

Digital gesteuertes AMOLED-System: Konzeption, Entwicklung und Realisierung

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

von
Pascal Volkert

Saarbrücken
2017

Tag des Kolloquiums: 11.08.2017
Dekan: Univ.-Prof. Dr. rer. nat. G. Kickelbick

Mitglieder des Prüfungsausschusses:

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. G. Frey

Berichterstattender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. C. Xu

Berichterstattender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Möller

Akademischer Mitarbeiter: Dr.-Ing. A. Tschöpe

Eidesstattliche Erklärung

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

Ich möchte mich an dieser Stelle bei allen bedanken, die indirekt und direkt am Entstehen dieser Arbeit mitgewirkt haben:

- meiner Frau Katharina, die in allen Lebenslagen an meiner Seite steht und sich gemeinsam mit mir durch die Wirrungen des Alltags schlägt.
- meinen Eltern und meiner gesamten Familie, die mir das Studium der Mechatronik ermöglicht haben und die es schon lange ertragen müssen, dass ich einiges einfach besser weiß...
- meinen Freunden und Bekannten, die einen oft auf den Boden der Tatsachen zurückholen und immer wieder zeigen, dass ein Studium nichts schadet, sondern man nebenbei noch etwas Vernünftiges macht.
- Professor Chihao Xu für die Möglichkeit das Thema dieser Arbeit zu bearbeiten, an seinem Lehrstuhl zu arbeiten sowie für seine Unterstützung bei der Entstehung der Arbeit.
- Yassen Dobrev, Tobias Jung, Daniel Schäfer, Maxim Schmidt, Michael Grüning, Xingtong Jiang, Brigitte Vogel-Schendel und allen ehemaligen Mitarbeitern des LME für viele hilfreiche Diskussionen, für die bis heute ungeklärte Frage, wie lange man eigentlich Pause machen kann und für die daraus erwachsenen Freundschaften.
- dem Lehrstuhl für Elektronik und Schaltungstechnik unter Prof. Dr. Möller, bei welchem ich knapp 3 Jahre als HiWi tätig war, insbesondere Horst Hettrich für die tolle Zusammenarbeit.
- allen Studenten, die mich im Zuge meiner Arbeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter etragen durften und die so vielfältig bei dieser Arbeit mitgewirkt haben.
- meinen gesamten Studienkollegen, Mitarbeitern und Professoren der (ehemaligen) Fachrichtung Mechatronik, klein aber fein!
- dem Leser dieser Arbeit, ab hier wird es interessanter.

Abstract

AMOLED displays offer big advantages and potential according visual quality, energy efficiency and flexibility compared with actually dominating LCD-technology. They are a promising candidate to be used in innovative display systems like wearable applications using flexible and foldable displays. Current AMOLED systems control the pixel luminance using an analog control scheme. It requires high precision in the manufacturing process and the control circuitry consumes nearly as much power as the light emitting device itself. This leads to high process cost, low yield and low energy efficiency. The usage of a digital driving scheme enables us to avoid these problems.

To show the feasibility of digital driving it is necessary to realize a prototype which offers the possibility to validate the visual quality using the human eye. In this work the conceptual design, the development and the final realization of such a prototype is described. By using this prototype, methods to avoid visual artifacts and to compensate aging effects were developed. The main problems, false contouring and aging artifacts, were solved. With this, the advantages of a digital driving scheme, high yield, low cost and high energy efficiency can show their effectiveness.

Kurzzusammenfassung

AMOLED-Displays besitzen hinsichtlich visueller Qualität, Energieeffizienz und flexibler Formgestaltung große Vorteile und bieten Potenzial im Vergleich zur derzeit dominierenden LCD-Technologie. Sie sind ein vielversprechender Kandidat zur Verwendung in innovativen Displaysystemen wie tragbare Anwendungen mit biege- und faltbaren Displays. Aktuell wird ein analoges Ansteuerungsverfahren zur Modulation der Pixelhelligkeit verwendet. Dieses benötigt hohe Genauigkeit im Fertigungsprozess und in der Ansteuerschaltung wird ähnlich viel Energie umgesetzt wie im Leuchtelement selbst. Es ergeben sich hohe Prozesskosten mit einer niedrigen Ausbeute sowie eine geringe Energieeffizienz. Der Ansatz einer digitalen Ansteuerung ermöglicht es, diese Probleme zu umgehen.

Zur Demonstration der Machbarkeit digitaler Ansteuerung, zur Verbesserung der Darstellungsqualität und zur Vermeidung visueller Artefakte ist es notwendig, einen Prototypen zu realisieren, welcher eine Inspektion der visuellen Qualität mit dem menschlichen Auge ermöglicht. Die vorliegende Arbeit beschreibt die Konzeption, Entwicklung und Realisierung eines solchen. Mithilfe dessen wurden Methoden zur Vermeidung visueller Artefakte und zur Kompensation von Alterungseinflüssen entwickelt. Die Hauptprobleme eines digitalen AMOLED-Systems, falsche Konturen und Alterung, wurden gelöst. Hierdurch können die Vorteile einer digitalen Ansteuerung wie hohe Ausbeute, geringe Kosten und hohe Energieeffizienz, zum Tragen kommen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	2
1.2	Ziele	4
1.3	Aufbau der Arbeit	5
2	Grundlagen	7
2.1	AMOLED-Display: Aufbau und Systeme	7
2.2	OLED und TFT	11
2.3	Datenhandling	13
3	Ansteuertechnologien für AMOLED	15
3.1	Analoges Treiberschema	15
3.1.1	Funktionsweise	15
3.1.2	Marktsituation und -hindernisse	17
3.1.3	Lösungsansätze	18
3.2	Digitales Treiberschema	19
3.2.1	Visuelle Randbedingungen	19
3.2.2	Funktionsweise	20
3.2.3	Umsetzung im realen System	23
3.2.4	Verarbeitung der Bilddaten	28
3.2.5	Potenzial und Herausforderungen	28
3.2.6	Anwendungen	30
4	Grundfunktionen eines digitalen AMOLED Anzeigesystems	31
4.1	Motivation	31
4.2	Anforderungen an Displaypanel und Ansteuerelektronik	32
4.2.1	Pixelbeschaltung	32
4.2.2	TFT-Technologie	34
4.2.3	Zeilentreiber und Programmiergeschwindigkeit	37
4.2.4	Spaltentreiber und Energieversorgung	41
4.2.5	Grafikprozessierung	43
4.3	Fazit	47
5	Technische Realisierung	49
5.1	Prototyp: Kodak AM550L	49
5.1.1	Panel	49
5.1.2	Visuelle Bewertung	51

5.1.3	Performance, Resultate	51
5.2	Visionox Panel	53
5.2.1	Aufbau	53
5.2.2	Anwendbarkeit der digitalen Ansteuerung	56
5.2.3	Verbesserungsmöglichkeiten	65
5.3	Tianma	67
5.3.1	Aufbau	67
5.3.2	Anwendbarkeit der digitalen Ansteuerung	69
5.3.3	Verbesserungsmöglichkeiten	71
5.4	Ansteuerelektronik	73
5.4.1	Schnittstellenwandler	73
5.4.1.1	Hauptplatine	74
5.4.1.2	Verstärkerkarten	75
5.4.2	Grafikprozessor	77
5.5	Fazit	82
6	Bildzerlegung	83
6.1	Weißabgleich	83
6.2	Farbtiefe	84
6.3	Konturvermeidung	86
6.3.1	Statische Konturen	87
6.3.2	Dynamische Konturen	92
6.4	Kompensation von Temperatureinflüssen	97
6.5	Fazit	99
7	Alterung	101
7.1	OLED-Alterung und Alterungsmodell	102
7.2	Zustandserfassung im Displaysystem	105
7.3	Kompensationsmethode	109
7.4	Implementierung der Kompensation und Resultate	117
7.5	Integration in Gesamtsystem und Ausblick	119
7.6	Fazit	122
8	Zusammenfassung und Ausblick	123
8.1	Einsatzmöglichkeiten	124
8.2	Ausblick und weiterführende Arbeiten	125
9	Anhang	127
10	Abkürzungsverzeichnis	133
11	Tabellenverzeichnis	135
12	Abbildungsverzeichnis	137

13 Literatur

143

1 Einleitung

Im menschlichen Alltag nehmen Displays als Bestandteil von Systemen einen festen Platz ein. Sie dienen beispielsweise als Schnittstelle zur Kommunikation und Interaktion mit Maschinen oder zur Darstellung von Informationen. Seit Einführung einfacher Anzeigen, zum Beispiel Statusleuchten, und mit dem Übergang zu matrixbasierten Anzeigen (Displays im heutigen Sinne) in Form von Röhrenbildschirmen nimmt die Verbreitung von Displays stetig zu. Sie finden sich heute in vielen Gegenständen des täglichen Gebrauchs (Smartphone, Laptop, Fernseher, aber auch Küchengeräte, Fahrzeuge, Werkzeuge etc.). Durch neue Bauformen und Anwendungsszenarien wie die zunehmende Digitalisierung wird trotz Preisverfalls durch industrielle Fertigung und konjunkturelle Effekte eine Steigerung des Umsatzes des Weltmarktes für Flachbildschirme erwartet, vergleiche Abbildung 1.1.

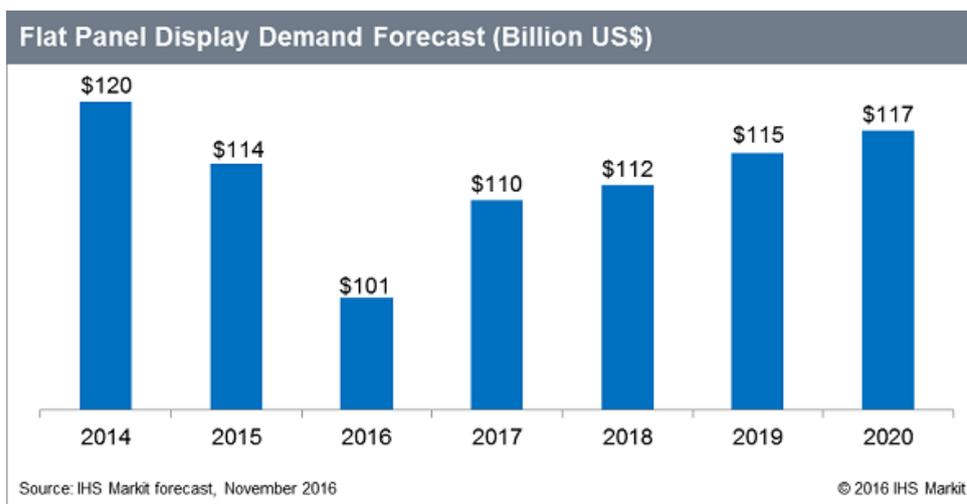


Abbildung 1.1: Erwartete Entwicklung des Weltmarktes für Flachbildschirme (Quelle: Park2016).

Der erwünschte und gar teils notwendige Einsatz von Displays in Anwendungen führt gleichzeitig zu gesteigerten Erwartungen an die Performance derer. Anwendungen im Automobil als HUD¹ erfordern sehr hohe Helligkeiten, als Fensterersatz im Flugzeug müssen Displays sehr leicht und energiesparend sein und für multimediale Anwendungen

¹Head Up Display

wie in Laptops, Fernsehern oder auch in VR-Brillen² ergeben sich hohe Anforderungen an die visuelle Qualität. Die bisher marktdominierende Technologie für Displays, LCD³, kann die wachsenden Ansprüche an Dicke, Gewicht, Flexibilität, Auflösung, Kontrast, Helligkeit, Temperaturbereich sowie Energieeffizienz nicht in allen Punkten erfüllen, sodass sich eine zunehmende Verschiebung hin zu alternativen Technologien wie AMOLED⁴ ergibt. Abbildung 1.2 zeigt den wachsenden Anteil von AMOLED-Displays am Gesamtmarkt, welcher einhergeht mit der Verdrängung von Nischentechnologien wie PDP⁵ und PMOLED⁶. Gleichzeitig lässt sich in jüngerer Vergangenheit aber eine allmähliche Stagnation der Durchsetzung von AMOLED-Displays feststellen, insbesondere werden Märkte wie der der großflächigen Displays kaum erschlossen. Dies kann zurückgeführt werden auf Einschränkungen der Verwendbarkeit von AMOLED-Displays in bestimmten Anwendungen aufgrund zu hoher Fertigungskosten und Energiebedarfs. Durch Konzeption, Entwicklung und Realisierung eines AMOLED-Systems, welches eine alternative Ansteuertechnologie (digitale Ansteuerung) verwendet, soll in dieser Arbeit aufgezeigt werden, wie diese Einschränkungen umgangen werden können.

