche und lässt es somit zu, die hellen LEDs etwas abzdunkeln. Bei sehr schmalen Light-Spread-Functions stößt der Ansatz der globalen Minimalwerte schnell an seine Grenzen, da in solchen Fällen der Crosstalk zwischen benachbarten LEDs nicht sehr groß ist, und die LEDs, die die hellen Bildbereiche abdecken müssen, trotzdem stark erhöht werden müssen. Dies führt dazu, dass weiterhin ein starker Halo sichtbar ist, da es für das Auge nicht zu unterscheiden ist, ob die dunklen Bereiche nur auf dem globalen Minimalwert, welcher stets immer noch einen sehr niedrigen Wert darstellt, oder komplett auf null liegen.

In diesen Fällen ist der Einsatz der Faktoren zwischen den LEDs unerlässlich, da nur mit dieser Methode sichergestellt werden kann, dass die dunklen LEDs genügend erhöht werden, um auf jeden Fall einen Halo zu vermeiden. Auch hier liegen die Probleme meist bei Displays mit Light-Spread-Functions die sehr schmal sind. Mithilfe der Faktoren können diese aber gehandhabt werden;

lediglich der gewählte Faktor muss dann noch niedriger gewählt werden, was, wie bereits genannt, deutlich zu Lasten des Power-Savings und des Kontrastes geht.

Die minimalen LED-Werte wurden bereits hier für statische Bilder eingeführt; ihr volles Potential entfalten sie aber erst bei der Betrachtung bewegter Bildinhalte, sowie bei der Darstellung künstlicher Bilder. Zur optimalen Darstellung solcher Inhalte ist eine Erweiterung der hier genannten Maßnahmen unerlässlich, worauf in den Kapiteln 5 und 6 noch genauer eingegangen wird. Weiterhin wird in Kapitel 7 eine Empfehlung gegeben, wie eine für Local-Dimming optimale Light-Spread-Function aussehen sollte.

4.3 Einhalten der Farbtreue und des Farbraumes

Ein wichtiger Aspekt lokal gedimmter Bilder ist die Einhaltung der Farbtreue. So lassen sich bei gedimmten Bildern immer wieder starke Farbabweichungen beobachten, die meistens besonders in dunklen Bildbereichen entstehen. Oftmals werden diese Farbabweichungen von Betrachtern nicht richtig wahrgenommen, da in den meisten Fällen ein direkter Vergleich zwischen gedimmtem und ungedimmtem Bild fehlt. Aus diesem Grund wurden mehrere Experimente zur Einhaltung der Farbtreue durchgeführt und somit wurden, mit Hinblick auf diese Arbeit, auch die möglichen Ursachen dieser Farbabweichungen deutlich.

Als Motivation dieser Thematik sei hier vorweg zu nennen, dass das menschliche Auge sehr empfindlich auf geringe Farbänderungen in eng benachbarten Bereichen reagiert. Dies führt sogar soweit, dass Produktionsschwankungen im Herstellungsverfahren von Versuchspersonen wahrgenommen werden können. Dies wurde am Lehrstuhl für Mikroelektronik mittels zweier identischer TV Geräte des Herstellers Hisense ermittelt, welche nebeneinander positioniert wurden. Hier war es für mehrere Betrachter leicht möglich, unterschiedliche Färbungen in den dargestellten Bildern zu erkennen.

Die in dieser Testumgebung sichtbaren Farbunterschiede resultieren aus unterschiedlichen Herstellungsschwankungen, sowie Schwankungen in der Materialqualität des LC-Materials. Eine weitere Ursache zur leicht unterschiedlichen Farbwahrnehmung kann eine neuere Firmware in der TV-Hardware sein, welche besonders in der Gamma-Kurve, aber auch in weiteren Parametern, leicht abweichen kann. Von außen ist eine neuere Version der TCON-Firmware meist nicht ersichtlich, was dazu führt, dass im Folgenden für Tests der Farbverschiebung stets das gleiche Display, einmal im gedimmten und einmal im ungedimmten Zustand, zum Vergleichen verwendet wird.

Aufgrund der geringen Akzeptanz von Farbverschiebungen wurden die Ursachen einer solchen Verschiebung in vom SSC-Algorithmus prozessierten Bildern systematisch untersucht. Die vom SSC-Algorithmus prozessierten Bilder stehen hier beispielhaft für alle lokal gedimmten Bilder, da die Ursachen immer identisch sind. Hierbei stellen sich mehrere Quellen der Verschiebung dar, von denen einige systembedingt sind, andere wiederum durch geeignete Änderungen des Algorithmus verbessert werden können. Im Folgenden werden einige dieser Ursachen und mögliche Verbesserungen zur Vermeidung dieser aufgeführt.

4.3.1 Begrenzte Auflösung zur Kompensation

Ein wichtiger Punkt im SSC-Algorithmus stellt die Pixel-Compensation dar (vgl. Abschnitt 3.4.4). Bei der Pixel-Compensation muss für ein gegebenes Backlight der richtige Transmissionswert des kompensierten Pixels berechnet werden. Hierfür gilt:

$$t_{i,j} = \frac{p_{i,j}}{b'_{i,j}} \quad (4-6)$$

Hiermit ergibt sich die neue Transmission eines Pixels $t_{i,j}$ aus dem Quotienten aus dem ursprünglichen Pixelwert $p_{i,j}$, sowie dem berechneten relativen Backlight $b'_{i,j}$. Das Backlight wird hierbei stets relativ zum maximalen Backlight betrachtet. Bei der Nutzung reeller Zahlen für alle drei angegebenen Variablen, stellt die Pixel-Compensation kein Problem bezüglich Rundungsfehlern oder zu geringer Auflösung dar. Beim Local-Dimming allerdings handelt es sich um Algorithmen, welche möglichst zur Laufzeit ausgeführt werden sollen. Somit sind stets hohe Anforderungen an die Prozessierzeit und die maximale Frequenz des Algorithmus gestellt. So sollen beispielsweise auch hochaufgelöste Bilder mit mindestens 50Hz wiedergegeben werden können. Ein weiterer Punkt ist die begrenzte Komplexität des Algorithmus. Da die meisten Displays heute auf dem freien Markt sehr preisgünstig gehandelt werden, dürfen die Zusatzkosten für einen Dimming-Chip nicht zu hoch ausfallen. Aus diesem Grund ist stets auch auf die Hardwarekomplexität des Algorithmus zu achten. In Abbildung 4-24 sind die Auflösungen, des in dieser Arbeit verwendeten Algorithmus, für die drei hier gezeigten Größen gezeigt.

Variable	Bitbreite
$t_{i,j}$	16 Bit
$p_{i,j}$	16 Bit
$b'_{i,j}$	16 Bit

Abbildung 4-24: Bitbreiten der zur Kompensation benötigten Variablen

Da die Auflösung, besonders für $t_{i,j}$, über den gesamten Definitionsbereich linear ist, kann es somit bei der Berechnung der Kompensation, insbesondere in dunklen Bildbereichen zu wahrnehmbaren Abbildungsfehlern kommen, da für das menschliche Auge in diesem Bereich Helligkeitsunterschiede besonders stark wahrgenommen werden. Auch mit Hinblick auf die inverse Gamma-Korrektur, welche vor der Bildausgabe erfolgt (vgl. Abschnitt 3.3), ist die Auflösung der Transmission eines Pixels nach der Kompensation im dunklen Bereich besonders kritisch, da die inverse Gamma-Kurve hier besonders steil ist (vgl. Abschnitt 4.3.2). Dies ist in der in Abbildung 4-25 gezeigten inversen Gamma-Kurve nochmals ersichtlich.

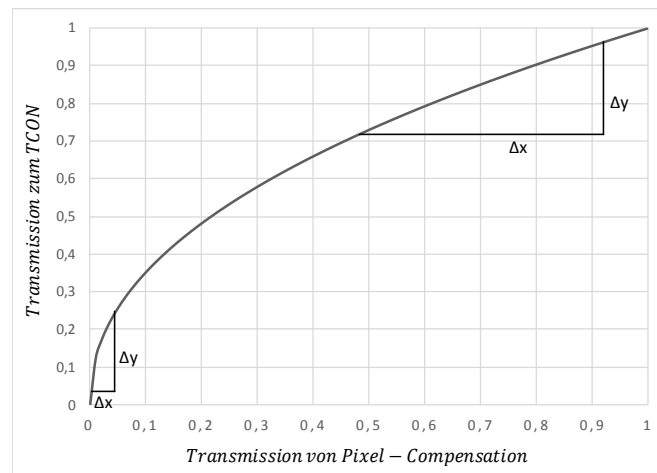


Abbildung 4-25: inverse Gamma-Kurve zur Veranschaulichung der Empfindlichkeit im dunklen Bereich

In dieser Abbildung ist zu sehen, dass bereits kleine Ungenauigkeiten im Eingangswert der inversen Gamma-Kurve zu großen Abweichungen in der Helligkeit des resultierenden Pixelwertes führen können.

Ein weiteres Problem der begrenzten Auflösung stellt das stets feste, obere Maximum des Wertebereichs dar. So ist es bei der Kompensation nur möglich, jedes Pixel auf maximal

$$2^{16} = 65536 \quad (4-7)$$

zu erhöhen. Somit ist es nicht möglich, einen Pixelwert, der mehr als 100% der Transmission erfordern würde, mit dieser Variablen zu erfassen. Es müsste eine zusätzliche Variable eingeführt werden, welche speziell den Überlauf des entsprechenden Farbkanals aufnimmt. Da aufgrund der begrenzten Komplexität des Algorithmus eine solche Speicherung zu umfangreich wäre, kann die Information über das durch den Überlauf entstandene Clipping eines Pixels bei der Kompensation nicht berücksichtigt werden. Dies ist einer der Hauptgründe für auftretende Farbverschiebungen im aktuellen Algorithmus. Da zur Kompensation für alle drei Subpixel eines Pixels die gleiche Helligkeit genutzt wird, aber die einzelnen Subpixel durchaus unterschiedliche Werte aufweisen können, kann es hierbei bei der Pixel-Compensation leicht zu Farbverschiebungen kommen. Diese treten besonders dann auf, wenn die Werte der Subpixel große Unterschiede aufweisen, und gleichzeitig das Backlight relativ dunkel ist, so dass ein hoher Kompensationsfaktor gewählt werden muss [Sch16].

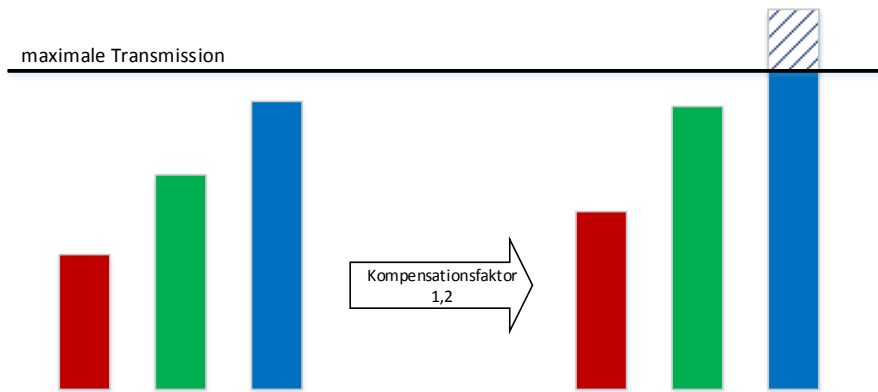


Abbildung 4-26: Farbverschiebung als Folge von Clipping: Die drei Farbwerte werden in diesem Beispiel mit einem Kompensationsfaktor von 1,2 kompensiert. Dies führt zu einem Abschneiden des blauen Subpixels am Transmissionsmaximum

In Abbildung 4-26 ist eine beispielhafte, durch Clipping entstehende Farbverschiebung in der Pixel-Compensation schematisch dargestellt. Links sind die unkompensierten, originalen Farbwerte des betrachteten Pixels dargestellt. Für die Farbwerte auf der rechten Seite wurde ein Kompensationsfaktor von 1,2 angenommen. Dieser Faktor entspricht realistischen Werten und tritt bei moderat gediminten Bildern häufig auf. In diesem Beispiel wurde ein bereits hoher Subpixelwert für das blaue Subpixel gewählt. Dies hat zur Folge, dass der Wert des blauen Subpixels nach der Kompensation die maximale Auflösung, die zur Darstellung dieses Farbkanals zur Verfügung steht, überschreitet. Dies würde theoretisch bedeuten, dass das blaue Subpixel in diesem Fall mehr Licht aus der Hintergrundbeleuchtung passieren lassen müsste, als überhaupt zur Verfügung steht. Bei Betrachtung dieses Diagramms ist es einfach zu sehen, dass in einem solchen Fall die resultierende Farbe des kompensierten Pixels einen, relativ betrachtet, deutlich geringeren Blauanteil enthält. In diesem Beispiel sind blau und grün nach der Kompensation in ungefähr gleichem Anteil in der Farbe enthalten; im Originalpixel hingegen ist ein deutlich höherer Blauanteil vorhanden.

Diese auf Clipping in der Pixel-Compensation basierende Farbverschiebung tritt besonders bei dunklen Bildinhalten, die eine dunkle, annähernd gesättigte Farbe enthalten, auf. Das Ziel des SSC-Algorithmus ist es, stets einen möglichst hohen Kompensationsfaktor zu nutzen, da dies das Power-Saving, sowie die zu erwartende Kontrasterhöhung, verbessert. Allerdings besteht bei Bildern mit diesen hohen Kompensationsfaktoren vermehrt die Gefahr, dass sichtbare Farbverschiebungen auftreten. So ist es im Extremfall möglich, dass ein Originalpixel vor der Kompensation farbig ist, aber nach der Kompensation lediglich grau bzw. farblos erscheint (vgl. Abbildung 4-27).

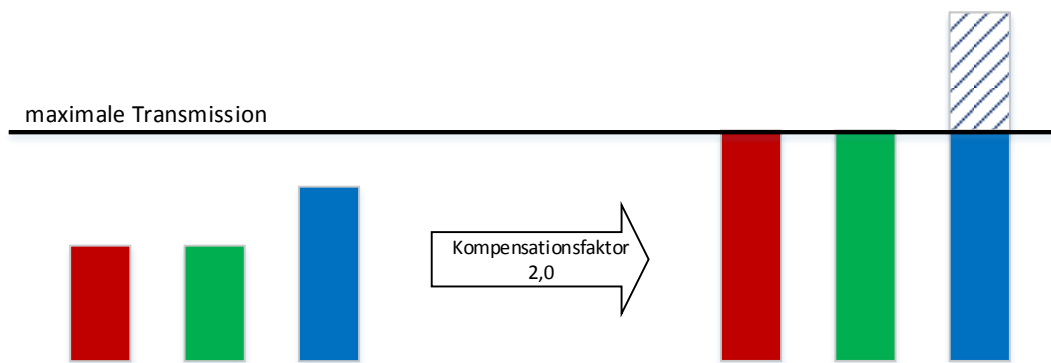


Abbildung 4-27: Verlust der Pixelfarbe nach der Pixelkompensation durch Clipping

Ein Beispiel für eine durch Clipping entstandene Farbverschiebung ist in Abbildung 4-28 dargestellt. Auf der linken Seite der Abbildung ist das Originalbild zu sehen, rechts das gedimmte Bild mit den kompensierten Pixelwerten. Es ist hierbei besonders in den dunklen Bereichen zu sehen, dass die Farben verloren gehen und vor allem der Hintergrund in einem dunklen Grau erscheint. Insbesondere an der Rückwand des Zeltes ist dies zu sehen, aber auch im Bart des Mannes ist ein deutlicher Verlust der Farbe wahrnehmbar.



Abbildung 4-28: Farbverschiebung durch Clipping: Links Originalbild: Rechts: kompensiertes Bild [Sch16]

Verringerung der durch Clipping hervorgerufenen Farbverschiebung

Nach genauer Untersuchung des Problems der Farbverschiebung durch Clipping ergibt sich unmittelbar eine erste Herangehensweise, dieses Artefakt zu umgehen. Da die Farbverschiebung stets durch das Clipping in einem oder mehreren Farbkanälen hervorgerufen wird, ist die einfachste Möglichkeit, dieses Clipping nicht entstehen zu lassen. Hierzu wurde in Kapitel 3 bereits gezeigt, dass ein gewisses Maß an Clipping in einem gedimmten Bild unerlässlich ist, um das von den Displayherstellern oft gewünschte Power-Saving zu erreichen. Hierbei handelt es sich im Idealfall um Clipping, welches vom Betrachter nicht wahrgenommen werden kann. Da die Farbverschiebung durch Clipping, wie hier beschrieben, allerdings deutlich wahrgenommen werden kann, gilt es die dadurch entstehenden Artefakte zu vermeiden. Hierzu bietet es sich an, einzelne Pixel nur so stark zu kompensieren, bis das erste Subpixel in den Bereich des Clippings eintritt. Dies führt zwangsläufig zu

einer Reduzierung des Kompensationsfaktors einzelner Pixel, was wiederum zu unterschiedlichen Helligkeiten in benachbarten, gleich hellen Pixeln resultiert. Solche pixelweise unterschiedlichen Helligkeitswerte sind, da das Auge vor allem in dem besonders fehleranfälligen dunklen Bereich besonders empfindlich ist, vom Betrachter leicht sichtbar.

Um diese kleinen, hochfrequenten Helligkeitsunterschiede zu umgehen, gibt es zwei Möglichkeiten. Die erste setzt im Condenser an, und hat als Ziel, stets genügend Helligkeit in kritischen Bildbereichen bereitzustellen, so dass keine nachträgliche Begrenzung des Kompensationsfaktors mehr nötig ist. Diese Maßnahme geht stets mit einem verringerten Power-Saving einher. Weiterhin kann die Bereits in Abschnitt 4.1.3 vorgestellte Clipping-Suppression-Funktion das sichtbare Clipping in lokalen, räumlich gefilterten Bereichen deutlich reduzieren. Durch den dadurch ebenfalls verringerten Kompensationsfaktor ist diese Methode auch gut geeignet, Farbverschiebungen in lokal gediminten Bildern zu vermeiden. Ein Beispiel hierfür ist in Abbildung 4-29 gezeigt.

Die markierte Stelle der Wand im Hintergrund lässt erkennen, dass bei der rechten Variante, in welcher der *CSF* zur Kompensation genutzt wurde, die Farbe der Wand deutlich kräftiger erscheint, als im normal kompensierten linken Bild. Weiterhin erscheint die Farbe der gesamten Wand mit Nutzung des *CSF* auch deutlich gleichmäßiger.



Abbildung 4-29: Geringere Farbverschiebung bei Nutzung von *CSF*; links: normale Pixel-Kompensation; rechts: Pixelkompensation mit *CSF* [Sch12]

Dieser Effekt kann genauso bei vielen weiteren Testbildern beobachtet werden, weshalb sich die Methode des Clipping-Suppression-Faktors als ein geeignetes Mittel zur Reduktion von Farbverschiebungen, welche durch Clipping hervorgerufen werden, eignet. Weiterhin kann durch die Nutzung des Clipping-Suppression-Faktors der normalerweise bestehende Tradeoff zwischen Clipping und Kontrast bzw. Power-Saving im Local-Dimming aufgehoben werden.

4.3.2 Farbabweichungen durch Abbildungsfehler in der Gamma-Funktion

Da, wie bereits in Abschnitt 4.3.1 dargestellt, Farbabweichungen entstehen, sobald mindestens ein Subpixel des betrachteten Pixels seine Intensität ändert, können durch ungenaue Abbildungen und

zu geringe Auflösungen der Gamma-Kurven leicht Farbverschiebungen im unteren Helligkeitsbereich entstehen.

Wie bereits in Kapitel 3 beschrieben, ist eine Gamma-Anpassung des Dimming-Algorithmus an das jeweilige Display nötig; hierzu werden zwei gespeicherte Gamma-Kurven benötigt. Zunächst wird das Originalbild mit einer Gamma-Funktion bearbeitet, um im Dimming-Algorithmus im linearen Helligkeitsbereich arbeiten zu können. In der Ausgabe des Algorithmus müssen diese linearen Helligkeitswerte wieder mit der inversen Gamma-Funktion transformiert werden, um in Kombination mit der im TCON des Displays erneut vorgenommenen Gamma-Korrektur die richtigen Helligkeitswerte zu erzeugen (vgl. Kapitel 3).

Zur Veranschaulichung sind in Abbildung 4-30 eine Gamma-Kurve (links) sowie eine inverse Gamma-Kurve (rechts) dargestellt.

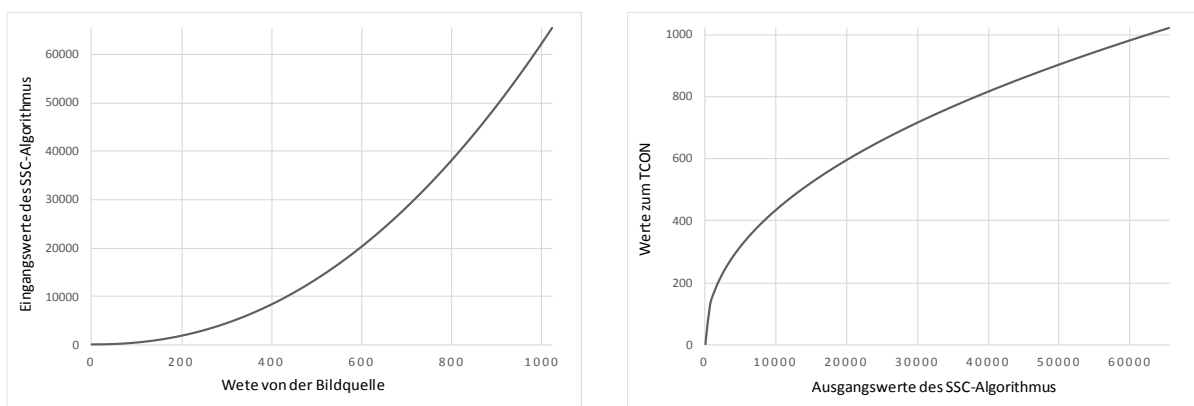


Abbildung 4-30: links: gemessene Gamma-Kurve; rechts: inverse Gamma-Kurve

Um Farbverschiebungen im betrachteten Local-Dimming-System zu vermeiden, ist es unerlässlich, dass die Gamma-Kurve des Displays exakt vermessen wird. Hierbei ist es insbesondere wichtig, die Gamma-Kurven aller drei Farben des Displays zu messen, da diese sich zum Teil erheblich unterscheiden können. Um keine Farbänderungen bei der Transformation aus dem linearen Bereich, in welchem der SSC-Algorithmus arbeitet, zum Display zu erhalten, ist es wichtig, dass die inverse Gamma-Kurve, welche auf die Ausgangswerte des Algorithmus angewendet wird, möglichst exakt die inverse Kurve der gemessenen Gamma-Kurve des Displays darstellt. Andererseits ist es ebenfalls wichtig, dass die, auf die Eingangswerte des SSC-Algorithmus angewandte Gamma-Kurve, exakt der inversen Kurve der Ausgangskennlinie entspricht. Hieraus ergibt sich zwangsläufig, dass die Eingangs-Gamma-Kurve der gemessenen Gamma-Kurve des Displays entsprechen muss. Da die Gamma-Kurve des Displays keine kontinuierliche Funktion darstellt, kann, unabhängig von der hohen Genauigkeit der Messung mittels Spectroradiometer (Photo Research PR-740 **[Pho16]**), in einer Hardwarerealisierung des Algorithmus keine Gamma-Kurve mit kontinuierlicher Auflösung hinterlegt werden. Da es bei jeder Abweichung zwischen den beiden gespeicherten Gamma-Kurven und der realen Gamma-Kurve des Displays zu Farbverschiebungen kommen kann, ist es unerlässlich, die Kurven mit einer möglichst hohen Auflösung zu speichern. Um den Speicherbedarf möglichst gering zu halten, werden im Folgenden die Speicherkosten der Gamma-Kurven analysiert, und eine

Methode vorgestellt, die den Speicherplatzbedarf besonders der inversen Gamma-Kurve erheblich reduzieren kann.

Reduzierung des Speicherbedarfs der Gamma-Kurven

Zunächst wird die Abbildung der Gamma-Kurve betrachtet. Da die Auflösung dieser Abbildung in einer Implementierung eines Dimming-Algorithmus begrenzt ist, kann es bereits bei den originalen Eingangswerten des Algorithmus zu Abbildungsfehlern kommen. Der ursprüngliche SSC-Algorithmus arbeitet mit einer Helligkeitsauflösung von 16Bit und in der Übertragung der Pixelwerte in der Display-Industrie werden meist Auflösungen von 8Bit oder 10Bit verwendet. Der am Lehrstuhl für Mikroelektronik implementierte SSC-Algorithmus setzt hier stets Eingangswerte einer Auflösung von 10Bit voraus. Der Algorithmus ist dadurch universell einsetzbar, da selbst bei Quellen mit geringerer Auflösung, durch eine Schiebeoperation der Eingangssignale, der Algorithmus ohne Verluste arbeiten kann. Bei einem auf 8Bit Eingangswerte ausgelegten Algorithmus, ist bei Eingangswerten von 10Bit und mehr stets bereits an dieser Stelle mit Auflösungsverlusten zu rechnen. Diese 10Bit Eingangswerte werden mittels der Gamma-Kurve auf 16Bit Helligkeitswerte im linearen Bereich transformiert. Die Auflösung von 16Bit ergab sich aus empirischen Betrachtungen mittels verschiedener Testreihen am Lehrstuhl für Mikroelektronik. Diese Auflösung ist besonders im unteren Helligkeitsbereich erforderlich. Der resultierende Speicherplatzbedarf beträgt:

$$2^{10} * 16\text{Bit} = 16384\text{Bit} \quad (4-8)$$

Hieraus ergibt sich im SSC-Algorithmus eine Helligkeitsauflösung von 16Bit. Wie in Abschnitt 3.4.4 beschrieben, werden diese Eingangswerte mit dem aus dem berechneten Backlight resultierenden Kompensationsfaktor multipliziert. Hieraus ergibt sich wiederum eine Auflösung des kompensierten Pixelwertes zu 16Bit. Dieser 16Bit-Wert stellt das Ausgangssignal des Algorithmus dar und muss mittels der inversen Gamma-Kurve wieder auf den für das Display verständlichen Wertebereich von 10Bit abgebildet werden. Auch hier wird im SSC-Algorithmus eine 10Bit Ausgangsgröße gewählt, da eine Verringerung um zwei Binärstellen zur Ansteuerung von Displays geringerer Farbtiefenaufklärung jederzeit verlustfrei möglich ist. Hieraus ergibt sich ein Speicherplatzbedarf der inversen Gamma-Kurve von

$$2^{16} * 10\text{Bit} = 655360\text{Bit}. \quad (4-9)$$

Da ein solch großer Speicher (40-mal größer als der Speicher, der für die Gamma-Kurve benötigt wird) nicht in kostengünstiger Hardware realisiert werden kann, wurde eine Methode entwickelt, die den Speicherplatz der inversen Gamma-Kurve so weit reduziert, dass eine Speicherung in kostengünstigen ICs oder FPGAs möglich ist, und gleichzeitig die geforderte Auflösung und Genauigkeit in allen Helligkeitsbereichen erhalten bleibt. Der Ansatz besteht darin, verschiedene Bereiche der inversen Gamma-Kurve mit unterschiedlichen Auflösungen abzuspeichern und so die

Auflösung der gesamten Abbildung bei gleichzeitig stark gesenktem Speicherplatzbedarf zu erhöhen. So ist die in Formel (4-9) genannte Genauigkeit nur im unteren Helligkeitsbereich nötig. Eine solche hohe Auflösung im oberen Helligkeitsbereich ist somit nicht nötig.

Um die Rahmenbedingungen dieser Optimierung abzugrenzen, werden an dieser Stelle zunächst einige Grundlagen, der in der Mikroelektronik verwendeten Speichereinheiten, vorgestellt. So wird ein Wert aus dem Speicher stets ausgelesen, indem die sogenannte Adresse dieses Wertes an die Eingangspins des Speichers angelegt wird. Die Länge der Adresse bestimmt hierbei die Anzahl der im Speicher ablegbaren Einträge, und somit maßgeblich die Größe des Speichers. Aus fertigungstechnischen Gründen wird die Größe eines Speichers stets durch die maximal belegbaren Einträge definiert, nicht durch die real genutzten. Aus diesem Grund entspricht die Anzahl an Einträgen eines mikroelektronischen Speichers in der Regel einer Zweier-Potenz [Bai11]. Eine weitere Bedingung, die stets gilt, ist, dass alle Einträge eines Speichers die gleiche Länge haben. Somit wurde für den SSC-Algorithmus eine maximal vertretbare Größe des Speichers zur Abbildung der inversen Gamma-Kurve ein Adressbereich von 12Bit sowie ein Wertebereich von 10Bit gewählt. Der resultierende Speicherbedarf ergibt sich zu:

$$2^{12} * 10\text{Bit} = 40960\text{Bit} \quad (4-10)$$

Dies entspricht 6,25% des ursprünglich berechneten Speicherplatzbedarfs. Durch die streng monoton steigende Form der inversen Gamma-Kurve ist es möglich, diese Kurve in mehrere Bereiche aufzuteilen, und in den einzelnen Bereichen die Auflösung zu erhöhen. Durch eine spätere Addition eines festen Offset-Wertes für jeden Bereich, sowie bei der Prozessierung festgelegte fixe Grenzen zwischen den einzelnen Bereichen, ist es möglich, trotz des stark reduzierten Speicherplatzbedarfs in den besonders kritischen, dunklen Bereichen der Kurve eine im Vergleich zur 16Bit Kurve gleiche Auflösung zu erreichen. Ergebnis dieser Prozessierung ist eine neue Kennlinie, welche die inverse Gamma-Kurve repräsentiert und in Abbildung 4-31 dargestellt ist.

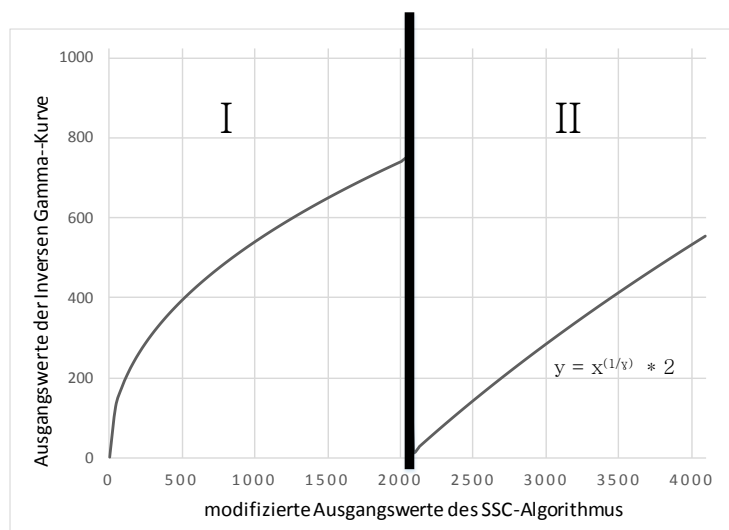


Abbildung 4-31: Abschnittsweise definierte inverse Gamma-Kurve

Es ist eine beispielhafte inverse Gamma-Kurve dargestellt, welche in zwei Bereiche (I und II) unterteilt wurde. Beide Bereiche belegen in diesem Beispiel 2^{11} Adressen des 2^{12} Adressen umfassenden Speichers. Zur genaueren Abbildung des unteren Bereiches der Kurve, werden in den unteren 2^{11} Adressen direkt die ersten 2048 Adressen der 2^{16} Adressen umfassenden inversen Gamma-Kurve gespeichert.

Hierdurch kann in diesem Bereich die Auflösung der Eingangswerte von 16Bit eingehalten werden. Dies hat zur Folge, dass die Auflösung der Eingangswerte im zweiten Bereich unter die theoretisch mögliche Auflösung des Speichers von 12Bit sinkt. Die Auflösung und Genauigkeit im zweiten Bereich ergibt sich somit zu:

$$A = \frac{2^{11}}{2^{16} - 2048} = 0,03225 \quad (4-11)$$

Dies entspricht einer Genauigkeit der Eingangswerte von 0,03225, was weniger als 5Bit entspricht, da der Großteil der 2^{16} Eingangsadressen auf den bereits halbierten reduzierten Bereich von 2^{11} Adressen abgebildet werden muss.

Durch diese Form der Speicherung ist es außerdem möglich, die Auflösung der Ausgangswerte um den Faktor zwei zu erhöhen, da in diesem Bereich für jeden Wert der Offset des Wertes an der Stelle 2047 abgezogen werden kann und somit die resultierenden Werte im zweiten Bereich immer kleiner als die Hälfte des maximalen Ausgabewertes ist. Aufgrund der monotonen Form und der flachen Steigung der inversen Gamma-Kurve im hellen Bereich, kombiniert mit der Erhöhung der Auflösung der Ausgangswerte in diesem Bereich, reicht die hier gewählte Auflösung aus, um den oberen Bereich der Kurve ausreichend genau abbilden zu können. Es wurden bei mehreren Testreihen keine Unterschiede im hellen Bereich zwischen der hier gezeigten, modifizierten Gamma-Kurve, und der voll aufgelösten Gamma-Kurve festgestellt.

Der zusätzliche Aufwand für die Adressierungslogik, der nötig ist um diese LUT der inversen Gamma-Kurve korrekt zu nutzen ist hierbei gering. Der reduzierte Wertebereich lässt sich in Hardware einfach mittels Schiebeoperationen realisieren. Hierbei ist darauf zu achten, dass nur die Adressen im zweiten Bereich geschoben werden, sowie dass der Offset zu den Eingangswerten dieses Bereiches hinzuaddiert wird und gegebenenfalls die Ausgangswerte um den Faktor 2 angepasst werden.