1.1 Motivation

Nachdem der Markt für großflächige Displays, wie beispielsweise für Fernseher, in den letzten Jahren stagnierte, verschiebt sich der Fokus der Displayhersteller hinsichtlich Wachstumspotenzial zunehmend auf den Markt klein- bis mittelgroßer Displays, wie sie in Smartphones und Tablets eingesetzt werden. In Abbildung 1.3 ist die Verteilung der Marktanteile auf die verschiedenen Hersteller gezeigt. In dieser Darstellung werden die Märkte sowohl für LCD als auch AMOLED betrachtet⁷. Auf dem Markt der AMOLED gibt es derzeit nur zwei große Hersteller, der Pionier im AMOLED-Markt Samsung mit etwa 95% Marktanteil sowie LG (Quelle: **Jin-Young2016**). Viele andere Hersteller wie unter anderen Tianma, AUO, CME und BOE versuchen seit vielen Jahren in diesem Markt Fuß zu fassen, europäische Firmen spielen hier nur im Zulieferermarkt eine Rolle. Probleme in der Fertigung der Displays und somit auch in den Kosten hindern sie aber bis heute am Markteintritt. Gleichzeitig treibt die fortschreitende Weiterentwicklung der LCD und die damit verbundene Konkurrenzfähigkeit zu AMOLED-Displays den Kostendruck auf letztere. Durch Einführung von Technologien wie IPS⁸, Local Dimming, Scanning Backlight und Verwendung von Quantum Dots sind aktuelle LCD in ihrer visuellen Performance hinsichtlich Kontrast und Farbumfang vergleichbar zu AMOLED-Displays, sodass deren Hauptvorteile verloren gehen. Bestehende Nachteile im Bereich Fertigungskosten und Energieeffizienz aber bleiben bestehen. Durch wachsende

²VR: virtuelle Realität.

³Liquid Crystal Display

⁴Active Matrix Organic Light Emitting Diode

⁵Plasma Display Panel

⁶Passive Matrix Organic Light Emitting Diode

⁷Andere Displaytechnologien spielen hier keine nennenswerte Rolle.

⁸In Plane Switching

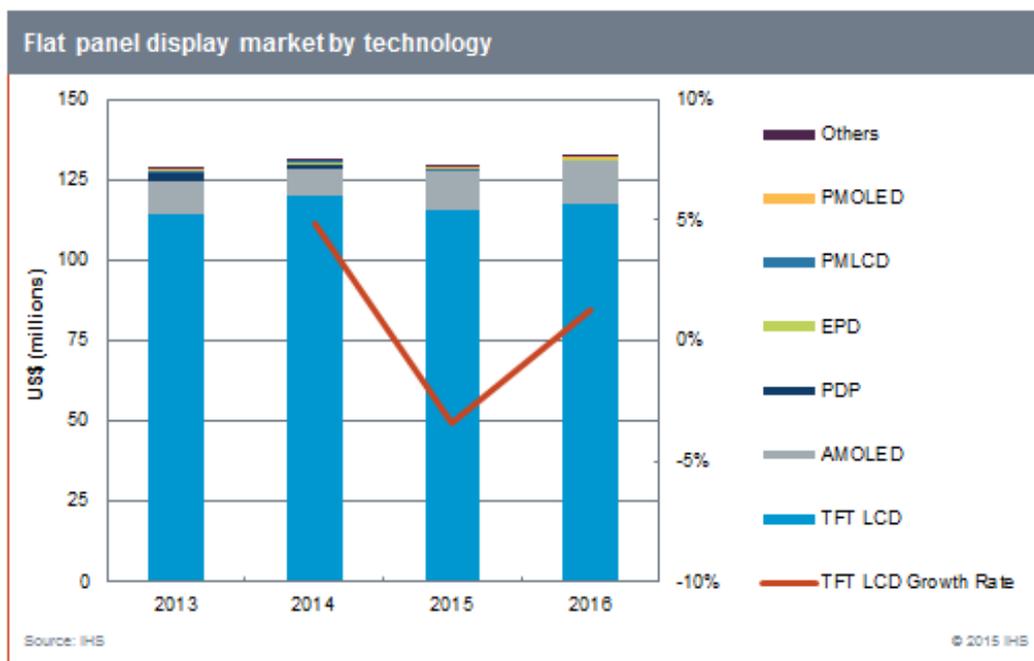


Abbildung 1.2: Gemessener und erwarteter Marktanteil verschiedener Displaytechnologien (Quelle: **IHS2015**). Die vertikale Achse sind Milliarden US\$ (sic).

Erwartungen des Marktes an die Auflösung der Displays steigen diese sogar.

Neben den erwähnten Vorteilen hinsichtlich visueller Qualität bieten AMOLED-Displays jedoch Möglichkeiten wie die Verwendung flexibler Substrate und damit die Realisierung flexibler Displays, welche mit LCD nicht gegeben sind (vergleiche auch Kapitel 2). Hier sind bereits erste Produkte wie die Galaxy Edge Reihe von Samsung und verschiedene Smartwatches am Markt verfügbar. Für die kommenden Jahre wird hier ein stark wachsender Marktanteil vorhergesagt. Auch bei diesen Anwendungen ergeben sich Forderungen an Kosten und Energieeffizienz, welche durch die aktuelle AMOLED-Technologie nur schwer zu erfüllen sind. Ein Wechsel der Ansteuertechnologie, das heisst weg von analoger Steuerung mit Nachteilen hinsichtlich Robustheit (Fertigungstoleranzen) und Energieeffizienz hin zu digitaler Ansteuerung ist hier ein vielversprechender Ansatz, um kostengünstige und energieeffiziente AMOLED-Displays mit hoher Darstellungsqualität unter Verwendbarkeit aller technologischen Vorteile zu realisieren. Um die Möglichkeiten und Herausforderungen der Verwendung einer digitalen Ansteuertechnologie für AMOLED-Displays näher zu untersuchen, ist ein funktionsfähiger Prototyp notwendig und mithilfe dieses Prototypen müssen weitere Untersuchungen durchgeführt werden. Die vorliegende Arbeit hat diese Konzeption, Entwicklung und Realisierung eines digital angesteuerten AMOLED-Displaysystems zum Thema.

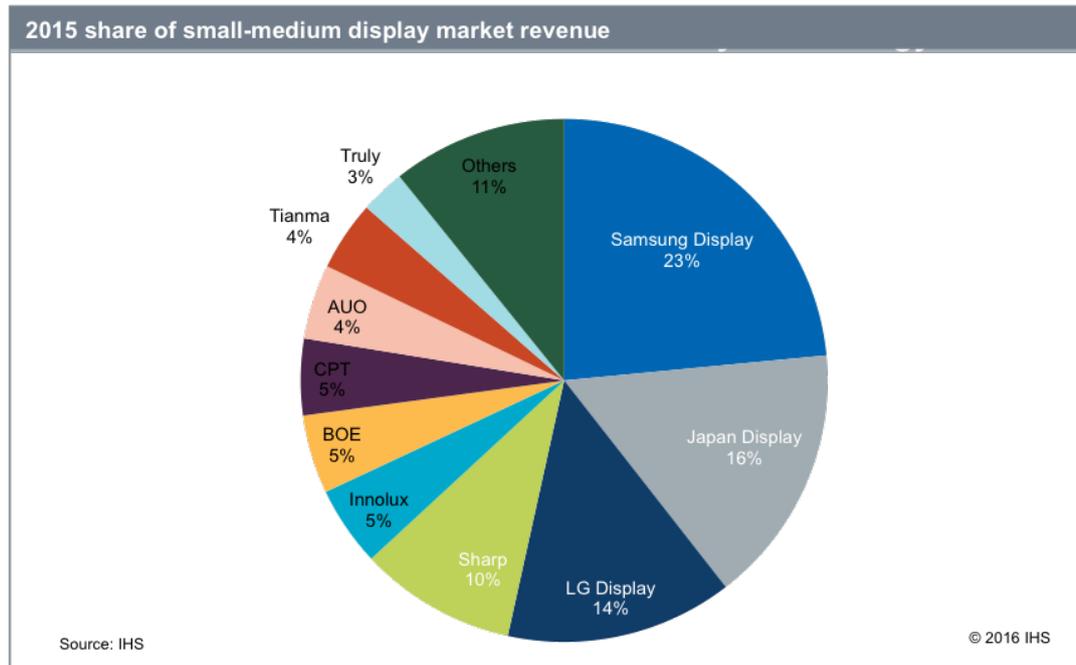


Abbildung 1.3: Marktanteil für kleine bis mittelgroße Displays verschiedener Displayhersteller (Quelle: **IHS2016**).

1.2 Ziele

Ziel der Arbeit ist es, Möglichkeiten aufzuzeigen, zu analysieren und umzusetzen, mit welchen kostengünstige und energieeffiziente AMOLED-Displays realisiert werden können. Hierfür soll ein digitales Ansteuerschema auf AMOLED-Displays appliziert werden. Es soll eine zu aktuell am Markt verfügbaren Displays vergleichbare oder verbesserte visuelle Performance (Leuchtdichte, Graustufenauflösung) erzielt werden. Durch verbesserte Fertigbarkeit der Displays aufgrund geringerer Anforderungen an die integrierten Pixel-schaltungen und eine daraus resultierende höhere Ausbeute sollen die Stückkosten gesenkt werden. Es sollen Wege aufgezeigt werden, im Vergleich zu konventionellen analogen AMOLED sowohl die intern im Display verwendete als auch die extern ansteuernde Hardware im Aufwand zu senken, ohne hierbei Einschnitte in der Darstellungsqualität hinnehmen zu müssen.

Um der begrenzten Lebensdauer von AMOLED-Displays, eines der größten Hindernisse am Markt, entgegenzutreten, soll eine Möglichkeit gefunden werden, diese im System zu kompensieren. Maßgeblich ist auch hier, den Aufwand für das Display in nur möglichst geringem Maße zu erhöhen. Durch ein solches Kompensationssystem soll die Verwendung von AMOLED-Displays auch für Darstellungszwecke, welche Bilder mit statischen Inhalten benötigen wie etwa Statusanzeigen mit geringer Wechselrate des Inhaltes, mit einer

hohen Lebensdauer ermöglicht werden.

Die Verwendbarkeit der gefundenen Lösungen für Displays verschiedener Größen (kleine Anzeigeeinheiten vs. Multimedia- oder TV-Anwendungen) soll betrachtet werden. Durch die Verwendung einfacher und damit kostengünstiger Display- und Hardwarestrukturen sollen auch kostensensitive, großflächige Anwendungen erschlossen werden.

Die Umsetzbarkeit der gefundenen Lösungsansätze für Displayhersteller soll behandelt und erste Prototypen gefertigt werden. Anhand dieser soll die optische Performance evaluiert und eventuelle Probleme sowie Lösungen für diese herausgearbeitet werden. Mithilfe der gewonnenen Erkenntnisse soll bewertet werden, ob der gefundene Ansatz zielführend für einen Displayhersteller sein kann. Hierbei soll insbesondere darauf eingegangen werden, wie die für die Prototypen realisierten Schaltungen und Datenprozessoren in einem realen Displaysystem integriert werden können, welcher zusätzliche Aufwand hierbei entsteht und ob die Grundziele (geringerer Aufwand, Kosten, Energiebedarf) in den verschiedenen Zielsystemen realistisch erreicht werden können.

1.3 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau der Arbeit spiegelt das systematische Vorgehen zur Erfüllung der gesetzten Ziele wider. In Kapitel 2 werden die Grundlagen von Displaysystemen behandelt und es wird insbesondere auf AMOLED-Systeme eingegangen. Darauf folgend werden in Kapitel 3 Ansteuertechnologien für ein solches AMOLED-Display vorgestellt, Vor- und Nachteile verschiedener Technologien diskutiert und die sich ergebenden Möglichkeiten und Herausforderungen bei Verwendung eines digitalen Ansteuerschemas erläutert. Kapitel 4 konzentriert sich auf die Grundfunktionen eines digitalen AMOLED Anzeigesystems, die notwendige Displayelektronik und Datenprozessierung und stellt die Grundlagen für die in Kapitel 5 vorgestellten realisierten Displaysystemen dar. In den Kapiteln 6 und 7 werden verschiedene visuelle Artefakte welche sich durch die Verwendung der digitalen Ansteuerung auf den realisierten Systemen ergeben behandelt. Es werden die Auswirkungen dieser dargestellt und Lösungen zur Vermeidung beziehungsweise Kompensation erläutert. Abschließend fasst Kapitel 8 die gesamte Arbeit kurz zusammen.

2 Grundlagen

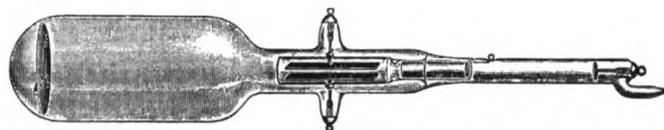


Abbildung 2.1: Kathodenstrahlröhre nach Braun, 1897 (Quelle: Nesper1921).

Seit der Kommerzialisierung CRT¹ basierter Displays im Jahr 1922 stieg einerseits die Zahl der Anwendung von Displays in Systemen, andererseits förderte die Weiterentwicklung der Displaytechnologien die Möglichkeiten für neue Anwendungsgebiete. Getrieben durch neue Anforderungen, wie der Wunsch nach kleinerer Bauform, flache Displays, höhere Kontraste, verbesserte Lebensdauer oder auch größerer Farbraum, wurden stets neue Technologien entwickelt. Gegen Ende der 1980er Jahre kamen LCD als Alternative auf den Markt. Diese waren erstmals flach und ermöglichten die Realisierung transportabler Geräte wie Laptops. Große Bild diagonalen waren hiermit jedoch sehr teuer in der Produktion. Mitte der 1990er Jahre kamen aktiv-emittierende Displays in Form von PDP als Alternative auf. Diese wurden erst durch den Preisverfall von großformatigen LCD und deren stetige Weiterentwicklung hinsichtlich visueller Qualität in den letzten Jahren vom Markt verdrängt. Der Wunsch nach höheren Kontrastraten und besserer Farbdarstellung trieb die Entwicklung der AMOLED-Displaysysteme voran. Seit etwa 2004 drängen diese in den kommerziellen Markt. Anfängliche Überlegenheit in Farbraum und Kontrast konnten durch Weiterentwicklung der LCD-Technologie zwischenzeitlich zwar nahezu aufgeholt werden, jedoch bieten AMOLED-Displays Möglichkeiten wie Flexibilität, schnelle Reaktionszeit und höhere Energieeffizienz, welche durch LCD nicht abgedeckt werden können. Der Markt für AMOLED-Displays ist wie in Kapitel 1 gezeigt weiterhin stark wachsend und sie stehen daher weiter im Fokus aktueller Entwicklung.

2.1 AMOLED-Display: Aufbau und Systeme

Der Aufbau eines AMOLED-Displays ist ähnlich zu dem eines LCD. Jedoch werden statt einer Hintergrundbeleuchtung welche variierbar gefiltert wird, selbst-emittierende Pixel genutzt. Diese ermöglichen sehr hohe Kontrastraten, da dunkle Pixel keinerlei Licht emittieren. Das Kontrastverhältnis ist lediglich durch Reflektionen des Umgebungslichts

¹Cathode Ray Tube

begrenzt. Zur Vermeidung dieser kommen spezielle Filterschichten zum Einsatz. Typischerweise werden lineare Polfilter in Kombination mit Retardationsschichten verwendet. Dies ergibt das Verhalten eines zirkularen Polfilters. Eingedrungenes Licht, welches im Display reflektiert wird, erfährt bei der Reflektion eine Drehung der zirkularen Polarisationsrichtung und kann durch den Polfilter nicht mehr austreten. Hierdurch werden auch bei starken Umgebungslicht sehr hohe Kontrastraten erreicht. Daneben werden für ein AMOLED-Display im Vergleich zu LCD nur sehr wenige Schichten benötigt, was die Fertigung vereinfacht. Als Grundlage können neben Glassubstraten auch flexible Plastiksubstrate verwendet werden. Größte Herausforderung ist hier die hermetische Verkapselung, welche das Eindringen von Sauerstoff verhindert. Dies würde die Pixel irreparabel schädigen.

Die selbst-emittierenden Pixel werden mittels OLED² ausgeführt. Die typische Struktur eines AMOLED-Displays ist in Abbildung 2.2 dargestellt. Als Emittor kommen wahlweise OLED in den drei Grundfarben Rot, Grün und Blau zum Einsatz oder es werden weiße OLED mit Farbfiltern verwendet. Neben der klassischen Struktur mit den drei Grundfarben gibt es auch Realisierungen mit einer vierten Farbe oder einem zusätzlichen weißen Subpixel. Hierdurch können größere Farbräume oder auch hellere Displays beziehungsweise Displays mit einer höheren Effizienz erreicht werden. Durch die größere notwendige Fläche je Pixel sinkt jedoch die Auflösung bei gleichbleibender Displayfläche.

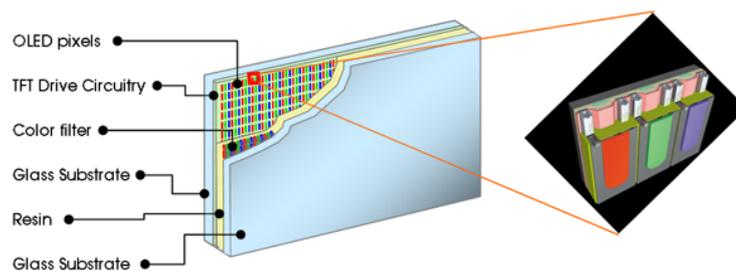


Abbildung 2.2: Typische Struktur eines AMOLED-Display (Quelle: provideocoalition.com).

Zur Ansteuerung der OLED dient eine Beschaltung mit Transistoren als aktive Elemente. Diese Beschaltung steuert die Helligkeit der OLED, vergleiche auch Kapitel 3. Je nach Schaltungstopologie werden je Subpixel zwei und mehr Transistoren eingesetzt. Daneben sind passive Elemente wie Kapazitäten in den Schaltungen verbaut. Die klassische Struktur ist die Verwendung einer Bottom-Emission-Struktur wie in Abbildung 2.3 in der linken Hälfte gezeigt. Hierbei werden zuerst die Transistoren auf dem Glas hergestellt, im letzten Schritt wird das OLED-Material aufgebracht und eine finale Versiegelungsschicht aufgebracht. Zusätzlich wird in der Regel mit einem rückseitigen Glas eine hermetische

²Organic Light Emitting Diode

Abdichtung realisiert. Nachteil bei dieser Struktur ist, dass Flächen, auf denen sich Transistoren befinden, nicht zur Lichtemission zur Verfügung stehen. Hierdurch muss die Leuchtdichte der einzelnen OLED höher sein, was negative Auswirkungen auf die Lebensdauer des Displays hat.

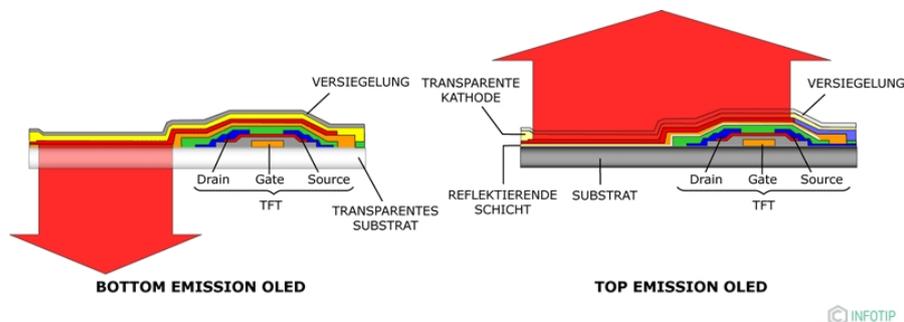


Abbildung 2.3: Top- und Bottomemissionstruktur eines AMOLED-Pixels (Quelle: kompendium.infotip.de).

Bei Verwendungen mehrerer Transistoren je OLED oder allgemein, um die emittierende Fläche zu vergrößern, kann eine Top-Emission-Struktur verwendet werden, vergleiche Abbildung 2.3. Hierdurch kann das Verhältnis von emittierender zur gesamten Fläche (die Apertur) deutlich gesteigert werden. Nachteilig ist eine aufwendigere Fertigungstechnik und das Auftreten von sogenannten Microcavity-Effekten. Diese ergeben sich durch das Versiegelungsglas, welches auf dem Trägerglas aufgebracht wird. In diesem muss eine Kavität erzeugt werden, sodass Raum für die auf dem Trägerglas gefertigten Strukturen zur Verfügung steht. Bei Verwendung einer Top-Emission-Struktur tritt das Licht durch dieses Deckglas aus. Durch Reflektion und Brechung des austretenden Lichts an der Übergangsfläche von Innenraum zum Glas ergeben sich Blickwinkelabhängigkeiten und Farbverschiebungen. Zudem müssen die Versiegelungsschichten und die lichtdurchlässige Elektrode entsprechende optische Eigenschaften besitzen, sodass genügend Licht ausgekoppelt wird. Für kostengünstige Displays kommt üblicherweise eine Bottom-Emission-Struktur zum Einsatz.

Ein Hauptvorteil von AMOLED gegenüber LCD ist wie erwähnt der flexible Formfaktor aber auch die hohe Skalierbarkeit. Abbildung 2.4 zeigt ein Miniaturdisplay (Bildschirmdiagonale 0,77 inch) der Firma eMagin. Das Display weist eine Auflösung von 1292×1036 bei einem Pixelabstand von $12 \mu\text{m}$ auf. Gefertigt werden diese Displays auf einem Siliziumsubstrat, welches auch die notwendige Ansteuerelektronik enthält. Entsprechend können diese Displays dank der schnellen Reaktionszeit der OLED³ sehr hohe Bildwiederholraten erreichen und können gleichzeitig nah ans Auge gebracht werden, beispielsweise für Anwendungen wie Datenbrillen oder militärische Systeme. Weitere Anwendungen für kleinflächige Displays sind Smartwatches und andere Kleinsteigeräte wie Fitness-Tracker.

³Typisch weisen OLEDs Reaktionszeiten im Bereich $1 \mu\text{s}$ auf.



Abbildung 2.4: 0,77" Mikrodisplay, Auflösung SXGA (1292 * 1036), Pixelpitch 12 μm (Quelle: eMagin Corp.).

Hier spielt zunehmend auch der mögliche flexible Formfaktor eine Rolle. Ein Beispiel für ein solches flexibles Display ist in Abbildung 2.5 gezeigt.

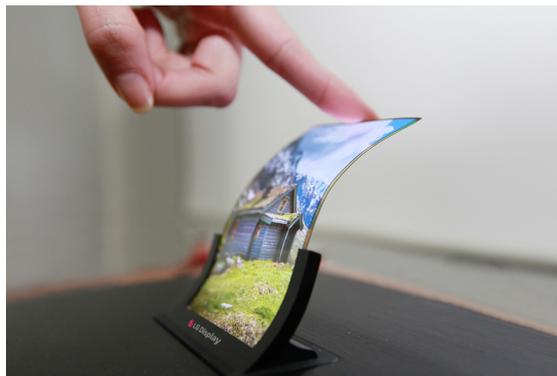


Abbildung 2.5: AMOLED-Display auf flexiblem Substrat (Quelle: LG; redorbit.com).

Bei großflächigen AMOLED-Displays ist derzeit die Fertigungstechnik noch ein kostenbestimmender Faktor. Es sind am Markt noch keine Geräte verfügbar, die im Preis konkurrenzfähig zu LCD sind. Jedoch profitiert auch hier der Anwender von den visuellen Vorteilen der AMOLED-Technik. Daneben existieren Nischenanwendungen wie Signature-Displays (feste Formen) und Beleuchtungsanwendungen, bei welchen OLED zum Einsatz kommen. Insgesamt gibt es ein breites Anwendungsfeld mit Möglichkeiten für Spezialanwendungen, in welchen andere Displayssysteme nicht einsetzbar sind.