Das hier gezeigte Verfahren, mit der Aufteilung der inversen Gamma-Funktion in zwei Bereiche, liefert gute Ergebnisse, so dass in der Implementierung des Algorithmus eine Methode gewählt wurde, in welcher die inverse Gamma-Kurve in fünf Bereiche unterteilt werden kann. Dies ermöglicht eine ideale Anpassung der Auflösung auf die Steigung der Kurve in jedem Bereich. Durch die sehr genaue Abbildung der Gamma-Kurven konnten mit dieser Maßnahme die Farbverschiebungen der gedimmten Bilder deutlich reduziert werden, ohne den Speicherplatz zu erhöhen. Da der Algorithmus zuvor auf 16Bit Auflösungen beschränkt war, bot diese Maßnahme die Möglichkeit, die Auflösungen der Gamma-Kurven weiter zu erhöhen. So führten erste Ergebnisse einer Pixel-Compensation mit einer Auflösung von 20Bit zu guten Ergebnissen. Diese hohen Auflösungen waren

im ursprünglichen Algorithmus nicht möglich, da der Speicherbedarf für die inverse Gamma-Kurve nicht mehr in dem genutzten FPGA (Xilinx Spartan 6 bzw. Xilinx Kintex 7 **[Xil17a]**) gespeichert werden konnte. Die Vorgehensweise bei Verwendung der 20Bit Kompensation ist hierbei identisch mit der Verarbeitung der 16Bit Farbauflösung. Aufgrund des überschaubaren Speicherplatzbedarfs der Gamma-Kurve kann diese einfach in der erhöhten Auflösung gespeichert werden. Für die inverse Gamma-Kurve kann die hier vorgestellte Methode eingesetzt werden, um die hohe Auflösung in den kritischen Bereichen der Kurve zu erhalten.

Es konnte hierbei festgestellt werden, dass vor allem im dunklen Bereich, die erhöhte Auflösung der inversen Gamma-Kurve zu einer geringeren Farbverschiebung geführt hat. Da diese Verbesserungen nur bei dunklen Bildern und bei Betrachtung in einem speziellen Dunkelraum sichtbar sind, wird an dieser Stelle auf Abbildungen zu den Ergebnissen verzichtet.

4.3.3 Blickwinkel und Farben

Im Rahmen dieser Arbeit wurde weiterhin die Entwicklung der Farbdarstellung von LC-Displays in Abhängigkeit des Betrachtungswinkels untersucht. Da der Betrachtungswinkel bei LC-Displays stets von großer Bedeutung ist und oft der Kontrast bei hohen Betrachtungswinkeln stark sinkt (vgl. **[Tan16]** **[Par12]**) wurde in dieser Arbeit untersucht, wie sich die Darstellung von Farben bei gedimmten Bildern in Abhängigkeit des Betrachtungswinkels verhält.

Hierzu wurde zunächst betrachtet, wie sich der Farbton ungedimmter Bilder in Abhängigkeit des Betrachtungswinkels verändert. Es wird davon ausgegangen, dass hinreichend bekannt ist, dass das Light-Leakage eines Displays mit flacher werdendem Betrachtungswinkel stetig zunimmt **[Lue01]** **[Yeh10]**. Um die Farbverschiebungen im dunklen Bereich zu erklären, wurde für diesen Abschnitt das Light-Leakage eines TV-Gerätes des Herstellers Hisense vom Typ 50K680 gemessen. Die Messung des Light-Leakage wurde hierbei durchgeführt mit dem Photo Research PR-740 **[Pho16]**. Das betrachtete Panel, sowie ein für Farbverschiebungen im dunklen Bereich kritisches Bild sind in Abbildung 4-32 dargestellt.



Abbildung 4-32: Prototyp Hisense 50K680: Kritisches Bild für Farbverschiebungen im dunklen Bereich

Zu beachten ist, dass die in diesem Kapitel betrachtete Farbverschiebung deutlich von der durch das Dimming hervorgerufenen Farbverschiebung aus den vorherigen Abschnitten zu unterscheiden ist. Die Farbverschiebung, welche sich durch das Light-Leakage ergibt, stellt eine wesentliche Charakteristik des genutzten Displays dar und liegt in der Natur des Aufbaus eines Flüssigkristall-Displays, da es stets zu einem gewissen Light-Leakage bei eingeschaltetem Backlight kommt.

Da diese Abweichung in der Farbdarstellung unerwünscht ist, bietet sich die Möglichkeit, durch den Einsatz eines gedimmten Backlights, die Farbverschiebung gering zu halten und den zu erreichenden Farbraum dadurch vergrößern zu können. Insbesondere der stark verringerte Farbraum, bei Betrachtung unter flachen Winkeln, wird immer wieder als störend wahrgenommen. Hierzu wurde der Farbraum des Testpanels für einen Betrachtungswinkel von $22,5^\circ$ sowie für einen Betrachtungswinkel von 45° gemessen. Der Betrachtungswinkel bezieht sich hierbei auf den Winkel zwischen Betrachter und der Displaynormalen. Der Farbraum wird hierbei in der prozentualen Abdeckung des 1987 definierten NTSC-Farbraumes angegeben. So kann das hier betrachtete Panel im ungedimmten Zustand bei einem Betrachtungswinkel von 0° 102,2% dieses Farbraumes abdecken; bei einem Betrachtungswinkel von 45° lediglich noch 95,5%.

Die Ursache findet sich in dem gemessenen Light-Leakage, dessen Farbe gemessen wurde zu **[Sch15]**:

$$\begin{aligned}x &= 0,27307 \\y &= 0,22660\end{aligned}\tag{4-12}$$

Dies entspricht im CIE-Farbmodell **[CIE31]** keinem reinen weiß, sondern einem hellen blau. Dies erklärt, weshalb sich der gemessene Farbraum bei Erhöhung des Betrachtungswinkels verringert, da die beiden primären Eckpunkte des Farbraumes für grün und rot in Richtung blau wandern, was die Farbsättigung verringert.

Hierbei ist zu erwarten, dass das Light-Leakage besonders in dunklen Bildern zu starken Abweichungen der gewünschten Farbe führen kann. Für die physikalische Helligkeit eines Pixels $L_{i,j}$ gilt stets:

$$L_{i,j} = b_{i,j} * t_{i,j} + L'_{i,j}\tag{4-13}$$

Während die Helligkeit des Light-Leakage beschrieben wird durch:

$$L'_{i,j} = \frac{b_{i,j}}{K}\tag{4-14}$$

Da der Kontrast K für ein betrachtetes Display konstant ist, ist es leicht zu erkennen, dass das Light-Leakage bei ungedimmtem Backlight $b_{i,j}$ am meisten zu der Gesamthelligkeit eines betrachteten Pixels beiträgt, wenn die Transmission $t_{i,j}$ in diesem Pixel niedrig ist. Daher trägt das Light-Leakage in

diesen dunklen Pixeln auch besonders stark zur resultierenden Farbe des Pixels bei, was zu einer unerwünschten Farbverschiebung führt. Da der Kontrast für größere Blickwinkel abnimmt, tritt die unerwünschte Farbverschiebung dann besonders stark auf.

Da durch Local-Dimming das Light-Leakage, insbesondere für dunkle Bilder, verringert werden kann, wird im Folgenden der resultierende Farbraum für Grundfarben mit einer verringerten Helligkeit berechnet. Dies soll das Potenzial des Lokal-Dimmings zur Vergrößerung des Farbraumes darstellen.

Für die erste Messung wurden gesättigte Farben verwendet, welche lediglich über eine Helligkeit von 24% der maximal möglichen Helligkeit verfügen. In Abbildung 4-33 sind die abgedeckten Farbräume im CIE-Farbmodell für einen Betrachtungswinkel von 22,5° eingezeichnet. Als schwarzes Dreieck ist der ungedimmte Originalfarbraum des Displays dargestellt, da bei einer Helligkeit der Primärfarben das leicht blaue Light-Leakage einen nicht zu vernachlässigenden Beitrag zur resultierenden Farbe der Primärfarben liefert. Hierbei verschieben sich insbesondere die grüne und die rote Spitze des Dreiecks in Richtung der Farbe des gemessenen Light-Leakage. Hierzu ist in der Abbildung 4-33 auch nochmal die Farbe des Light-Leakage als weißer Kreis eingezeichnet. Anhand des roten Dreiecks ist deutlich zu erkennen, dass der Farbraum des gedimmten Displays deutlich größer wird. Insbesondere ist hier ersichtlich, dass die grünen und roten Spitzen des Dreiecks weiter nach außen gezogen werden. Im Vergleich zum 1987 definierten NTSC-Farbraum, erreicht in diesem Beispiel das ungedimmte Display eine Farbraumabdeckung von 99,15%. Im gedimmten Zustand erreicht das Display unter diesem Blickwinkel sogar einen größeren Farbraum als der 1987 definierte NTSC-Farbraum: Umgerechnet ergibt sich für das gedimmte Display ein Farbraum von 112,7% des NTSC-Farbraumes.

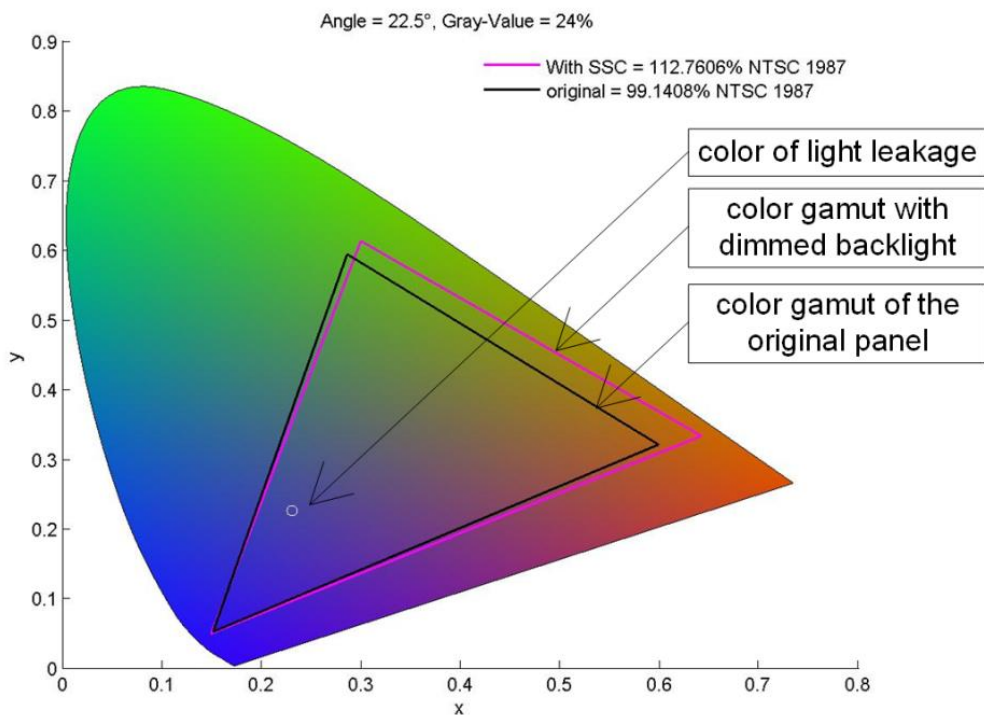


Abbildung 4-33: Durch Dimming vergrößerter Farbraum bei Betrachtungswinkel von 22,5° [Sch15]

Da erwartet wird, dass das Light-Leakage bei noch flacheren Betrachtungswinkeln weiter zunimmt, wurden die gleichen Messungen nochmals für einen Betrachtungswinkel von 45° wiederholt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4-34 dargestellt.

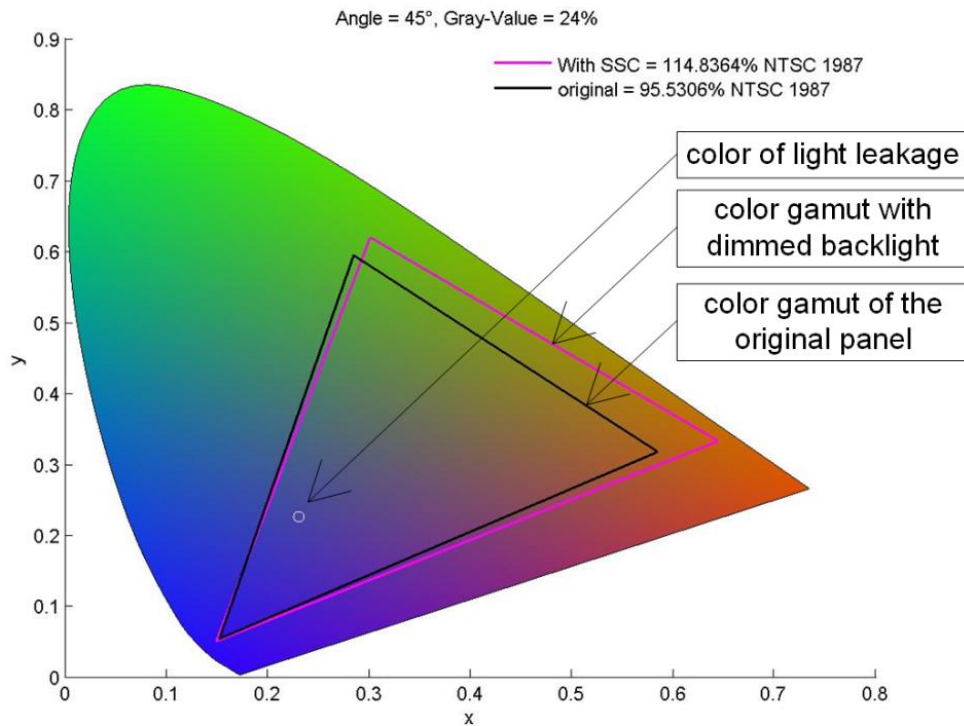


Abbildung 4-34: Durch Dimming vergrößerter Farbraum bei Betrachtungswinkel von 45° [Sch15]

Wie zu erwarten war, verringert sich durch den Einfluss des blauen Light-Leakage der im ungedimmten Zustand erreichte Farbraum weiter, so dass für diesen Betrachtungswinkel nur noch 95,5% des NTSC-Farbraumes von 1987 erreicht werden. Unter Verwendung des SSC-Local-Dimming-Algorithmus bleibt der Farbraum im Vergleich zu dem Betrachtungswinkel von $22,5^\circ$ annähernd konstant. Für den Betrachtungswinkel von 45° kann hier ein Farbraum von 114,8% des NTSC-Farbraumes von 1987 abgebildet werden.

Diese effektive Vergrößerung des Farbraumes tritt meistens bei dunklen Grundfarben auf, da hier das meist blaue Light-Leakage den größten relativen Einfluss hat. Um den Farbraum über alle Helligkeitswerte zu untersuchen, wurden diese Messungen für verschiedene Helligkeiten der Primärfarben wiederholt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4-35 dargestellt.

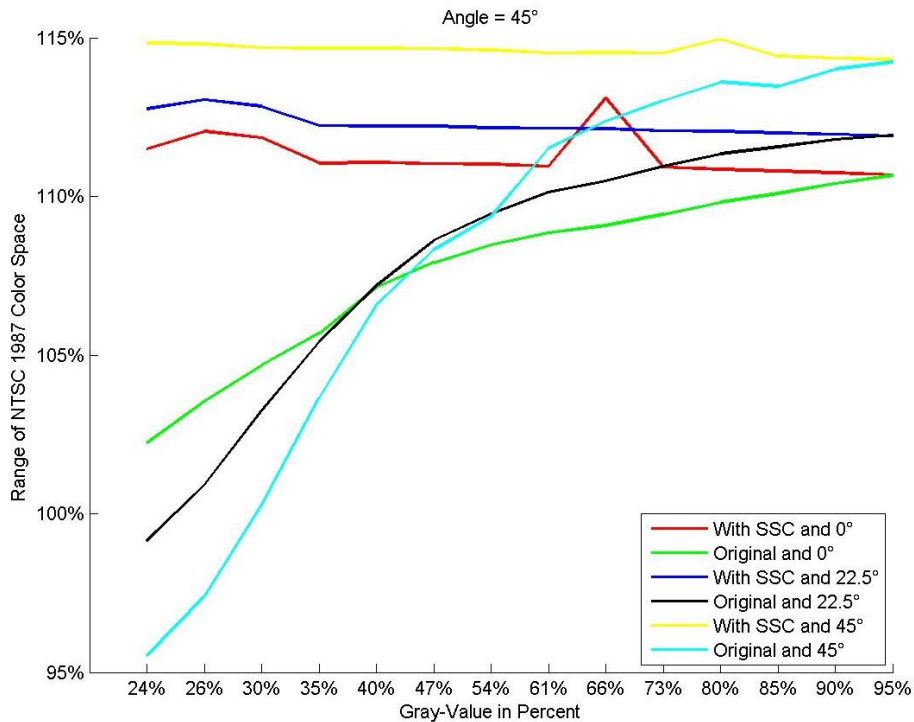


Abbildung 4-35: Konstanter Farbraum über alle Helligkeitsbereiche beim SSC-Local-Dimming Algorithmus [Sch15]

In diesem Diagramm wurde die Helligkeit der Primärfarben, welche die Ecken des Dreiecks des Farbraumes aufspannen, variiert. Die einzelnen Kurven repräsentieren die drei Blickwinkel 0°, 22,5° und 45°. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Größe des Farbraumes für Helligkeitswerte über 54% des möglichen Maximalwertes über alle Blickwinkel betrachtet nahezu konstant bleibt. Weiterhin ist zu sehen, dass der Farbraum im ungedimmten Zustand für dunklere Grundfarben stark abfällt. Diese höhere Farbsättigung ist auch in dem bereits in Abbildung 4-28 gezeigten Beispielbild zu sehen. Das gedimmte Bild erscheint hierbei deutlich rötlicher, und entspricht somit genauer den Farben der Bildquelle, welche im ungedimmten Zustand nicht exakt wiedergegeben werden konnten.

Aus diesen Gründen bietet sich der SSC-Algorithmus an, um den Farbraum bestehender Displays auch für flache Blickwinkel konstant zu halten oder sogar zu erhöhen. Dies erhöht die Qualität des dargestellten Bildes und stellt somit, neben den besseren Kontrasten und dem Power-Saving, einen weiteren großen Mehrwert des SSC-Algorithmus dar.

4.4 Ergebnisse

In diesem Kapitel wurden die kritischsten Probleme, die beim lokalen Dimmen von statischen Bildern auftreten können, dargestellt und deren Ursachen erläutert sowie Lösungen erarbeitet.

In Abschnitt 4.1.2 wurde besonders ausführlich auf die Ursachen des statischen Clippings beim Local-Dimming eingegangen und es wurde gezeigt, wie insbesondere durch die Wahl eines geeigneten Condenser-Modus bzw. durch den Einsatz der Clipping-Suppression-Function in der Pixel-Compensation dieses Clipping erheblich reduziert oder sogar vermieden werden kann. Während hierbei die Wahl des Condensers stets das Power-Saving beeinflusst, bleibt das Power-Saving beim Einsatz der Clipping-Suppression-Function stets unangetastet, da diese lediglich die Werte der Pixel-Compensation beeinflusst.

Im darauf folgenden Abschnitt 4.2 wurde das Problem des statischen Halo besprochen. Dieses Phänomen stellt insbesondere bei lokal gedimten Bildern ein großes Problem dar, da es zumeist in einem direkten Kompromiss zwischen erreichter Bildqualität, insbesondere einem hohen Schwarzwert, und dem zu erreichenden Power-Saving führt. Es wurden mehrere Verfahren zur Glättung des Backlights vorgestellt sowie deren Vor- und Nachteile diskutiert. Durch den Einsatz eines globalen, minimalen LED-Faktors sowie durch die Begrenzung der Abweichung benachbarter LEDs lässt sich der Halo im hier betrachteten SSC-Local-Dimming-Algorithmus deutlich reduzieren, ohne dass Power-Saving signifikant zu reduzieren.

Im letzten Abschnitt dieses Kapitels wurde dargestellt, dass mittels Local-Dimming der Farbraum eines Displays erhöht werden kann. Dies ergibt sich durch ein deutlich reduziertes Light-Leakage, da dies bei den meisten Displays, insbesondere bei dunklen Bildern, zu einer Farbverschiebung in Richtung blau führt. Dadurch kann Local-Dimming auch die Einhaltung der Farbtreue solch dunkler Bilder insbesondere für flache Betrachtungswinkel deutlich verbessern, in denen das Light-Leakage ansonsten besonders stark ausgeprägt ist. Weiterhin wurde gezeigt, dass es durch geschickte Anpassungen an den Gamma-Kurven möglich ist, die Farbverschiebungen in lokal gedimten Bildern äußerst gering zu halten.

Die hier gezeigten Maßnahmen führen zu deutlichen Verbesserungen in der visuellen Wahrnehmung lokal gedimmter Bilder im Vergleich zu anderen Local-Dimming-Algorithmen (z.B. **[Bho12]** **[Rip16]**). Da allerdings im seltensten Fall statische Bilder auf Displays dargestellt werden, sondern vielmehr bewegte Bildinhalte, wird im nächsten Kapitel auf die, für diese Fälle resultierenden besonderen Herausforderungen an einen Local-Dimming-Algorithmus, eingegangen.

5. Sicherstellung der Videoqualität

5.1 LED-Flickering

Ein bislang sehr großes Problem beim Betreiben von lokal gedimmben Displays mit Edge-Lit-LED-Anordnung ist ein mögliches Auftreten von LED-Flickering. Hierunter wird die schnelle zeitliche Änderung der Helligkeitswerte der LEDs verstanden. Da es die Grundlage jedes Local-Dimming-Algorithmus ist, für jedes anzuzeigende Bild die ideale LED-Verteilung zu berechnen, ergeben sich logischerweise auch für unterschiedliche Bilder unterschiedliche LED-Verteilungen. Diese Tatsache ist für das sequentielle Abspielen unterschiedlicher Bilder gewünscht und nachvollziehbar. Problematisch werden die unterschiedlichen LED-Verteilungen für schnell aufeinanderfolgende, sich gegenseitig sehr ähnlichen Bildern. Dies trifft auf die meisten Videos zu, sofern nicht gerade Übergänge zwischen verschiedenen Szenen betrachtet werden. Da Videos auf TVs oder auch Anwendungen auf Laptops und Smartphones heute mit Bildwiederholraten von ca. 30Hz bis 120Hz abgespielt werden, ergeben sich hieraus, für eine auf den Betrachter als ruhig wirkende Filmszene, bis zu 120 unterschiedliche LED-Verteilungen pro Sekunde. Da es aufgrund unterschiedlicher Bildinhalte somit zu LED-Helligkeitsbewegungen in dieser Frequenz kommen kann, ist es leicht ersichtlich, dass diese schnellen Helligkeitsänderungen vom Auge besonders stark wahrgenommen werden, da die Sensibilität des Auges hierfür hoch ist (vgl. Abschnitt 2.1.3). Im folgenden Abschnitt wird erläutert, wieso die LED-Verteilung nur leicht unterschiedlicher Bilder große Änderungen aufweisen kann, und welche Rolle die LED-Anordnung auf die Entstehung von LED-Flickering hat.

5.1.1 Ursachen des LED-Flickering für verschiedene Backlight-Arten

Bei reiner Betrachtung des Local-Dimming-Algorithmus dürfte es, wie in Kapitel 4 beschrieben, zu keinen sichtbaren Helligkeitsunterschieden in den gleichen Bereichen aufeinanderfolgender Bilder kommen, da theoretisch durch die Pixelkompensation, die von der LED erzeugte Helligkeit genau auf die geforderte Helligkeit in jedem Pixel kompensiert wird. Dass dies bei realen Prototypen nicht der Fall ist, wurde bereits in Kapitel 4 gezeigt. So sind bekannte Artefakte, welche bei einem gedimmben Bild auftreten können, z.B. Clipping, Halo oder auch eine Farbabweichung. Wie in Kapitel 4 gezeigt, treten diese Artefakte stets an den Stellen auf, wo das Bild besonders stark gedimmt wurde, was dazu führt, dass dies auch die kritischen Stellen sind, an denen es leicht zu LED-Flickering kommen kann.

Als LED-Flickering werden im Folgenden alle Artefakte bezeichnet, welche auf einer Änderung der LED-Helligkeitswerte in der Größenordnung der Bildwiederholfrequenz beruhen. Ein sich bewegender Halo, wie er im folgenden Abschnitt betrachtet wird, stellt hierbei kein LED-Flickering dar, da sich das dynamische Halo-Artefakt mit der gleichen Geschwindigkeit wie das sich bewegende Objekt bewegt, und nicht mit der Bildwiederholrate. Während sich die langsamen Bewegungen in der Backlight-Helligkeit leicht erklären lassen, wird im Folgenden beschrieben, wie es beim SSC-Optimierer zu den hochfrequenten LED-Änderungen, dem Flickering, kommt.

Um das Entstehen der unterschiedlichen Backlight-Verteilungen für ähnliche Bilder zu verstehen, ist es wichtig, die in Abschnitt 3.2 beschriebene Pixelorder, sowie den Ablauf des SSC-Optimierers zu kennen. Die wichtigste Eigenschaft zur Untersuchung dieses Problems besteht darin, dass jeder Condenser-Zelle eine feste LED zugeordnet ist, welche den größten Einfluss auf diese Zelle hat. Diese Zuordnung ergibt sich aus rein physikalischen Betrachtungen und ist zunächst vollkommen losgelöst von der Art des Backlights. In Abbildung 5-1 sind zwei dicht aufeinanderfolgende Bilder eines Videos dargestellt, in denen sich der Bildinhalt nur leicht unterscheidet.



Abbildung 5-1: Zwei dicht aufeinanderfolgende Bilder eines Videos zur Veranschaulichung der Ursache des LED-Flickerings

Die Mittelwert-Kondensierung dieser beiden Bilder ist in Abbildung 5-2 gezeigt.

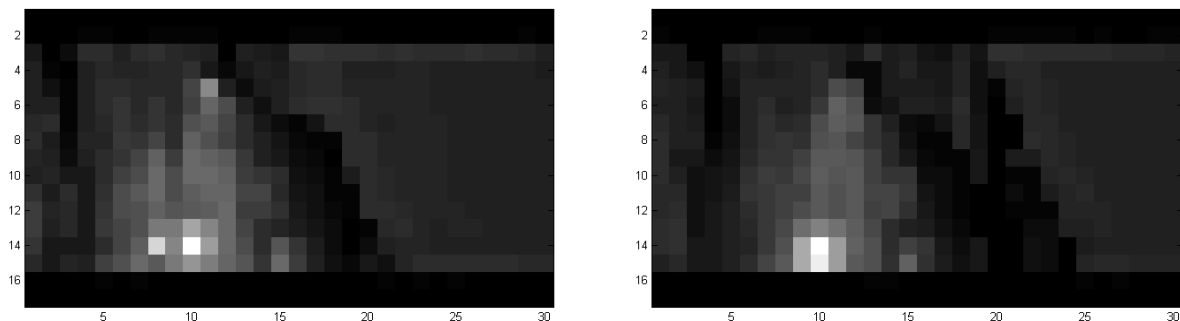


Abbildung 5-2: Mittelwert-Kondensierung der in Abbildung 5-1 gezeigten Bilder

Wird bei dieser Mittelwert-Kondensierung die bereits bekannte LED-Verteilung mit 24 LEDs an der unteren, langen Displays-Kante betrachtet (vgl. Anhang), ergibt sich hieraus ein Wechsel der LEDs mit dem höchsten relativen Einfluss. Während im ersten Bild noch zwei helle Condenser-Zellen in der achten und zehnten Spalte des Condensers vorhanden sind, sind im zweiten Bild nur noch helle Zellen um die zehnte Spalte vorhanden. Dies führt dazu, dass im ersten Bild durch die hellen Condenser-Zellen die LEDs 8 und 9 als LEDs mit dem höchsten Einfluss auf diese Zellen betrachtet werden, und im zweiten Bild nur noch die LED 9. Dies führt zu einer schnellen Helligkeitsbewegung im Bild, da innerhalb nur eines Frames (50Hz) die LED 8 abgeschaltet und die LED 9 dadurch stärker erhöht wird. Aufgrund des dunklen Hintergrundes werden die LEDs, welche nicht direkt benötigt

werden, um die helle Spitze des Zauberstabes auszuleuchten, ebenfalls ausgeschaltet, bzw. stark reduziert, da bereits von der benachbarten LED, welche erforderlich ist, den Zauberstab auszuleuchten, genügend Licht für den Hintergrund erzeugt wird.

Die hier ausgewählte Szene wird sich in den nächsten Frames so entwickeln, dass es innerhalb weniger Sekunden zu mehreren hundert Wechseln der benötigten LED zur Ausleuchtung des Zauberstabes kommt. Dies führt zwangsläufig zu einem unangenehmen Flickering, was vom Betrachter als störend wahrgenommen wird. Da es sich hierbei keinesfalls um Einzelfälle handelt, sondern solche oder ähnliche Situationen in annähernd allen Videos und Sequenzen enthalten sind, wenn auch nicht so extrem ausgeprägt wie in dem zur Veranschaulichung gewählten Beispiel, werden im folgenden Abschnitt Maßnahmen beschrieben, die versuchen, dieses LED-Flickering zu reduzieren.

5.1.2 Maßnahmen zur Reduzierung des LED-Flickering

In diesem Abschnitt sollen Maßnahmen erläutert werden, welche das bereits beschriebene LED-Flickering reduzieren können. Zunächst wird die wenig zielführende Methode der nachträglichen LED-Filterung ([Lee09] [Man13]) und deren Nachteile gezeigt, um im Folgenden erfolgversprechendere Methoden zu erläutern.

Nachträgliche Filterung

Die naheliegende Maßnahme, um das LED-Flickering zu reduzieren, besteht in einer nachträglichen Filterung der LED-Werte. Hierbei soll an dieser Stelle nicht auf die genaue Art eines solchen Filters eingegangen werden (IIR oder MA Filterung in [Tay12] und [Rem08]); es soll mehr die grundlegende Funktionsweise dieser Methode sowie ihre Nachteile erläutert werden. Dass eine Filterung mit langsamer Zeitkonstante die schnellen LED-Bewegungen verhindern kann, ist offensichtlich. Im oben genannten Beispiel wird es somit nicht zu einem sofortigen Ausschalten der LED 8 kommen, und die LED 9 wird auch langsamer erhöht werden. Dies bedeutet, dass für eine gewisse Zeit immer noch LED 8 für die Ausleuchtung des Zauberstabes verantwortlich ist, während eigentlich LED 9 schon die besseren Ergebnisse, also das höhere Power-Saving für das aktuelle Bild, liefern würde. Bewegt sich der Zauberstab weiter nach rechts, ist ab sofort die LED 9 für das Ausleuchten des Zauberstabes verantwortlich, da LED 10 erst langsam eingeschaltet wird. Problematisch wird dies, wenn zu diesem Zeitpunkt LED 9, aufgrund der Filterung, ebenfalls noch nicht über die geforderte Helligkeit verfügt. Daraus folgt, dass sich kontinuierlich bewegende Objekte nur dann richtig ausleuchten lassen, wenn der Filter ausreichend schnell eingestellt ist. Dies führt allerdings wieder zu einem sichtbaren LED-Flickering.

Zusammengefasst lässt sich sagen, dass die nachträgliche Filterung stets ein Kompromiss zwischen zu schnellen LED-Bewegungen und einer für das darzustellende Bild zu dunklen oder zu hellen Hintergrundbeleuchtung ist. Dies ist nochmals anhand von 50 Frames eines Ausschnittes eines Videos in Abbildung 5-3 verdeutlicht.

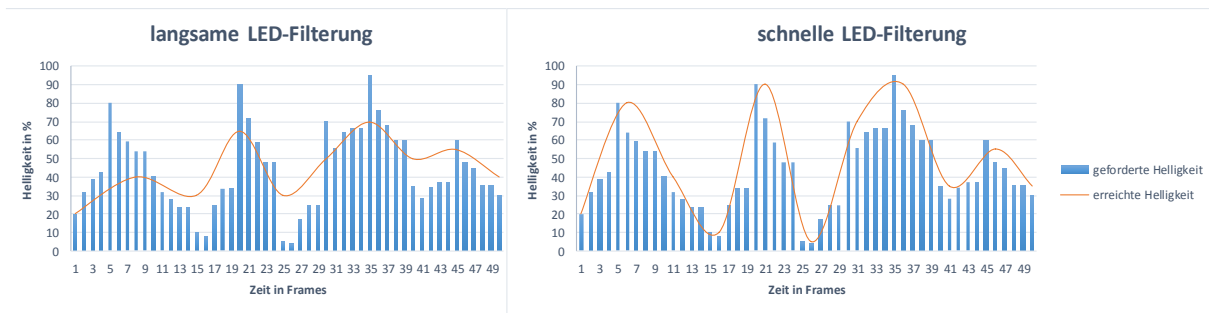


Abbildung 5-3: Links: langsame LED-Filterung; rechts: schnelle LED-Filterung

Das linke Diagramm stellt hierbei eine langsame LED-Filterung dar, wobei sich leicht die Nachteile dieser Filterungsart erkennen lassen. In vielen Bildern ist, aufgrund des zu langsamen Filters, die erreichte Helligkeit zu hell eingestellt, was zu einer starken Reduzierung des Power-Savings führt. Weiterhin ist es bei den restlichen Frames der Fall, dass die geforderte Helligkeit nicht erreicht wird; hier ist ein starkes Clipping zu erwarten. Das rechte Diagramm zeigt den gleichen vom SSC-Optimierer berechneten LED-Verlauf (geforderte Helligkeit) mit einer schnelleren LED-Filterung. Hier ist zu sehen, dass die beschriebenen Mängel nicht auftreten, allerdings sind die LED-Bewegungen in diesem Fall wieder so schnell, dass sie vom Betrachter als störend wahrgenommen werden.

Vorgegebene LED-Grenzen

Eine bessere Möglichkeit, ein flickerfreies Bild zu garantieren, ist die Nutzung sogenannter LED-Grenzen [Jun14]. Grundlage dieses Verfahrens ist es, dem SSC-Optimierer als zusätzliche Eingabewerte für jede LED einen oberen, sowie einen unteren Schwellwert, die sogenannte untere und obere Grenze, vorzugeben. Diese Methode ist im Vergleich zur nachträglichen Filterung der LED-Werte einfacher in den SSC-Optimierer zu integrieren und ermöglicht es, das, auf diese Weise unter Umständen bei der Glättung der LED-Werte entstehende, zu hohe Backlight als Crosstalk im nächsten Iterationsschritt zu berücksichtigen. Daher lassen sich mit dieser Methode deutlich höhere Power-Saving Werte erreichen. Während die Bedingungen im SSC-Optimierer leicht zu realisieren sind, gilt in jeder Optimierungsiteration:

$$\begin{aligned} LED_{t,n} &< LED_{t,n,max} \\ LED_{t,n} &> LED_{t,n,min} \end{aligned} \quad (5-1)$$

Hierbei bezeichnet t den aktuellen Frame und n die Nummer der aktuellen LED. Da diese Grenzen direkt vom Bildinhalt abhängen, ist ein höherer Aufwand zur Berechnung der unteren und oberen Grenzen erforderlich. Ein Sonderfall stellt hierbei das Verhalten bei einem Scene-Cut dar. In diesem Fall sollen sich die LEDs sehr schnell bewegen, das heißt, sobald ein Scene-Cut erkannt wird, werden die oberen und unteren Grenzen der LEDs zunächst freigegeben, um im Anschluss daran nochmals kontinuierlich näher eingegrenzt zu werden. Da das Hauptmerkmal dieses Kapitels auf der

Reduzierung des Flickerings und dem Sicherstellen eines ruhigen gedimmten Bildes liegt, wird an dieser Stelle nicht weiter auf das Verhalten bei und die Detektion von [Sch14] Scene-Cuts eingegangen.

Um diese Grenzen einzuhalten, wurden in der von [Jun14] vorgestellten Methode konstante Werte ΔLED gewählt, um welche sich eine LED maximal pro Frame bewegen darf. Somit gilt:

$$LED_{t-1,n} - \Delta LED \leq LED_{t,n} \leq LED_{t-1,n} + \Delta LED \quad (5-2)$$

Das zeitliche Verhalten für eine ausgewählte LED und einem beispielhaften Helligkeitsanstieg im Einflussbereich dieser LED ist in Abbildung 5-4 dargestellt.

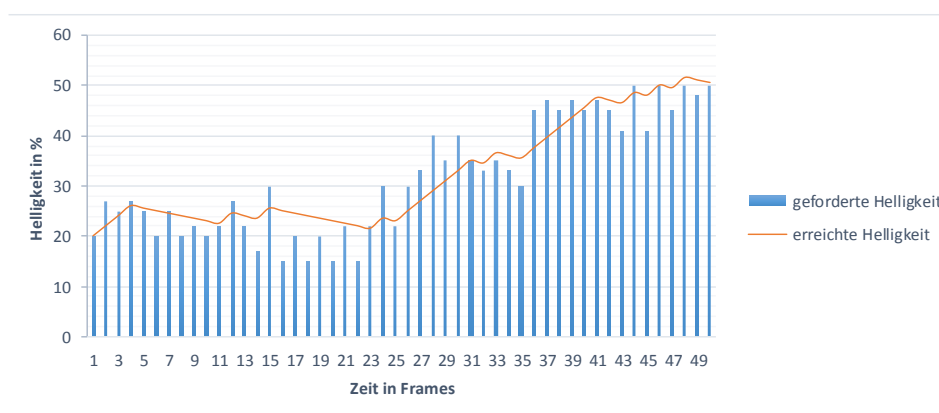


Abbildung 5-4: LED-Filterung nach [Jun14]

Die Ergebnisse dieser Methode sind beim Einsatz in Local-Dimming-Algorithmen größtenteils positiv. Das Bild wird deutlich ruhiger und das hohe Power-Saving kann nahezu erhalten werden. Diese Methode kann somit als eine aktive Filterung, im Gegensatz zu einer passiven, nachträglichen Filterung, interpretiert werden.

Bei der Betrachtung der für diese Arbeit relevanten Edge-Lit-Displays stellten sich einige Mängel bei der Betrachtung dunkler Szenen heraus. Um diese Szenen ruhig darzustellen, muss das erlaubte ΔLED einer LED so gering gewählt werden, dass die daraus resultierende LED-Geschwindigkeit für viele kritische Szenen zu langsam war. Besonders kritisch sind hierbei solche Szenen, welche über dunkle Hintergründe und helle, sich kontinuierlich bewegende Elemente verfügen (Beispiel Zauberstab in Abschnitt 5.1.1). Dadurch wird oft das Erkennen eines Scene-Cuts verhindert. Dies ist in Abbildung 5-5 nochmals graphisch dargestellt.

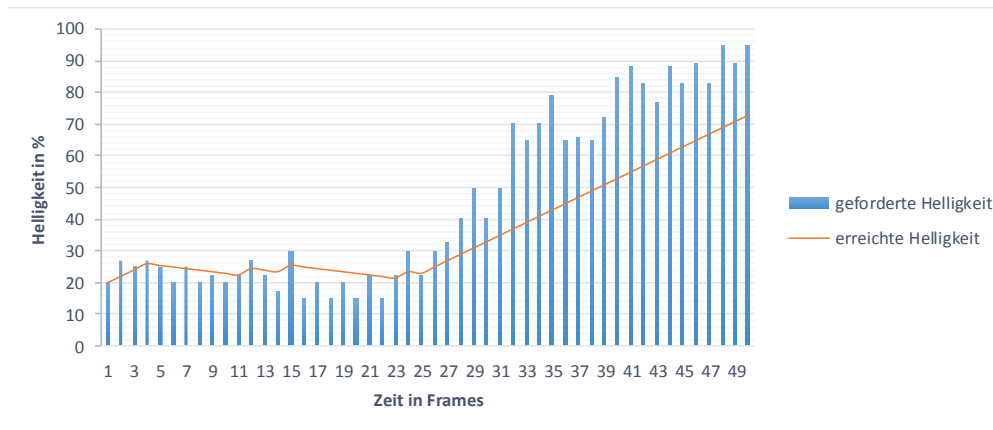


Abbildung 5-5: Probleme der LED-Filterung nach [Jun14]

Es ist deutlich zu erkennen, dass durch das zu niedrig gewählte ΔLED der Wert der LED der entsprechenden Bildhelligkeit nicht schnell genug folgen kann. Um dieses Problem zu umgehen, wurde für diese Arbeit die Berechnung der LED-Grenzen angepasst; anders als ursprünglich dient nicht mehr ein absolutes maximales ΔLED zum Berechnen der oberen und unteren Grenzen, sondern das maximale ΔLED ergibt sich aus einem prozentualen Anteil des vorherigen LED-Wertes. Hieraus ergeben sich enge Grenzen für dunkle Szenen, in denen das Auge besonders empfindlich für Flickering ist, und ansteigende obere Grenzen für clippinganfällige Bereiche. Hierfür gilt:

$$\Delta LED_{t,n} = \Delta LED_{param} + \partial * LED_{t-1,n} \quad (5-3)$$

Das in dieser Formel auftretende ΔLED_{param} entspricht dem bisherigen festen ΔLED . Allerdings kann es durch den zusätzlichen prozentualen Anteil ∂ des vorherigen Wertes der LED deutlich niedriger sein. Der Faktor ∂ bewegt sich bei den für diese Arbeit genutzten Displays im Bereich zwischen $1/4$ und $1/64$, während der Startparameter ΔLED_{param} entsprechend angepasst sein muss. Hierdurch ist es zwar immer noch nicht möglich, das zeitlich auftretende Clipping innerhalb eines Frames zu eliminieren, allerdings wird sich die Steigerungsgeschwindigkeit der zuständigen LED so lange erhöhen, bis die vom SSC-Optimierer geforderte Helligkeit erreicht ist. Diese neue Methode ist in Abbildung 5-5 nochmal graphisch verdeutlicht.

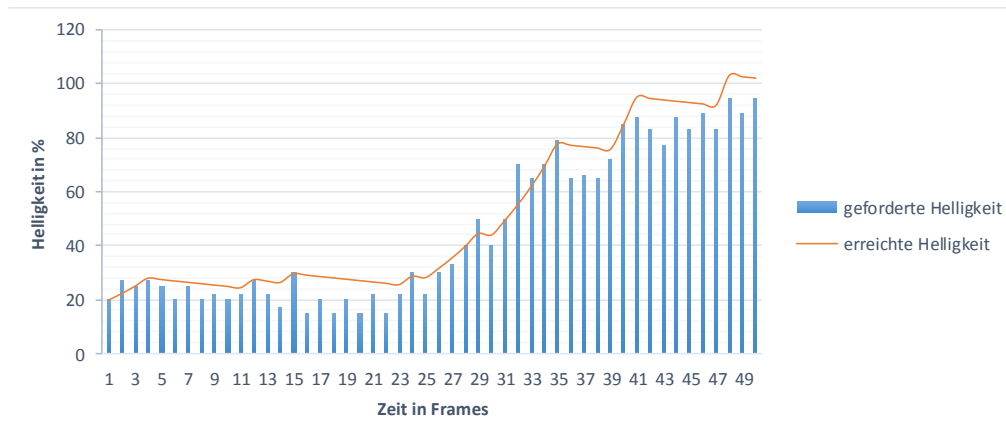


Abbildung 5-6: Neue Methode zur LED-Filterung

Eine weitere Maßnahme, die in dieser Arbeit entstand, ist die clippingabhängige rückgekoppelte Erhöhung der zulässigen LED-Bewegung [Ang14] [Ker09]. Hierbei wird vor allem die steigende LED-Bewegung durch größere erlaubte ΔLED beschleunigt, so lange in der Pixel-Compensation noch ein hohes Clipping für das betrachtete Bild festgestellt wird. Zur Bestimmung des auftretenden Clippings in der Pixel-Compensation genügt es für diese Anwendung, die entstehenden Reste bei Überläufen in der Kompensation aufzusummieren. Die führt zu einer Kennzahl des Clippings, welche proportional zum im gesamten Bild auftretenden Clipping ist. Somit tritt die hier erwähnte Beschleunigung der Steigerung der LED-Werte nur dann ein, wenn viel Clipping über das gesamte Bild erkannt wird. Da, je nach Wahl des Condensers und aufgrund der Arbeitsweise des SSC-Optimierers, Clipping nie ganz vermieden werden kann, wäre es an dieser Stelle störend, die LED-Geschwindigkeit immer zu erhöhen, sobald Clipping erkannt wird. Dies würde das entstandene Clipping kaum verringern, aber das LED-Flickering stark erhöhen. Aus diesem Grund existiert ein unterer Schwellwert für das auftretenden Clipping, welche zunächst überschritten werden muss, bevor die Geschwindigkeit der Änderung der LED-Werte modifiziert wird.

LED-Faktoren und globale, minimale LED-Werte zur Reduzierung des Flickerings

Als weitere Maßnahme zur Reduzierung des Flickerings sind an dieser Stelle noch die in Abschnitt 4.2.3 eingeführten LED-Faktoren sowie die globalen, minimalen LED-Werte zu nennen. Hierbei handelt es sich nicht um Maßnahmen, welche speziell zur Reduzierung des Flickerings eingeführt wurden, sondern, wie bereits beschrieben, um Maßnahmen zur Reduzierung des Halos und zur Sicherstellung eines homogenen Bildes. An dieser Stelle soll aber kurz erläutert werden, dass durch diese Maßnahmen auch das LED-Flickering reduziert wird.

Es ist leicht zu erkennen, dass eine Erhöhung des globalen, minimalen LED-Wertes ein mögliches Flickering reduziert, da dadurch keine LED komplett ausgeschaltet wird, und somit die maximal mögliche Bewegung der LED limitiert ist.

Wie bereits beschrieben, tritt das Flickering dann am stärksten auf, wenn sich zwei benachbarte LEDs stark gegeneinander bewegen; also eine LED stark erhöht wird, während die Benachbarte stark reduziert wird. Hierbei ist zunächst ersichtlich, dass eine solch starke gegenläufige Bewegung bei Nutzung der LED-Faktoren nicht auftreten kann, da die maximale Differenz zwischen den LEDs durch den Faktor begrenzt ist und dadurch auch die maximale Bewegung. Allerdings kann es bei bestimmten Bildabfolgen zu Problemen mit den bisher vorgestellten, starren LED-Faktoren kommen. Hierbei ist aufgefallen, dass es, unter bestimmten Voraussetzungen, zu einem Alternieren zwischen zwei benachbarten LEDs, die mittels eines LED-Faktors verknüpft sind, kommen kann. Ein solches Verhalten ist in Abbildung 5-7 dargestellt.

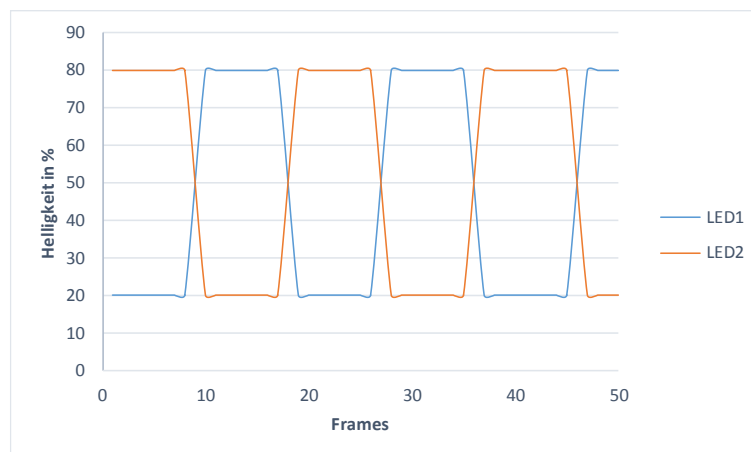


Abbildung 5-7: Mögliches Verhalten der zwei LEDs bei schneller LED-Filterung

Den in dieser Abbildung dargestellten LED-Werten liegen beispielhafte Bilder zugrunde, in denen abwechselnd *LED 1* und *LED 2* den größten relativen Einfluss in einem abzudeckenden hellen Bildbereich haben. Alle 10 Frames ereignet sich ein Wechsel zwischen diesen beiden Bildern. Diesem LED-Verlauf liegt außerdem die Annahme zugrunde, dass die bereits eingeführte LED-Filterung mittels oberer und unterer Grenze auf hohen Grenzen beruht, also eine große Änderung der LED-Werte pro Frame erlaubt ist. Obwohl in diesem LED-Verlauf der LED-Faktor (hier $c_s = 4$) zwischen den benachbarten LEDs stets eingehalten wird, ist es leicht zu sehen, dass hierbei Flickering entsteht. Dies liegt an den schnellen Wechseln der Richtung des LED-Faktors und der sich somit schnell ändernden Helligkeiten der beiden betroffenen LEDs.

Ein Flickering dieses Ausmaßes konnte am Lehrstuhl für Mikroelektronik nur beobachtet werden, wenn im finalen SSC-Algorithmus keine optimalen Grenzen für die LEDs angegeben wurden, und somit ein mögliches Flickering nicht unterdrückt wurde.

Allerdings wurde durch dieses Verhalten ein weiteres Artefakt ausgelöst, welches stark mit dem Flickering verbunden ist. Sobald die Frequenz der Bildwechsel soweit verlangsamt wird, dass die LEDs für jedes einzelne Bild genügend Zeit haben die endgültigen Werte anzunehmen, entsteht trotzdem ein ähnlicher LED-Verlauf wie in Abbildung 5-7 dargestellt. Aufgrund der Filterung wird dieser allerdings als langsame Schwingung in der Backlight-Helligkeit wahrgenommen.

Um dies zu verhindern, wurde, im Rahmen dieser Arbeit, eine Erweiterung der LED-Faktoren entwickelt, welche darauf basiert, dass die Richtung des Faktors erst umgekehrt werden darf, wenn beide LEDs des betrachteten LED-Paares den gleiche Wert haben. Somit gilt für einen LED-Wert stets:

$$\begin{aligned} LED_{t,n} &\leq LED_{t,n-1} * c_s \quad \text{für } LED_{t,n-1} \geq LED_{t,n} \\ LED_{t,n} &\geq LED_{t,n-1} * \frac{1}{c_s} \quad \text{für } LED_{t,n-1} < LED_{t,n} \end{aligned} \quad (5-4)$$

Die zur Umsetzung benötigte zusätzliche Hardware ist hierbei gering und besteht fast ausschließlich aus der Speicherung, welche LED des LED-Paares aktuell über den höheren Wert verfügt. Bei der Einhaltung der LED-Faktoren muss im Folgenden darauf geachtet werden, dass sich die LED mit dem größten Wert nicht ändert, bevor zuvor nicht beide LEDs gleich hell sind. Der resultierende LED-Verlauf für die gleiche Bildabfolge, wie in Abbildung 5-7 genutzt, ist in Abbildung 5-8 gezeigt.

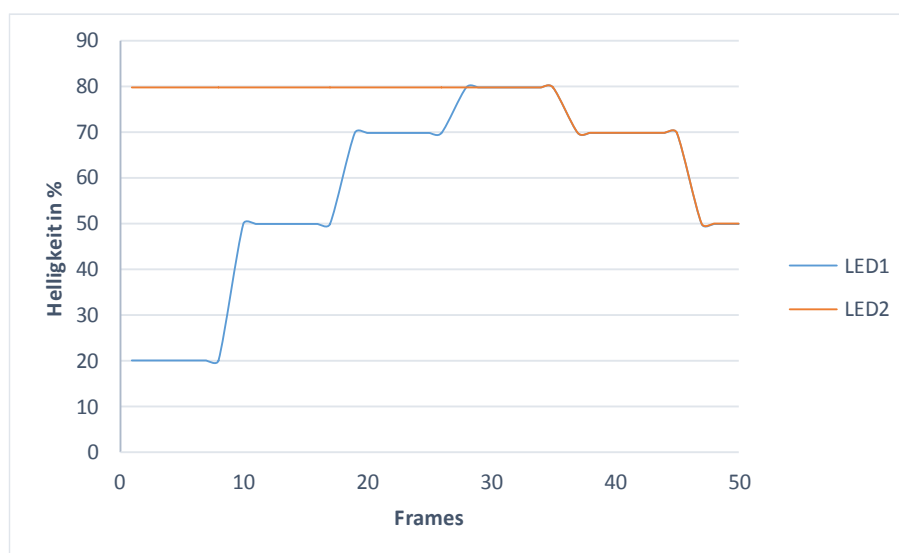


Abbildung 5-8: LED-Verhalten bei Berücksichtigung der Richtung der LED-Faktoren

Es ist in diesem Fall deutlich zu erkennen, dass der Wert von *LED 1* erst dann reduziert wird, wenn der Wert der *LED 2* den Wert der ersten LED erreicht hat. Dies hat zur Folge, dass das Backlight zu diesem Zeitpunkt zu hell ist und mehr Energie verbraucht wird, als eigentlich nötig wäre. Im weiteren zeitlichen Verlauf ist zu sehen, dass die Werte beider LEDs weiter reduziert werden und diese auch für die weiteren Abfolgen der ähnliche Werte beibehalten. Dies führt direkt zu einem deutlich ruhigeren Bildverhalten und die langsamen Schwingungen in bestimmten Szenen können auf diese Weise eliminiert werden.

Der Nachteil dieser Erweiterung besteht darin, dass die Summe aus den beiden LEDs stets etwas höher liegt als die Summe der beiden LEDs ohne den erweiterten LED-Faktor. Dies lässt sich damit erklären, dass in diesem Fall die zweite LED in jedem zweiten Bild aus Gründen des zeitlichen Ablaufs

im Filter auch helle Bildbereiche abdecken muss, in denen eigentlich die erste LED den größten relativen Einfluss besitzt.

Bei weiteren Untersuchungen ergab sich ein nur minimal reduziertes Power-Saving um ca. einen Prozentpunkt bei Betrachtung des IEC Standardvideos zur Ermittlung des Power-Savings **[IEC08]**. Aufgrund der erheblichen Verbesserungen und der Verringerung der Schwingungen wird die Erweiterung des LED-Faktors im Folgenden stets im SSC-Algorithmus genutzt.

5.2 Dynamisches Halo-Verhalten

In Abschnitt 4.2 wurde bereits beschrieben, was Halo-Artefakte sind, und wie diese vom Clouding unterschieden werden können. In diesem Abschnitt soll auf das dynamische Halo-Verhalten eingegangen werden. Hierbei handelt es sich um ein Phänomen, welches bisher in der Fachliteratur nicht gesondert behandelt wurde und deshalb auch noch keine Lösungsvorschläge zur Reduzierung dieses Problems bekannt sind. In dieser Arbeit wird daher das dynamische Halo-Verhalten erstmals beschrieben und es werden Methoden zur Reduzierung dieses gezeigt.

Beim dynamischen Halo handelt es sich um ein Artefakt, welches bevorzugt bei dunklen Videos auftritt, in welchen sich helle Elemente langsam über das Display bewegen. Zur Untersuchung des dynamischen Halos wurde am Lehrstuhl für Mikroelektronik ein spezielles Testvideo genutzt, welches einen hellen Kreis darstellt, der sich kontinuierlich in der Größe ändert, und zwischen den vier Bildkanten hin und her springt (Moving-Circle Video). Die Helligkeit des Kreises selbst entspricht hierbei einem hellen Grauwert. In Abbildung 5-9 sind einige Screenshots aus dem Video aufgezeigt, welche die Bewegung des Kreises verdeutlichen sollen.

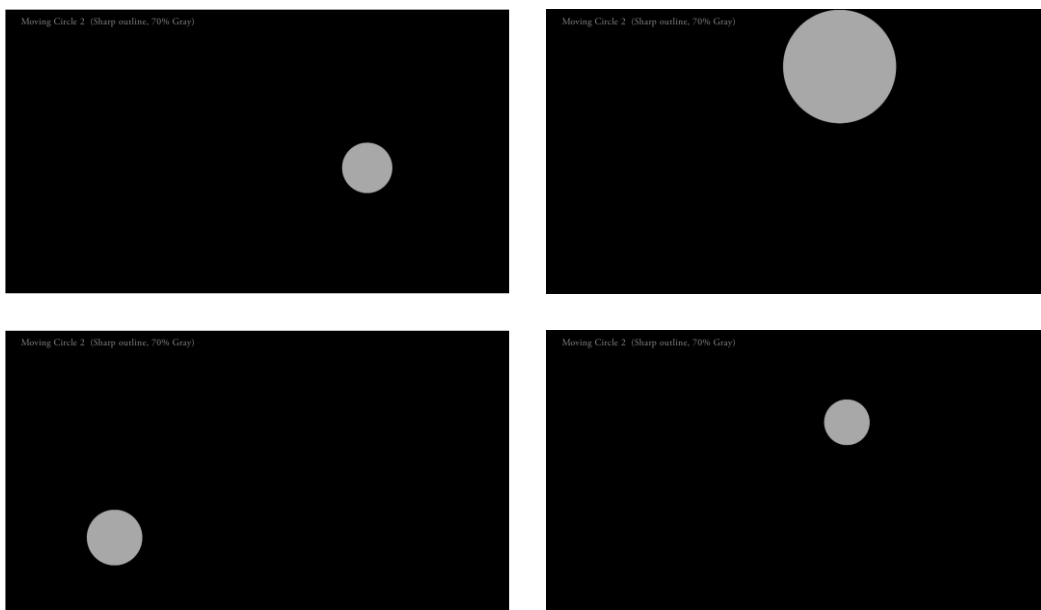


Abbildung 5-9: Screenshots aus einem Testvideo zur Untersuchung des dynamischen Halo-Artefakts

Bei Betrachtung der Einzelbilder dieses Videos ist leicht zu sehen, dass es hier bei jedem Einzelbild zu Halo-Artefakten kommen kann. Da der Hintergrund dunkel ist, aber der Kreis hell, werden, wie bereits beschrieben, nur die LEDs vom SSC-Algorithmus erhöht, welche nötig sind, um den Kreis vollständig auszuleuchten. Da sich das dadurch entstehende Halo-Artefakt mit dem Kreis über das Display bewegt, erscheint dieses, je nach Art des Backlights des genutzten Displays, deutlich störender, als das bereits betrachtete statische Halo-Artefakt. Dies lässt sich mit der gesteigerten Empfindlichkeit des menschlichen Auges für Bewegungen erklären (vgl. Abschnitt 2.1.3). Im nächsten

Abschnitt wird analysiert, welche Bewegungen für welche LED-Verteilungen im Backlight besonders kritisch sind.

5.2.1 Zusammenhang des dynamischen Halos und der LED-Anordnung

Da der ein besonderer Schwerpunkt dieser Arbeit bei der Betrachtung von Displays mit einseitigen Backlight-Systemen liegt, werden an dieser Stelle diese Arten des Backlights besonders berücksichtigt, da sie auch zu den kritischsten Situationen in Bezug auf das dynamische Halo führen können.

Die unkritischste Backlight-Konstellation findet sich hierbei bei Direct-Lit-Displays, da das dynamische Halo beim lokalen Dimmen dieser Displays nicht als besonders störend empfunden wird. Wie bereits bekannt, entsteht beim Halo eines lokal gedimmten Direct-Lit-Displays ein Light-Leakage in naher Umgebung des kritischen, hellen Elements (vgl. Abschnitt 4.2). Da Halo stets durch helle Elemente auf dunklem Hintergrund hervorgerufen wird, ist das Auge bei Betrachtung des hellen Objekts ohnehin leicht geblendet, so dass das Halo-Artefakt nicht besonders stark wahrgenommen wird. Die Größe des Halo-Artefakts hängt hierbei stark von der Anzahl der LEDs im Backlight ab. Hieraus ergeben sich, bei Betrachtung des Moving-Circle Videos, auf einem lokal gedimmten Direct-Lit-Display keine besonderen Beeinträchtigungen, da die Bewegung des Halos durch den sich in unmittelbarer Nähe befindenden Kreis nicht wahrgenommen werden kann. Anders sieht dies bei Edge-Lit-Displays aus; hier hängt die Art des zu erwartenden dynamischen Halos maßgeblich von der Anordnung der Edge-Lit-LEDs ab.

Befinden sich die LEDs ausschließlich an einer kurzen, seitlichen Displaykante, sind vertikale Bewegungen des Kreises äußerst kritisch, da sich hierzu die zur Abdeckung der geforderten Helligkeit des Kreises nötige LED kontinuierlich ändert. Dies ist in Abbildung 5-10 anhand eines Displays mit 6 LEDs an der kurzen Displaykante dargestellt.

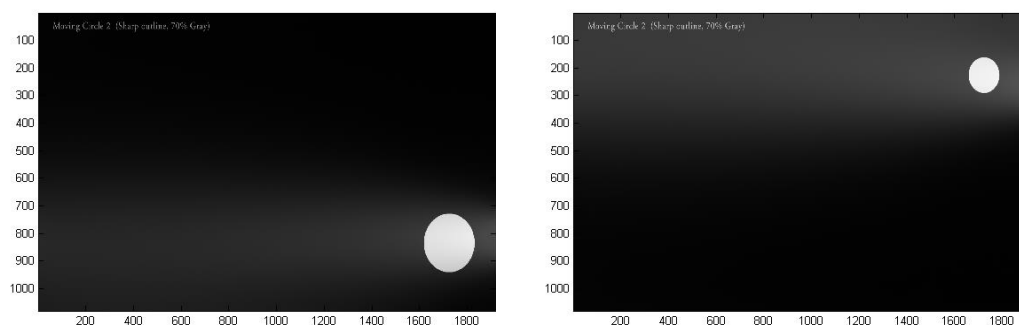


Abbildung 5-10: Änderung des Halos eines sich vertikal bewegenden Elementes auf einem Display mit 6 LEDs an der kurzen Displaykante; links: LED 5 mit höchstem Einfluss; rechts: LED 2 mit höchstem Einfluss.

In den gezeigten Bildern ist in der linken Position die LED 5 stark eingeschaltet, während in der rechten Position die LED 2 stark eingeschaltet ist. Durch die unterschiedlichen Halo-Erscheinungen,

welche von den beiden LEDs erzeugt werden, ist der Wechsel zwischen den kontinuierlich variierenden Halos bei Betrachtung des Videos deutlich zu sehen.

Anders sieht dies für die gleiche vertikale Bewegung des Kreises und einer LED-Anordnung an der langen, unteren oder oberen Displayseite aus. Da hier der Kreis permanent in dem Gebiet bleibt, in welchem eine LED den größten Einfluss hat, ändert sich zwar die Form des Halos etwas, da, sobald der Kreis wieder von der LED-Kante entfernt ist, der Einfluss der primären LED sinkt, und weitere, benachbarte LEDs zugeschaltet werden müssen, um die Helligkeit des Kreises genügend auszuleuchten. Dies ist in Abbildung 5-11 anhand eines Displays mit 12 LEDs an der unteren Displaykante dargestellt. Den höchsten Einfluss hat in beiden Bildern *LED 11*

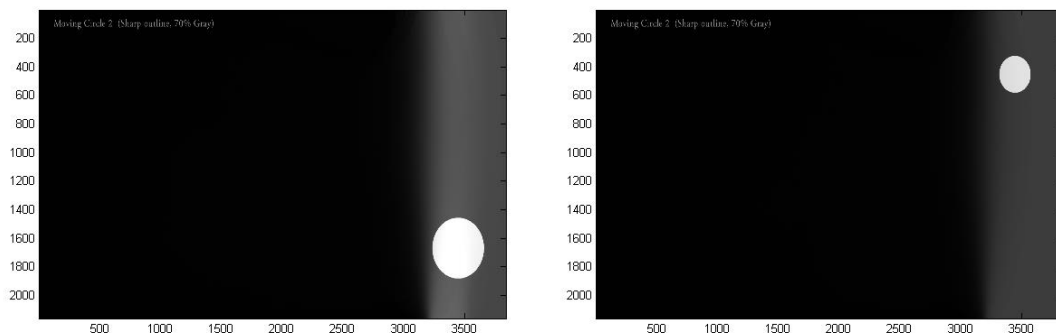


Abbildung 5-11: Änderung des Halos eines sich vertikal bewegenden Elementes auf einem Display mit 12 LEDs an der langen Displaykante; links: *LED 11* mit höchstem Einfluss; rechts: *LED 11* und *LED 12* mit hohem Einfluss.

Obwohl zum Ausleuchten der geforderten Helligkeiten des Kreises am oberen Bildschirmrand auch die benachbarte LED der *LED 11* benötigt wird, wird das dynamische Verhalten des Halos hierbei vom Betrachter als weniger störend wahrgenommen. Dies liegt maßgeblich an dem kontinuierlicheren Verlauf der Vergrößerung der vom Halo betroffenen Fläche. Gleichzeitig wird die vom Halo betroffene Fläche bei einer von der LED-Kante weg gerichteten Bewegung des Kreises kontinuierlich vergrößert; erst wenn der Kreis seine Bewegungsrichtung umkehrt, wird die Fläche wieder verringert.

Hieraus ergibt sich auch die besonders kritische Situation der vertikalen Bewegung auf einem Short-Edge-Display. Hier führt eine kontinuierliche, in eine vertikale Richtung geführte Bewegung des Kreises, gleichzeitig zu einer Verringerung des Halos der einer LED zugeordneten Fläche und einer Erhöhung des Halos der der benachbarten LED zugeordneten Fläche.

Das gleiche gilt hierbei reziprok für eine horizontale Bewegung des Kreises. In diesem Fall ist eine Entwicklung von Halo-Artefakten auf Long-Edge-Displays deutlich kritischer als bei Short-Edge-Displays. Weiterhin kann es zu starken dynamischen Halo-Entwicklungen bei Displays mit LEDs an mehr als einer Seite kommen. Hier tritt das auffälligste Artefakt ein, wenn der Kreis in etwa die Mitte des Displays durchquert. Diese Situation kann dazu führen, dass eine zuvor stark erhöhte LED des einen Randes schnell reduziert wird, während die korrespondierende LED des gegenüberliegenden Randes stark erhöht werden muss, um die geforderte Helligkeit abzudecken. Dies entspricht einer

ähnlichen Situation wie die Bewegung in die jeweils kritische Richtung eines Displays mit LEDs an nur einer Displaykante.

Das hier betrachtete Video des springenden Kreises stellt einen Extremfall dar, um das starke Stören des dynamischen Halos zu erklären und dessen Verhalten zu untersuchen. In der Realität entsteht oft eine schwächere Version dieses dynamischen Halos. Da bei realen Videos der Hintergrund meist nie rein schwarz ist, ist der Halo, z.B. auf einer Textur oder einer dunklen Landschaft, schwächer, aber dennoch wahrnehmbar. Beispiele für Szenen, welche für dieses Artefakt besonders anfällig sind, sind z.B. eine helle Lampe/Mond bei einem Kameraschwenk über eine dunkle Landschaft. In den folgenden Abschnitten werden Möglichkeiten aufgezeigt, das dynamische Halo zu reduzieren.

5.2.2 Gleichmäßige LED-Verteilung zur Verringerung von Halo-Artefakten

Wie bereits in Abschnitt 4.2.3 beschrieben, kann das Einführen von Faktoren zwischen benachbarten LEDs das Auftreten eines Halo-Artefaktes stark reduzieren. Durch das insgesamt hellere Backlight wird Light-Leakage über eine größere Fläche erzeugt, wodurch das Artefakt als deutlich weniger störend wahrgenommen wird.