2.2 OLED und TFT

Kernstück der selbst-emittierenden Pixel ist die OLED als Lichtemitter. Als OLED werden verschiedene organische Materialien bezeichnet, welche bei Anregung durch elektrischen Strom Licht emittieren. Beispiele für solche Materialien sind seit den 1950er Jahren bekannt. Industriell einsetzbar sind sie seit Anfang der 1990er. Typische moderne OLED bestehen aus einem komplexen Schichtaufbau. Die eigentliche Emitterschicht wird begleitet von verschiedenen Schichten zum Zweck der Ladungsträgerinjektion und des -transports. Diese sogenannten SMOLED⁴ haben die klassischen einschichtigen Polymer-OLED nahezu komplett abgelöst, da sie diesen hinsichtlich Effizienz und Robustheit deutlich überlegen sind.

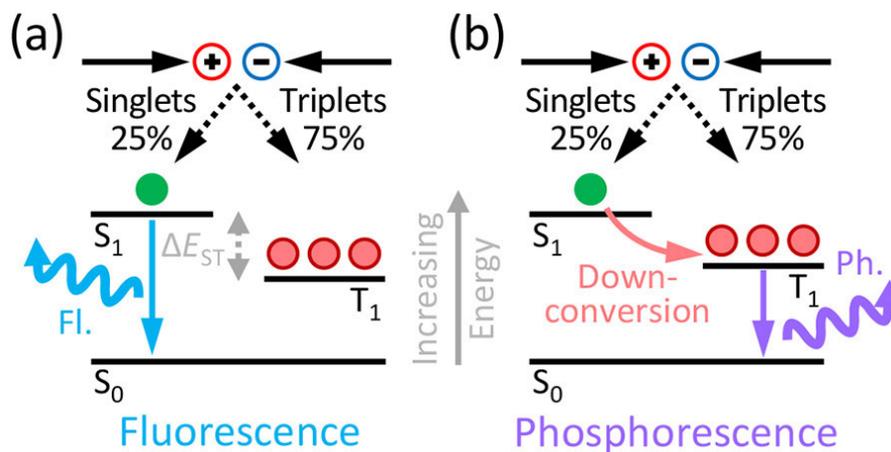


Abbildung 2.6: Photonemission bei fluoreszenten und phosphoreszenten OLED-Materialien (Quelle: Adachi2015).

Die Abgabe von Photonen resultiert aus in der OLED stattfindenden Rekombinationsvorgängen der injizierten Ladungsträger und daraus entstehenden angeregten Zuständen (Exzitonen). Wie in Abbildung 2.6 gezeigt, entstehen bei der Rekombination angeregte Zustände in Form von Singlet- oder Triplet-Zuständen⁵. Bei fluoreszenten OLED-Materialien werden nur bei Rückkehr aus den höher-energetischen Singlet-Zuständen S_1 (vergleiche Abbildung 2.6) in den Grundzustand S_0 Photonen emittiert. Statistisch werden Singlet-Zustände nur zu 25% angeregt, die effektive Quanteneffizienz⁶ von fluoreszenten Materialien ist entsprechend begrenzt. Aktuelle Entwicklungen haben die Klasse der phosphoreszenten OLED-Materialien hervorgebracht. Diese emittieren Licht bei der Rückkehr aus den Triplet-Zuständen. Zusätzlich können durch Energieabgabe Singlet-Zustände in

⁴Small Molecule OLED

⁵In der Quantenmechanik wird zwischen Singlet-Zuständen (Spin 0) und Triplet-Zuständen (Spin 1) unterschieden.

⁶Verhältnis von durch Rekombination angeregten Zuständen und Zustandsänderungen mit Photonemission.

Triplet-Zustände gewandelt werden, sodass diese Materialien eine effektive Quanteneffizienz von bis zu 100% aufweisen. Nachteilig bei diesen Materialien ist die niedrigere Langzeitstabilität. Aktuell sind aber bereits grüne und rote Emittermaterialien mit hinreichend langen Lebensdauern am Markt verfügbar. Lediglich für blau emittierende Materialien wird noch auf fluoreszente Materialien zurückgegriffen.

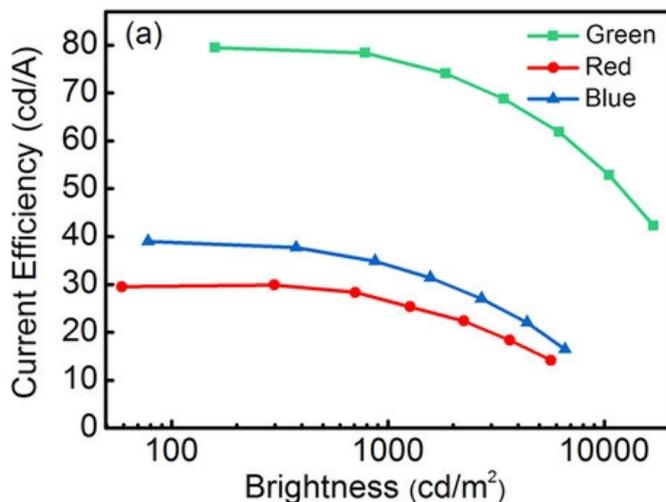


Abbildung 2.7: Verlauf der Stromeffizienz einer OLED über ihrer Leuchtdichte (Quelle: Wu2016).

Die Gesamteffizienz der OLED kann als Quotient aus abgegebenem Licht (Leuchtdichte multipliziert mit der emittierenden Fläche) und dem fließenden Strom angegeben werden. Man spricht hier von der Stromeffizienz. Diese ist ein typisches Maß für die Güte von OLED Materialien. Die Leuchtdichte L einer OLED lässt sich hiermit aus der Stromeffizienz η_I im Arbeitspunkt und dem die OLED durchfließenden Strom I_D berechnen:

$$L(I_D) = \eta_I * I_D. \quad (2.1)$$

In Abbildung 2.7 ist der gemessene Verlauf der Stromeffizienz dreier Materialien über der Leuchtdichte aufgetragen. Diese besitzt stets ein Maximum bei geringeren Leuchtdichten und nimmt hin zu höheren Leuchtdichten ab. Hier nehmen unproduktive, im Sinne von Photonenerzeugung, Rekombinationsvorgänge zu. Die gezeigten Effizienzen für die verschiedenen Farben liegen in typischen Bereichen für moderne OLED-Materialien. Weiß-emittierende OLED werden meist als Stapel aus verschiedenen farbigen OLED gefertigt, sodass die Mischung der Farben den gewünschten Weißton ergibt. Man bezeichnet diese Anordnung als Tandem-OLED.

Das elektrische Verhalten einer OLED entspricht dem einer Diode und kann mit der

Shockley-Gleichung gut beschrieben werden:

$$I(U_D) = I_0 * \left(\exp\left(\frac{U_D}{n * U_T}\right) - 1 \right). \quad (2.2)$$

$I(U_D)$ ist hier der die Diode durchfließende Strom in Abhängigkeit der Spannung U_D über der Diode, I_0 der Sättigungsstrom, n ein Emissionskoeffizient (auch Idealitätsfaktor) und U_T die Temperaturspannung. Im Gegensatz zu kristallinen Dioden ist der Kennlinienverlauf bei OLED sehr flach, es muss ein Emissionskoeffizient von $n = 20..40$ angesetzt werden. Entsprechend ist zur Steuerung der Helligkeit der OLED sowohl eine direkte Strom- als auch eine indirekte Spannungssteuerung gut möglich. Wie in Kapitel 3 erläutert, wird Stand der Technik eine analoge Stromsteuerung zur Steuerung verwendet. Im Pixel wird hierfür eine Transistorbeschaltung eingesetzt, welche durch TFT⁷ realisiert ist.

TFT sind Transistoren, welche auf großen Flächen durch flächige Fertigungsverfahren wie Aufdampfen erzeugt werden. Es gibt eine Vielzahl an Technologien, um diese zu erzeugen. Typische Kenngröße für die Qualität der gefertigten Transistoren ist die Ladungsträgermobilität und die Stabilität der Schwellspannung. Zur Ansteuerung von OLED sind TFT mit einer Ladungsträgermobilität typisch $\mu_e > 10..20 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}$ notwendig. In diesem Bereich sind mittels LTPS⁸ hergestellte oder Oxid-basierte TFT anwendbar. In der derzeitigen Fertigung werden vorwiegend LTPS-TFT verwendet, da diese seit langem am Markt etabliert sind und entsprechend das Fertigungsequipment leicht verfügbar und ausgereift ist. Oxide-TFT könnten diese langfristig ablösen, sind derzeit aber noch teurer in der Herstellung. LTPS-TFT werden durch rekristallisieren einer aufgetragenen amorphen Siliziumschicht erzeugt. Die hierfür notwendige Energie wird durch Laser abschnittsweise in die Kristallschicht eingebracht. Hierdurch entstehen leicht lokale Variationen in den Eigenschaften der TFT, was derzeit die größte Herausforderung für die Verwendung von LTPS darstellt. Oxide-TFT weisen hier eine bessere Homogenität auf, besitzen dafür Nachteile in der Langzeitstabilität.

2.3 Datenhandling

Die zur Steuerung der OLED-Helligkeit notwendigen Daten werden von einer externen Quelle zugespielt. Die Zuspiegelung zum Videoprozessor erfolgt digital unter Verwendung einer geeigneten Schnittstelle wie HDMI⁹, Displayport und andere. Die Übertragung der Daten erfolgt seriell. Neben der Deserialisierung ist als minimaler Prozessierungsschritt eine Gamma-Korrektur notwendig. Hierbei werden die physiologisch linear vorliegenden Bilddaten einer Anpassung unterzogen, sodass sie bei Darstellung auf einem physikalisch linearem System für das Auge linear wahrgenommen werden:

$$X_{\text{gamma}} = X^\gamma. \quad (2.3)$$

⁷Thin Film Transistor

⁸Low Temperature Polycrystalline Silicon

⁹High Definition Multimedia Interface

X ist hierbei ein Bilddatum und muss $0 \leq X \leq 1$ betragen, γ ist ein Anpassungsfaktor, welcher für das Darstellungssystem charakteristisch ist. Bei linearen Systemen ist typischerweise $\gamma = 2,2$. Hiermit wird dem durch das Weber-Fechner-Gesetz beziehungsweise durch die Stevenssche Potenzfunktion beschriebenen Umstand, dass das Auge nicht-linear auf Helligkeit reagiert, Rechnung getragen. Gleichzeitig hat die Gamma-Korrektur den Effekt einer Datenkompression, es ist effektiv weniger Auflösung zur Übertragung der Bilddaten notwendig¹⁰. Nach dieser Prozessierung werden die Daten an die einzelnen Pixel durch die Zeilen- und Spaltentreiber zugespielt. Diese Verteilen die Daten an die Zielpixel. Der Zeilentreiber aktiviert die zu programmierende Zeile, der Spaltentreiber programmiert die Daten in die Pixel der aktivierten Zeile. Bei analoger Ansteuerung liegen die Daten hier als analoger Stellwert vor, bei digitaler Ansteuerung als einfache binäre Werte. Details hierzu werden im nächsten Kapitel behandelt.

¹⁰Sollen 256 Graustufen übertragen werden, ist bei Übertragung linearer Daten eine Auflösung von 8 Bit notwendig, die nicht-linearen Daten nach Gamma ($\gamma = 2,2$) würden 18 bit benötigen.

3 Ansteuertechnologien für AMOLED

Wie in Kapitel 2 erläutert, stellt ein Display eine Matrix aus einzelnen Bildpunkten dar. Zur Darstellung von Bildinhalten auf dieser wird die Helligkeit und Farbe der einzelnen Bildpunkte variiert. Ähnlich zu verschiedenen anderen elektronischen, elektromechanischen und mechanischen Systemen stehen grundlegend zwei Verfahren zur Steuerung zur Verfügung: die direkte Modulation der Helligkeit oder die Modulation der wahrgenommenen Helligkeit durch Variation der Ansteuerdauer.