Ein ähnlicher Ansatz stellt das Erhöhen der globalen Minimalwerte der LEDs dar. Dies bedeutet, dass unabhängig von der vom SSC-Optimierer berechneten, lokal gedimmten LED-Verteilung der Wert einer LED mindestens auf den vorher festgelegten Minimalwert erhöht wird. Auch in diesem Ansatz wird mehr oder weniger versucht, das Halo zu unterdrücken, in dem über das gesamte Bild ein höheres, und dadurch gleichmäßigeres, Light-Leakage erzeugt wird, da das Halo bei hohen Helligkeitsunterschieden stärker wahrgenommen wird [Ich10]

Untersuchungen am Lehrstuhl für Mikroelektronik lieferten allerdings bei diesen beiden Methoden nur unzureichende Ergebnisse. Wie zu erwarten war, kann das Power-Saving durch beide Methoden stark reduziert werden. Dies kann, bei der in Abschnitt 4.2.3 vorgestellten Methode, zur Vermeidung des Halo in statischen, oder auch sich langsam bewegenden Elementen, akzeptiert werden. Da für diese Fälle LED-Faktoren und auch LED-Minimalwerte so gewählt werden können, dass das Power-Saving nur moderat sinkt, da durch den SSC-Optimierer jederzeit das dadurch zusätzlich erzeugte Licht als Crosstalk in der LED-Verteilung berücksichtigt wird. Die Werte für statische Bilder liegen hierbei, mit leichten Abweichungen für unterschiedliche Displayarten bei LED-Faktoren von ca. 1,4 und bei LED-Minimalwerten von ca. 10% der maximalen Helligkeit. Dies führt zu einer Reduzierung des Power-Savings um wenige Prozentpunkte im IEC Testvideo [IEC08].

Anders sieht dies beim dynamischen Halo aus; um hier den störenden Einfluss des Halos zu eliminieren, wurden in Untersuchungen am Lehrstuhl für Mikroelektronik niedrigere LED-Faktoren von bis zu 1,1 ermittelt. Auch die Ergebnisse bei Modulation des globalen, minimalen LED-Wertes lieferten keine zufriedenstellenden Ergebnisse, hier sind minimale LED-Werte von bis zu 30% nötig, um das störende Artefakt zu eliminieren. Da dies das Power-Saving stark senkt, bei den hier betrachteten Videos um bis zu 20%, sind diese beiden Maßnahmen zur Reduzierung des dynamischen Halos nicht geeignet. Im folgenden Abschnitt wird eine Methode vorgestellt, welche das Power-Saving erhalten kann, und trotzdem das dynamische Halo in kritischen Bildern reduziert.

5.2.3 Bildanalyse zur Reduzierung von Halo-Artefakten

Da eine reine Anpassung der Parameter der LED-Faktoren oder des globalen, minimalen LED-Wertes sowie die Begrenzung der zeitlichen LED-Änderung mit Hinblick auf das stark reduzierte Power-Saving keine akzeptable Möglichkeit darstellt, wird in diesem Abschnitt untersucht, wie das dynamische Halo-Artefakt dennoch reduziert werden kann.

Die zugrundeliegende Idee dieses Ansatzes besteht darin, dass ein reduziertes Power-Saving für kritische Videostellen akzeptiert werden kann, da diese Videoabschnitte nur relativ selten auftreten und das durchschnittliche Power-Saving dieser Szenen ohnehin hoch ist. Dies liegt an der Art der für Halo-Artefakte kritischen Bilder, welche, im Mittel betrachtet, eher dunkel sind. Typische kritische Bilder erreichen hierbei Power-Saving-Raten von bis zu 80%. Dies, und die Tatsache, dass kritische Videoabschnitte lediglich selten auftreten, legt es nahe, die in Abschnitt 5.2.2 genannten Parameter nur dann anzupassen, wenn das aktuell dargestellte Bild als kritisches Bild für dynamische Halo-Artefakte eingestuft wurde. Für alle anderen Bilder des betrachteten Videos können die Parameter auf den ursprünglichen Werten belassen werden.

Kriterien zur Bestimmung der für dynamisches Halo kritischen Bilder

Aus den bisherigen Untersuchungen über das Auftreten von Halo-Artefakten (Abschnitt 4.2.2) wurden bereits einige Aspekte gesammelt, welche Bilder anfällig für Halo machen. So handelt es sich stets um Bilder, welche im Mittel sehr dunkel sind, daher gilt als erste Bedingung:

$$\frac{\sum_{n=1}^{N_p} p(n)}{N_p} < H_{TH} \quad (5-5)$$

Hierbei stellt $p(n)$ die Helligkeit der einzelnen Pixel und N_p die Anzahl der Pixel des Displays dar. Die daraus resultierende mittlere Helligkeit muss unter dem zuvor definierten Helligkeitsschwellwert H_{TH} liegen. Da dieses Vorgehen einen hohen Aufwand bei der Summation der Helligkeitswerte der Pixel erfordert, und bereits im Mittelwert-Condenser der mittlere Helligkeitswert aller sich in einer Condenser-Zelle befindenden Pixel berechnet wird, ist es an dieser Stelle ausreichend, den Mittelwert der einzelnen Mittelwert-Condenser-Zelle zu ermitteln. Hierfür gilt:

$$\frac{\sum_{n=1}^{N_c} C_{mw}(n)}{N_c} < H_{TH} \quad (5-6)$$

Weiterhin repräsentiert $C_{mw}(n)$ den Wert der einzelnen Pixel des Mittelwert-Condensers sowie N_c die Anzahl der Condenser-Pixel des Bildes. Der zu unterschreitende Schwellwert der mittleren Helligkeit ändert sich hierbei nicht.

Ein weiteres Merkmal für Bilder, welche anfällig für dynamisches Halo sind, sind die lokalen, hellen Bereiche in den Bildern. Hierbei stellt sich schnell heraus, dass ein reines Zählen der hellen Pixel eines Bildes zu keinen brauchbaren Resultaten führt, da auf diese Weise nicht in Erfahrung gebracht wird, ob die hellen Pixel sich in direkter Nachbarschaft zueinander befinden, oder gleichförmig über das gesamte Bild verteilt sind. Um eine komplizierte Berechnung zur Bestimmung der Nachbarschaftsverhältnisse der einzelnen Pixel zu vermeiden, lässt sich an dieser Stelle ebenfalls der Mittelwert-Condenser nutzen. Die einzelnen Zellen des Mittelwert-Condensers erreichen nur dann hohe Werte, wenn auch eine hohe Anzahl in der Zelle enthaltener Pixel einen hohen Pixelwert aufweist. Als Kriterium für ein kritisches Bild gilt:

$$n_{TH} \leq n_{zelle} = \sum_{n=1}^{N_c} f(C_{mw}(n)) \quad (5-7)$$

mit

$$f(x) = \begin{cases} 1, & x < p_{TH} \\ 0, & x \geq p_{TH} \end{cases} \quad (5-8)$$

Hierbei werden nur Condenser-Pixel gezählt, welche eine minimale mittlere Helligkeit p_{TH} erreichen. N_c gibt hierbei die Anzahl der Condenser-Pixel an. Um als dynamisches kritisches Bild betrachtet zu werden, muss die Anzahl dieser Zellen n_{zelle} größer sein als n_{TH} .

Mit der richtigen Wahl der hier beschriebenen Parameter war es möglich, die kritischen Bilder gezielt zu erkennen und die Halo-verringern Parameter, LED-Faktor und globaler, minimaler LED-Wert, nur für die kritischen Bilder anzupassen. Für die entsprechenden Parameter gilt:

$$\begin{aligned} \Delta LED_{param} &= f(C_{mw}, H_{TH}, p_{TH}, n_{TH}) \\ c_s &= f(C_{mw}, H_{TH}, p_{TH}, n_{TH}) \\ \partial &= f(C_{mw}, H_{TH}, p_{TH}, n_{TH}) \\ LED_{min} &= f(C_{mw}, H_{TH}, p_{TH}, n_{TH}) \end{aligned} \quad (5-9)$$

Auf diese Weise ist es möglich, das dynamische Halo erheblich zu reduzieren und gleichzeitig das hohe Power-Saving des SSC-Algorithmus beizubehalten. Da die kritischen Szenen nur selten auftreten, wurde im IEC Testvideo **[IEC08]** das Power-Saving lediglich um 3 bis 4 Prozentpunkte, je nach verwendetem Display, reduziert.

Die Verwendung dieser Methode reduziert weiterhin auch das Halo statischer Bilder, da diese stets als kritisch erkannt, und dadurch die Parameter strenger gesetzt werden können, was in diesen Fällen zu einer höheren Bildqualität führt.

5.3 Dynamisches Clipping-Verhalten

In diesem Abschnitt wird das dynamische Clipping-Verhalten eines lokal gedimmten Displays untersucht. Das dynamische Clipping ist ähnlich wie das dynamische Halo-Verhalten ein Artefakt, welches verstärkt bei Edge-Lit-Displays auftritt. Hierbei hängt das dynamische Clipping stark von der Art der Glättung der LED-Werte ab (vgl. Abschnitt 5.1.2). Hierzu wurde das dynamische Clipping bereits kurz im Abschnitt 5.1.1 erwähnt, da die Aspekte eines flickerfreien Bildes aufgrund einer LED-Filterung eng mit dem Phänomen des dynamischen Clippings zusammenhängen.

Um dies zu verstehen, ist es wichtig, das dynamische Clipping vom statischen Clipping zu unterscheiden. Zunächst ist unter beiden Phänomenen das gleiche Artefakt zu verstehen: Informationsverlust wegen eines zu geringen Backlights und keine Möglichkeit zur ausreichenden Kompensation, da die TFT-Werte bereits am oberen Maximum sind. Das Resultat ist hierbei jeweils ein Informationsverlust in hellen Bildbereichen. Für alle in diesem Abschnitt untersuchten Artefakte wird jegliche Art von statischem Clipping nicht berücksichtigt, da das statische Clipping maßgeblich von der Wahl des Condensers sowie der Art der Optimierung im SSC-Optimierer abhängt, ist dieses unabhängig von dynamischem Verhalten.

Dynamisches Clipping entsteht für eine gewisse Zeit, wenn die Backlight-Helligkeit aufgrund dynamischer Effekte, wie z.B. einer LED-Filterung, nicht der geforderten Helligkeit für das anzuzeigende Bild entspricht. Um dieses Artefakt näher zu untersuchen, wird das bereits in Abschnitt 5.2 genutzte Video des springenden Kreises einer in leicht geänderten Version genutzt. Im hier verwendeten Video ist die Helligkeit des Kreises nicht homogen, sondern nimmt von außen hin bis zum Zentrum des Kreises stets zu. Der Mittelpunkt des Kreises ist somit ein weißer Punkt. Dieses Video ist in Abbildung 5-12 anhand einiger Beispielbilder dargestellt.

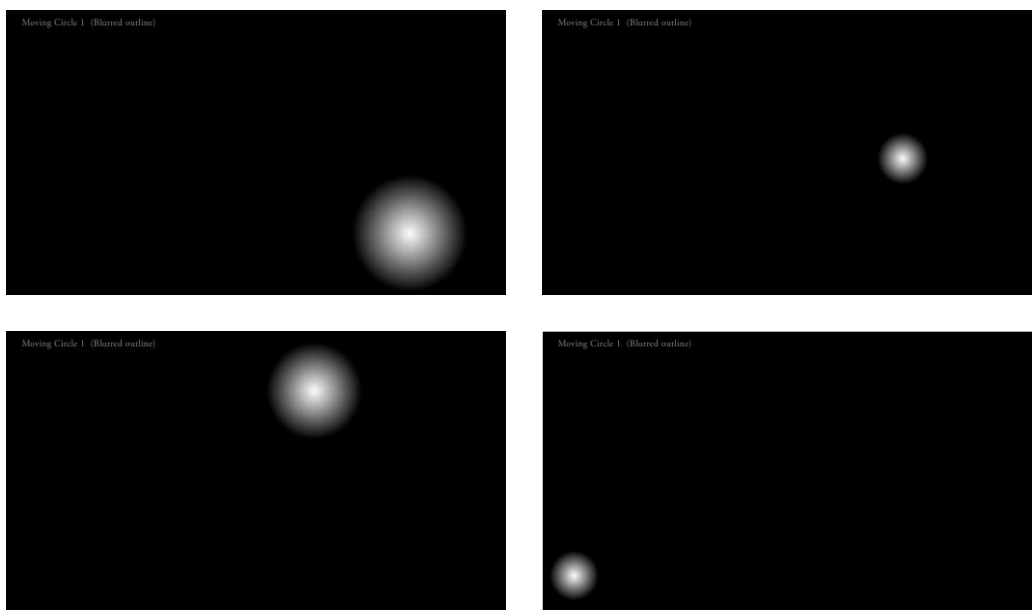


Abbildung 5-12: Beispielvideo zur Untersuchung des dynamischen Clippings: Helligkeitsgradient im Moving-Circle

Dies ist ein Helligkeitsverlauf, welcher vor allem Clipping leicht sichtbar macht, da sich dann der weiße Punkt in der Mitte des Kreises direkt stark vergrößert. Somit ist bei diesem Testvideo die Größe des weißen Bereichs in der Kreismitte ein Indiz für die Höhe des Clippings. In Abbildung 5-13 ist ein Bild des Videos gezeigt, in welchem der Kreis stark geclippt wird.

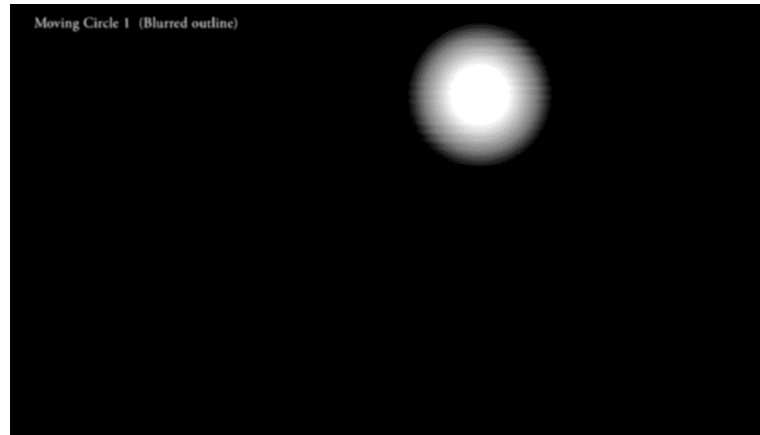


Abbildung 5-13: Auftretendes dynamisches Clipping

In dem Testbild ist deutlich der große weiße Bereich in der Mitte des Kreises zu erkennen. Zu beachten ist, dass dieses Bild die aktuellen Kompensationsresultate aus dem laufenden Video zeigt. Ein Pausieren des Videos liefert nämlich hierbei andere Ergebnisse. Da der Algorithmus beim pausierten Video genügend Zeit hat, die richtige LED-Verteilung einzustellen, verschwindet in diesem Fall auch das Clipping im Kreis. Das hier betrachtete dynamische Clipping tritt nur auf, wenn aufgrund einer zu langsamen LED-Filterung das Backlight hinter dem sich weiterbewegenden Kreis zu gering ist. Dies ist, wie bereits im vorherigen Abschnitt beschrieben, bei vertikalen Bewegungen des Kreises besonders kritisch für Displays mit LEDs an der kurzen Displayseite und für horizontale Bewegungen des Kreises für Displays mit LEDs an der langen Displaykante. Die Gründe hierfür sind identisch mit denen, in Abschnitt 5.2 genannten Gründen, für die Anfälligkeit für dynamisches Halo. Im Folgenden werden Möglichkeiten untersucht, das dynamische Clipping zu reduzieren.

LED-Faktoren

Durch ein engeres Setzen der bereits bekannten LED-Faktoren ist es möglich, das dynamische Clipping zu reduzieren, da die benachbarte LED bereits zu einem gewissen Grad erhöht ist, wenn sich das Objekt in deren Zuständigkeitsbereich bewegt. Somit verringern niedrige LED-Faktoren das dynamische Clipping, reduzieren aber auch das zu erwartende Power-Saving sowie den Kontrast.

Globaler, minimaler LED-Wert

Ähnlich wie die LED-Faktoren wirken auch die globalen, minimalen LED-Werte. Allerdings ist ein Erhöhen dieser Minimalwert für das Problem des dynamischen Clippings weniger geeignet, da der Minimalwert, um das Clipping in den hellen, kritischen Bereichen zu reduzieren, hoch sein muss. Eine solche Wahl dieses Parameters ist für das Local-Dimming ungeeignet, da das Power-Saving und die Kontrasterhöhung erheblich reduziert werden.

Größere erlaubte ΔLED -Werte für die LED-Bewegungen

Die einzige Möglichkeit, das Clipping zu reduzieren, ohne gleichzeitig auch das Power-Saving bzw. den Kontrast zu reduzieren, liegt in einer Beschleunigung der erlaubten LED-Bewegungen. Durch die Beschleunigung der Anpassung der LED-Werte ist es naheliegend, dass bei einer ausreichend schnellen Bewegung kein dynamisches Clipping mehr auftreten kann, da somit für den SSC-Optimierer wieder die Möglichkeit besteht, eine optimale Lösung mit geringem Clipping zu finden. Der Nachteil dieser Methode besteht darin, dass das Flickering stark erhöht wird, und somit die dargestellten Videos wieder als zu unruhig wahrgenommen werden.

Herabsetzen der Bildhelligkeit

Da die bisher vorgestellten Methoden keine Lösung für das Artefakt des dynamischen Clippings liefern, wurde eine weitere Maßnahme entwickelt, welche allerdings Kompromisse bei der Bildhelligkeit fordert. Das Herabsetzen der Bildhelligkeit verfolgt einen ähnlichen Ansatz wie die Clipping-Suppression (vgl. Abschnitt 4.3.1), allerdings wird bei dem hier gewählten Ansatz das gesamte Backlight virtuell erhöht. Dass Clipping-Suppression Clipping reduzieren kann, wurde bereits in Abschnitt 4.3.1 gezeigt, allerdings ist die nötige Filterung des lokal erhöhten Backlights bei sehr schnellen Bewegungen nicht mehr möglich. Andererseits ist das unterdrückbare Clipping, aufgrund der einzuhaltenden Homogenität des restlichen Backlights, durch einen maximalen Clipping-Suppression-Faktor von ca. 2 bis 3 begrenzt. Um die hier betrachteten schnellen Bewegungen auf dunklen Hintergründen zu behandeln, ist die lokale Clipping-Suppression nicht ausreichend. Ein Ausweg besteht in der globalen virtuellen Erhöhung des Backlights. Da dies für das gesamte Backlight geschieht, ist eine nachrangige räumliche Filterung, wie bei der Clipping-Suppression, nicht nötig. Aus den bereits gewonnenen Erkenntnissen zur Clipping-Suppression, ist leicht zu sehen, dass eine globale Erhöhung des virtuellen Backlights das dynamische Clipping effektiv reduzieren kann. Da hierzu auch keine Anpassung der LED-Geschwindigkeit nötig ist, bleibt das abgespielte Video weiterhin flickerfrei. Da das virtuelle Backlight nicht grundsätzlich erhöht werden kann, sondern nur in den Fällen, in denen das dynamische Clipping besonders störend ist, wurden Kriterien entwickelt, um die Anhebung des virtuellen Backlights zu berechnen.

Das erste wichtige Kriterium ist hierbei das auftretende Clipping; dieses wird bereits während der Pixel-Compensation berechnet. Durch die Größe des abgeschnittenen, geclippten Wertes in der Pixel-Compensation lässt sich ebenfalls ermitteln, wie stark einzelne Pixel geclippt werden.

Da das dynamische Clipping besonders stark auftritt, wenn sich helle Objekte schnell über dunkle Hintergründe bewegen, ist das dynamische Clipping genau dann besonders störend, wenn die einzelnen geclippten Pixel stark ins Clipping gehen. Dies ergibt sich daraus, dass die zuständige LED, zu der sich das helle Objekt hinbewegt, zunächst aufgrund des dunklen Hintergrundes einen niedrigen Wert hat, und deshalb das Clipping c_n entsprechend stark auftritt. Somit gilt als Kriterium für geclippte Pixel:

$$N_{TH} \leq n_{ZELLE} = \sum_{n=1}^{N_p} f(c_n) \quad (5-10)$$

mit

$$f(x) = \begin{cases} 1, & x < C_{TH} \\ 0, & x \geq C_{TH} \end{cases} \quad (5-11)$$

Wobei c_n die Höhe des Clippings pro Pixel angibt, N_p die Anzahl der Pixel und C_{TH} ein Schwellwert für das Clipping pro Pixel ist. Mit der Anzahl der stark geclippten Pixel n ist eine Größe gefunden, die den Schwellwert der Anzahl der stark geclippten Pixel N_{TH} übersteigen muss.

Ein weiteres Kriterium für ein auftretendes dynamisches Clipping ist ein niedriger Helligkeitswert des Hintergrundes. Als Größe hierfür dient die mittlere Helligkeit des Bildes, welche aus den Werten des Mittelwert-Condensers $p_{mw,n}$ gewonnen wird. Somit gilt als Kriterium für ein dunkles Bild:

$$\frac{\sum_{n=1}^{N_c} C_{mw}(n)}{N_c} < H_{TH} \quad (5-12)$$

Während N_c die Anzahl der Condenser-Pixel angibt und H_{TH} ein gewählter Schwellwert ist. Beim Eintreten beider Kriterien wird in der genutzten Implementierung das virtuelle Backlight sukzessive in kleinen Schritten so weit erhöht, bis das Clipping-Kriterium nicht mehr erfüllt ist. Aufgrund der schnellen Bewegung des kritischen hellen Objektes wird das virtuelle Backlight über die einzelnen Frames zunächst in großen, später in der Größe abnehmenden Schritten, erhöht. Auf diese globalen Helligkeitsänderungen ist das Auge weniger Empfindlich als auf lokale Änderungen [Smi94].

Mit dieser Maßnahme konnte, bei den hier genutzten Prototypen, das dynamische Clipping stark reduziert werden, so dass dieses nicht mehr negativ auffiel. Weiterhin wurde die Helligkeit unkritischer Sequenzen sowie statischer Bilder nicht reduziert. Somit handelt es sich bei dieser Maßnahme um eine sinnvolle Erweiterung des SSC-Algorithmus.

5.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

In diesem Kapitel wurden mehrere Ursachen für verschlechterte visuelle Qualität durch Local-Dimming bei der Videodarstellung aufgezeigt und Lösungsvorschläge für diese Probleme gegeben.

So konnte in Abschnitt 5.1 durch die Anpassung der LED-Änderungsgeschwindigkeit in Vergleich zu **[Jun14]** das LED-Flickering insbesondere für dunkle Videostellen stark reduziert werden. Dies wurde maßgeblich durch das Einführen eines relativen Anteils in Abhängigkeit des aktuellen LED-Wertes zur maximal erlaubten LED-Änderung pro Frame erreicht. Außerdem wurden in diesem Abschnitt weitere Maßnahmen zur Reduzierung des Flickering vorgestellt; wie z.B. der Einfluss der LED-Faktoren und der globalen, minimalen LED-Werte. So lässt sich abschließend zeigen, dass eine Kombination aus LED-Faktoren zwischen benachbarten LEDs und dem Einsatz eines globalen, minimalen LED-Wertes die besten Ergebnisse liefert.

Im Abschnitt 5.2 wurde in dieser Arbeit erstmalig das dynamische Halo-Verhalten eines lokal gedimmten Displays untersucht. Das dynamische Halo-Artefakt hängt hierbei stark mit dem Light-Leakage des Displays und den Änderungen der LEDs der Hintergrundbeleuchtung zusammen. So hat ein solch sich bewegendes Light-Leakage einen schlechten Einfluss auf die visuelle Qualität des Bildes. Um dieses dynamische Halo zu reduzieren, wurde in dieser Arbeit eine Methode vorgestellt, welche bereits bekannte Parameter in Abhängigkeit des darzustellenden Bildes automatisch variiert. So ist es möglich, zumeist zu Lasten des Power-Saving, das dynamische Halo bei kritischen Bildern deutlich zu reduzieren und somit die Qualität von Videowiedergaben auf lokal gedimmten Systemen deutlich zu steigern. Da solche kritischen Bilder in Relation zur gesamten Betrachtungszeit eines Videos nicht oft auftreten, wird das Power-Saving über die gesamte Zeit nur unwesentlich verringert.

In denen in Abschnitt 5.3 enthaltenen Betrachtungen zum dynamischen Clipping lässt sich als Schlussfolgerung erwähnen, dass das dynamische Clipping zumeist aufgrund einer zu niedrigen Änderungsgeschwindigkeit der LEDs entsteht und somit stets im Konflikt zum LED-Flickering steht. Es wurde daher eine Lösung aufgezeigt, wie das dynamische Clipping durch eine globale Abdunkelung des darzustellenden Bildes reduziert werden kann, welche die Bildqualität in einigen Fällen signifikant verbessern kann.

6. Anzeigen künstlicher Bilder

Die bisher in dieser Arbeit gezeigten Light-Spread-Functions und die daraufhin entwickelten Algorithmen wurden neben dem Einsatz für mobile Endgeräte vorwiegend für den Einsatz in großen TV-Geräten entworfen. Während die in Kapitel 4 gezeigten Maßnahmen eine ideale Wiedergabe statischer Bildinhalte ermöglichen, ermöglichen die in Kapitel 5 gezeigten Erweiterungen auch den Einsatz des SSC-Algorithmus für bewegte Bilder. Alle bisher betrachteten Verbesserungen am SSC-Algorithmus sind auf natürliche Bilder ausgelegt. Unter natürlichen Bildern werden in dieser Arbeit Bilder verstanden, welche realen Aufnahmen entsprechen. Diese Bilder haben stets einige Gemeinsamkeiten, so sind bspw. die Helligkeitsverläufe in diesen Bildern meistens nicht besonders stark. Weiterhin enthalten natürliche Bilder meist keine größeren Flächen homogener Farben.

Allerdings stellen diese Bilder nicht die einzigen, auf TV-Geräten dargestellten Bilder dar. So werden oft in TV-Geräten Menüs genutzt, um zwischen den einzelnen Funktionen zu wählen. Diese künstlich erzeugten Bilder der Menüs unterscheiden sich erheblich von den natürlichen Bildern, auf die der bisherige SSC-Algorithmus angepasst ist. So verfügen die künstlichen Menübilder meist über große Flächen mit gesättigten Farben, oder auch kontinuierlichen Farbverläufen in Hintergründen. Bei solchen künstlichen Bildern ist der Mensch gegenüber auftretenden Fehlern in der Darstellung besonders empfindlich. Dies liegt daran, dass im Gegensatz zu natürlichen Bildern der Betrachter einer Vorstellung über den Bildinhalt hat. So werden bestimmte Eigenschaften wie z.B. gleichmäßige Farben oder Helligkeits- und Farbverläufe je nach Bild bereits vom Betrachter erwartet, was dazu führt, dass eine Abweichung besonders stark auffällt. Aus diesen Gründen muss stets eine möglichst fehlerfrei Darstellung von künstlichen Bildern im SSC-Algorithmus gegeben sein.

Im Folgenden wird das Augenmerk verstärkt auf die Prozessierung von Menübildern als herausragendes Beispiel für künstliche Bilder gelegt. Allerdings stehen diese an dieser Stelle stets stellvertretend für viele verschiedene künstlich erzeugte Bilder, da diese oft über die gleichen Charakteristiken verfügen.

Während es für den menschlichen Betrachter einfach ist, diese künstlichen Bilder von den natürlichen Bildern zu unterscheiden, ist dies für einen Algorithmus mit erheblichem Aufwand verbunden. Da der SSC-Algorithmus auch für künstliche Bilder gute Ergebnisse liefern soll, ist eine Anpassung der Parameter erforderlich. Diese Anpassung soll natürlich nur für die Prozessierung künstlicher Bilder angewendet werden, woraus resultiert, dass der Algorithmus selbst erkennen muss, um welches Bild es sich aktuell handelt. Da in den TV-Geräten keine verlässliche Information vorhanden ist, ob sich der User gerade in einem Menü befindet oder einen Film anschaut, bzw. es für das TV-Gerät unmöglich ist, festzustellen, ob z.B. über HDMI ein Menübild oder ein Film eingespielt wird, muss der SSC-Algorithmus zu jeder Zeit sicher voraussagen, ob es sich um ein künstliches, oder ein natürliches Bild handelt.

In den folgenden Abschnitten werden die Herausforderungen der Prozessierung künstlicher Menübilder näher betrachtet und in Abschnitt 6.3 eine Lösung dieses Problems in Form einer Menü-Detektion und einer Anpassung des globalen, minimalen LED-Wertes gegeben.

6.1 Statische Bildartefakte in Menüs

In Kapitel 4 wurden bereits die kritischen Artefakte für statische Bilder behandelt, und Lösungsansätze für die einzelnen Probleme erläutert. In diesem Abschnitt sollen diese statischen Artefakte in Bezug auf künstliche Menübilder nochmals betrachtet und die bereits gegebenen Lösungsansätze für diesen Anwendungsfall analysiert werden. Da sich, wie bereits gezeigt wurde, künstliche Menübilder durch den Aufbau und die unterschiedliche Art der Gestaltung erheblich von natürlichen Bildern unterscheiden, sind mitunter Abweichungen und Mängel bei den bisherigen Lösungsansätzen bei der Betrachtung von Menübildern zu erwarten. Die Untersuchungen an Menübildern wurden mit TV-Geräten des Herstellers Hisense vorgenommen. Da diese Menüs repräsentativ für weitere TV-Menüs sind, werden die folgenden Erläuterungen anhand dieser Menüs durchgeführt. Ein solches Menü eines Hisense TV-Gerätes ist in Abbildung 6-1 dargestellt.



Abbildung 6-1: Beispielhaftes Menübild eines Hisense TV-Gerätes

Dieses Menübild beinhaltet viele kritische Elemente, die bei der Prozessierung von Menübildern im SSC-Algorithmus problematisch werden können. Einerseits sind die Farben der einzelnen Kacheln hell und gesättigt. Weiterhin ist der Hintergrund, besonders im oberen Bereich, sehr dunkel und auch der Farbverlauf ist für Lokal-Dimming-Algorithmen schwer physikalisch genau abzubilden. Im Folgenden werden die aus Kapitel 4 bekannten statischen Artefakte für diese künstlichen Menübilder nochmals analysiert.

Clipping bei der Betrachtung von künstlichen Menübildern

Bei der Betrachtung von künstlichen Menübildern spielt Clipping in der Regel eine untergeordnete Rolle. Dies lässt sich leicht erkennen, wenn die verschiedenen Menüs in zwei Kategorien unterteilt werden. Die erste Kategorie beinhaltet hierbei dunkle Menüs; die zweite Kategorie helle Menüs. Untersuchungen haben gezeigt, dass die meisten betrachteten Menüs sich eindeutig in eine dieser Kategorien einordnen lassen. Dies reduziert die Untersuchungen des Clippings auf diese beiden Kategorien an möglichen Menübildern. Wie bereits in Abschnitt 4.1 gezeigt, spielt Clipping in dunklen

Bildern keine große Rolle. Das kritische Clipping, welches im SSC-Optimierer entsteht, da stets nur die beiden LEDs mit dem maximalen Einfluss berücksichtigt werden (vgl. Abschnitt 4.1.2), tritt bei diesen dunklen Bildern nicht auf, da die LEDs nicht bis zu ihrem Maximalwert angesteuert werden, und somit die geforderte Helligkeit von den beiden LEDs mit dem größten Einfluss im Pixel abgedeckt werden kann. Das bewusste Clipping, welches durch die Wahl des Condensers entsteht, ist lediglich bei der Verwendung des Mittelwert-Condensers bei der Betrachtung der dunklen Menübilder kritisch. Durch die meist hohen Frequenzen in den Condenser-Zellen der Menübilder (Schrift), führen die anderen beiden Condenser-Modi zu meist clippingfreien Resultaten.

Ähnliche Betrachtungen gelten hierbei für die Kategorie der hellen Menübilder. Da die hellen Menübilder, wie das in Abbildung 6-1 gezeigte Beispiel, meist über eine hohe mittlere Helligkeit verfügen, stellt Clipping auch bei diesen Bildern kein Problem dar. Hier sind meist viele der LEDs der Hintergrundbeleuchtung stark erhöht worden und somit ist meist das gesamte Backlight des Displays ausreichend hell.

Aufgrund dieser Analyse ergibt sich, dass die bisher vorgestellten Erweiterungen, insbesondere der neue Ansatz der automatischen Condensers (vgl. Abschnitt 3.4.2), für den SSC-Algorithmus im Hinblick auf Clipping gut zur Darstellung von Menübildern geeignet sind.

Halo bei der Betrachtung von künstlichen Menübildern

Ein größeres Problem stellt das Halo-Artefakt bei der Betrachtung künstlicher Menübilder dar. Besonders kritisch für das Auftreten von Halo-Artefakten bei Menübildern sind hierbei dunkle Bilder, welche über lokale, hellere Bereiche verfügen. Ein solches Beispielbild ist in Abbildung 6-2 dargestellt.

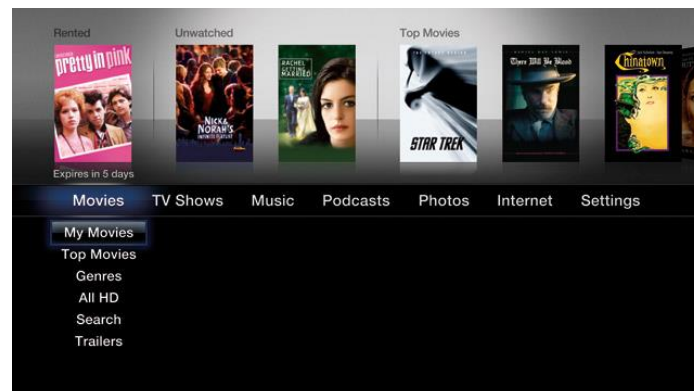


Abbildung 6-2: Beispielhaftes kritisches Menübild für Halo-Artefakte

Es ist leicht zu erkennen, dass in der linken und der oberen Displayhälfte deutlich höhere Helligkeiten erforderlich sind, als in der unteren bzw. der rechten Hälfte. Durch den hellen Bereich und die Abbildungen der einzelnen Filme im oberen Bereich ist dieses Beispiel bei der Darstellung auf einem Display mit LEDs an den langen Displaykanten weniger kritisch, als bei der Darstellung auf Displays

mit LEDs an den kurzen Displaykanten. Während alle LEDs eines Long-Edge-Displays ähnlich hohe Werte aufweisen, ist die Wahrscheinlichkeit eines Halos gering. Im Gegenzug ist der Halo auf dem dunklen Hintergrund der unteren Bildhälfte bei Displays mit, wie hier betrachtet, LEDs an beiden kurzen Displaykante, deutlich wahrnehmbar. Besonders im Zentrum der unteren schwarzen Fläche ist ein Helligkeitsunterschied zwischen linker und rechter Bildhälfte zu sehen. Dies ist in Abbildung 6-3 verdeutlicht.