Stand der Technik ist die Verwendung einer analogen Steuerung der Helligkeit der Pixel. Diese weist jedoch Nachteile hinsichtlich Robustheit und Energieeffizienz auf. Durch Verwendung einer digitalen Ansteuerung, welche jedoch neue Herausforderungen mit sich bringt, lassen diese sich umgehen. Im Folgenden werden beide Verfahren detailliert dargestellt und verglichen.

3.1 Analoges Treiberschema

Analoge Treiberschemata basieren auf der direkten Modulation der Helligkeit eines Pixels. Hierbei ist die Helligkeit proportional zu einem Ansteuersignal, welches in Zeit und Wert kontinuierlich und somit nach Definition analog ist. Typischerweise findet dieses Ansteuerschema in Displaysystemen wie CRT und LCD Verwendung, wo die Helligkeit durch Modulation des Elektronenstrahls beziehungsweise durch die Neigung der Polarisierungsebene moduliert wird. Entsprechend wurde dieser Ansatz auf AMOLED-Systeme adaptiert und führte zu schnellen Erfolgen und einer möglichen Markteinführung in 2004. Erste Displaysysteme wurden von der Firma Kodak präsentiert.

3.1.1 Funktionsweise

Wie in Kapitel 2 gezeigt, ist die Leuchtdichte einer OLED proportional dem Strom, welcher sie durchfließt. Diese Proportionalität ist zudem abhängig vom Arbeitspunkt, sodass dieser bei Modulation des Stroms berücksichtigt werden muss. Um die Zielleuchtdichte eines Pixels einzustellen, wird mithilfe der Pixelbeschaltung direkt der Strom durch die OLED moduliert. Bei Verwendung verschieden farbiger Subpixel kann somit Farbe und Helligkeit des Pixels wie gewünscht eingestellt werden. Ein einfacher Weg ist hier die Verwendung einer Pixelbeschaltung, welche einen Strom durch die Datenleitung in einen proportionalen Strom durch die OLED spiegelt. Eine solche Schaltung ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Sie wird mithilfe von TFT auf dem Glassubstrat des Displays hergestellt.

bei konstanter Leuchtdichte beziehungsweise kein Flackern bei Wechsel wahrnimmt, muss sichergestellt werden, dass die Leuchtdichte zwischen zwei Programmierperioden konstant bleibt und eine Neuprogrammierung des Pixels hinreichend oft erfolgt. Wie in Abschnitt 3.2 gezeigt wird, ist es hierfür ausreichend, die Pixel mit einer Frequenz von 60 Hz zu programmieren. Gegenüber dem digitalen Treiberschema ist dies eine deutlich geringere Programmierrate, womit sich entsprechend geringere Ansprüche an andere Schaltungsteile wie den Zeilentreiber ergeben. Zudem ist das analoge Ansteuerschema wegen der Gleichmäßigkeit der Leuchtdichte über der Zeit deutlich weniger anfällig für visuelle Artefakte im Vergleich zur digitalen Ansteuerung. Es ergeben sich aber starke Nachteile hinsichtlich Homogenität, Ansprüche an Fertigungstoleranzen und Energieeffizienz. Wie diese die Durchsetzung von AMOLED-Displays behindern und sich auf den Markt auswirken, wird im Folgenden näher erläutert.

3.1.2 Marktsituation und -hindernisse

Wie in Kapitel 1 erläutert, verschiebt sich der Anteil von Displaysystemen am Markt seit Einführung der AMOLED-Displays zunehmend in deren Richtung. Viele Hersteller versuchen sich am Markt zu etablieren. Bisher ist dies jedoch nur Samsung und LG gelungen. Durch Verbesserungen im Bereich der LCD wurde insbesondere bei großen Displays bisher eine erfolgreiche Vermarktung von AMOLED-Displays trotz bestehender Vorteile hinsichtlich visueller Qualität und möglichen Bauformen verhindert. Auch bei kleinen Displays stagniert der Markt und es konnten sich bisher weiterhin keine anderen Anbieter erfolgreich platzieren.

Herausforderung bei der Realisierung eines AMOLED-Displays ist stets das Erreichen der notwendigen analogen Genauigkeit in allen Pixeln über der gesamten Displayfläche. Für AMOLED-Displays sind Transistoren mit hoher Ladungsträgermobilität notwendig, bei TFT eignen sich hier nur LTPS-TFT. Durch notwendige Prozesse zur Herstellung dieser, welche sequentiell auf der Displayfläche durchgeführt werden, ergeben sich Schwankungen der Eigenschaften der OLED und Transistoren über der Fläche und hierdurch Abweichungen in den optischen Eigenschaften der Pixel. Diese führen zu nicht akzeptierten Helligkeitsschwankungen über der Fläche und können im Allgemeinen nicht einfach kompensiert werden, sodass die Verwendung der analogen Ansteuerung hier ein Markthindernis darstellt. Verschärft wird dieses Problem zudem durch Forderungen des Marktes nach flexiblen Displays, welche bei Einbau und idealerweise auch im Betrieb biegsam sind. Abbildung 3.2 zeigt eine Vorhersage nach **IHS2016a** bezüglich des zu erwartenden Marktanteiles flexibler Displays am gesamten AMOLED-Displaymarkt. Bisher beherrscht nur ein Fertiger (Samsung) die Technologie zur Fertigung von AMOLED-Displays auf flexiblen Substraten. LG hat in der Vergangenheit auch entsprechende Produkte (LG G Flex und LG G Flex 2) vorgestellt, jedoch war die Zuverlässigkeit dieser unbefriedigend. Die Verwendung eines analogen Treiberschemas ist hier problematisch, da sich durch mechanische Spannungen, wie sie bei Biegung zwangsläufig auftreten, sich die elektrischen Eigenschaften der Pixel ändern und es somit zu nicht hinnehmbaren visuellen Artefakten kommt.

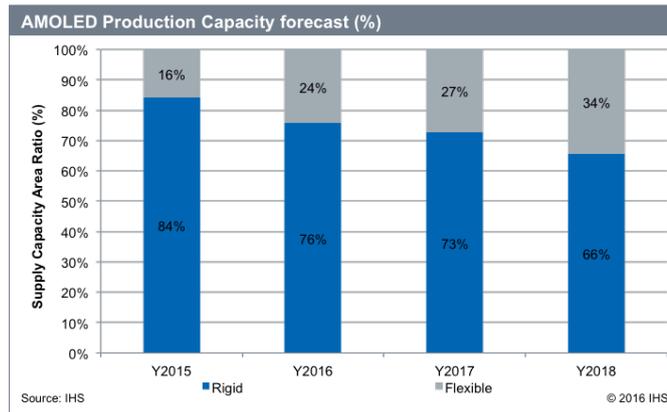


Abbildung 3.2: Vorhersage des Marktanteiles flexibler und starrer AMOLED-Displays am Gesamtmarkt für AMOLED (Quelle: **IHS2016a**).

3.1.3 Lösungsansätze

Um eine hinreichende Homogenität der Darstellung über der Fläche zu erreichen, ist es notwendig, die Einflüsse der Transistoren und OLED möglichst zu verringern. Bei den OLED gab es hier deutliche Verbesserungen durch Weiterentwicklung der Materialien und der Prozesse zur Einbringung dieser in die Displaymatrix. Mit modernen Prozessen und Materialien können großflächig OLED mit hinreichender Stabilität und Genauigkeit produziert werden, sodass deren Einfluss vernachlässigbar ist.

Die größte Herausforderung bleibt die Genauigkeit und Stabilität der Transistoren, realisiert als TFT. Hier gibt es zwar Technologien wie Oxide-TFT, welche sehr hohe Homogenitäten erreichen, bisher ist deren Ladungsträgermobilität jedoch noch zu gering. Eine Verwendung für AMOLED ist nicht möglich. Der Fokus der Entwicklungen liegt bisher auf Pixelschaltungen, welche die Schwankungen der TFT in Eigenschaften wie der Schwellspannung schaltungstechnisch kompensieren. Hierfür sind mehrere zusätzliche Transistoren notwendig, womit die Komplexität und somit die Fertigungskosten der Displays deutlich steigen. Moderne AMOLED-Displays verwenden 4 TFT und mehr je Pixel sowie zusätzliche Kapazitäten, vergleiche beispielsweise **Lin2014** oder **Zhang2013**. Hierdurch sind zusätzliche Aufwände in der Fertigung wie top-emission Strukturen (vergleiche Kapitel 2) notwendig, um genügend Fläche für die emittierenden Pixelstrukturen zur Verfügung zu haben.

Verfahren zur Kompensation entstehender Artefakte mittels Manipulation der Bildinhalte scheitern bei analoger Ansteuerung in der Regel an den Kosten und Möglichkeiten für hinreichend genaue Spaltentreiber. Die Programmierströme beziehungsweise -spannungen der einzelnen Pixel müssen hier sehr genau stellbar sein, was die Systemkosten erneut stark steigen lässt und nur begrenzt möglich ist.

Bisher nicht am Markt etablierte Anbieter suchen daher nach alternativen Ansteuer-

methoden, welche kostengünstige Displays zum Markteinstieg ermöglichen. Diese dürfen keine Nachteile hinsichtlich Darstellungsqualität im Vergleich zu bisherigen Displays aufweisen. Die Verwendung eines digitalen Treiberschemas ist hier vielversprechend, zudem sich Vorteile in der Energieeffizienz der Displays und somit für mobile Anwendungen ergeben.

3.2 Digitales Treiberschema

In Abschnitt 3.1 wurden die direkte Modulation der Amplitude der Leuchtdichte zur Steuerung der Pixelhelligkeit in einem Display vorgestellt. Dies ist bei AMOLED-Displays derzeit Stand der Technik.

Alternativ hierzu kann die wahrgenommene Helligkeit einer Lichtquelle auch durch zeitliche Modulation des Lichtsignals bei konstanter Amplitude der Leuchtdichte realisiert werden. In diesem Fall spricht man von einem digitalen Ansteuer- oder Treiberschema, da die Leuchtdichte über der Zeit nur zwei diskrete Werte annimmt. Im Folgenden werden die Voraussetzungen sowie die Vor- und Nachteile eines solchen Treiberschemas dargestellt.

3.2.1 Visuelle Randbedingungen

Die Anwendbarkeit eines digitalen Treiberschemas setzt voraus, dass das Zielsystem das Verhalten eines Tiefpasses aufweist, also eine Grenzfrequenz aufweist, ab derer schnellere Änderungen zunehmend nicht mehr ausgewertet werden können. Im vorliegenden Fall eines Displaysystems ist das Empfängersystem das menschliche Auge. In den 1930er Jahren wurde die CFF¹ als Maß eingeführt, bis zu welcher Änderungsrate das menschliche Auge in der Lage ist zeitliche Vorgänge aufzulösen (vgl. **Hecht1936**). Die CFF beschreibt die Grenze, bei welcher ein „flackerndes“ Lichtobjekt in der Hälfte der Zeit als nicht-konstant (ergo flackernd) wahrgenommen wird.

Der Wert der CFF ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Die für die Anwendung des digitalen Treiberschemas wesentlichen Punkte sind die Abhängigkeit vom Einfallsort auf die Retina des Auges, von der Form des stimulierenden Signals, dessen mittlerer Helligkeit sowie vom Kontrast innerhalb des Signals. Für eine weitergehende, detailliertere Übersicht sei auf **Chen2012** verwiesen.

In den Untersuchungen von Hecht zur Festlegung der CFF kam ein Apparat zum Einsatz, welcher nahezu rechteckförmig modulierte Lichtsignale produzierte (**Hecht1933**). Da dies auch dem Modulationsschema für ein digital angesteuertes AMOLED-Display entspricht, sind die Ergebnisse diesbezüglich direkt übertragbar.

Die Abhängigkeit sowohl von der retinalen Position des betrachteten Signals als auch von dessen mittlerer Helligkeit wurde in **Hartmann1979** untersucht. Hierbei stellte sich heraus, dass im peripheren Sichtfeld die Empfindlichkeit für Lichtänderungen deutlich

¹Critical Flicker Frequency

erhöht ist, insbesondere für hohe mittlere Helligkeiten (vergleiche Abbildung 3.3). Es zeigte sich zudem eine Abhängigkeit der CFF vom Verhältnis der Zeit der hellen Phase zur dunklen Phase, wie in Abbildung 3.4 dargestellt.

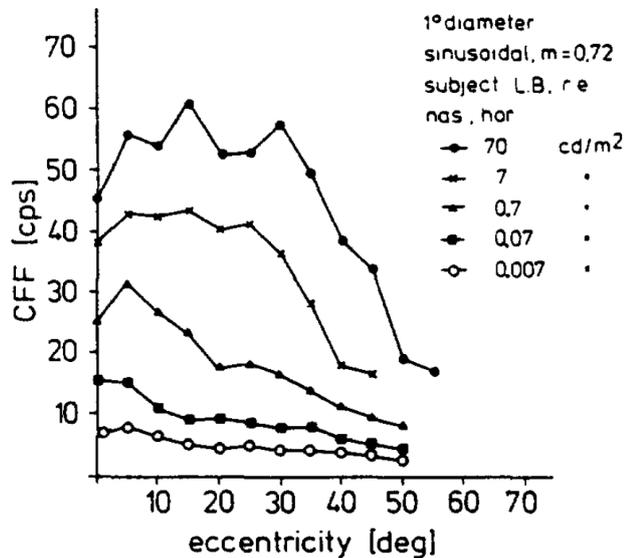


Abbildung 3.3: Verlauf der CFF über der retinalen Position in Abhängigkeit der mittlere Leuchtdichte des Stimuli (Quelle: **Hartmann1979**).

Die ermittelten Grenzen für die CFF müssen bei der Realisierung eines digitalen Treiberschemas beachtet werden. Nach Möglichkeit muss jegliche zeitliche Änderung der Leuchtdichte des Displays, sei es die Darstellung des gesamten Bildes oder einzelner Teilbilder, schneller als mit einer Frequenz von etwa 60 Hz erfolgen. Je nach Realisierung des Ansteuerschemas treten zwischen den Leuchtphasen dunkle Phasen auf, in denen das Display deaktiviert ist (vergleiche 3.2.3). Da dies zusätzlich die Empfindlichkeit für Flackern erhöht, kann eine weitere Erhöhung der Wiederholrate notwendig sein, insbesondere bei nicht-statischen Bildinhalten.

3.2.2 Funktionsweise

Zur Darstellung von Bildinhalten wird jedem Bildpunkt eines Bildes ein Grauwert (nach Gammakorrektur) zugewiesen. Im Folgenden soll dieser Grauwert den Wert

$$GV = X, X \in [0, 2^n - 1] \in \mathbb{N} \quad (3.2)$$

betragen. Die Variable n ist eine ganze Zahl beschreibt die Zahl der dargestellten Teilbilder. Typischerweise liegt n im Bereich 10..15. Anstelle der direkten Umsetzung des Grauwertes in ein proportionales Leuchtdichtesignal durch Modulation der Amplitude

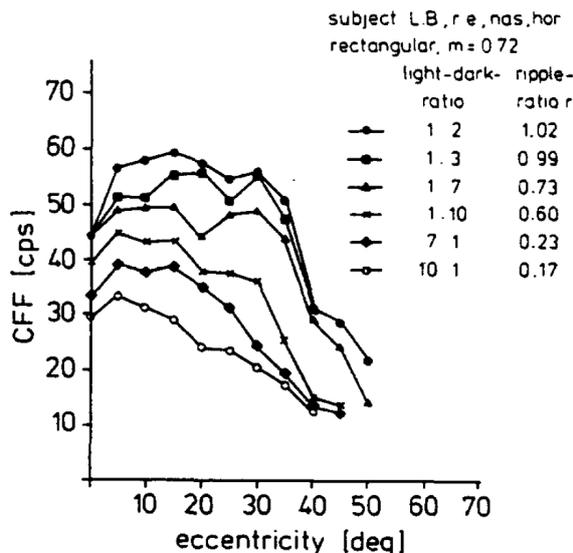


Abbildung 3.4: Verlauf der CFF über der retinalen Position in Abhängigkeit des Verhältnisses von aktiver zu inaktiver Zeit der Lichtquelle (Quelle: Hartmann1979).

der Leuchtdichte des Bildpunktes tritt für das digitale Treiberschema eine Zerlegung des Wertes in diskrete Teilwerte und eine sequentielle Darstellung dieser Teilwerte. Durch Integration über die Einzelwerte durch das Auge ergibt sich im Gesamten die gewünschte wahrgenommene Helligkeit.

Eine einfache Möglichkeit der Zerlegung in Teilwerte stellt die Darstellung des größten Wertes als eine geometrische Reihe dar:

$$GV_{max} = \sum_{i=0}^{n-1} 2^i. \tag{3.3}$$

Um die Gesamtmenge der Grauwerte (siehe Gleichung 3.2) darstellen zu können, wird ein Schalter b definiert, welcher für jeden einzelnen Wert des Exponenten i angibt, ob dieser zum Gesamtwert beitragen soll ($b = 1$) oder nicht ($b = 0$):

$$b(i) \in \{0,1\} \in \mathbb{N} \tag{3.4}$$

$$GV = \sum_{i=0}^{n-1} b(i) \cdot 2^i. \tag{3.5}$$

Der Schalter $b(i)$ ist somit ein Vektor der Länge n , die Potenzwerte von 2 stellen Teilgrauwerte dar, die entsprechend zum Gesamtbild beitragen oder nicht.

Auf einem Display darzustellende Bilder stellen eine Matrix von Bildpunkten dar. Die Dimension der Matrix entspricht der Auflösung des Displays und sei $x \times y$. Das

zuvor beschriebene Verfahren kann nun für jeden einzelnen der Bildpunkte angewendet werden, womit sich eine dreidimensionale Matrix von Schaltern der Dimension $x \times y \times n$ ergibt. In der üblichen Terminologie wird das gesamte Bild als ein „Frame“ bezeichnet, entsprechend spricht man bei den n Teilbildern dieser Matrix von „Subframes“, da sie eine Untermenge des Gesamtbildes sind.



Abbildung 3.5: Darstellung der Zerlegung, gewichteten Zerlegung und Aufsummierung der Teilbilder für ein Testbild (von oben nach unten).

In Abbildung 3.5 ist beispielhaft die Zerlegung und Darstellung eines Testbildes nach dem zuvor erläuterten Schema dargestellt. Die erste Zeile stellt die einzelnen Subframes dar, welche nur die Elemente 0 (schwarz) und 1 (weiß) enthalten. Die Gewichte der Subframes nehmen von links nach rechts ab. In der zweiten Zeile sind die Subframes gewichtet mit dem jeweilig zugehörigen Teilgrauwert und in der dritten Zeile die Aufsummierung über alle Subframes bis zur jeweiligen Spalte dargestellt.

Es ist gut zu erkennen, dass die geringwertigeren Subframes wichtig für die Detaildarstellung, wie beispielsweise Farbverläufe, sind. Die gewählte Darstellung mit nur vier Subframes reicht noch nicht aus, um Übergänge im Testbild ohne sichtbare Höhenlinien² darzustellen. Gut zu erkennen ist dies im Bereich der Schulter beziehungsweise des Spiegelbildes des Huts.

Die Anzahl der linear darstellbaren Graustufen kann direkt mit der Anzahl von Subframes identifiziert werden, vergleiche Gleichung 3.5. Zur optisch befriedigenden Darstellung von gängigen 8-bit Bildinhalten (256 Abstufungen je Farbkanal) ist aufgrund der notwendigen Gamma-Korrektur die Verwendung von theoretisch 18 Subframes notwendig, vergleiche Kapitel 2. Empirische Versuche zeigen, dass ab 12 Subframes für natürliche Bilder eine visuelle Qualität erreicht wird, die durch Probanden nicht von Bildern mit höherer Farbauflösung zu unterscheiden ist.

²Im Bereich der Grafik stellen Höhenlinien Grenzen von Bereichen gleichen Grauwertes dar.

Das vorgestellte Verfahren entspricht im Ansatz einer PCM³. Die Gewichtungsfaktoren der Subframes (die Teilgrauwerte) stellen hier die Kodierung dar. Daneben gibt es noch weitere Verfahren, die auch der digitalen Modulation zuzuordnen sind. In **Jang2010** wird die Anwendung einer auf der Delta-Sigma-Modulation basierenden PDM⁴ gezeigt. Eine weitere Möglichkeit ist die Realisierung einer PWM⁵, wie beispielsweise in **Akimoto2002** erläutert. Diese Ansätze können Probleme, die bei Verwendung einer PCM auftreten (vergleiche unter anderem Kapitel 6.3), vermeiden. Jedoch benötigen sie komplexere elektrische Schaltungen im Display, was die Kosten für dieses erhöht. Auch ist die Datenverarbeitung aufwendiger und es werden spezielle Modulatoren oder analoge Vergleichsschaltungen benötigt, die in einem Standard-Display nicht zur Verfügung stehen. Da die Verwendung eines PCM basierten Verfahrens die zugleich einfachste und hinsichtlich eines realen Displaysystems kostengünstigste Variante darstellt, wurde dieser Ansatz in der Arbeit weiter verfolgt, siehe auch Ziele der Arbeit in Kapitel 1.

3.2.3 Umsetzung im realen System

Um ein solches digitales Ansteuerungsverfahren in einem Display umsetzen zu können, ist es notwendig, den Zustand jedes einzelnen Pixel steuern zu können. Wie in Kapitel 2 dargestellt, verfügt ein AMOLED-Display hierfür über elektrische Schaltungen an jedem Pixel. Im Unterschied zum analogen Ansteuerungsverfahren dienen diese aber nicht der Modulation der Amplitude der Helligkeit, sondern, wie zuvor erläutert, nur zum Ein- und Ausschalten des Pixels. Anstelle der Stromsteuerung tritt nun eine Steuerung der Spannung über der OLED. Im idealisierten Fall besitzt der Pixel somit zwei Zustände:

$$L_{x,y} = 0 \text{ für } b_{x,y} = 0 \quad (3.6)$$

$$L_{x,y} = L_0 \text{ für } b_{x,y} = 1. \quad (3.7)$$

Abbildung 3.6 zeigt eine vereinfachte Darstellung der verwendeten Pixelbeschaltung. Bei Aktivierung des Pixels durch anlegen des Signals $b_{x,y}$ liegt über der OLED die konstante Spannung $V_{DD} - V_{SS}$ an. Es gibt keine weiteren steuernden Elemente.

Um die in Gleichung 3.5 erkennbaren, notwendigen Teilgrauwerte zu realisieren, wird eine zeitliche Gewichtung eingeführt:

$$L_{x,y} = \frac{L_0}{T} \sum_{i=0}^{n-1} b_{x,y} t_i, t_i \in \left\{ \frac{1}{2}T, \frac{1}{4}T, \dots, \frac{1}{2^n}T \right\} \quad (3.8)$$

wobei T die Gesamtdauer als Summe der einzelnen Leuchtphasen (dies entspricht in der Regel der Framedauer) beschreibt. Die Steuerung der Leuchtzeit erfolgt, indem die Versorgungsspannung über dem aktivierten Pixel zwischen $V_{DD} - V_{SS}$ und $V_{DD} - V_{DD} = 0$ gewechselt wird. Hierfür dient ein externer Schalter, der die negative Versorgungsspannung

³Pulse Code Modulation

⁴Puls Density Modulation

⁵Puls Width Modulation

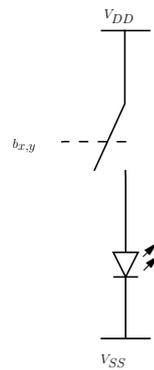


Abbildung 3.6: Vereinfachte Darstellung der Pixelansteuerung bei Verwendung eines digitalen Treiberschemas.

des Displays wahlweise auf V_{SS} zur Aktivierung beziehungsweise V_{DD} zur Deaktivierung schaltet. Während das emittierende Element durch Wegschalten der Versorgungsspannung deaktiviert ist, muss der zeitlich nächste Zustand des Pixels programmiert werden. Die hierfür notwendige Pixelansteuerung ist in Abbildung 3.7 skizziert. Durch niedrigohmige Schaltelemente und Zuleitungen wird sichergestellt, dass kein Nachleuchten aufgrund kapazitiv in der OLED gespeicherter Energie erfolgt und die gewollten Dauern der Leuchtphasen möglichst genau getroffen werden.