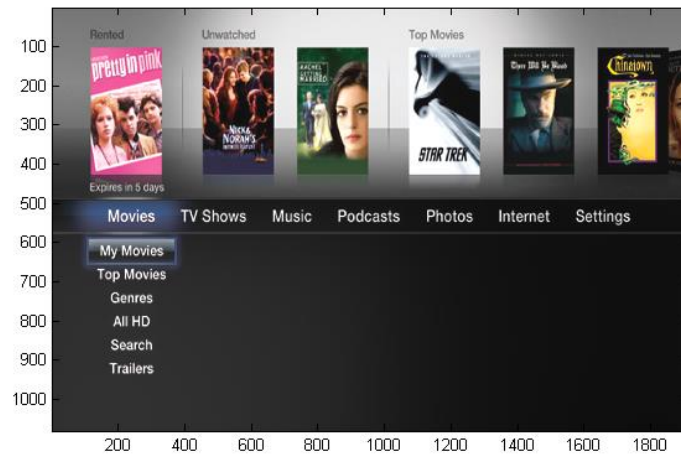


Abbildung 6-3: Halo in Menübild bei Display mit LEDs an beiden kurzen Displaykanten

In Abschnitt 4.2.3 wurden bereits Maßnahmen zur Reduzierung des Halos vorgestellt. Die dort vorgestellten Maßnahmen eignen sich allerdings nur bedingt zur Unterdrückung des Halos in Menübildern. So ist in dem hier gezeigten Beispiel deutlich zu sehen, dass eine Verwendung eines engen LED-Faktors nicht zielführend ist. Da das Display jeweils acht LEDs an beiden kurzen Displayseiten hat, liegt der kritischste Bereich bei der Entstehung von Halo-Artefakten in der Mitte der unteren schwarzen Fläche.

Ein LED-Faktor ist für diese Art Bilder nur dann sinnvoll, wenn er sehr eng gesetzt wird, was dazu führt, dass das Power-Saving stark sinkt und auch der Kontrast deutlich reduziert wird. Das Gleiche gilt für eine Anpassung des globalen, minimalen LED-Wertes. Um das Halo in Menübildern der hier gezeigten Art zu unterdrücken, müsste der globale, minimale LED-Wert in der Größenordnung von ca. 80% der Gesamthelligkeit liegen, was für den SSC-Algorithmus aufgrund des hohen Verlustes an Power-Saving inakzeptabel ist.

Einhalten der Farbtreue bei der Betrachtung von künstlichen Menübildern

Ein weiteres Problem bei der Betrachtung künstlicher Bilder stellen Farbverläufe dar. Da diese oft künstlich erzeugten Farbverläufe in den Hintergründen der Menüs meist sehr fein abgestuft sind, kann es bei der Kompensation leicht zu Abweichungen vom Original kommen. Ein kritisches Bild ist im linken Teil der Abbildung 6-4 zu sehen. Obwohl es sich hierbei um kein Menübild handelt, soll im

Folgendes Bild genutzt werden, um auf die Probleme bei der Einhaltung der Farbtreue bei der Betrachtung künstlicher Bilder und speziell künstlicher Farbverläufe einzugehen.

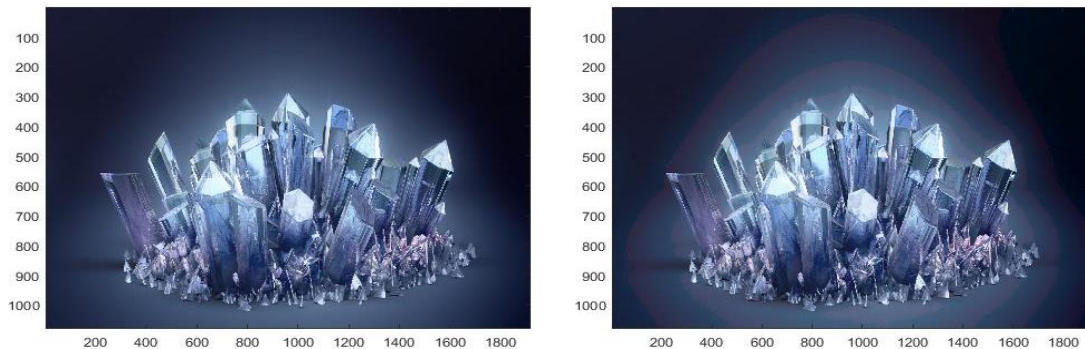


Abbildung 6-4: künstlicher Farbverlauf in künstlichen Bildern; links: Originalbild; rechts: gedimmtes Bild mit Verschiebungen im Farbverlauf

Das gedimmte Bild ist im rechten Teil der Abbildung 6-4 zu sehen. Anhand der nun sichtbaren Linien in dem die Kristalle umgebenden Farbverlauf sind hier die durch das lokale Dimmen entstandenen Farbverschiebungen sichtbar geworden. Diese entstehen durch die Anpassung der Backlight-Helligkeit auf den gedimmten Wert. Durch Ungenauigkeiten in beispielsweise der Gamma-Kurve bzw. durch begrenzte Auflösungen in der Berechnung der Kompensationswerte der Pixel im FPGA entstehen diese leichten Farbverschiebungen. Ansätze zur Kompensation dieser Farbverläufe finden sich in [Bau15]. Auf einem homogenen Hintergrund wären diese leichten Farbverschiebungen nicht sichtbar. Erst durch die Relation zur kontinuierlich sich ändernden Nachbarfarbe sind diese Abweichungen wahrzunehmen. Aufgrund der Form der Gamma-Kurve und auch der Berechnung der Kompensation stellt sich heraus, dass diese Farbabweichungen stärker werden, wenn der Kompensationsfaktor steigt. Aus diesem Grund sind diese sichtbaren Helligkeitsverläufe zumeist nur bei relativ dunklen Bildern wahrnehmbar. Zur Vermeidung dieses Artefakts bietet es sich daher an, die Backlight-Helligkeit zu erhöhen und somit den Kompensationsfaktor zu begrenzen. Welche weiteren Maßnahmen ergriffen werden könnten, wird im nächsten Abschnitt, in dem eine mehr oder weniger dynamische Variante dieses Artefakts betrachtet wird, behandelt.

6.2 Dynamische Bildartefakte in Menüs

Neben den in Abschnitt 6.1 beschriebenen statischen Bildartefakten bei Menübildern treten auch dynamische Artefakte bei der Betrachtung von Menüs auf. Das Auftreten dieser Artefakte hängt stark von der Art des Menüs ab. Zunächst soll hier ein Artefakt näher erläutert werden, welches bei Untersuchungen besonders oft aufgefallen ist und auch als störend von den Betrachtern empfunden wurde.

Halo bei schnellem Scrollen durch Menüs

Hierbei handelt es sich um eine Art dynamisches Halo-Artefakte, welche beim Scrollen durch Menüs auftreten kann. Dass dieses Artefakt so oft auftritt, liegt an der Beschaffenheit der TV-Menüs: Um in einem solchen Menü navigieren zu können, ist es fast zwangsläufig erforderlich, dass der aktuell angewählte Menüeintrag optisch hervorgehoben wird, da er nicht, wie bei einem PC, mittels Cursor oder auf dem Smartphone mit Touch-Control angesteuert werden kann. Da bei TV-Geräten meist nur eine Navigation über ein auf der Fernbedienung angegebene Steuerkreuz möglich ist, führt dies dazu, dass der optisch hervorgehobene, aktuell angewählte, Menüeintrag bei der Navigation über das Menü wandert. Zwei nacheinander angewählte Menüeinträge sind in den oberen beiden Bildern in Abbildung 6-5 dargestellt.

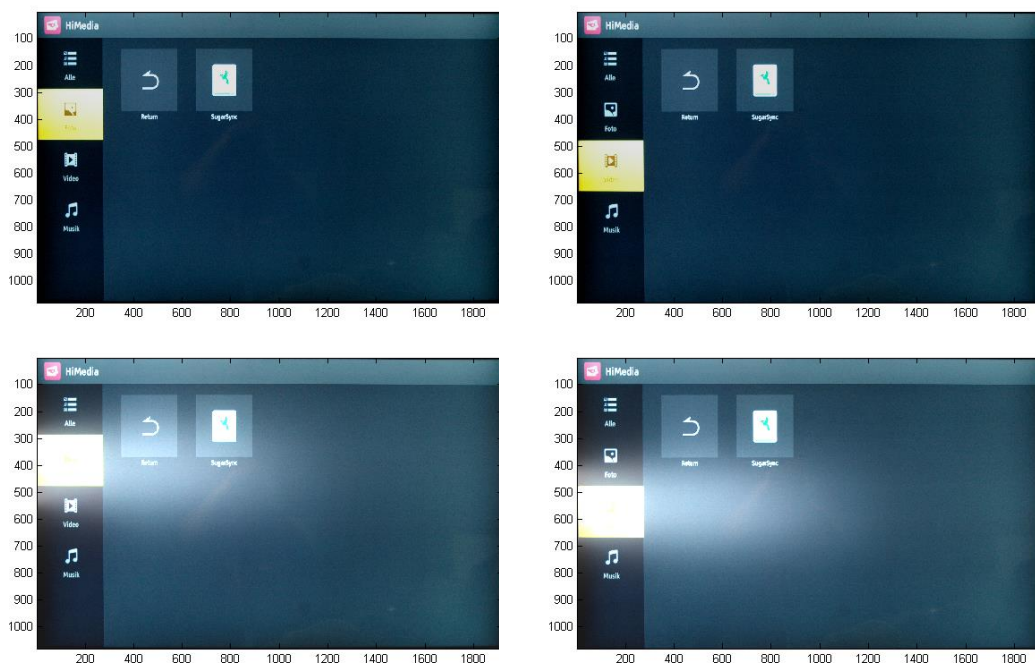


Abbildung 6-5: oben: Schematisches Scrollen durch ein Menü; unten: sichtbare Halo-Artefakte

In den unteren beiden Abbildungen in Abbildung 6-5 sind die entstehenden Halo-Artefakte für diese beiden Bilder hervorgehoben. Bei dem betrachteten Display handelt es sich um ein TV-Gerät mit jeweils acht LEDs an den beiden kurzen Displaykanten. Es ist hierbei leicht zu erkennen, dass sich beim Scrollen durch das Menü auch die LED ändert, welche in der abzudeckenden Region des hell markierten Menüeintrages den größten Einfluss hat. Dies führt, trotz der Anwendung des in Abschnitt 4.2.3 eingeführten LED-Faktors und des globalen, minimalen LED-Wertes zu einer ungleichmäßigen Verteilung der Helligkeit, was besonders auf dem dunklen, homogenen Hintergrund, welcher für Menübilder typisch ist, stark auffällt.

Es ist hierbei deutlich zu sehen, wie das Halo-Artefakt von oben nach unten über das Display wandert. Da in diesem Fall der hell hervorgehobene Menüeintrag viel heller, als das umliegende Menü ist, ist selbst bei der Wahl eines moderaten LED-Faktors noch ein deutliches Halo-Verhalten zu sehen. Der LED-Faktor müsste in diesem Fall, um jeglichen Halo zu unterdrücken, nahe bei eins liegen, was ein insgesamt helles Backlight zur Folge hätte. Weiterhin hat sich gezeigt, dass die für natürliche Videos erprobten Zeitkonstanten bei der LED-Filterung über untere und obere Grenzen, für den Fall des hier gezeigten Scrollens durch Menüs, zu langsam sein können, da in der Regel kein Scene-Cut [Jun14] [Sch14] ausgelöst wird. Dies ist leicht zu erkennen, da bei jedem Tastendruck auf der Fernbedienung innerhalb kürzester Zeit der nächste Menüeintrag markiert wird (vgl. Abbildung 6-5). Um in diesem Fall ein Clipping in dem hell hervorgehobenen, markierten Menüeintrag auszuschließen, wäre eine starke Beschleunigung des LED-Verhaltens notwendig. Aufgrund der in Abschnitt 5.1 geforderten Kriterien für ein flickerfreies Bild ist eine derartige Beschleunigung des LED-Verhaltens für alle dargestellten Inhalte des SSC-Algorithmus nicht möglich.

Eine Lösung dieses Konfliktes wird in Abschnitt 6.3 vorgestellt.

Fading beim Ein- und Ausblenden von Menüs

Ein weiteres dynamisches Artefakt beim Betrachten von Menüs auf TV-Geräten entsteht bei dem sogenannten Fading zwischen einzelnen Menübildern. Hierunter werden im Folgenden spezielle Effekte in den Menüs verstanden, wie z.B. das langsame Ein-oder Ausblenden von ganzen Menüs oder auch Menüteilen. Dies ist prinzipiell unkritisch für den SSC-Algorithmus, da diese absichtlich erzeugten Übergänge zwischen verschiedenen Menübildern bewusst langsam erfolgen, so dass es für den SSC-Algorithmus kein Problem darstellt, die richtige LED-Verteilung für jedes Bild zu berechnen. Weiterhin ist auch ein LED-Flickering oder ein Halo in diesem Fall nicht zu erwarten. Problematisch wird es bei diesen Fading-Effekten, wenn die Farben des Menüs für einzelne Flächen nicht homogen sind, da sich in diesem Fall, bei einem sich über die Zeit ändernden Backlight, auch die kompensierten TFT-Werte der Farben im Menü ändern. Dass sich die Farbe überall im Bild auf ähnliche Weise ändert, fällt dem Betrachter von Menüs mit homogenen, monotonen Flächen nicht auf. Anders sieht es aus, wenn im Menü Farbverläufe vorhanden sind, wie dies oft in Hintergründen hinter Menüs der Fall sein kann. Ein Beispielfeld eines solchen Menüs ist in Abbildung 6-6 dargestellt.



Abbildung 6-6: Farbverläufe im Hintergrund von TV-Menüs

Hier ist deutlich der Farbverlauf im unteren Bildbereich zu sehen. Die Auswahl eines Menüpunktes dieses Menüs führt dazu, dass sich die angezeigten Symbole ändern und dadurch auch ein neues Backlight für das Display berechnet wird. Durch die Filterung der LEDs führt dies zu sichtbaren, sich bewegenden Abstufungen im Farbverlauf. Diese sichtbaren Linien entsprechen den schon in Abbildung 6-4 gezeigten Linien, mit dem Unterschied, dass sie sich in diesem Fall kontinuierlich über das Display bewegen, was als noch störender empfunden wird. Diese Abstufungen treten prinzipiell in allen Bildern mit Farbverläufen auf, werden vom Betrachter allerdings kaum wahrgenommen. Erst durch die Bewegungen im Backlight und die dadurch entstehenden Bewegungen der Abstufungen im Farbverlauf werden diese für einen Betrachter sichtbar. Da sich solche Bewegungen in dieser Arbeit schlecht visualisieren lassen, wird hier auf eine zusätzliche Abbildung verzichtet.

Ein Erhöhen des LED-Faktors führt bei diesem Artefakt zu keiner Verbesserung, da durch die sich ändernden Bilder sich stets das Backlight ändert und es zu sichtbaren Bewegungen in den Farbverläufen kommt. Selbst eine Reduzierung des LED-Faktors auf eins würde dieses Artefakt nicht verhindern, wenn sich die globale Helligkeit des Bildes ändert, da sich dadurch ebenfalls das Backlight global ändern würde und durch Abweichungen in beispielsweise der Abbildung der Gamma-Kurve die zeitliche Bewegung in den Farbverläufen trotzdem entsteht.

Da aufgrund der begrenzten Ressourcen, die im FPGA für den SSC-Algorithmus zur Verfügung stehen, und auch wegen produktionsbedingten Schwankungen in der Farbdarstellung der Panel, keine genaue Abbildung der Gamma-Kurve und somit keine genauere Pixel-Compensation möglich ist, besteht die einzige Möglichkeit, dieses Artefakt zu unterdrücken, darin, jede mögliche Helligkeitsänderung im Backlight so weit wie möglich zu reduzieren. Da weiterhin kein Clipping in den darzustellenden Bildern entstehen soll, ergibt sich aus diesem Grund ein hoher globaler, minimaler LED-Wert. Würde der globale, minimale LED-Wert im Folgenden stets auf einen solch hohen Wert festgesetzt werden, wäre es nicht mehr möglich, mit dem SSC-Algorithmus Leistung einzusparen oder den Kontrast zu erhöhen. Da allerdings Menü-Bilder nicht über eine längere Zeit angezeigt werden, ist somit der erhöhte Stromverbrauch bei deren Anzeige unkritisch.

Im folgenden Abschnitt wird ein Ansatz vorgestellt, welcher auf einer Menüerkennung basiert und die Parameter des SSC-Algorithmus abhängig vom Bildinhalt für die optimale Anzeige von Menüs oder auch künstlichen Bildinhalten einstellt.

6.3 Menü-Detektion und dynamischer LED-Minimalwert

Da es, wie in den Abschnitten 6.1 und 6.2 gezeigt, bei der Betrachtung von künstlichen Bildern bzw. Menübildern bei der Verwendung des SSC-Algorithmus häufig zu störenden visuellen Artefakten kommt, wird in diesem Abschnitt ein neuer Ansatz vorgestellt, wie es trotzdem möglich ist, die hohe visuelle Qualität, die der SSC-Algorithmus bei natürlichen Bildern und Videos bietet, auch für die Betrachtung künstlicher Bilder beizubehalten. Dieser Ansatz beruht auf der Betrachtung der grundlegenden Eigenschaften des SSC-Algorithmus. Diese bestehen darin, durch das Dimmen Leistung einzusparen, den lokalen Kontrast zu erhöhen, sowie für eine bessere Farbstabilität zu sorgen. Da in den beiden vorherigen Abschnitten gezeigt wurde, dass eine Verbesserung der Bildqualität von künstlichen Menübildern durch Local-Dimming-Algorithmen nur mit hohem Risiko, möglich ist, kann der SSC-Algorithmus hier nicht zur Verbesserung eingesetzt werden. Dies resultiert daraus, dass Menübilder meistens bereits über hohe Helligkeiten und viele gesättigte Farben verfügen, so dass eine Kontrastverbesserung kaum möglich ist. Allerdings sind stets mögliche Verschlechterungen in der Darstellung solcher Bilder auf jeden Fall zu vermeiden. Somit bliebe nur noch die Leistungseinsparung als Kriterium bei der Betrachtung der Menübilder. Diese ist allerdings, aufgrund der bereits genannten Gründe, ebenfalls gering und trägt aufgrund der kurzen Anzeigedauer der Menübilder kaum zur gesamten Energieeinsparung bei.

Dies führt dazu, dass es sinnvoll ist, für Menübilder ein eingeschränktes Local-Dimming zu verwenden. Dies wird auch dadurch bestätigt, dass die Betrachtungszeit von solchen Menübildern oder auch von künstlichen Bildern im Vergleich zu natürlichen Bildern oder gar Videos gering ist. Das Menü dient lediglich für einige Sekunden zur Senderwahl oder Auswahl eines Videos, welches dann für mehrere Minuten oder gar Stunden abgespielt wird. Unter der Annahme, dass Menübilder und künstliche Bilder maximal ca. 10% des darzustellenden Inhaltes eines TV-Gerätes ausmachen, ist auch nur ein Absinken des gesamten Power-Savings um ca. 10% zu erwarten, was bei der dadurch erreichten Sicherstellung der Bildqualität in Menübildern zu vertreten ist. Aus diesem Grund wird hier vorgeschlagen, bei der Betrachtung von Menübildern oder künstlichen Bildern den SSC-Algorithmus einzuschränken

Im Folgenden wird gezeigt, wie eine solche Einschränkung des SSC-Algorithmus aussehen kann, und wie es im laufenden Betrieb eines Displays möglich ist, Menübilder zu erkennen.

Homogenisierung des Backlights bei Betrachtung von Menübildern

Da die meisten Artefakte bei der Betrachtung von Menübildern durch eine ungleichmäßige Verteilung der LED-Werte und das dadurch entstehende inhomogene Backlight entstehen, ist es sinnvoll, die Homogenität des Backlights für die Betrachtung von Menübildern sicherzustellen. Die Maßnahmen zur Homogenisierung sind hierbei bereits aus Abschnitt 4.2 bekannt, da eine Reduzierung des Halo-Verhaltens stets zu einer hohen Homogenität des Backlights führt. In Abschnitt 4.2 wurden hierzu zwei Möglichkeiten vorgestellt: Die LED-Faktoren sowie der globale, minimale LED-Wert.

Da unter anderem ein großes Problem bei der Betrachtung von Menübildern die schnellen Helligkeitsänderungen aufgrund des Scrollens durch das Menü sind (vgl. Abschnitt 6.2), ist eine Anpassung der LED-Faktoren zur Behebung der Artefakte weniger geeignet, da für jedes Bild erst bei der Berechnung der LED-Werte im SSC-Optimierer erneut das Einhalten der LED-Faktoren sichergestellt wird. Aufgrund der in Abschnitt 5.1.2 vorgestellten Erweiterungen der LED-Faktoren entstehen zwar keine Schwingungen in der Helligkeit der Hintergrundbeleuchtung beim schnellen Scrollen in Menüs, aber es kann passieren, dass wegen der langsamen LED-Filterung, in Kombination mit der Vorgabe der Bewegungsrichtung der LED, durch die LED-Faktoren die geforderte Helligkeit im Menü nicht abgedeckt werden kann. Dies entsteht vor allem beim schnellen Scrollen, da hier keine Scene-Cuts erkannt werden, und somit die Anpassung der LEDs trotz niedrig gewähltem LED-Faktor zu langsam ist. Der niedrige Faktor erhöht zwar, z.B. beim Scrollen, die direkt benachbarten LEDs, so dass bei einem Wechsel in den nächsten markierten Menüeintrag noch kein Artefakt sichtbar wird. Bei schnellem Wechsel zu weiter entfernten Einträgen sind die zugehörigen LEDs dieser Einträge noch nicht erhöht, was zwangsläufig zu Clipping führt. Aufgrund der üblichen Merkmale von Menüs wird Clipping hier als besonders störend wahrgenommen. Dieser Effekt ist stark abhängig von der Anzahl an LEDs pro Kante des Displays: Bei nur wenigen LEDs pro Kante werden nahezu alle LEDs dieser Kante durch den Faktor angehoben, bei vielen LEDs (z.B. 24 LEDs an einer langen Kante) verringert sich der Einfluss des Faktors mit zunehmendem Abstand zu der zu Beginn, aufgrund der Markierung im Menü, erhöhten LED. Da der hier vorgestellte Algorithmus für alle Edge-Lit-Geräte gute Ergebnisse liefern soll, müsste ein Faktor von nahezu eins gewählt werden, um mit Sicherheit alle Artefakte zu verhindern. Allerdings würde ein LED-Faktor von nahezu eins das ohnehin schon reduzierte Power-Saving bei Menübildern weiter stark belasten, da in den meisten Menüs mindestens eine Stelle auftritt, die einen LED-Wert von 100% verlangt. Somit wäre keine Leistungseinsparung beim Betrachten von Menübildern möglich.

Eine weitere Möglichkeit zur Homogenisierung des Backlights bietet ein Erhöhen des globalen, minimalen LED-Wertes. Dass ein starkes Erhöhen des globalen, minimalen LED-Wertes die bei der Betrachtung von Menübildern entstehenden Artefakte erheblich reduzieren kann, ist hierbei leicht zu sehen. Durch das erhöhte globale Backlight müssen die einzelnen LEDs, welche in lokalen Bereichen hoher Helligkeit den größten Einfluss haben, nicht mehr so stark erhöht werden, da bereits ein großer Anteil des geforderten Lichtes vom globalen Anteil des Backlight abgedeckt wird. Bei Untersuchungen ergab sich ein globaler, minimaler LED-Wert von 80% des Maximalwertes der LEDs in allen betrachteten Menübildern als ausreichend. In den meisten betrachteten Menübildern musste sogar zusätzlich keine weitere LED lokal angehoben werden, da bereits durch das Minimum von 80% genügend Licht im Backlight erzeugt wurde. Bei der Betrachtung von Menüs mit sehr hohen lokalen Helligkeiten entstehen ebenfalls keine Artefakte, da der maximale lokale Unterschied in der Hintergrundbeleuchtung lediglich noch 20% betragen kann. Diese Abweichungen können vom menschlichen Auge kaum noch wahrgenommen werden. Weiterhin wurde die Gefahr des Clippings reduziert, da die zuständigen LEDs, ausgehend von 80% der Helligkeit, leicht ihren Zielwert erreichen können.

Im folgenden Abschnitt wird eine Methode vorgestellt, um ohne großen Hardwareaufwand Menü- bzw. künstliche Bilder von natürlichen Bildern zu unterscheiden.

Menü-Detektion mit geringem Hardwareaufwand

Da die Parameter des SSC-Algorithmus für die optimale Darstellung von Menübildern angepasst werden müssen, wird in diesem Abschnitt eine Möglichkeit vorgestellt, mit geringem Hardwareaufwand Menübilder von natürlichen Bildern zu unterscheiden.

Ziel dieses Ansatzes ist es, ohne einen Bildspeicher auszukommen, da ein zusätzlicher Speicher in der FPGA-Implementierung des SSC-Algorithmus zu einem unverhältnismäßig hohen weiteren Hardwarebedarf führen würde (vgl. Abschnitt 3.5). Um dies zu realisieren, wurden zunächst Untersuchungen durchgeführt, um zu bestimmen, welche Merkmale typisch für Menübilder sind. Diese Merkmale werden im Folgenden kurz erläutert und ihre Wahl begründet.

- Bildbereiche mit geringer räumlicher Frequenz:

Dieses Kriterium beruht auf der Annahme, dass die Betrachtung von Menübildern stets dann besonders kritisch ist, wenn der Hintergrund dieser Bilder sehr homogen ist, oder langsame kontinuierliche Farbverläufe mit geringer Frequenz beinhaltet. Die Größe dieser Bildbereiche soll an dieser Stelle noch nicht näher benannt werden.

- Bildbereiche mit hoher räumlicher Frequenz:

Die Betrachtung von Menübildern wird immer dann besonders kritisch, wenn spezielle Menüeinträge optisch hervorgehoben werden. Auch das Scrollen zwischen diesen Menüeinträgen führt oft zu störenden Artefakten. Um mit Hinblick auf diese Artefakte sicher die kritischen Menübilder erkennen zu können, ist es unerlässlich, dass ein Bild bestimmte Bereiche enthält, in denen Schrift vorhanden ist. Aufgrund der hardwareintensiven Schrifterkennung [Umb10] wird in diesem Ansatz darauf verzichtet, und es werden stattdessen Bildbereiche mit einer hohen räumlichen Frequenz als kritisch angesehen, da diese oft Schrift enthalten. Ebenfalls soll auf die Anzahl und Größe dieser Bereiche an dieser Stelle noch nicht eingegangen werden.

- Bildbereiche mit Bewegung:

Ein Vorhandensein sich ändernder Bildinhalte stellt ein letztes Kriterium zur Bestimmung kritischer Bildinhalte dar, da es leicht zu Bildartefakten kommen kann, sobald sich einzelne Teile des Bildes ändern. Diese Änderungen in Menübildern können in diesem Fall Änderungen in einzelnen Teilmenüs sein, oder auch nur ein sich bewegendes Cursor.

Untersuchungen ergaben hierbei eine starke Korrelation zwischen den ersten beiden Kriterien. So stellte sich heraus, dass ein Bild genau dann als kritisch einzustufen ist, wenn sowohl Bildbereiche mit niedriger Frequenz, als auch Bildbereiche mit hoher Frequenz im Bild vorhanden sind. Anders verhält es sich mit dem Kriterium der bewegten Bildinhalte. Hier stellte sich heraus, dass das Erfüllen dieses Kriteriums nicht zwangsweise notwendig ist um kritische Bilder zu erkennen. Das Kriterium der bewegenden Bildinhalte stellt somit eine Ergänzung zu den ersten beiden Kriterien dar. Es hat sich herausgestellt, dass mit zunehmenden, sich bewegenden Bildinhalten, auch die Anzahl und Stärke der auftretenden Artefakte in erkannten Menübildern stark zunimmt.

Da die Erkennung einzelner zusammenhängender Bildbereiche zur Bestimmung der Kriterien umfangreich ist [Umb10] und nicht in einem Pipeline-Prozess realisiert werden kann, wird zur Bestimmung der einzelnen Kriterien der bereits im SSC-Algorithmus vorhandene Condenser genutzt. Zur Veranschaulichung sind in Abbildung 6-7 nochmals ein beispielhaftes Menübild sowie das zugehörige Mittelwert-kondensierte Condenser-Bild dargestellt.

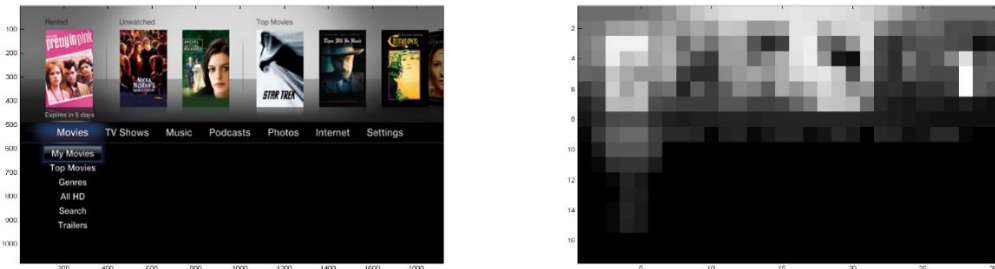


Abbildung 6-7: Links: Menübild; rechts: Mittelwert-Kondensierung

Dieses Beispiel zeigt bereits, dass eine Bestimmung der Kriterien in kritischen Bereichen auf Basis des Condensers möglich ist. So ist hier zu sehen, dass die Auflösung des resultierenden kondensierten Bildes ausreicht, um alle Flächen ausreichend genau zu charakterisieren.

Da, basierend auf den bisher eingeführten Condenser-Modi, noch keine genaue Aussage über die Art der aktuellen Zelle getroffen werden kann, wurde der Condenser um weitere Funktionen erweitert, die es erlauben, für jede Zelle des kondensierten Bildes einen korrespondierenden Wert für jedes hier vorgestellte Kriterium zu berechnen. Basierend auf Schwellwerten für jedes Kriterium pro Zelle ergibt sich hieraus, ob, und wenn ja, in welchem Kriterium die gerade betrachtete Zelle $c_{i,j}$ kritisch ist. Hierbei gilt:

$$C_{i,j,f_{low}}(c_{i,j}) = 1 \text{ für } f \leq f_{TH_{low}} \quad (6-1)$$

$$C_{i,j,f_{high}}(c_{i,j}) = 1 \text{ für } f \geq f_{TH_{high}} \quad (6-2)$$

$$C_{i,j,mov}(c_{i,j}) = 1 \text{ für } mov \geq mov_{TH} \quad (6-3)$$

Während der Berechnung der Frequenz f in diesem Fall jeweils eine einfache Frequenzanalyse (vgl. [Umb10]) über die Pixel der kondensierten Zelle $c_{i,j}$ zu Grunde liegt, wird der Wert der bewegten Zellen mov , basierend auf der Änderung zwischen aufeinander folgenden Bildern, ermittelt. Damit der Wert der sich bewegenden Zellen nicht nur für einzelne Frames gilt, werden die Werte über mehrere Frames gefiltert.

Die hier gezeigte Charakterisierung der Zellen während der Kondensierung und die damit einhergehende Bestimmung des maßgeblichen Kriteriums für jede Zelle beruht darauf, dass auf diese Weise in der Hardware-Realisierung nicht alle Werte für jede Zelle gespeichert werden müssen. Dies hätte zur Folge, dass der Speicherplatz von drei zusätzlichen Condensern nötig wäre. Da die Position der einzelnen kritischen Zellen zur Bestimmung des Bildinhaltes nicht erforderlich ist, reicht es, auf diese Weise die Anzahl der, je nach Kategorie, als kritisch betrachteten Zellen zu zählen. Dies erfordert weniger Hardware und reduziert die Eingangswerte der weiteren Analyse auf drei Werte: Die Anzahl kritischer Zellen je Kategorie. Zur Veranschaulichung sind in Abbildung 6-8 nochmal die kritischen Zellen je Kategorie des in Abbildung 6-7 gezeigten Beispielbildes hervorgehoben. Die Werte für $C_{i,j,mov}$ erklären sich daher, dass der im Bild markierte Menüeintrag eine Laufschrift enthält.



Abbildung 6-8: Links: Kritische Zellen für niedrige Frequenz $C_{i,j,f_{low}}$; Mitte: Kritische Zellen für hohe Frequenz $C_{i,j,f_{high}}$; rechts: Kritische Zellen für Bewegung $C_{i,j,mov}$

Es ist zu sehen, dass diese Methode gut geeignet ist, die kritischen Zellen jeder Kategorie zu identifizieren. Im Folgenden wird die Position der einzelnen Zellen nicht gespeichert, sondern lediglich die Anzahl der Zellen gezählt. Um anhand dieser drei Kennzahlen zu bestimmen, ob es sich um ein kritisches Menübild handelt, wurden in Untersuchungen am Lehrstuhl für Mikroelektronik untere Schwellwerte für die Anzahl von Zellen mit hoher sowie mit niedriger Frequenz bestimmt. Ein Bild gilt somit dann als kritisch, wenn beide Schwellwerte überschritten werden. Die Einbeziehung der sich bewegenden Zellen stellte sich als Herausforderung dar, da auch Bilder als kritisch betrachtet werden müssen, in denen sich keine Zellen bewegen.