Wie Abschnitt 3.2.1 beschrieben, muss die Dauer der einzelnen Leuchtphasen hinreichend kurz gewählt werden, sodass sich für das Auge keine wahrnehmbare Helligkeitsänderung innerhalb der gesamten Leuchtdauer ergibt und die wahrgenommene Helligkeit der integralen Helligkeit der Leuchtphasen entspricht. Die Abstufung zwischen den einzelnen Teilgrauwerten mit Faktor 2 ist nicht zwingend notwendig. Um alle möglichen Grauwerte in der (ganzzahligen) Zielmenge darstellen zu können, darf der Faktor jedoch 2 nicht überschreiten. Durch Wahl eines Faktors kleiner 2 treten Doppeldeutigkeiten beziehungsweise Redundanzen auf und es sind mehr Teilgrauwerte (Subframes) notwendig um einen definierten maximalen Zielwert zu erreichen (vergleiche Gleichung 3.3 und **Xu2016**). Dies kann jedoch zielführend sein, um mögliche visuelle Artefakte zu mindern (vergleiche Kapitel 6.3).

Um eine hohe Farbtiefe zu erhalten, müssen sehr kurze Aktivierungszeiten t_i für die Pixel realisiert werden. Eine genauere Betrachtung hierzu in absoluten Werten findet sich in Kapitel 4.2.3. Wie in Kapitel 2 bereits erläutert, sind die OLED Pixel selbst hinreichend schnell, der begrenzende Faktor ist hier die Programmierung des Zustands der einzelnen Pixel. Insbesondere die Adressierung der Pixel durch ein in der Regel auf dem Displayglas realisiertes Schieberegister (Zeilentreiber) begrenzt hier die Geschwindigkeit. Hierdurch entstehende Artefakte müssen durch Anpassungen in der Ansteuerung vermieden werden.

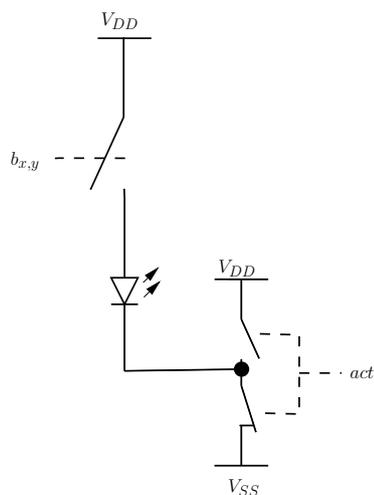


Abbildung 3.7: Vereinfachte Darstellung der Pixelansteuerung mit Möglichkeit zur Steuerung der Leuchtzeit bei Verwendung eines digitalen Treiberschemas.

Die Programmierung der Displayinhalte geschieht stets sequentiell und zeilenbasiert. Bezüglich der zeitlichen Abfolge der Programmierung der Bildinhalte und der Leuchtphasen muss zwischen zwei grundlegenden Ansätzen unterschieden werden.

DPS⁶

Die Verwendung des DPS Schemas zur Adressierung der Pixel ist der einfachste und intuitivste Weg. Abbildung 3.8 zeigt den prinzipiellen Ablauf der Adressierung und der Leuchtphase der Pixel auf. In den Zeiten t_{scan} wird jede einzelne Zeile des Displays durch das Schieberegister adressiert und der entsprechende Pixelwert programmiert. Um definierte Leuchtzeiten der Pixel zu erhalten, wird in der Adressierzeit das gesamte Display deaktiviert, es leuchtet also nicht. Sind alle Pixel auf den gewünschten Zustand (das Subframe) programmiert, wird das Display wiederum aktiviert und die Pixel leuchten nun für eine Zeit $t_{SF,i}$ bis erneut eine Deaktivierung des Displays und eine Programmierung des nächsten Subframes erfolgt (vergleiche **Mizukami2000**). Die hierfür notwendige Beschaltung ist in Abbildung 4.6 auf Seite 44 gezeigt.

Nachteilig an dieser Methode ist, dass wie in Abbildung 3.8 erkennbar, die Programmierzeiten erheblichen Anteil an der gesamten Framedauer t_{frame} haben. Hiermit wird

⁶Display Period Separated

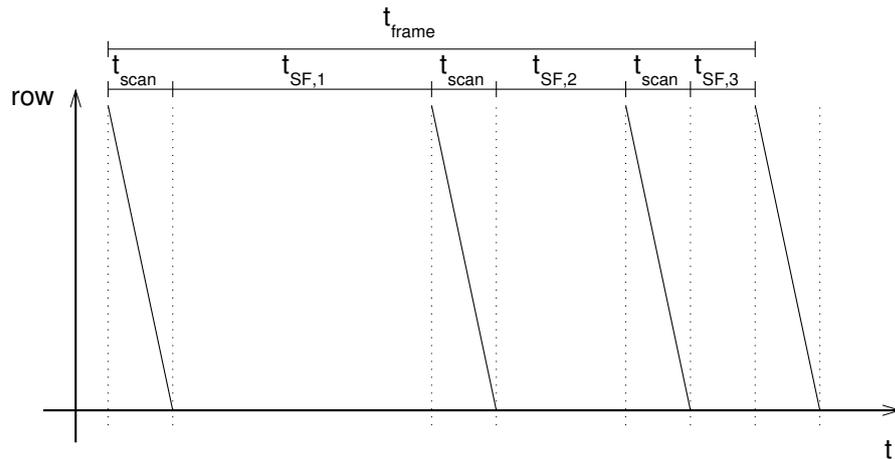


Abbildung 3.8: Abfolge der Programmier- und Leuchtphase für das DPS-Schema.

die maximale Leuchtdauer der Pixel herabgesetzt, dies entspricht in Gleichung 3.8 einem zusätzlichen Vorfaktor für die Grundhelligkeit L_0 mit einem Wert < 1 . Entsprechend kann L_0 als maximale Helligkeit nicht mehr erreicht werden. Um diesen Verlust an Leuchtzeit zu kompensieren, muss die Grundhelligkeit L_0 und somit die angelegte OLED-Spannung angehoben werden, was jedoch zu anderen negativen Effekten wie schnellerer Alterung (vergleiche Kapitel 7) führt.

Statt das Display während der Programmierphase zu deaktivieren, kann diese auch zum Leuchten ausgenutzt werden. Abbildung 3.9 zeigt, dass dies bei der Verwendung des DPS Schemas möglich ist, ohne zusätzliche Änderungen an der Pixelschaltung vorzunehmen. Jedoch können nur Subframes mit einer Leuchtdauer länger der Programmierphase ausgenutzt werden, um auch in der Programmierphase die Pixel leuchten zu lassen. Vor der Aktivierung von Subframes mit kürzerer Leuchtphase muss zusätzlich eine deaktivierende Programmierung des gesamten Displays durchgeführt werden („Erase“ in Abbildung 3.9). Je nach Verhältnis der Programmierdauer und der Dauer der Subframes ergibt sich hier jedoch nur ein sehr geringer Vorteil in der Gesamtdauer, sodass die Anwendung dieses Schemas im Einzelfall geprüft werden muss. Für den gezeigten Fall ergeben sich die Framezeiten zu:

$$\text{DPS1: } t_{\text{frame}} = 3 * t_{\text{scan}} + t_{\text{SF},1} + t_{\text{SF},2} + t_{\text{SF},3} \quad (3.9)$$

$$\text{DPS2: } t_{\text{frame}} = 4 * t_{\text{scan}} + (t_{\text{SF},1} - t_{\text{scan}}) + (t_{\text{SF},2} - t_{\text{scan}}) + t_{\text{SF},3} \quad (3.10)$$

$$= 2 * t_{\text{scan}} + t_{\text{SF},1} + t_{\text{SF},2} + t_{\text{SF},3} \quad (3.11)$$

$$(3.12)$$

Allgemein lässt sich bei einer Anzahl von x Subframes mit $t_{\text{sf}} > t_{\text{prog}}$ rechnerisch eine Zeit $t = (x - 1) * t_{\text{scan}}$ einsparen. Bei längeren Subframezeiten und höheren Subframezahlen ergeben sich entsprechend größere Vorteile. Die Hauptprobleme wie Flackern, auftretende

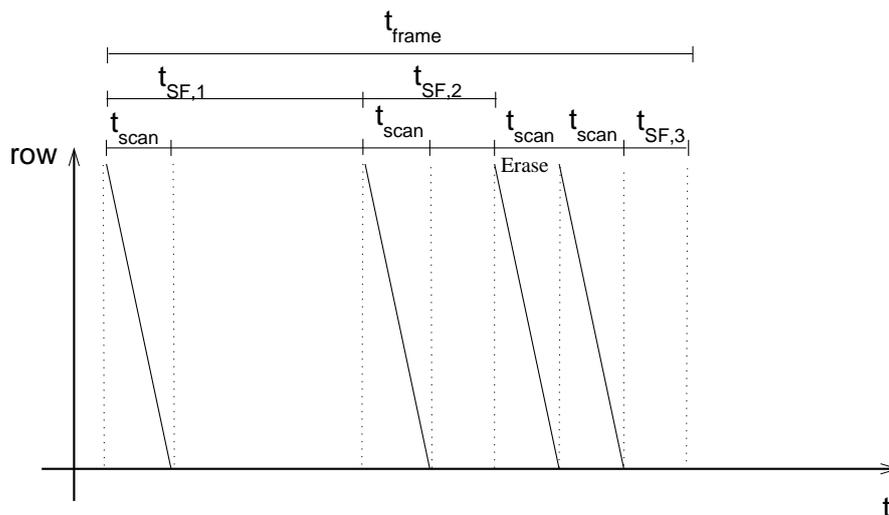


Abbildung 3.9: Abfolge der Programmier- und Leuchtphase für das angepasste DPS-Schema.

Konturen und fehlende Farbtiefe werden jedoch durch Verwendung dieses Schemas nicht gelöst, sodass hier spezifische Lösungsansätze erarbeitet werden müssen.

SES⁷

Inukai2000, Tanada2004 und andere zeigen die Anwendung eines alternativen Programmierschemas auf, mit welchem die gesamte Programmierzeit als Leuchtzeit verwendet werden kann. Hierfür muss jedoch die Pixelschaltung angepasst werden, sodass es möglich ist, bei Adressierung des Pixels durch eine spezielle Scan-Periode den Pixel zu löschen (vergleiche „Erase Scan“ in oben genannten Quellen). Limitiert ist dieses Schema wiederum durch die Programmierdauer, da nie zwei parallele Programmiervorgang abgearbeitet werden können. Es kommt daher zu nicht-emittierenden Zeiten („Blanking“). Auch hier muss abgewogen werden, ob der Gewinn an Leuchtdauer in Relation zum höheren Schaltungsaufwand steht.

Tagawa2004 stellt eine Variante des SES Programmierschemas vor, welches mit einer sehr einfachen Pixelschaltung auskommt. Dieses benötigt jedoch eine sehr hohe Programmierfrequenz, was die Verwendbarkeit im Allgemeinen stark einschränkt (vergleiche Kapitel 4.2.3).

Entsprechend den Zielen der vorliegenden Arbeit, ein kostengünstiges und einfaches Gesamtsystem zu realisieren, wurde der Ansatz des DPS als zielführend bewertet und im Weiteren verfolgt. Eine nachträgliche Umsetzung des Schemas nach **Tagawa2004**

⁷Simultaneous Erase Scan

beziehungsweise des angepassten DPS Schemas sollte dennoch jederzeit möglich sein und beachtet werden.

3.2.4 Verarbeitung der Bilddaten

Die Verarbeitung der Bilddaten für das digitale Treiberschema ist im Vergleich zum analogen Treiberschema deutlich vereinfacht. Da die Bilddaten bei modernen Displaysystem bereits über ein digitales Interface zugespielt werden (vergleiche Kapitel 2), müssen diese nur noch verarbeitet und zerlegt werden, sodass die einzelnen darzustellenden Subframes als Datensatz zur Verfügung stehen. Auf die Verarbeitung der Daten wird in Kapitel 4.2.5 näher eingegangen.