Weitere Untersuchungen ergaben, dass ein Menübild als besonders kritisch eingestuft werden muss, wenn sich bestimmte Teile darin bewegen. Dies ließ sich mit den bereits vorhandenen Kriterien gut abbilden: Es wurde eine LUT entwickelt, die einen Zusammenhang zwischen der Anzahl der sich

bewegenden Zellen (N_{mov}) und den Schwellwerten der Kategorien ($N_{TH_{low}}$ und $N_{TH_{high}}$) für Zellen hoher und niedriger Frequenz einführt. Somit gilt:

$$N_{TH_{low}} = f(N_{mov}) \quad (6-4)$$

$$N_{TH_{high}} = f(N_{mov}) \quad (6-5)$$

Diese Kopplung der Parameter erlaubt eine sichere Erkennung von Menübildern anhand von in der Pixel-Pipeline berechneten Werten während der Bildkondensierung (vgl. Abschnitt 3.4). Somit ist im SSC-Algorithmus für jedes einzelne Frame bekannt, ob es sich hierbei um ein kritisches Menübild handelt oder nicht. Da sich die ebenfalls kritischen, künstlichen Bilder mit den gleichen Kriterien abdecken lassen, erlaubt diese Erweiterung des Algorithmus hierbei sogar die zuverlässige Erkennung dieser kritischen, künstlichen Bilder.

Integration in den SSC-Algorithmus:

Um die Ergebnisse dieser Analyse mit dem bestehenden SSC-Algorithmus zu kombinieren, ist eine Erhöhung des globalen, minimalen LED-Wertes nötig. Hierzu wird in Abhängigkeit der gezeigten Kriterien der globale, minimale LED-Wert linear bis zu dem im letzten Abschnitt ermittelten Wert von 80% erhöht. Somit ist sichergestellt, dass für die kritischsten Bilder stets das Backlight zu mindestens 80% eingeschaltet ist, was möglicherweise auftretende Artefakte zuverlässig vermeiden kann. Ebenfalls erkannte, weniger kritische Bilder werden somit auf entsprechend niedrigere globale, minimale LED-Werte abgebildet, so dass stets die visuelle Qualität sichergestellt ist und trotzdem ein möglichst hohen Power-Saving erreicht werden kann. Da sich durch diese Methode mit den angezeigten Bildern auch der globale, minimale LED-Wert zeitlich ändern, ist eine Betrachtung der Filterung dieses Wertes unerlässlich.

Das zeitliche Verhalten der LED-Filterung ist hierbei beim Wechsel von natürlichen Bildern zu künstlichen Bildern besonders zu Betrachten. Da durch Wechsel zwischen den verschiedenen Bildarten große Unterschiede im Bild entstehen, ist eine schnelle spontane Anpassung der Helligkeit für den Betrachter nicht wahrnehmbar. Gleichzeitig ist es ebenfalls wichtig, den globalen, minimalen LED-Wert für kritische Bilder schnell zu erreichen, da sonst das langsame, zeitlich gefilterte Erhöhen des Backlights sichtbar ist und es weiterhin zu starken Clipping-Artefakten kommen kann. Als Lösung für dieses Problem bietet es sich an, bei jedem Wechsel zwischen unkritischen natürlichen und besonders kritischen Menü-Bildern einen Scene-Cut auszulösen. Die Behandlung von Scene-Cuts wurde bereits in [Jun14] und [Sch14] behandelt und bildet seitdem einen festen Bestandteil in der LED-Filterung (vgl. Abschnitt 5.1.2)

Weiterhin ist der Wechsel kritischen Bildern zu unkritischen Bildern stets unkritisch, da das Backlight bei der Darstellung der kritischen Bilder ohnehin stark erhöht ist. Dies hat zur Folge, dass das langsam abnehmende, zeitlich gefilterte Backlight für die darzustellenden natürlichen, unkritischen Bilder unter Umständen zu hell ist, was lediglich für eine kurze Zeitspanne den Kontrast etwas senken

könnte bzw. das Power-Saving minimal reduziert. Besonders kritische Artefakte, wie starkes Clipping oder Halo, können bei diesen Übergängen nicht auftreten.

Die hier vorgestellten Maßnahmen wurden in die FPGA-Implementierung des SSC-Algorithmus implementiert. Der zusätzliche Hardwareaufwand ist dabei gering und Untersuchungen am Lehrstuhl für Mikroelektronik zeigten eine deutliche Reduzierung der in Menübildern auftretenden Artefakte. Insbesondere durch die dynamische Anpassung des globalen, minimalen LED-Wertes ist es möglich, Artefakte zuverlässig zu unterdrücken und trotzdem ein möglichst hohes Power-Saving zu erreichen.

6.4 Robustheit und Diskussion der Ergebnisse

Durch die in diesem Kapitel vorgestellte Bildanalyse zur Menü-Detektion und dem daraus resultierenden dynamischen Anpassen des globalen, minimalen LED-Wertes konnten die meisten Artefakte, welche bei der Anzeige künstlicher Bilder auftraten, eliminiert werden. Insbesondere die statischen Bildartefakte wie Clipping bzw. Halo bei dunklen Menüs konnten deutlich reduziert werden, da durch die Erhöhung des globalen, minimalen LED-Wertes wegen der höheren Helligkeit kaum noch Clipping auftritt und aufgrund der vergrößerten Homogenität des Backlights die Halo-Artefakte deutlich minimiert wurden.

Aufgrund der langsamen Filterung des globalen, minimalen LED-Wertes während ein Menü-Bild detektiert ist, verschwinden auch die sonst üblichen dynamischen Artefakte. Hier sei insbesondere der Halo beim Scrollen als auch das Fading beim Übergang zwischen verschiedenen Menü-Bildern genannt. Beide Artefakte können, soweit alle das Problem betreffenden Frames korrekt als Menü erkannt wurden, durch die gewonnene Helligkeit und Homogenität des erhöhten globalen, minimalen LED-Wertes deutlich minimiert werden.

Hierbei wurde durch die Art der Implementierung der Menü-Detektion sichergestellt, dass Menü-Bilder mit einer großen Sicherheit erkannt werden. Dies wurde so gewählt, da die Artefakte, die ein falsch detektiertes Menü-Bild auslöst, sich auf das Gesamtergebnis des Local-Dimming-Systems deutlich schlechter auswirken, als die Konsequenzen eines natürlichen Bildes, welches fälschlicherweise als Menü-Bild detektiert wurde. Da der globale, minimale LED-Wert bei falsch detektierten natürlichen Bildern nur graduell erhöht wird, leidet zumeist nur das Power-Saving minimal für diese wenigen, falsch detektierten Bilder. Die Bildqualität dieser Bilder bleibt nahezu erhalten, auch wenn auf die Verbesserungen des Local-Dimmings, wie z.B. höherer Kontrast und besserer Schwarzwert, bei diesen Bildern dann verzichtet werden muss. Da der Mensch allerdings negative Artefakte deutlich stärker wahrnimmt, als nicht vorhandene Verbesserungen, ist es in diesem Fall stets besser, einige Fehldetektionen von natürlichen Bildern in Kauf zu nehmen, um dadurch die Treffsicherheit der Detektion der echten Menü-Bilder zu erhöhen.

7. Optimierung der Hintergrundbeleuchtung von Edge-Lit-Displays

In den bisherigen Betrachtungen für Local-Dimming-Algorithmen an Edge-Lit-Displays wurde bereits die unterschiedliche Anordnung der LEDs an den verschiedenen Displaykanten erwähnt, und auch vor allem in Bezug auf die Entstehung von Halo-Artefakten (vgl. Abschnitt 4.2) die Auswirkungen der Anordnungen auf gezielt gewählte Testbilder untersucht.

Allerdings wurde bisher nicht betrachtet, welche Art der LED-Anordnung für unterschiedliche Displays die besten Ergebnisse beim Local-Dimming liefert. Hierbei lässt sich keine pauschale Aussage treffen, ob Long-Edge oder Short-Edge die besseren Backlight-Varianten sind; viel mehr hängt die Wahl des Backlights mit dem Einsatzgebiet des Displays zusammen. So sieht eine optimale LED-Anordnung für ein TV-Gerät anders aus, als eine optimale LED-Anordnung für Smartphones oder auch Computer-Displays.

Bisher wurde die LED-Anordnung der Hintergrundbeleuchtung zumeist entweder aus wirtschaftlichen Gründen oder zur Erfüllung besonderer Design-Vorgaben gewählt. Dieser Trend begann bereits bei der ersten Einführung von Edge-Lit-Displays. Das Ziel dieser Displays war vorrangig nicht eine Verbesserung der Bildqualität oder ein erhöhtes Power-Saving. Viel mehr litt anfangs die Bildqualität und auch das Power-Saving aufgrund der nur mangelhaft vorhandenen Dimming-Algorithmen für diese Backlight-Art. Das trotzdem ab etwa 2012 verstärkt Displays mit Edge-Lit-Hintergrundbeleuchtung hergestellt wurden, lag unter anderem an dem Wunsch der Kunden, dass Displays möglichst dünn sein sollten. Dies lässt sich nur mit Edge-Lit-Displays realisieren, da bei Direct-Lit-Displays stets ein gewisser Abstand zwischen den LEDs und dem Panel erforderlich ist (vgl. Abschnitt 2.3.1).

Gleichzeitig hatte der Wechsel auf Edge-Lit-Backlight auch zur Folge, dass weniger einzelne LEDs erforderlich sind, was den Preis eines solchen Backlights senken kann. So sind beispielsweise in einer Kante eines Edge-Lit-Displays zwischen 50 und 160 physikalische LEDs⁷ verbaut, während ein Direct-Lit-Display zur Erzeugung eines homogenen Backlights deutlich mehr LEDs benötigt. So sind in einem am Lehrstuhl für Mikroelektronik untersuchten Display 7 x 19 LEDs, also insgesamt 133 LEDs verbaut. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit wurden im Folgenden Edge-Lit-Displays entwickelt, welche nur noch LEDs an einer Kante des Displays haben. Dies reduziert weiterhin die Anzahl der benötigten LEDs und ermöglicht ein dünneres Display an den restlichen Displaykanten. Dies wurde in letzter Zeit von mehreren TV-Herstellern so weit getrieben, dass LEDs nur noch an der unteren Kante eingesetzt werden, da diese bei normaler Nutzung des TV-Gerätes nicht sichtbar ist. Die stärker wahrgenommenen oberen und seitlichen Kanten des Displays können dadurch deutlich dünner realisiert werden.

Unabhängig von den wirtschaftlichen Gründen und des Designs, soll im Folgenden untersucht werden, welche Anordnung der LEDs bei einem Edge-Lit-Display für den Einsatz von Local-Dimming-Algorithmen die besten Ergebnisse liefert.

⁷ Meist werden zwischen 10 und 20 physikalische LEDs zu einer, einzeln ansteuerbaren LED-Gruppe zusammengefasst.

7.1 Unterscheidung verschiedener Edge-Lit-Varianten

Unter den hier behandelten Edge-Lit-Varianten werden die unterschiedlichen Anordnungen der LEDs an den Displaykanten bezeichnet. Die möglichen Variationen sind im Folgenden aufgelistet:

- LEDs an einer kurzen Kante
- LEDs an beiden kurzen Kanten
- LEDs an einer langen Kante
- LEDs an beiden langen Kante

Da sich das Verhalten von Displays, welche LEDs an nur einer Seite haben, von denen mit LEDs an sich gegenüberliegenden Seiten nicht wesentlich unterscheidet, werden hier zunächst die Unterschiede von Displays mit LEDs an der langen Displaykante und LEDs an der kurzen Displaykante erläutert. In Abbildung 7-1 sind beispielhaft die LSFs zweier LEDs dieser beiden Edge-Lit-Varianten dargestellt.

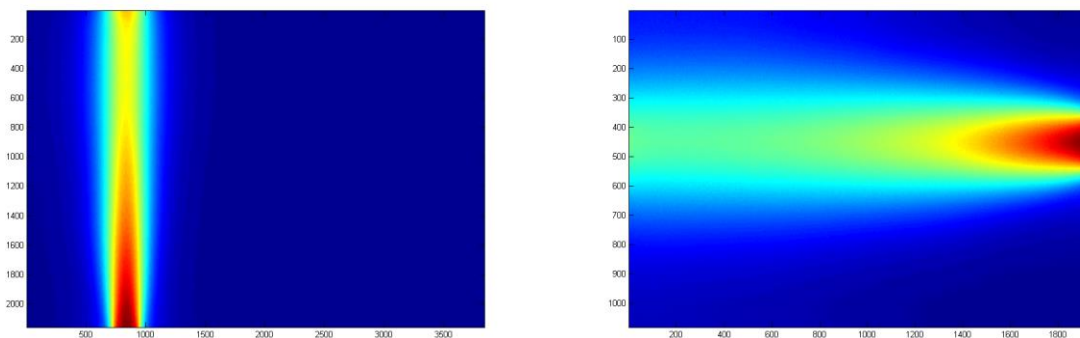


Abbildung 7-1: Vergleich der LSF von unterschiedlichen Edge-Lit-Varianten; links: Display mit LEDs an der langen Kante; rechts: Display mit LEDs an der kurzen Kante

Hierbei ist links die LSF einer LED eines Displays mit 16 LEDs an der unteren Displaykante und rechts die LSF einer LED eines Displays mit 6 LEDs an der rechten Displaykante dargestellt. Deutlich zu erkennen sind die jeweiligen Vorzugsrichtungen der Lichtausbreitung, was dazu führt, dass ein Display mit LEDs an der langen Displaykante besser geeignet ist, vertikale, helle Strukturen in den darzustellenden Bildern auszuleuchten. Andererseits können mit der LSF der LEDs von Displays mit LEDs an der kurzen Displaykante die horizontalen Strukturen der Bilder besser ausgeleuchtet werden. Dies ist so zu verstehen, dass helle orientierte Bereiche in der jeweiligen Ausrichtung gezielt ausgeleuchtet werden können, so dass ein hohes Power-Saving und ein hoher Kontrast Bezug auf die dunkleren Displaybereiche möglich ist. Diese Erkenntnis liefert zwar für Displays von z.B. Smartphones keine weitere Erkenntnis, da es ohnehin im mobilen Bereich üblich ist, dass die Geräte, und somit auch die dargestellten Bildinhalte in den Händen der Benutzer gedreht werden. Anders

sieht dies bei Computer-Monitoren und TV-Geräten aus, die stets eine statische Orientierung aufweisen. Um eine Vorzugsorientierung der LEDs zu bestimmen, ist es erforderlich, einen Blick auf die darzustellenden Inhalte zu werfen. So werden auf Smartphones und Tablets zumeist viele künstliche Bilder dargestellt. Diese enthalten, je nach geöffneter Anwendung, entweder menüartige Strukturen oder bilden einen Text auf zumeist hellem Hintergrund ab. In Abbildung 7-2 sind exemplarisch drei solcher Bilder dargestellt.

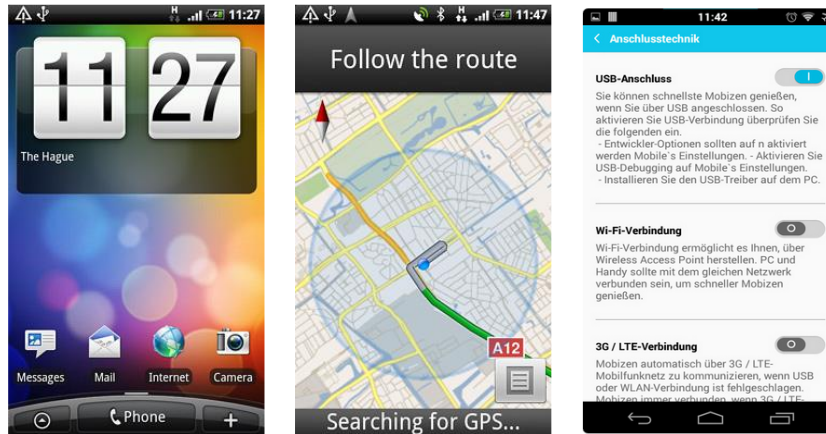


Abbildung 7-2: Beispielhafte Bildinhalte eines Smartphones

In allen diesen Bildern ist keine Vorzugsrichtung der Helligkeitsverteilung auszumachen, so dass es nicht möglich ist, eine optimale Art der Edge-Lit-Beleuchtung für Smartphones anzugeben. Ähnlich verhält sich dies bei Computer-Monitoren: Dort werden ebenfalls oft künstliche Menübilder oder Texte dargestellt, so dass auch hier oft keine bevorzugte Richtung der Helligkeitsverteilung auszumachen ist. Dies führt dazu, dass bei diesen Geräten die Kante, an der die LEDs angebracht werden, für den Local-Dimming-Algorithmus keine große Rolle spielt. Ohnehin wäre bei diesen Anwendungen (Smartphone, Tablet, Laptop) keine Änderung der LED-Kante möglich, da sich diese bauweisebedingt bei Smartphones stets an den kurzen Seiten, und bei Laptops stets an der unteren langen Seite befinden.

Anders sieht es bei externen Computer-Monitoren aus, welche oft auch zum Abspielen natürlicher Videos genutzt werden und im Aufbau den TV-Geräten sehr ähnlich sind. Diese Geräte sind stets horizontal ausgerichtet und auch die anzuzeigenden Bildinhalte sind unter Umständen sehr identisch. Auf beiden Geräten werden, zu einem sehr großen Anteil, natürliche Bilder wiedergegeben. Anhand von Untersuchungen am Lehrstuhl für Mikroelektronik hat sich herausgestellt, dass diese Bilder sehr oft horizontale Strukturen aufweisen. Zwei solcher Beispielbilder sind in Abbildung 7-3 dargestellt.



Abbildung 7-3: Beispielbilder für horizontale Helligkeitsverläufe

In beiden Bildern ist deutlich die horizontale, helle Struktur des Himmels zu erkennen. Da ein heller Horizont in vielen natürlichen Bildern und auch Videos vorhanden ist, bietet sich ein Backlight mit LEDs an den kurzen Displaykanten an. Dies führt dazu, dass zum Beleuchten des Himmels nur wenige, obere LEDs der jeweiligen seitlichen Kante erforderlich sind. Dies führt zu einem deutlich höheren Power-Saving als bei Long-Edge-Displays. Dort müssten fast alle LEDs zur vollständigen Ausleuchtung des Himmels eingeschaltet werden. Weiterhin ist aus diesem Grund eine Erhöhung des Kontrastes bei Long-Edge-Displays schwieriger, da ein Clouding über das gesamte Display entsteht, um den oberen Displaybereich auszuleuchten. Ein weiterer Vorteil von Short-Edge-Displays ist bei der Darstellung von neueren Spielfilmen zu erkennen. Diese sind zumeist mit einem Seitenverhältnis von 21:9 aufgenommen, während die Displays zumeist ein Seitenverhältnis von 16:9 aufweisen. Dies führt zu den bekannten schwarzen Balken im unteren und oberen Bildbereich, was es Short-Edge-Displays ermöglicht, die oberen und unteren LEDs der seitlichen Kanten stark zu dimmen und somit den Schwarzwert dieser Streifen deutlich zu erhöhen. Auch ist ein möglicherweise vorhandenes dynamisches Halo-Artefakt in diesen Streifen bei Short-Edge-Displays nicht vorhanden, wodurch Clouding-Artefakte unterdrückt werden können. Bei der Darstellung solcher Videos auf Long-Edge-Displays ist es möglich, dass ein störendes, dynamisches Halo-Artefakt in diesen schwarzen Streifen wahrgenommen wird. Dies führt eindeutig zu einer Bevorzugung von Short-Edge-Displays im TV-Bereich.

Bisher nicht beachtet wurde in diesem Abschnitt die Unterscheidung von Displays mit LEDs an nur einer Kante bzw. mit LEDs an gegenüberliegenden Kanten. Prinzipiell bleiben für beide Varianten die hier getroffenen Überlegungen gültig. Da allerdings für Local-Dimming immer eine größere Anzahl LEDs vorteilhafter ist (vgl. Abschnitt 7.2), ist auch hier eine Anordnung der LEDs auf beiden gegenüberliegenden Seiten zu bevorzugen. Dies ermöglicht zu jeder Zeit die Anpassung der Helligkeiten für jede Bildhälfte und kann, aufgrund der fehlenden LED-Faktoren zwischen gegenüberliegenden LEDs, das Power-Saving erhöhen.

7.2 Einfluss der Anzahl der LEDs pro Kante

Eine wichtige Rolle bei der Betrachtung von unterschiedlichen Varianten des Backlights von Edge-Lit-Displays spielt die Anzahl der LEDs. Diese stellt hierbei stets einen Kompromiss zwischen den Kosten der Hintergrundbeleuchtung und der Effizienz eines Local-Dimming-Algorithmus dar.

Es lässt sich grundsätzlich sagen, dass die Effizienz eines Local-Dimming-Algorithmus mit der Anzahl der einzeln ansteuerbaren LEDs der Hintergrundbeleuchtung steigt. Dies liegt daran, dass der relative, maximale Einfluss einer LED auf einen bestimmten Bildbereich mit steigender LED-Anzahl ebenfalls zunimmt. Dies lässt sich leicht anhand der Größe des zugeordneten Bildbereiches ausmachen. So haben beispielsweise in einem Display mit 16 LEDs 35% aller Pixel mindestens eine zugeordnete LED mit einem maximalen Einfluss von mindestens 50%. Bei einem Display mit 6 LEDs erreichen diesen Wert lediglich 25% aller Pixel (vgl. Abschnitt 3.1). Dass das Power-Saving mit zunehmendem Einfluss der LEDs auf die zugeordneten Pixel steigt, ergibt sich daraus, dass für jeden Pixel eine LED mit hohem Einfluss auf diesen Pixel gefunden werden kann. Dies führt dazu, dass Local-Dimming-Algorithmen eine möglichst große Zahl von LEDs benötigen, um die besten Ergebnisse zu liefern.

Ein Trade-off zwischen den Kosten und den möglichen Verbesserungen im SSC-Algorithmus ergibt sich hierbei wiederum anhand der Betrachtung von typischen Bildmaterialien. Wie bereits im vorherigen Abschnitt erläutert, lässt sich bei Smartphones und Laptop-Monitoren keine Struktur in den anzuzeigenden Bildinhalten ausmachen, was bei den bisher betrachteten Überlegungen zu einer möglichst großen Zahl von LEDs führt. Anders sieht dies wiederum bei häufig dargestellten natürlichen Inhalten auf TV-Geräten aus. Diese natürlichen Inhalte zeigen oft ähnliche Strukturen, wie z.B. Landschaften oder Menschen. Hierbei ergeben sich immer ähnlich große Unterschiede in den Gradienten der Helligkeitsverteilungen. Aufgrund dieser Regelmäßigkeiten in natürlichen Bildern konnte, anhand verschiedener Prototypen ab einer LED-Anzahl von 16 LEDs keine wesentlich gesteigerte Effizienz des SSC-Algorithmus erkannt werden. Ein weiteres Argument für die Wahl von 16 LEDs bei Displays mit LEDs an den kurzen Displaykanten ergibt sich wiederum bei der Betrachtung von 21:9 Videomaterial. Während der Einfluss der ersten und letzten LED der 8 LEDs einer Seite noch schmal genug ist, um aufgrund des schwarzen Streifens im Bild die entsprechende LED deaktivieren zu können, ist dies bei 6 LEDs pro kurzer Displaykante nicht mehr möglich. In Abbildung 7-4 sind beide hier beschriebenen LSFs abgebildet.

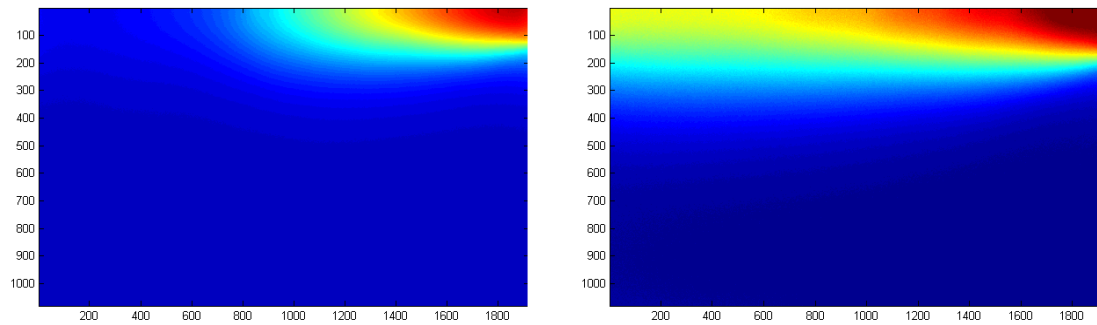


Abbildung 7-4: Links: ausreichende LED Anzahl zur Deaktivierung einer LED bei 21:9 Bildinhalte; rechts: zu geringe LED Anzahl zur Deaktivierung einer LED bei 21:9 Bildinhalte

Zwar ist ein vollständiges Abschalten der obersten und untersten LED bei der Wiedergabe von 21:9 Bildmaterial aufgrund der festgelegten LED-Faktoren nicht möglich; diese LEDs werden durch den möglicherweise hohen Wert ihrer benachbarten LEDs ebenfalls eingeschaltet. Trotzdem ist ein stark gesteigertes Power-Saving für Displays mit mindestens 8 LEDs pro kurzer Displayseite bei diesen Videos zu beobachten. Außerdem verbessert sich der Schwarzwert der schwarzen Balken erheblich, was das Clouding stark reduziert und zu deutlich Kontrastreicheren Bildern führt.

7.3 Einfluss der Form der Light-Spread-Funktion

Ein weiterer großer Einfluss, mit Bezug zu einem maximal möglichen Power-Saving und möglichst verringerten Bildartefakten, liegt in der Form der Light-Spread-Functions der einzelnen LEDs. Je nachdem, welche Optik der LED vorgeschaltet ist, bzw. über welche Abstrahleigenschaften die LED verfügt oder, je nach Art des gewählten Light-Guides, wird das Licht der LEDs bei unterschiedlichen Edge-Lit-Displays unterschiedlich stark aufgefächert. Die Bandbreite hierbei ist relativ groß, und ist exemplarisch in Abbildung 7-5 für zwei Displays dargestellt.

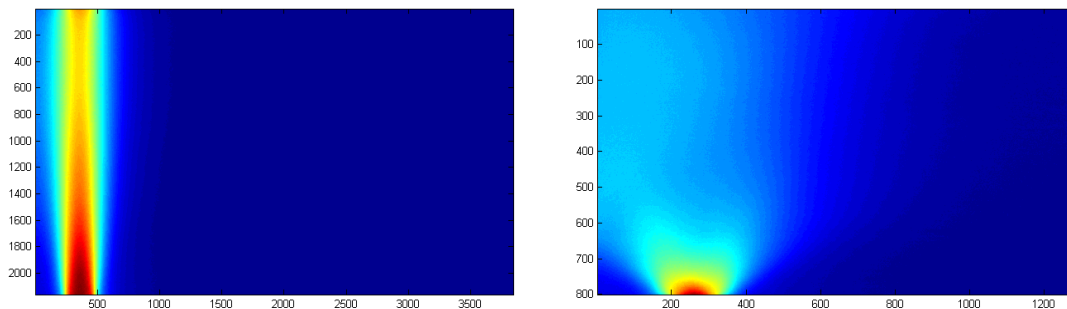


Abbildung 7-5: Links: LSF einer LED eines Displays mit 16 LEDs an der langen Displaykante (collimated); rechts: LSF einer LED eines Displays mit 12 (dispersive)

Es ist leicht zu erkennen, dass die Kanten der LSF des linken Displays deutlich steiler abfallen als im rechten Display. Dies ermöglicht zwar einerseits einen hohen Kontrast in dunklen Bildbereichen, fördert aber auch stark das Entstehen von Halo-Artefakten. Da diese Halo-Artefakte bei diesem Display deutlich sichtbar waren, waren niedrige LED-Faktoren für diesen Prototyp erforderlich, was das Power-Saving und somit auch den Kontrast wiederum reduziert haben. Ein weiterer Nachteil einer solch steilen LSF liegt in dem fehlenden Crosstalk-Licht benachbarter LEDs. Dies führt dazu, dass zur Abdeckung eines hellen Objektes stets die direkt zugeordnete LED stark aktiviert werden muss. LSFs mit solch steilen Helligkeitsverläufen werden im Folgenden als collimated LSF bezeichnet.

Bei flachen LSFs, auch dispersive LSF genannt, wie sie im rechten Display gezeigt ist, ist es möglich, auch Objekte zu großen Teilen mit dem von allen LEDs erzeugten Crosstalk-Licht abzudecken. Allerdings geht dies bei dieser Form der LSF zu Lasten des Kontrastes, da sich das Licht jeder einzelnen LED weit über das gesamte Display zerstreut.

Aufgrund dieser Überlegungen sind für den SSC-Algorithmus LSF-Formen ideal, welche zwar stark in die entsprechende Richtung gerichtet sind, sich hingegen in Richtung der gegenüberliegenden Displayseite etwas aufspalten. Eine LSF, die sich bei den Untersuchungen als nahezu optimal herausgestellt hat, ist in Abbildung 7-6 dargestellt:

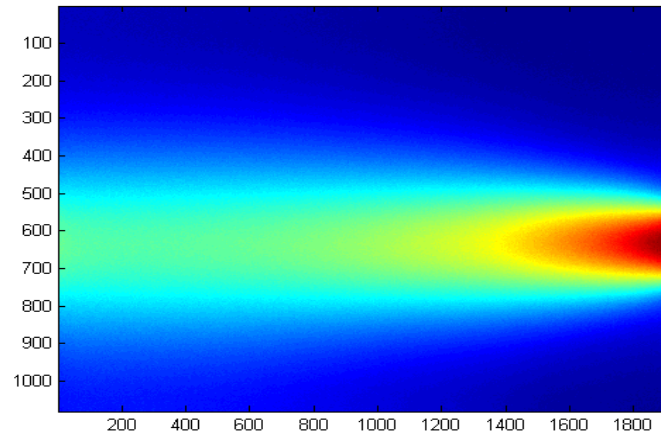


Abbildung 7-6: Nahezu optimaler Verlauf der Helligkeit der LSF einer LED zur Optimierung im SSC-Algorithmus

Eine solche LSF stellt stets einen Kompromiss zwischen collimated und dispersive LSF dar. Displays mit einer ähnlichen LSF lieferten bei Untersuchungen stets die besten Ergebnisse in Hinblick auf Power-Saving und erreichbare Bildqualität sowie Kontrast. Dies liegt an einer optimalen Ausnutzung des Crosstalks in der gegenüberliegenden Displayhälfte sowie einer trotzdem relativ schmalen Form, was hohe Kontraste im Display und ein hohes Power-Saving ermöglicht.

7.4 Diskussion

In diesem Kapitel wurde die Anordnung der LEDs sowie auch die Form der Light-Spread-Function betrachtet. Die Anordnung der LEDs ist hierbei nur von Bedeutung für die Bildqualität, wenn auf den betrachteten Displays mehrheitlich natürliche Bilder dargestellt werden. In diesem Fall bieten sich LEDs an den kurzen Displaykanten an, da natürliche Bilder meist über horizontal ähnliche Helligkeiten verfügen. Für Displays, welche mehrheitlich künstliche Bilder darstellen, dominieren zumeist andere Gründe zur Wahl der Position der LEDs, da kaum optische Effekte erzielt werden können. Für diese Displays stellen die Randbedingungen an die Form des Gehäuses oft die wichtigeren Kriterien zur Anordnung der LEDs.

Die Untersuchungen zum Einfluss der Anzahl der LEDs pro Displaykante ließen hingegen klar erkennen, dass, wenn die LEDs von TV-Geräten an der kurzen Seite angebracht sind, der Mehrwert von mehr als 8 LEDs pro Seite gering ist. Die 8 LEDs pro Seite ergeben sich hierbei aus dem Verhältnis eines 16:9 Displays zu dem verbreiteten 21:9 Bildmaterial. Aber auch bei Displays mit LEDs an der langen Displaykante steigt der Mehrwert von mehr als 16 LEDs nur noch langsam, so dass der Kosten-Nutzen-Aspekt von weiteren LEDs dann stets eng an die geforderten Displays angepasst werden sollte.

Zuletzt sei die Form der Light-Spread-Function genannt, welche maßgeblich zum Erreichen eines hohen Power-Saving bzw. auch einer Verbesserung der visuellen Qualität beitragen kann. So wurde gezeigt, dass zu steile Helligkeitsverläufe in der Light-Spread-Function leicht Inhomogenität und sichtbare Halos erzeugen können. Gleichzeitig bieten diese Light-Spread-Functions aber das größte Potential zum Power-Saving. Light-Spread-Functions mit zu flachen Gradienten erzeugen andererseits zwar zumeist homogene Backlight-Beleuchtungen, sind im erreichbaren Power-Saving aber limitiert. Als für den SSC-Algorithmus optimal geeignete Form der Light-Spread-Function stellt sich somit eine Mischung dieser beiden Varianten heraus, welche es ermöglicht, Helligkeitsbedarf lokal abzudecken sowie das Crosstalk-Licht von benachbarten LEDs zur Optimierung zu nutzen.

8. Zusammenfassung und Fazit

In dieser Arbeit wurden Herausforderungen, die beim lokalen Dimmen von Displays mit seitlich angeordneten LEDs auftreten können, betrachtet und Lösungsvorschläge zur Qualitätssicherung aufgezeigt. Durch die flexible Implementierung des SSC-Algorithmus bezüglich der Auflösung der Displays und der Anzahl der individuell ansteuerbaren LEDs war es möglich, die auftretenden Artefakte von insgesamt acht am Lehrstuhl für Mikroelektronik vorhandenen Displays mit Edge-Lit Hintergrundbeleuchtung zu untersuchen. Da es sich bei diesen Displays teils um Prototypen von Kooperationspartnern und teils um eigens modifizierte Seriendisplay handelt, konnte hierbei nicht jede gewünschte Konstellation aus Auflösung und LED-Anordnung bzw. Anzahl realisiert werden. Umso wichtiger war es, dass der implementierte SSC-Algorithmus in der Lage war, für alle Displays eingesetzt werden zu können. Hierzu wurde der SSC-Algorithmus erweitert, um insbesondere auch mit Displays mit LEDs an nur einer Displaykante verwendet werden zu können und die einzelnen LEDs der Hintergrundbeleuchtung nicht ungleichmäßig zu belasten. Nachdem in dieser Arbeit zunächst die Grundlagen des Dimmings sowie die Wahrnehmung des menschlichen Auges erklärt wurden, konnten die größten Herausforderungen vom lokalen Dimmen von Displays mit Edge-Lit Hintergrundbeleuchtung ermittelt werden. Diese Herausforderungen ließen sich zunächst in zwei große Teilbereiche unterteilen: Das Auftreten von statischen bzw. dynamischen Bildartefakten. Es wurden hierzu Möglichkeiten vorgestellt, welche insbesondere das beim Dimmen auftretende Clipping durch Modifikationen im Condenser und im SSC-Optimierer stark reduzieren können. Auch das Artefakt des statischen Halos wurde beschrieben und die Ursachen dieses herausgearbeitet. Mit der Betrachtung der LED-Faktoren sowie eines globalen, minimalen LED-Wertes wurden Parameter vorgestellt, welche das Halo bei lokal gedimmten Edge-Lit-Displays deutlich reduzieren können. Hierbei wurde stets auf die wichtigsten Dimming-Kriterien, nämlich das Erreichen eines hohen Power-Savings sowie eines hohen Kontrastes, geachtet. Zur Veranschaulichung der statischen Ergebnisse des SSC-Algorithmus dient das Power-Saving sowie der statische Kontrast des in Abbildung 8-1 gezeigten Testbildes auf einem Hisense TV-Gerät mit jeweils 8 LEDs an beiden kurzen Displaykanten.



Messpunkt	ungedimmt	Hisense	SSC
1	329,5 cd/m ²	184,5 cd/m ²	271,6 cd/m ²
2	0,089 cd/m ²	0,053 cd/m ²	0,076 cd/m ²
3	0,142 cd/m ²	0,035 cd/m ²	0,0549 cd/m ²
4	0,074 cd/m ²	0,010 cd/m ²	0,0055 cd/m ²

Abbildung 8-1: Vergleich des erweiterten SSC-Algorithmus mit einem Hisense Local-Dimming-Algorithmus [Sch16]

Die vier Punkte geben unterschiedliche Messpunkte an, deren durch den SSC-Algorithmus erreichte Helligkeit mit der ungedimnten Helligkeit, sowie der Helligkeit des Hisense-Local-Dimming-Algorithmus verglichen werden können. Anhand der erreichten Helligkeitswerte lässt sich für das Originalbild ein Kontrast von 1:4450 berechnen. Der Hisense-Algorithmus erreicht einen Kontrast von 1:15900 und der SSC-Algorithmus von 1:49000. Dies führt zu einer Verdreifachung des Kontrastes bei nur mäßig verringertem Power-Saving im Vergleich zum Hisense-Algorithmus. Das Power-Saving des SSC-Algorithmus für dieses Bild beträgt 43% während der Hisense-Algorithmus ein Power-Saving von 51% aufweist.

Untersuchungen des Einflusses des Blickwinkels auf die Farbwiedergabe haben einen eindeutigen Zusammenhang zwischen Light-Leakage und dem Einhalten der Farbtreue erkennen lassen. Es wurde gezeigt, dass es somit möglich ist, den Farbraum eines Displays bei der Darstellung dunkler Bilder mittels Dimming-Algorithmus zu vergrößern. Weiterhin wurde die Einhaltung der Farbtreue durch eine Verringerung des Abbildungsfehlers in der Gamma-Kurve bei gleichbleibendem Speicherbedarf weiter erhöht. Dies führte stets zu originalgetreuen Farben und kaum sichtbaren Farbabweichungen in gedimnten Bildern.

Die Herausforderungen im Bezug auf die Sicherstellung der Videoqualität wurden durch neue Maßnahmen der Reduzierung des LED-Flickerings nahezu bewältigt. Hierzu wurden die Ursachen des LED-Flickerings untersucht und mehrere Ansätze zur Reduzierung dieses aufgezeigt. Im Weiteren wurde in dieser Arbeit erstmalig das Problem des dynamischen Halo-Verhaltens beschrieben und Lösungen zur Vermeidung gegeben. Die hierbei gewonnenen Resultate konnten im Weiteren bei der Vermeidung des dynamischen Clippings eingesetzt werden.

Da mit den gezeigten Verbesserungen weiterhin Artefakte bei der Betrachtung von Menübildern auftreten, wurde der SSC-Algorithmus um eine Menü-Detektion erweitert. Diese Menü-Detektion ist äußerst effizient und benötigt nur wenige Ressourcen. Durch das gezielte Detektieren von Menübildern ist es möglich, die Parameter des SSC-Algorithmus in diesen Fällen genau anzupassen. Zum Abschluss wurde die Optimierung der Hintergrundbeleuchtung von Edge-Lit-Displays betrachtet. Hierbei wurde die Form der LSF sowie die Anzahl und Anordnung der LEDs in Edge-Lit-Displays analysiert. Unter der Betrachtung, der für diese Arbeit verwendeten Displays, lässt sich hierbei sagen, dass der Mehrwert von mehr als 16 LEDs gering ist, während ansonsten die Effizienz des Dimming-Ergebnisses mit der LED-Anzahl steigt.

Somit konnte in dieser Arbeit gezeigt werden, dass ein Algorithmus, welcher ein hohes Power-Saving und hohe Kontraste erreicht, auch für Displays mit seitlich angeordneten LEDs möglich ist. Dies wurde erreicht, indem bekannte Artefakte, die beim Dimmen dieser Displays auftreten, untersucht und systematisch reduziert wurden. Die vorgestellten Erweiterungen des SSC-Algorithmus erlauben es hierbei ein hohes Power-Saving zu erreichen und gleichzeitig die visuelle Qualität des Displays abzusichern und sogar zu steigern. Da LCDs trotz der OLED Konkurrenz weiterhin die günstigste Display-Technologie bleiben wird, ist Local-Dimming für Edge-Lit Displays die beste Methode, dünne Bauformen zu ermöglichen sowie den Kontrast und den Schwarzwert und somit die visuelle Qualität zu verbessern.

9. Ausblick

9.1 Kombination von LEDs an kurzer und langer Displayseite zur Erhöhung der Brillanz

Die größten Herausforderungen beim lokalen Dimmen von Displays mit einseitiger LED-Anordnung zeigten sich unter anderem im Erreichen eines hohen lokalen Kontrastes bzw. einer hohen Brillanz. Besonders störend ist hierbei das in Abschnitt 4.2 beschriebene statische Halo. Dadurch kommt es durch das Light-Leakage der einzelnen Pixel zu einer deutlichen Verschlechterung des Schwarzwertes. Dies zeigt sich besonders deutlich bei dunklen Bildern, welche über nur einzelne, helle Spots verfügen. Da die LEDs der hier betrachteten Displays oft schon einen großen Bereich des Displays beleuchten, um die geforderte Helligkeit des hellen Spots abzudecken (vgl. Kapitel 7), sind die entstehenden Halo-Artefakte in diesem Fall auch besonders störend auf großen Flächen des Displays zu sehen.

Um den lokalen Kontrast bzw. die Brillanz eines solchen Displays zu erhöhen, bieten sich zwei Möglichkeiten an. Die erste besteht darin, das Light-Leakage der Pixel zu reduzieren. Hierzu bedarf es eines hohen Aufwands in der Grundlagenforschung und an den Liquid-Crystal-Materialien. Diese Forschung wird aufgrund der großen Konkurrenz durch OLED-TVs bereits stark in den entsprechenden Unternehmen betrieben.

Eine weitere, günstigere Möglichkeit besteht darin, das Licht des Backlights, welches zum Light-Leakage und somit zum Halo führt, in den Bereichen des Displays, an denen die Helligkeit nicht gefordert ist, mehr zu verteilen; hierzu könnten LEDs an beiden Displaykanten dienen. Durch die Addition jeweils einer LED an der kurzen bzw. der langen Displaykante kann die geforderte Helligkeit ähnlich eines Direkt-Lit-Backlights gezielt eingestellt werden. Ein Beispiel einer solchen, künstlich erzeugten LSF ist in Abbildung 9-1 zu sehen.

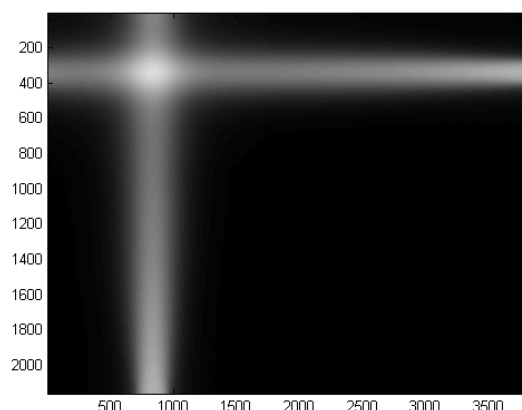


Abbildung 9-1: künstlich erzeugte LSF eines Displays mit LEDs an einer kurzen sowie einer langen Displaykante

Es ist deutlich zu sehen, dass im Bereich der Überschneidung beider Lichtkegel eine deutlich höhere Helligkeit erreicht wird als in den beiden Lichtkegeln einzeln. Dies führt dazu, dass ausschließlich im Bereich der Überschneidung ein Halo um ein abzubildendes Objekt entstehen kann. Somit könnte es für ein solches Display möglich sein, ähnliche lokale Kontraste, wie beispielsweise Direct-Lit-Displays, zu erreichen.

Da aktuell am Markt der Trend zu einseitigen LED-Anordnungen geht, konnte kein Display mit einer entsprechenden LED-Anordnung zur genaueren Analyse gefunden werden. In Kooperation mit einem Displayhersteller kann versucht werden, die optimale Form einer solchen LSF zu ermitteln.

Außerdem müsste der SSC-Optimierer für diesen Fall angepasst werden. Die Optimierung darf nicht mehr rein auf die Minimierung des erzeugten Lichtes ausgelegt sein, sondern auf die optimale Verteilung des Lichtes, um Kontrast und Brillanz zu erhöhen. Erste Ansätze eines solchen Optimierers wurden bereits in **[Jun13]** gezeigt. Bei der Anpassung des SSC-Algorithmus auf Displays mit solchen LED-Anordnungen ist weiterhin die Filterung der LEDs näher zu betrachten, da durch die Abdeckung einer geforderten Helligkeit aus zwei unterschiedlichen Richtungen neue dynamische Artefakte auftreten können. Die Kopplung der LEDs, über ihren Bereich der Überschneidung, führt dabei zu einer dynamischen Kopplung in der Filterung der LED-Werte.

Wenn das dynamische Verhalten solcher Displays beherrscht wird und die Optimierung angepasst ist, bieten diese Displays einen guten Kompromiss zu den teureren Direct-Lit-Displays.

9.2 Local-Dimming und HDR

Die Verbreitung und Darstellung von HDR-Inhalten hat in letzter Zeit stark zugenommen. Hierbei steht HDR für High Dynamic Range und beschreibt verschiedene Standards, die es ermöglichen, einen höheren Dynamikumfang der anzuzeigenden Bilder zu erreichen. Dass eine solche Erhöhung erwünscht ist, ist naheliegend, da sie zunehmend der Wahrnehmung des menschlichen Auges der realen Welt entspricht (vgl. Abschnitt 2.1.1). Allerdings gibt es einige technische Herausforderungen, die zum Erreichen eines guten HDR-Ergebnisses zu lösen sind.

Zunächst muss es dem Display physikalisch möglich sein, die großen geforderten Dynamikbereiche abbilden zu können. Hierbei fehlt es OLED-Displays oft an der benötigten maximalen Helligkeit (vgl. Abschnitt 2.2.1); wohingegen herkömmliche LC-Displays meist nicht den geforderten tiefen Schwarzwert erreichen können. Speziell wird der Schwarzwert schlechter, wenn gleichzeitig besonders hohe Helligkeiten dargestellt werden müssen. Aus diesem Grund ist eine Realisierung eines HDR tauglichen LC-Displays nur mit dem Einsatz eines leistungsfähigen Local-Dimming-Algorithmus möglich. Dass auf die Weise der Schwarzwert signifikant verbessert werden kann, wurde in dieser Arbeit gezeigt.

Ein weiteres Problem, mit aktuellem Handlungsbedarf, stellt die Übertragung und die Bereitstellung des entsprechenden HDR-Bildmaterials dar. Aktuelle Möglichkeiten zur Übertragung finden sich in den Standards „Dolby Vision“ und „HDR10“, welche auf eine 10Bit- bzw. 12Bit-Übertragung der Daten setzen. Anschließend werden diese Daten mittels einer PQ⁸-Kurve auf den höheren Dynamikbereich für die HDR-Darstellung abgebildet [Cha17]. Um den in dieser Arbeit vorgestellten Algorithmus für die Darstellung von HDR Inhalten nutzen zu können, muss anstelle der bisherigen Gamma-Kurve eine PQ-Kurve mit entsprechend geringem Hardwareaufwand integriert, sowie das Interface angepasst werden. Die berechnete LED-Verteilung ermöglicht dann eine HDR-Darstellung auf dem Ausgabedisplay.

Ein weiterer aktueller Forschungspunkt ist das Verfahren des „inverse tone mapping“ [Did08]. Es dient dazu, Bild- und Videomaterialien, welche nicht in HDR vorliegen, zur verbesserten Darstellung auf HDR fähigen Displays anzupassen. Das Verfahren erhöht hierbei künstlich den Dynamikumfang der vorliegenden Bilddaten. Da die meisten Bilddaten nicht in HDR vorliegen, könnte eine Erweiterung des SSC-Algorithmus darin bestehen das „inverse tone mapping“ bzw. ein speziell zu entwickelndes Verfahren zur Erhöhung des Dynamikumfangs im SSC-Algorithmus zu integrieren. Hierbei gilt es zu untersuchen, ob durch Synergieeffekte die Effizienz des Condensers gesteigert werden kann, bzw. ob bekannte Artefakte im „inverse tone mapping“ wie z.B. „blocky areas“ oder Rauschen [Ban07] minimiert werden können.

⁸ PQ: Abkürzung für Perceptual Quantizer

A Anhang

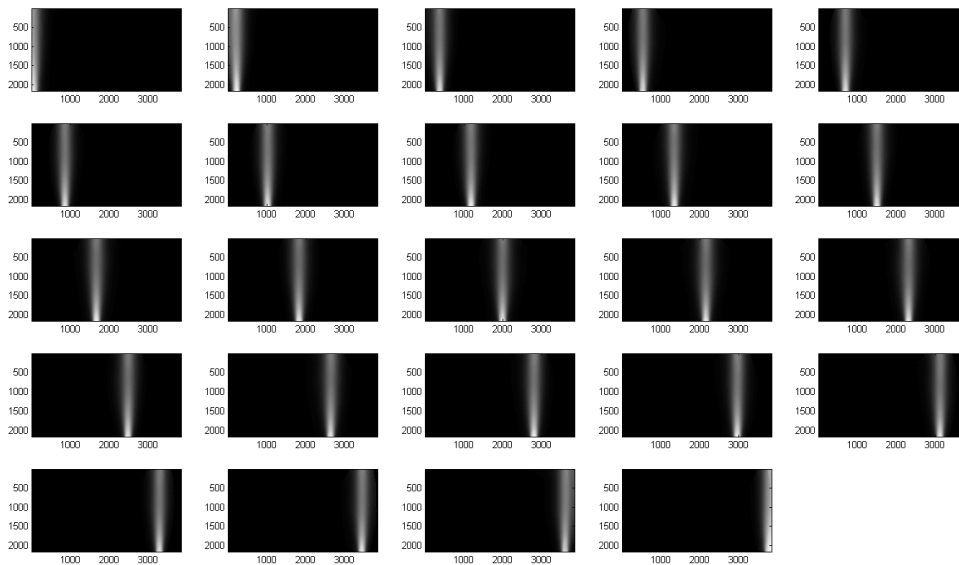


Abbildung A-1: Display 1: Hisense TV, 24 LEDs an der unteren, langen Displaykante, 3840 x 2140 Pixel

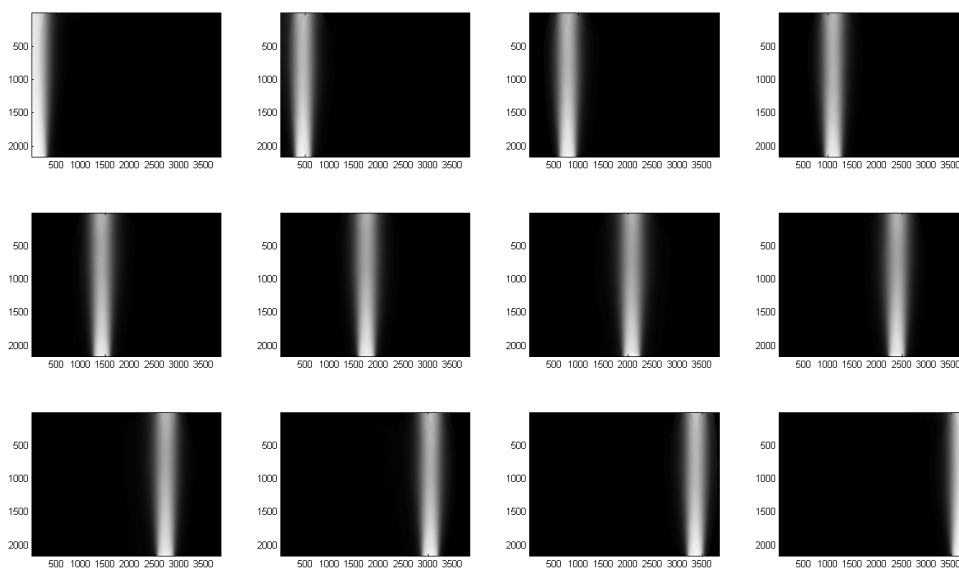


Abbildung A-2: Display 2: Hisense TV; 12 LEDs an der unteren, langen Displaykante, 3840 x 2140 Pixel

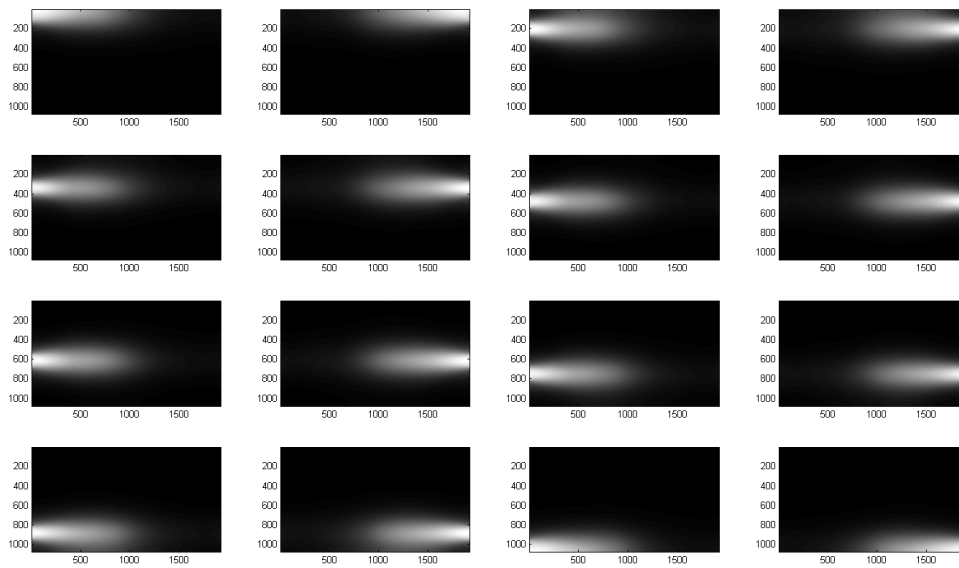


Abbildung A-3: Display 3: Hisense TV, 16 LEDs an beiden kurzen Displaykanten, 1920 x 1080 Pixel

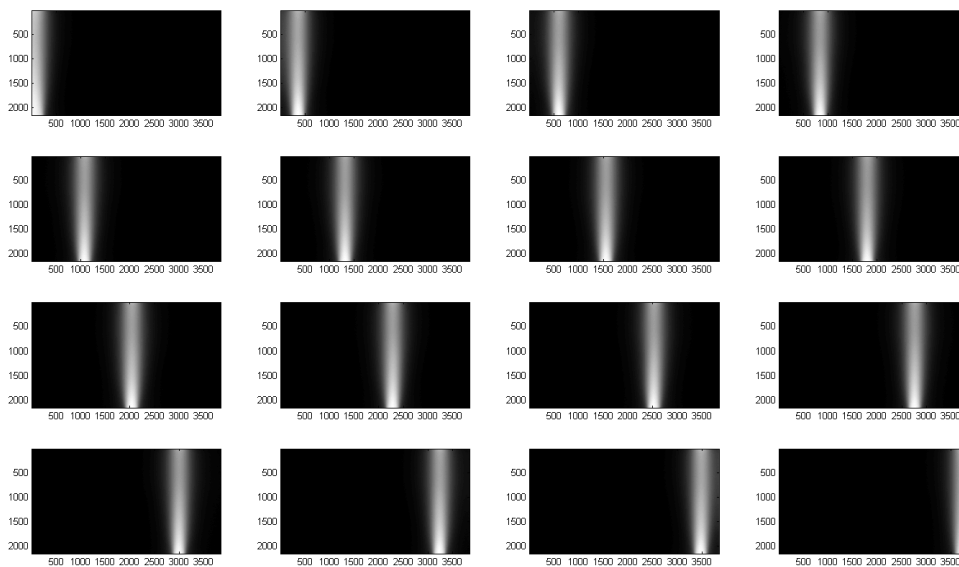


Abbildung A-4: Display 4: Hisense TV, 16 LEDs an der unteren, langen Displaykante, 3840 x 2140 Pixel

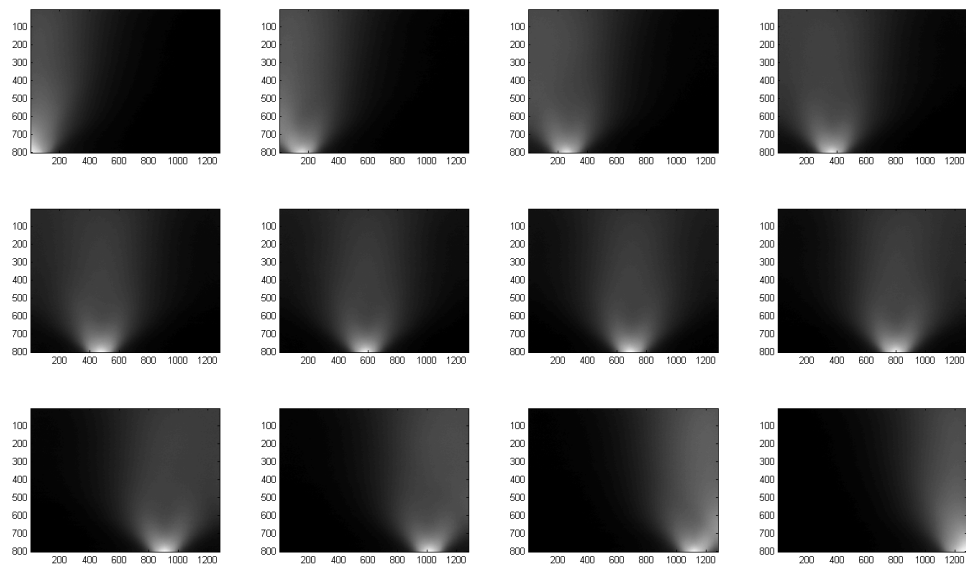


Abbildung A-5: Display 5: Huawei Tablet, 12 LEDs an einer langen Displaykante, 800 x 1280 Pixel

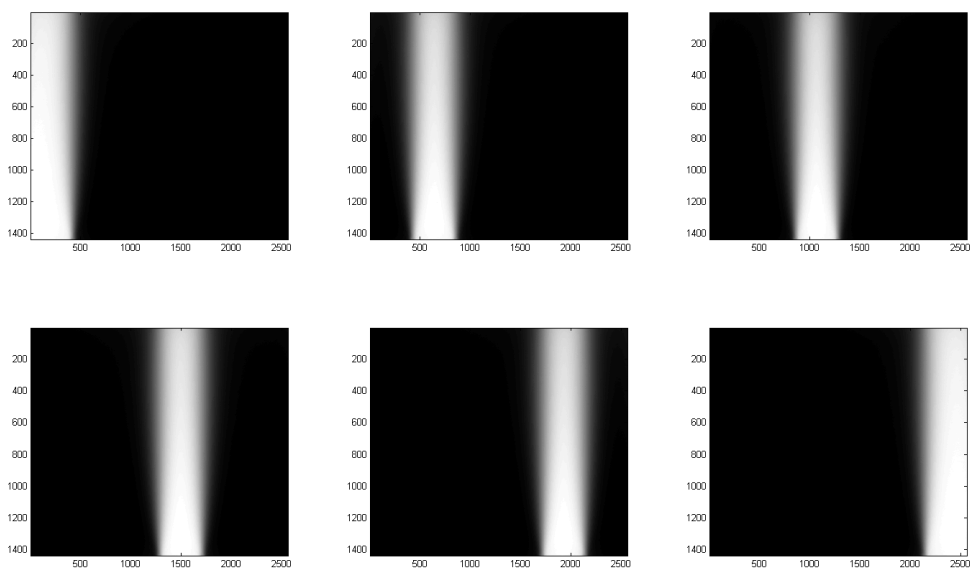


Abbildung A-6: Display 6, Intel Laptop-Display, 6 LEDs an der unteren, langen Displaykante, 2560 x 1440 Pixel

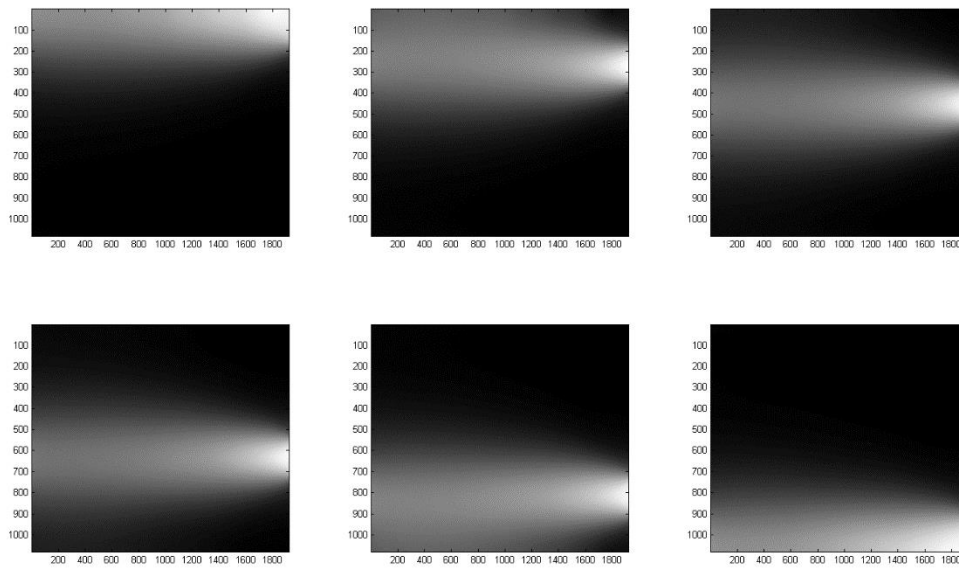


Abbildung A-7: Display 7: Hisense TV, 6 LEDs an der rechten Displaykante, 1920 x 1080 Pixel

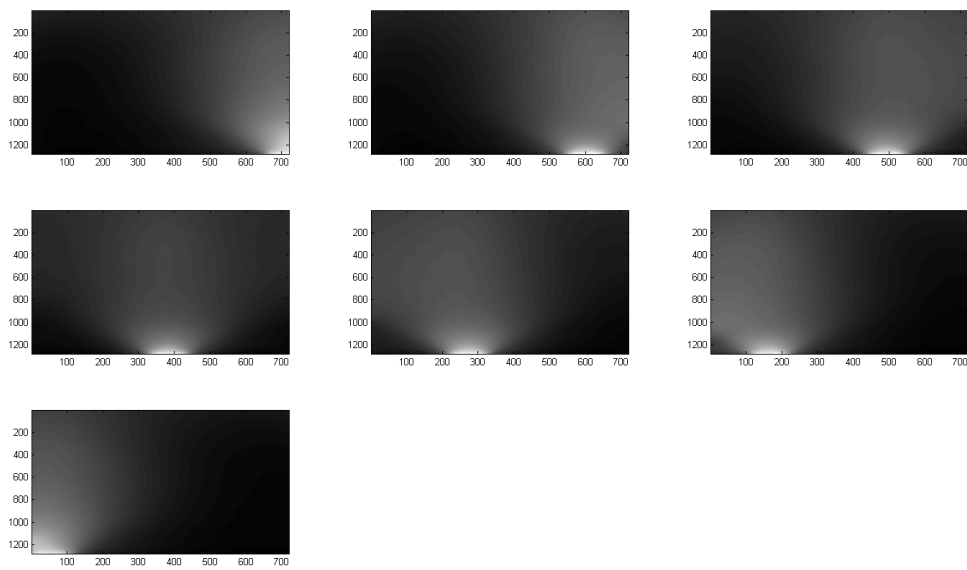


Abbildung A-8: Display 8: Huawei Smartphone Display, 7 LEDs an einer kurzen Displaykante, 1280 x 720 Pixel

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Das menschliche Auge [Aug17].....	5
Abbildung 2-2: Wellenlängenbereiche der Zapfentypen [Wik17].....	6
Abbildung 2-3: Aufbau eines LC-Displays [Chi10].....	12
Abbildung 2-4: Querschnitt einer Direct-Lit (oben) und einer Edge-Lit (unten) Hintergrundbeleuchtung	14
Abbildung 2-5: Abbildungskennlinie der Pixelhelligkeiten im Global-Dimming [MSc15]	19
Abbildung 3-1: Links: Helligkeitsverteilung einer LED in cd/m^2 für ein Display mit LEDs an der kurzen Displaykante; rechts: Helligkeitsverteilung einer LED in cd/m^2 für ein Display mit LEDs an der langen Displaykante	24
Abbildung 3-2: Hintergrundbeleuchtung eines LC-Displays mit LEDs an der unteren Displaykante bei eingeschaltetem Backlight in cd/m^2	25
Abbildung 3-3: Links: Relative Einflüsse einer LED eines Edge-Lit-Displays; rechts: Relative Einflüsse einer LED eines Direct-Lit-Displays	27
Abbildung 3-4: Anzahl Pixel, auf die eine LED Einfluss hat unter Betrachtung der genannten Mindesteinflüsse.....	28
Abbildung 3-5: kondensierte LSF eines Displays mit je 6 LEDs an beiden kurzen Displaykanten	30
Abbildung 3-6: Häufigkeit der Betrachteten LEDs	31
Abbildung 3-7: Resultierende Häufigkeit der Betrachtung einer LED	32
Abbildung 3-8: Reihenfolge der Condenser-Pixel in der Pixelorder	33
Abbildung 3-9: Schematische Darstellung der Pixelorder (erster Teil).....	33
Abbildung 3-10: Schematische Darstellung der Pixelorder (vollständig)	34
Abbildung 3-11: Beispielhafte Gamma-Kurve	35
Abbildung 3-12: Local-Dimming ohne Gamma-Anpassung	36
Abbildung 3-13: Local-Dimming mit Gamma-Anpassung	37

Abbildung 3-14: Schematischer Aufbau des SSC-Algorithmus	38
Abbildung 3-15: Beispielbild zur Verdeutlichung der Condenser-Funktionen	41
Abbildung 3-16: Mit Mittelwert-Condenser kondensiertes Bild	41
Abbildung 3-17: Mit Maximalwert-Condenser kondensiertes Bild	42
Abbildung 3-18: Vom SSC-Optimierer berechnetes Backlight in SP-Auflösung.....	47
Abbildung 3-19: Verschiebung zwischen Condenser-Zellen und LSF-Zellen	49
Abbildung 3-20: Interpolieren der LSF	49
Abbildung 3-21: links: Kompensierte Pixelwerte; rechts: Ursprüngliche Pixelwerte vor der Pixel- Compensation.....	50
Abbildung 3-22: Beispielhaftes LVDS Schema [Ti14]	53
Abbildung 3-23: Pipeline-Prozessierung für Condenser und Pixel-Compensation.....	54
Abbildung 3-24: Zeitlicher Ablauf des gesamten SSC-Algorithmus	54
Abbildung 3-25: Even-Odd Combiner	56
Abbildung 3-26: Schematischer Aufbau des SSC-Algorithmus bei Eingangsbildern mit mehreren Pipes	57
Abbildung 4-1: Links: Clipping im hellen Bereich; recht: Clipping im dunklen Bereich	60
Abbildung 4-2: links: Beispiel für Clipping im hellen Bereich der Wolken; rechts: zugehöriges Originalbild.....	61
Abbildung 4-3: Links: Testbild mit hellem Spot von 40% der maximalen Helligkeit und schwarzem Hintergrund;	63
Abbildung 4-4: Links: Testbild mit hellem Spot von 40% und Hintergrund mit 30% der maximalen Helligkeit und schwarzem Hintergrund; rechts: Resultierendes Backlight mit der betreffenden LED auf 40% und den restlichen LEDs auf 10% des Maximums.....	64
Abbildung 4-5: Summe des Einflusses der LEDs mit dem größten Einfluss auf die jeweiligen Pixel. Oben links: LED mit größtem Einfluss; oben rechts: zwei LEDs mit größtem Einfluss; bis; unten rechts: 6 LEDs mit größtem Einfluss.....	65

Abbildung 4-6: Links: Hochfrequente Zelleninhalte mit geringem Risiko für sichtbares Clipping; rechts: Zelleninhalt mit niedriger Frequenz und dadurch hohem Risiko für sichtbares Clipping [Sch12]	66
Abbildung 4-7: Vorhersage von sichtbarem Clipping; oben: Originalbild; links unten: Frequenzanalyse; rechts unten: Clipping Dichte [Sch12]	67
Abbildung 4-8: Clipping-Suppression-Function; links: Lokal gedimmtes Bild mit zugehörigem Backlight; rechts: mit <i>CSF</i> gedimmtes Bild mit zugehörigem virtuellem Backlight [Sch12]	68
Abbildung 4-9: Bild ohne Halo bei Plasma oder OLED-Displays	70
Abbildung 4-10: Links: Halo-Artefakt bei einem Direct-Lit-Display; rechts: Halo-Artefakt bei einem Edge-Lit-Display (verstärkt dargestellt)	70
Abbildung 4-11: Clouding eines Edge-Lit-TVs mit LEDs an beiden kurzen Displaykanten	71
Abbildung 4-12: Resultierendes Backlight eines Direct-Lit-Displays für das gezeigte Beispielbild	72
Abbildung 4-13: Links: vertikale Querschnittslinie durch das Backlight; rechts: horizontale Querschnittslinie durch das Backlight	73
Abbildung 4-14: Verdeutlichung des Halos bei einem Direct-Lit-Backlight (horizontaler Querschnitt). Schwarz: TFT-Wert, Rot: Backlight, Blau: Backlight einer LED	73
Abbildung 4-15: Verdeutlichung des Halos bei einem Edge-Lit-Backlight (horizontaler Querschnitt). Schwarz: TFT-Wert, Rot: Backlight, Blau: Backlight einer LED	74
Abbildung 4-16: Verdeutlichung des Halos bei einem Direct-Lit-Backlight (vertikaler Querschnitt). Schwarz: TFT-Wert, Rot: Backlight, Blau: Backlight einer LED	74
Abbildung 4-17: Resultierendes Backlight eines Edge-Lit-Display mit LEDs an der unteren Displaykante für das in Abbildung 4-9 gezeigte Beispielbilder	75
Abbildung 4-18: Verdeutlichung des Halos bei einem Edge-Lit-Backlight (vertikaler Querschnitt). Schwarz: TFT-Wert, Rot: Backlight, Blau: Backlight einer LED	75
Abbildung 4-19: Unterschiedliche Light-Spread-Functions durch unterschiedliche Light-Guide; links eine schmale LSF (Display mit 24 LEDs an der langen Seite); rechts breite LSF (Display mit 12 LEDs an der langen Seite)	77
Abbildung 4-20: Verringertes Halo durch LED Faktoren; links starkes Halo ohne Faktoren; rechts: stark reduziertes Halo bei einem Faktor von 1,4 [Gru16]	79

Abbildung 4-21: LED-Verteilung des gedimmten Bildes; links: ohne LED Faktor; rechts: LED Faktor von 1,4	79
Abbildung 4-22: Beispielbild zur Betrachtung der Vorteile des globalen, minimalen LED-Wertes.....	81
Abbildung 4-23: LED-Verteilung für Abbildung 4-22; links: Ohne minimalen LED-Wert;.....	82
Abbildung 4-24: Bitbreiten der zur Kompensation benötigten Variablen.....	85
Abbildung 4-25: inverse Gamma-Kurve zur Veranschaulichung der Empfindlichkeit im dunklen Bereich	86
Abbildung 4-26: Farbverschiebung als Folge von Clipping: Die drei Farbwerte werden in diesem Beispiel mit einem Kompensationsfaktor von 1,2 kompensiert. Dies führt zu einem Abschneiden des blauen Subpixels am Transmissionsmaximum.....	87
Abbildung 4-27: Verlust der Pixelfarbe nach der Pixelkompensation durch Clipping.....	88
Abbildung 4-28: Farbverschiebung durch Clipping: Links Originalbild: Rechts: kompensiertes Bild [Sch16].....	88
Abbildung 4-29: Geringere Farbverschiebung bei Nutzung von <i>CSF</i> ; links: normale Pixel-Kompensation; rechts: Pixelkompensation mit <i>CSF</i> [Sch12]	89
Abbildung 4-30: links: gemessene Gamma-Kurve; rechts: inverse Gamma-Kurve	90
Abbildung 4-31: Abschnittweise definierte inverse Gamma-Kurve	92
Abbildung 4-32: Prototyp Hisense 50K680: Kritisches Bild für Farbverschiebungen im dunklen Bereich	94
Abbildung 4-33: Durch Dimming vergrößerter Farbraum bei Betrachtungswinkel von 22,5° [Sch15]	96
Abbildung 4-34: Durch Dimming vergrößerter Farbraum bei Betrachtungswinkel von 45° [Sch15]...	97
Abbildung 4-35: Konstanter Farbraum über alle Helligkeitsbereiche beim SSC-Local-Dimming Algorithmus [Sch15]	98
Abbildung 5-1: Zwei dich aufeinanderfolgende Bilder eines Videos zur Veranschaulichung der Ursache des LED-Flickerings	102
Abbildung 5-2: Mittelwert-Kondensierung der in Abbildung 5-1 gezeigten Bilder	102
Abbildung 5-3: Links: langsame LED-Filterung; rechts: schnelle LED-Filterung.....	104
Abbildung 5-4: LED-Filterung nach [Jun14]	105

Abbildung 5-5: Probleme der LED-Filterung nach [Jun14]	106
Abbildung 5-6: Neue Methode zur LED-Filterung.....	107
Abbildung 5-7: Mögliches Verhalten der zwei LEDs bei schneller LED-Filterung	108
Abbildung 5-8: LED-Verhalten bei Berücksichtigung der Richtung der LED-Faktoren.....	109
Abbildung 5-9: Screenshots aus einem Testvideo zur Untersuchung des dynamischen Halo-Artefakts	111
Abbildung 5-10: Änderung des Halos eines sich vertikal bewegenden Elementes auf einem Display mit 6 LEDs an der kurzen Displaykante; links: <i>LED 5</i> mit höchstem Einfluss; rechts: <i>LED 2</i> mit höchstem Einfluss.	112
Abbildung 5-11: Änderung des Halos eines sich vertikal bewegenden Elementes auf einem Display mit 12 LEDs an der langen Displaykante; links: <i>LED 11</i> mit höchstem Einfluss; rechts: <i>LED 11</i> und <i>LED 12</i> mit hohem Einfluss.....	113
Abbildung 5-12: Beispielvideo zur Untersuchung des dynamischen Clippings: Helligkeitsgradient im Moving-Circle.....	117
Abbildung 5-13: Auftretendes dynamisches Clipping.....	118
Abbildung 6-1: Beispielhaftes Menübild eines Hisense TV-Gerätes.....	124
Abbildung 6-2: Beispielhaftes kritisches Menübild für Halo-Artefakte	125
Abbildung 6-3: Halo in Menübild bei Display mit LEDs an beiden kurzen Displaykanten	126
Abbildung 6-4: künstlicher Farbverlauf in künstlichen Bildern; links: Originalbild; rechts: gedimmtes Bild mit Verschiebungen im Farbverlauf	127
Abbildung 6-5: oben: Schematisches Scrollen durch ein Menü; unten: sichtbare Halo-Artefakte....	128
Abbildung 6-6: Farbverläufe im Hintergrund von TV-Menüs	130
Abbildung 6-7: Links: Menübild; rechts: Mittelwert-Kondensierung	134
Abbildung 6-8: Links: Kritische Zellen für niedrige Frequenz $ci, j, flow$; Mitte: Kritische Zellen für hohe Frequenz $ci, j, fhig$; rechts: Kritische Zellen für Bewegung ci, j, mov	135
Abbildung 7-1: Vergleich der LSF von unterschiedlichen Edge-Lit-Varianten; links: Display mit LEDs an der langen Kante; rechts: Display mit LEDs an der kurzen Kante.....	140
Abbildung 7-2: Beispielhafte Bildinhalte eines Smartphones.....	141

Abbildung 7-3: Beispielbilder für horizontale Helligkeitsverläufe	142
Abbildung 7-4: Links: ausreichende LED Anzahl zur Deaktivierung einer LED bei 21:9 Bildinhalte; rechts: zu geringe LED Anzahl zur Deaktivierung einer LED bei 21:9 Bildinhalte	144
Abbildung 7-5: Links: LSF einer LED eines Displays mit 16 LEDs an der langen Displaykante (collimated); rechts: LSF einer LED eines Displays mit 12 (dispersive).....	145
Abbildung 7-6: Nahezu optimaler Verlauf der Helligkeit der LSF einer LED zur Optimierung im SSC- Algorithmus	146
Abbildung 8-1: Vergleich des erweiterten SSC-Algorithmus mit einem Hisense Local-Dimming- Algorithmus [Sch16]	149
Abbildung 9-1: künstlich erzeugte LSF eines Displays mit LEDs an einer kurzen sowie einer langen Displaykante	151
Abbildung A-1: Display 1: Hisense TV, 24 LEDs an der unteren, langen Displaykante, 3840 x 2140 Pixel	155
Abbildung A-2: Display 2: Hisense TV; 12 LEDs an der unteren, langen Displaykante, 3840 x 2140 Pixel	155
Abbildung A-3: Display 3: Hisense TV, 16 LEDs an beiden kurzen Displaykanten, 1920 x 1080 Pixel	156
Abbildung A-4: Display 4: Hisense TV, 16 LEDs an der unteren, langen Displaykante, 3840 x 2140 Pixel	156
Abbildung A-5: Display 5: Huawei Tablet, 12 LEDs an einer langen Displaykante, 800 x 1280 Pixel .	157
Abbildung A-6: Display 6, Intel Laptop-Display, 6 LEDs an der unteren, langen Displaykante, 2560 x 1440 Pixel.....	157
Abbildung A-7: Display 7: Hisense TV, 6 LEDs an der rechten Displaykante, 1920 x 1080 Pixel	158
Abbildung A-8: Display 8: Huawei Smartphone Display, 7 LEDs an einer kurzen Displaykante, 1280 x 720 Pixel.....	158

Formelzeichen und Abkürzungsverzeichnis

Formelzeichen

$a(p_{i,j})$	maximaler Einfluss einer LED im Pixel $P_{i,j}$
$a_{i,j}(l)$	Einfluss der LED l auf das Pixel i, j
$a_{i,j}^{virtual}$	virtueller Einfluss einer LED auf die Zelle i, j
$a_{k,l}(L)$	Einfluss der LED L auf das Pixel i, j
$a_p(l)$	Einfluss der LED l auf das Pixel p
α_i	Schwellwert der Iteration i
B	globales Backlight; mittlere Helligkeit des Bildes
$B_{k,l}$	Backlight der Condenser-Zelle k, l
B_p	vom Backlight erzeugte Helligkeit im Pixel p
B'_p	prozentualer Wert des Backlights im Pixel p in Bezug zu einem ungedimmten Backlight
$b_{i,j}$	Backlight im Pixel i, j
$b_{i,j}^{virtual}$	virtuelles Backlight der Zelle i, j
$b_{i,j}(l)$	von der LED l erzeugte Helligkeit im Pixel i, j
$b'_{i,j}$	relatives Backlight im Pixel i, j
$b_{i,j,max}$	maximale Helligkeit des Backlights im Pixel i, j
$b_p(l)$	von der LED l erzeugte Helligkeit im Pixel p
C_{auto}	Wert des Automatik-Condensers

$C_{(\Delta/2)}$	Wert des $(\Delta/2)$ -Condensers
$C_{i,j,f_{low}}$	Kritischer Wert für Zelle i, j in Bezug auf f_{low}
$C_{i,j,f_{high}}$	Kritischer Wert für Zelle i, j in Bezug auf f_{high}
$C_{i,j,mov}$	Kritischer Wert für Zelle i, j in Bezug auf mov
$C_{k,l}$	Wert der Condenser-Zelle an der Position k, l
C_{max}	Wert des Maximalwert-Condensers
C_{mw}	Wert des Mittelwert-Condensers
c_n	Clipping im Pixel n
c_s	räumlicher Faktor zwischen zwei benachbarten LEDs
$CSF_{i,j}$	Clipping-Suppression-Faktor der Zelle i, j
γ	Exponent bei der Gamma-Anpassung
Δ_i	fehlender Helligkeit in einer Condenser-Zelle in der Iteration i
ΔLED	erlaubte LED-Änderung pro Zeiteinheit
ΔLED_{param}	absoluter Anteil der LED-Änderung pro Zeiteinheit
∂	relativer Anteil der LED-Änderung pro Zeiteinheit
$F_{i,j}$	Wert der Frequenzanalyse der Zelle i, j
f_{auto}	Automatik-Condenser-Funktion
f_{BL}	helligkeitsabhängige Komponente der Automatik-Condenser-Funktion
f_{freq}	frequenzabhängige Komponente der Automatik-Condenser-Funktion
$H_{i,j}$	Wert der Clipping-Dichte der Zelle i, j

$i_{k,l}$	geforderte Helligkeit in den Condenser-Zelle k, l
i_p	geforderte Helligkeit im Pixel p
$i_{p,max}$	maximal darstellbare Helligkeit im Pixel p
K	Kontrast
K_{dyn}	dynamischer Bildkontrast
K_{stat}	statischer Bildkontrast
$L(P_n)$	LED mit dem größten Einfluss im Pixel P_n
$L_{i,j}$	physikalische Helligkeit / Leuchtdichte im Pixel i, j
$L'_{i,j}$	Light-Leakage im Pixel i, j
$LED(l)$	Wert der LED l (sortiert nach Einfluss in der Pixelorder)
LED_{max}	maximaler LED-Wert
LED_{min}	minimaler LED-Wert
LED_n	LED an der Position n (sortiert nach Anordnung am Display)
$LED_{n,max}$	Maximalwert der LED an Position n
$LED_{n,min}$	Minimalwert der LED an Position n
$LED_{t,n}$	LED an der Position n zum Zeitpunkt t
$LED_{t,n,max}$	Maximalwert der LED an der Position n zum Zeitpunkt t
$LED_{t,n,min}$	Minimalwert der LED an der Position n zum Zeitpunkt t
N_c	Anzahl der Condenser-Zellen im Display
N_{LED}	Anzahl der LEDs
N_p	Anzahl der Pixel im Display

N_{zelle}	in einer Condenser-Zelle enthaltene Pixel
n_{zelle}	Anzahl an Zellen über einem Schwellwert
P_n	Pixel, dass sich in der Pixelorder auf Position n befindet
$p_{i,j}$	Pixelwert an der Position i, j
Q	Knickpunkt der Übertragungsfunktion beim Global Dimming
SP_n	einer von vier Sample Points vor der Interpolation
$t_{i,j}$	Transmission des Pixel i, j
t_{in}	Transmission eines Pixels vor der Gamma-Anpassung
t_{max}	maximal mögliche Transmission
t_{out}	Transmission eines Pixels nach der Gamma-Anpassung
t_p	Transmission des Pixels p
$v(l)$	Wert der LED l

Abkürzungsverzeichnis

4K2K	Auflösung von 3840 x 2160 Pixeln
AMOLED	active matrix organic light emitting diode
ASIC	application-specific integrated circuit
CIE	commission international de l'éclairage
CSF	clipping suppression factor/function
FPGA	field programmable gate array
HD	high definition
HDMI	high-definition multimedia interface
HDR	high dynamic range
IEC	international electrotechnical commission
IC	integrated circuit
IIR	infinite impulse response
IPS	in plane swiching
ITO	indium tin oxide
LC-Display	liquid crystal Display
LCD	liquid crystal Display
LED	light emitting diode
LSF	light spread function
LUT	look up table
LVDS	low voltage differential signal

MA	moving average
NTSC	national television system committee
OLED	organic light emitting diode
PC	personal computer
PMOLED	passive matrix organic light emitting diode
ppi	pixel per inch
QDot	quantum dot
SSC-Algorithmus	Sorted Sector Covering Algorithmus:
TCON	timing controller
TFT	thin film transistor
TN	twisted nematic
TV	television
UHD	ultra high definition
V-by-1	auf LVDS basierendes Datenübertragungsprotokoll der Firma Thine
VESA	video electronics standards association

Literaturverzeichnis

- [Alb09] M. Albrecht, et. al.: „*Method, System and Apparatus for Power-Saving Backlight*“. US-Patent, USPTO 8687028, 2009
- [Alb10] M. Albrecht, et. al.: „*Sorted Sector Covering Combined with Image Condensation – An Efficient Method for Local Dimming of Direct-Lit and Edge-Lit LCDs*“. In: IEICE Transactions on Electronics E93, No. 11, pp. 1556-1563, 2010
- [Alb10a] M. Albrecht: „*Sorted Sector Covering mit Bildkondensierung – Eine universelle Methode zur effizienten Berechnung von Local Dimming LED Backlight*“. Dissertation Universität des Saarlandes, 2010
- [Alb15] M. Albrecht, C. Xu, D. Schäfer, T. Jung.: „*Scheme for adjusting image of LCD (liquid crystal display) by aid of local darkened backlight*“. Patent China, Publication Number 104637455A, 2015
- [Alb11] M. Albrecht, D. Schäfer, C. Xu, J. Bauer, M. Kreuzer: „*LSF-Correlator – An Amending Module for SSC Local Dimming Algorithm to increase the Static Contrast of Edge-Lit LCDs*“. In: SID 2011 Digest, pp.1458-1461, 2011
- [Ang14] N. Angeli, D. Schäfer, C. Xu: „*A Feedback Method for Ensuring Reliable Visual Quality of Locally Dimmed LCDs*“. In: SID 2014 Digest, pp. 1141-1144, 2014
- [Aug17] „*Aufbau des menschlichen Auges*“, Augen.de (auf <http://www.augen.de/infos-fuer-patienten/der-aufbau-des-menschlichen-auges/>), **zugegriffen am** 25. August 2017)
- [Bai11] D. G. Bailey: „*Design for Embedded Image Processing on FPGAs*“. (Singapore, 2011), John Wiley & Sons, ISBN 978-0-470-82849-6
- [Ban07] F. Banterle, K. Debattista, A. Chalmers, M. Bloy: „*A framework for inverse tone mapping*“. In: The Visual Computer, 2007
- [Bar12] N. Bardsley: „*Eye Resolution Display*“. In J. Chen, W. Cranton: „*Handbook of Visual Display Technology*“. (Berlin, 2012), Springer, ISBN 978-3-319-14345-3
- [Bau10] J. Bauer, M. Kreuzer, T. Ganz, B. Straub, H. Enigk, N. Boemak: „*New ways from visual perception and human contrast sensation to better readable displays in automotive environments*“. Electronic displays conference, 2010
- [Bau15] J. Bauer, M. Kreuzer, T. Jung, D. Schäfer: „*Increasing the Perceived Grey Value Resolution by Combining Frame Rate Control and Error Diffusion to Reduce Visible Artefacts in Local Dimming Applications*“. In: electronic displays conference, 2015

- [Bho12]** A. K. Bhowmik: *“Mobile display subsystem power-performance optimization Technologies”*. In: Proceedings of IMID, pp. 451-452, 2012
- [Bla15]** K. Blankenbach, A. Marsal, A. Sycev: *„Comparison of Key Optical Measurements of Curved to Flat TVs and Their Impact on Image Quality“*. In: SID 2015 Digest, pp. 630-633, 2015
- [Boe05]** W. den Boer: *“Active Matrix Liquid Crystal Displays: Fundamentals and Applications”*. (Amsterdam, 2005), Newnes, ISBN 0-7506-7813-5
- [Cha17]** A. Chalmers, P. Champisi, P. Shirley, I. G. Olaizola: *„High Dynamic Range Video – Concepts, Technologies, and Applications“*. (London 1017), Elsevier, ISBN 978-0-12-809477-8
- [Cor09]** T. H. Cormen, C. E. Leiserson, R. L. Rivest, C. Stein: *„Introduction to Algorithms“*. (Cambridge, 2009), The MIT Press, ISBN 978-0-262-03384-8
- [Chi10]** *“LCD-Schema: Flüssigkristalle werden von hinten durchleuchtet”*, chip.de (auf http://www.chip.de/ii/9/8/2/3_/4/0/6/877ae9918748fa80.jpg, **zugriff am 14. September 2017**), 2010
- [Cho08]** Y.C. Choi, et. al.: *“The high contrast ratio and fast response time of a liquid crystal display lit by a carbon nanotube field emission backlight unit”*. In: Nanotechnology, Volume 19, 2008
- [CIE31]** *“Commission international de l’Eclairage proceedings”*. (Cambridge, 1931), Cambridge University Press, 1931
- [Cri09]** D. J. R. Cristaldi, S. Pennisi, F. Pulvirenti: *“Liquid Crystal Display Drivers – Techniques and Circuits”*. (Catania, 2009), Springer, ISBN 978-90-481-2254-7
- [Did08]** P. Didyk, R. Mantiuk, M. Hein, H.P. Seidel: *“Enhancement of Bright Video Features for HDR Displays”*. In: Eurographics Symposium on Rendering, Volume 27, Number 4, 2008
- [Eld17]** *“Eldim UMaster Datasheet”*, Eldim (auf <https://www.eldim.eu/optical-metrology/>, **zugriff am 18. April 2017**), 2017
- [Emm13]** J. Emmel: *“Novel backlighting techniques for high dynamic range displays”*. Dissertation University of British Columbia, Electronic Theses and Dissertations, 2013

- [Erh08]** A. Erhardt: *“Einführung in die Digitale Bildverarbeitung”*. (Wiesbaden 2008), Vieweg+Teubner, ISBN 978-3-519-00478-3
- [Fre16]** L. E. Frenzel: *“Handbook of Serial Communications Interfaces – A Comprehensive Compendium of Serial Digital Input/Output (I/O) Standards”*. (Oxford, 2016), Elsevier, ISBN 978-0-12-800629-0
- [Gru16]** M. Grüning, M. Schmidt, D. Schäfer, C. Xu: *„Challenges and Methods for Local Dimming of Long-Edge LCD TVs“*. In: Proceedings of IDW, pp. 1339-1341, 2016
- [Ich10]** H. Ichioka et al.: *“Proposal of Evaluation Method for Local-Dimming Backlights”*. In: SID 2010 Digest, pp. 750-753, 2010
- [IEC08]** IEC 62087:3008: *“Methods of measurement for the power consumption of audio, video and related equipment”*. International Electrotechnical Commission (IEC), 2008
- [Iwa17]** S. Iwaida, Y. Fukaya, E. Irieda, T. Yamasaki, A. Rehman, K. Kihara, T. Iso, S. Ohtsuka: *“Reproduction of Perceptual Reality in Standard-Dynamic-Range (SDR) Environments Using High-Dynamic-Range (HDR) Images Compressed by Global Tone Mapping”*. In: SID 2017 Digest, pp. 1379-1382, 2017
- [Jia15]** X. Jiang, P. Volkert, C. Xu: *“Degradation Behavior of blue OLEDs”*. In: Proceedings of EuroDisplay, p. 62, 2015
- [Jia16]** X. Jiang, C. Xu: *“Data-Counting Model for Empirical Prediction of OLED Degradation”*. In: Proceedings of IDW, pp. 651-653, 2016
- [Jun11]** T. Jung, M. Albrecht, D. Schäfer, C. Xu: *„System Architecture and FPGA-Implementation of the SSC Local Dimming Processor for an Edge-Lit Serial TV“*. In: SID 2011 Digest, pp. 665-668, 2011
- [Jun13]** T. Jung, Q. Fu, C. Xu, M. Kreuzer, J. Bauer: *„Correlator Improved SSC Local Dimming Algorithm for Homogeneous Backlight Distributions of Edge-Lit LCDs“*. In: SID 2013 Digest, pp 1110-1113, 2013
- [Jun14]** T. Jung: *“Methoden zur Sicherstellung der visuellen Qualität in lokal gedimmten Backlightsystemen”*. Dissertation Universität des Saarlandes, 2014
- [Ker09]** L. Kerofsky: *“Feedback Based Power Management for LCD Backlight Modulation for Guaranteed Average Levels of Power Consumption”*. In: Proceedings of IDW, pp. 1539-1542, 2009

- [Lak12]** V. Lakshimanarayanan: *“Light Detection and Sensitivity”*. In J. Chen, W. Cranton: *“Handbook of Visual Display Technology”*. (Berlin, 2012), Springer, ISBN 978-3-319-14345-3
- [Lan07]** E. H. A. Langendijk, O. Belik, F. Budzelaar, F. Vossen: *„Dynamic Wide-Color-Gamut RGBW Display“*. In: SID 2007 Digest, pp. 1458-1461, 2007
- [Lee09]** J.-H. Lee, S.-E. Kim, T.-H. Lee, W.J. Song: *“Flicker Reducing Backlight Control based on Adaptive Moving Average Filtering”*. In: SID Proceedings, pp. 1294-1297, 2009
- [Lee16]** E. Lee, C. Wang, C. Hotz, J. Hartlove, J. Yurek, H. Daniels, Z. Luo, D. Zehnder: *“Greener Quantum-Dot Enabled LCDs with BT.2020 Color Gamut”*. In: SID 2016 Digest, pp. 549-551, 2016
- [Lev11]** L. A. Levin, S. Nilsson, J. Hoeve, S. Wu: *“Adler’s Physiology of the Eye”*. (Edinburgh, 2011), Saunder Elsevier, ISBN 978-0-323-05714-1
- [Lue01]** E. Lueder: *„Liquid Crystal Displays“*. (New York, 2001), John Wiley & Sons, ISBN 0471490296
- [McK84]** S. P. McKee, K. Nakayama: *“The detection of motion in the peripheral visual field”*. In: Visual Research, Volume 24, Issue 1, pp. 25-32, 1984
- [Man13]** E. Mantel, C. Burini, N. Forchhammer, S. Nadernejad: *“Flicker reduction in LED-LCDs with local backlight”*. In: IEEE 15th International Workshop on Multimedia Signal Processing (MMSp), pp. 312-316, 2013
- [Min08]** T. Minami: *“Present status of transparent conducting oxide thin-film development for Indium-Tin-Oxide (ITO) substitutes”*. In: Thin Solid Films, Volume 516, Issue 17, pp. 5822-5828, 2008
- [Mur98]** E. Murofushi: *“Liquid crystal display with curved liquid crystal screen”*. US-Patent, US6332690B1, 1998
- [MSc15]** M. Schmidt, D. Schäfer, C. Xu: *„Increased Power Saving by Combining Global and Local Dimming for Edge-LED LCDs“*. SID 2015 Digest, pp. 1431-1434, 2015
- [MSc17]** M. Schmidt, M. Grüning, D. Schäfer, C. Xu: *„Efficient Modeling of LED Crosstalk of a Matrix Backlight Unit“*. In: accepted for Proceedings of IDW, 2017
- [Oys06]** C. W. Oyster: *„The Human Eye: Structure and Function“*. (Birmingham 2006), Sinauer, ISBN 0878936440

-
- [Par12]** S. Park et al.: *“Dark-state Color Shift and Gray Scale Inversion in an In-plane Switching Liquid Display Device”*. In: Journal of the Optical Society of Korea, pp. 409-412, 2012
- [Pho16]** *“Photo Research PR-788”*, Photo Research (auf http://www.photoresearch.com/sites/default/files/PR-788%20Brochure_0.pdf, **zugegriffen am** 3. Oktober 2017), 2016
- [Pre92]** W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, B. P. Flannery: *“Numerical Recipes”*. (Cambridge, 1992), Cambridge University Press, ISBN 0 521 43064 X
- [Rem08]** M. Remco: *“Spatio-temporally Consistent Video Processing for Local Backlight Dimming”*. In: SID 2008 Digest, pp. 979-982, 2008
- [Rip16]** M. Ripplinger, M. Krause, A. K. Louis, C. Xu: *„A new class of very efficient algorithms for local dimming“*. In: Computational Optimization and Applications, Volume 64, Issue 1, pp. 243-263, 2016
- [Ros96]** H.E. Ross, D. J. Murray: *“E.H. Weber on the tactile senses”*. (Erlbaum (UK), 1996), Taylor & Frances, ISBN 0-86377-421-0
- [Ros16]** I .Rose, J. Kuon: *“Measuring the Gap between FPGAs and ASICs”*. In: International Symposium on Field Programmable Gate Arrays, pp. 30-31, 2016
- [Sch12]** D. Schäfer, T. Jung, C. Xu: *„Enhanced local pixel compensation with clipping suppression and global luminance preservation“*. In: SID 2012 Digest, pp 473-476, 2012
- [Sch13]** D. Schäfer, T. Jung, M. Krause, C. Xu: *„Efficient Local-Dimming-Algorithm for LCDs with Single-Edge LED Backlight“*. In: Proceedings of IDW, pp. 1485-1488, 2013
- [Sch14]** D. Schäfer, T. Jung, C. Xu: *“Innovative Scene-Cut detection and treatment of locally dimmed LCD’s”*. In: electronic displays conference, DFF Student paper, 2014
- [Sch15]** D. Schäfer, C. Xu: *“Preserved Color Gamut and High Color Stability by Local Dimming for LC-Panels”*. In: Proceedings of EuroDisplay, p. 73, 2015
- [Sch16]** D. Schäfer, Y. Zhang, M. Grüning, C. Xu, S. Huang, W. Liu, J. Cao: *„Brilliant Images and Saturated Colors for 4K Edge-Lit LED TVs generated by an Efficient Versatile SSC Local Dimming Processor“*. In: SID 2016 Digest, pp. 211–214, 2016
- [Smi94]** A. T. Smith, R. J. Snowden: *“Visual Detection of Motion”*. (Michigan, 1994), Academic Press, ISBN 012651660X
-

- [Tan16] Y. Tang, H. Sun, T. Yang, G. Zha, H. Cui, D. J. Li, P. H. Lung: *“Color Shift Analysis of LTPS TFT-LCD Viewing for Large Angles”*. In: SID 2016 Digest, pp1834-1837, 2016
- [Tay12] F. J. Taylor: *“Digital Filters: Principles and Applications with Matlab”*. (Hoboken, 2012), John Wiley & Sons, ISBN 978-0-470-77039-9
- [Tec12] *“The History of Apple’s MacBook Pro, 2006 to Retina”*, techland.time.com (**auf** <http://techland.time.com/2012/06/12/the-history-of-apples-macbook-pro-2006-to-retina/>, **zugegriffen am** 8. September 2017), 2012
- [Thi14] *“Datasheet V-by-1 SerDes”*, thine.co.jp (**auf** http://www.thine.co.jp/en/products/pr_details/V-by-One.html, **zugegriffen am** 8. Oktober 2017), 2014
- [Ti14] *“Datasheet DS90UH948-Q1”*, TI (**auf** http://www.ti.com/product/DS90UH948-Q1/datasheet/detailed_description/, **zugegriffen am** 12. Oktober 2017), 2014
- [Uhd17] *“UHD Alliance”*, uhdalliance.org (**auf** <https://www.uhdalliance.org/vision-and-goals/>, **zugegriffen am** 4. Mai 2017), 2017
- [Umb10] S. E. Umbaugh: *“Digital Image Processing and Analysis”*. (Boca Raton, 2010), Taylor and Francis Group, ISBN 978-1-4298-0206-9
- [Ves05] VESA: *“Flat panel display measurements”*, VESA-Norm, 2005
- [Vol14] P. Volkert, C. Xu: *“Principal and validation of digital driving for active matrix organic light emitting diodes displays”*. In: Journal of the SID 22, pp 43-54, 2014
- [Vol17] P. Volkert: *“Digital gesteuertes AMOLED-System: Konzeption, Entwicklung und Realisierung”*. Dissertation Universität des Saarlandes, 2017
- [Wag08] J. F. Wagner, D.A. Keszler, R. E. Presley: *„Transparent Electronics“*. (New York, 2008), Springer, ISBN 978-0-387-72341-9
- [Wan07] L. Wang, Y. Tu, L. Chen, K. Teunissen, I. Heyndericks: *„Trade-off between Luminance and Color in RGBW Displays for Mobile-phone Usage“*. In: SID 2007 Digest, pp. 1142-1145, 2007
- [Wik17] *„Farbwahrnehmung“*, Wikipeda.org (**auf** <https://de.wikipedia.org/wiki/Farbwahrnehmung#/media/File:Cone-response-de.svg> **zugegriffen am** 12. Oktober 2017)

- [Xil17]** *“ISE Design Suite”*, Xilinx (**auf** <https://www.xilinx.com/products/design-tools/ise-design-suite.html>, **zugegriffen am** 18. Oktober 2017), 2017
- [Xil17a]** *“All Programmable FPGAs and 3D ICs”*, Xilinx (**auf** <https://www.xilinx.com/products/silicon-devices/fpga.html>, **zugegriffen am** 18. Oktober 2017), 2017
- [Xu16]** C. Xu, M. Albrecht, T. Jung: *“Intelligent Control of LED LCD Backlight”*. In: Handbook of Visual Display Technology (New York, 2016), Springer, ISBN 978-3-319-14345-3
- [Yeh10]** P. Yeh, C. Gu: *“Optics of Liquid Crystal Displays, 2nd Edition”*. (Hoboken, 2010), John Wiley & Sons, ISBN 978-0-470-18176-8
- [Zha16]** H. L. Zhang, H. Deng, Y. Xing, Z. L. Xiong, Q. H. Wang: *„Viewing-Angle-Enhanced Integral Imaging Display using Composite Micro-Lens Array“*. In: SID 2016 Digest, pp. 1446-1448, 2016
- [Zie98]** M. Ziefle: *“Effects of Display Resolution on Visual Performance”*. In: Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, Vol 40, Issue 4, pp. 554-568, 1998