Um die verarbeiteten Bilddaten in Subframes zu zerlegen, ist eine einfache LUT⁸ ausreichend. Wird als Gewichtung zwischen den Subframes ein Faktor von 2 gewählt (vergleiche 3.2) ist es sogar direkt möglich, die linearisierten Bilddaten (nach Gamma) bitweise aufzuspalten und somit die Subframedaten zu erhalten. Weicht der Gewichtungsfaktor von 2 ab, so kann durch eine vorab berechnete LUT eine Subframezerlegung für jeden Wert gespeichert und entsprechend ausgegeben werden.

Nachteilig ist, dass die Zuspiegelung der Daten bei aktuellen Protokollen immer vorsieht, dass das Gesamtsignal (die Zielhelligkeit) eines Pixels stets in einem Übertragungsvorgang geliefert wird. Daher ist es beim digitalen Treiberschema notwendig, die Bilddaten zwischenspeichern, vergleiche Kapitel 4.2.5.

3.2.5 Potenzial und Herausforderungen

Das digitale Treiberschema bietet im Vergleich zum analogen Treiberschema insbesondere für AMOLED-Displays deutliche Vorteile. Die Verwendung aktiv emittierender Pixel mit schnellen aktiven Elementen, den OLED, ermöglicht im Vergleich zu LCD erst die Anwendung dieses Schemas. Hier senkt der Wegfall der Digital-Analog-Wandlung die Systemkosten deutlich und dadurch, dass die Pixel alle rein digital betrieben werden, ist es nicht notwendig kompensierte Pixelschaltungen (vergleiche Kapitel 3.1) zu verwenden. Variationen in den Schaltungen der einzelnen Pixel haben deutlich geringere bis zu vernachlässigbare Auswirkung auf die Darstellungsqualität. **DeRoose2014** behandelt die Auswirkungen verschiedener Einflüsse auf analog getriebene Displays im Vergleich zu digital getriebenen. Die dort präsentierten Ergebnisse unterstützen zusätzlich die Motivation für das Ziel der Arbeit ein digital angesteuertes AMOLED-System zu realisieren. Es wird gezeigt, dass eine digitale Ansteuerung es ermöglicht, einfache und kostengünstige Pixelschaltungen zu verwenden, die für analoge Ansteuerung nicht verwendbar sind. Die Robustheit gegenüber Alterungs- und Umwelteinflüssen ist beim digitalen Treiberschema deutlich höher, da sich Möglichkeiten zur Kompensation dieser bieten. Auch bei Realisierung von Displays auf flexiblen Substraten mit Einbringung von mechanischem Stress durch Biegung bietet der Betrieb im digitalen Regime deutliche Vorteile hinsichtlich

⁸Look-Up Table

Robustheit. Durch die Verwendung der einfachen und zugleich kompakten Pixelschaltung, welche wenig Fläche in Anspruch nimmt, ist es möglich, Displays mit sehr hohen Pixeldichten zu realisieren. Insbesondere für neuartige Anwendungen wie die der virtuellen Realität (VR, virtual reality) ist dies von besonderem Interesse, vergleiche **Mertens2016**. Zudem kann eine Bottom-Emission-Struktur für die Pixel verwendet werden, da der geringere Platzbedarf der Pixelschaltung eine Öffnungsverhältnis (Aperture Ratio) im Bereich $\geq 25\%$ zulässt⁹. Diese Struktur ist kostengünstiger und robuster zu fertigen im Vergleich zu Top-Emission-Strukturen, vergleiche auch Kapitel 2.

Auch hinsichtlich der Energieeffizienz ist das digitale Treiberschema im Vorteil. Die bei analoger Ansteuerung notwendige Amplitudenmodulation des Leuchtdichtesignals wird durch Verwendung der Pixelschaltung als eine steuerbare Stromquelle realisiert. Hierbei muss der Spannungsabfall über dem ansteuernden Transistor hinreichend hoch sein, um diesen im Sättigungsbereich zu betreiben. Hieraus ergibt sich, dass bis zu 50% der Energie durch den Transistor in Wärme umgewandelt werden. Im Vergleich hierzu ist der Spannungsabfall beim digitalen Treiberschema aufgrund des Betriebs des ansteuernden Transistors als Schalter (linearer Bereich) je nach Auslegung um 1 bis 2 Größenordnungen kleiner und entsprechend wird annähernd die gesamte Energie in der OLED umgesetzt (vergleiche unter anderem **Dobrev2013**, **DeRoose2014**).

Durch Realisierung verschiedener Graustufen basierend auf der Modulation der Leuchtzeit, ist es möglich, höhere Graustufenaufösungen zu realisieren. Im analogen Treiberschema sind diese begrenzt durch die Genauigkeit der DAC¹⁰ sowie Variationen der Schaltungen im Display. Durch Anwendung des digitalen Treiberschemas ist es möglich, zum einen eine höhere visuelle Qualität zu erzielen und zum anderen visuelle Artefakte (beispielsweise durch Alterung) deutlich genauer zu kompensieren. Auch wird die OLED nur in einem sehr definierten Arbeitspunkt betrieben. Einflüsse des Arbeitspunktes auf die optische Charakteristik der OLED (beispielsweise Farbort) werden hierdurch vermieden, wie in Abbildung 7.7 auf Seite 112 gezeigt. Hiermit kann eine höhere Lebensdauer von Displays bei gleichzeitig höherer Energieeffizienz und geringeren Gesamtkosten ermöglicht werden.

Nachteilig beim digitalen Treiberschema ist die starke zeitliche Varianz des Bildinhaltes. Wie im ersten Abschnitt des Kapitels erläutert, muss zum einen eine sehr hohe Bildwiederholrate sichergestellt werden, um Artefakte wie Flackern zu vermeiden. Gleichzeitig kann es aber auch zu weiteren visuellen Artefakten kommen, welche in der folgenden Arbeit behandelt und für die Lösungen präsentiert werden. Auch kann der gepulste Betrieb der OLEDs zu verstärkter Alterung führen (vergleiche **Soh2006**), was näher untersucht wird. Insgesamt ist das digitale Treiberschema anfälliger für Alterungseinflüsse

⁹Bei sinkendem Öffnungsverhältnis muss die OLED bei sehr hohen Leuchtdichten betrieben werden, was diese schneller altern lässt. Aus diesem Grund muss das Öffnungsverhältnis bei Bottom-Emission-Strukturen stets möglichst groß gewählt werden. 25% sind ein typischer Wert welcher in der Vergangenheit in Produkten als Untergrenze angestrebt wurde und sich etabliert hat. Moderne Treiberschaltungen für analoge Ansteuerung lassen es nicht mehr zu diese Untergrenze einzuhalten, sodass vorwiegend Top-Emission-Strukturen, trotz Nachteilen hinsichtlich Robustheit und Fertigungskosten, eingesetzt werden.

¹⁰Digital Analog Converter

auf die OLED, da das steuernde Element der gesteuerten Stromquelle im Vergleich zum analogen Treiberschema wegfällt und damit zu mehr Einfluss des Verhaltens der OLED selbst führt. Die deutlich besseren Möglichkeiten zur Kompensation sollen hier genutzt werden, um ein entsprechend langlebiges Display zu ermöglichen (vergleiche Kapitel 1.2).

Durch die Darstellung rein binärer Bildinhalte in einem Subframe ist es nicht möglich für das digitale Treiberschema Technologien zur Energieeinsparung, die auf einer Herabsetzung der Bildwiederholrate basieren, wie beispielsweise PSR¹¹ zu verwenden. Es wäre nur möglich, einen „1-bit Modus“ zu realisieren, welcher aber für einfach Bildinhalte wie etwa das Ziffernblatt auf einer digitalen Uhr ausreichen kann.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass das digitale Ansteuerschema bei AMOLED-Displays deutliche Vorteile im Vergleich zur analogen Ansteuerung hinsichtlich Kosten und Energieeffizienz aufweist bei gleichzeitig einfacherer Displaystruktur und mindestens gleicher Bildqualität. Notwendig sind jedoch Anpassungen in den Pixelschaltungen und der Struktur des Displays selbst, auf welche im weiteren Verlauf der Arbeit noch näher eingegangen werden wird.

3.2.6 Anwendungen

Digitale Ansteuerschemata finden bereits in verschiedenen visuellen System Anwendung. So gibt es im Bereich der Projektoren die Technik des DLP¹². Hier werden die einzelnen Bildpunkte durch Spiegel realisiert, welche den Lichtstrahl nach außen zur Leinwand oder zu einem Absorber führen und damit digital die Helligkeit der Bildpunkte steuern. Auch wurde bei PDP Systemen eine digitale Ansteuerung verwendet, da die Leuchtdichte der Plasma-Zellen nicht hinreichend analog modulierbar ist. Bei diesen begrenzte jedoch die hohe Reaktionszeit der Zellen die Umsetzung stark. Zum Stand der Arbeit sind PDP de facto vom Markt verschwunden.

Aufgrund der geringen Reaktionszeit von OLEDs sowie der Probleme mit analoger Ansteuerung kostengünstige und energieeffiziente Displays zu ermöglichen, bietet es sich an, das digitale Treiberschema auch auf AMOLED-Displays zu adaptieren. Nach anfänglichen Versuchen der Industrie, das digitale Treiberschema auf AMOLED-Displays zu übertragen, wurde dieses vermutlich aufgrund der höheren Kompatibilität zur gängigen Ansteuerung von LCD zugunsten des analogen Treiberschemas aufgegeben. Zum Zeitpunkt der Erstellung der Arbeit sind alle am Markt erhältlichen Displays mit analoger Ansteuerung versehen und es sind keine existierenden funktionsfähigen Prototypen mit digitaler Ansteuerung bekannt. Für die weitere Erforschung der digitalen Ansteuertechnologie für AMOLED-Displays ist es daher notwendig, ein digital ansteuerbares AMOLED-System aufzubauen.

¹¹Panel Self Refresh

¹²Digital Light Processing

4 Grundfunktionen eines digitalen AMOLED Anzeigesystems

4.1 Motivation

Wie in Kapitel 3.2 beschrieben, ist die Anwendung eines digitalen Treiberschemas auf AMOLED Displays vielversprechend hinsichtlich Energieeffizienz, visueller Performance sowie Systemkomplexität und den damit verknüpften Kosten. Da Versuche am Markt verfügbare Displays zu verwenden, vergleiche Kapitel 5.1, nicht erfolgsversprechend waren, wurde das Ziel gesetzt, ein den Anforderungen des digitalen Treiberschemas angepasstes Displaypanel zu entwickeln und zu realisieren. Rein modellbasierte Bewertungen der visuellen Performance eines Displays stellen eine große Hürde dar, da meist nur sehr spezifische Aspekte hinreichend genau modelliert und bewertet werden können, siehe unter anderem **Ney2014**. Der Prototyp muss es daher ermöglichen, die visuelle Darstellung mit dem Auge zu bewerten. Da dieser als Entwicklungswerkzeug dient wird zudem auf einfache und freie Parametrierbarkeit der Ansteuerelektronik sowie der enthaltenen Datenprozessierung Wert gelegt. Ziel ist es, ein Displaysystem zu realisieren, das eine schnelle Ausprobe neuer Algorithmen und Prozessierungsansätze ermöglicht. Zudem muss es auf verschiedene Displaytypen anpassbar sein, die Spalten- wie Zeilenansteuerung soll sich leicht skalieren lassen. Das System muss mit den dem Lehrstuhl zur Verfügung stehenden Mitteln und Werkzeugen in begrenzter Zeit¹ umsetzbar sein, sodass sich Einschränkungen wie keine Verwendung speziell gefertigter ASIC² ergeben. Gleichzeitig wird auf eine technologische Skalierbarkeit der Ansätze geachtet, wodurch sich das realisierte System bei Interesse eines Industriekunden auch leicht in ein real im Produkt verwendbares System überführen lässt.

Wie in Kapitel 3.2 dargestellt, unterscheidet sich ein digitales Treiberschema grundlegend von einem analogen Treiberschema sowohl hinsichtlich der Datenprozessierung, als auch hinsichtlich der Ansteuerung des Displays. Im Folgenden werden die Konzepte, welche hinter einem solchen System stehen, aufgeteilt in die Bereiche Anforderungen an das Display-Panel, Interface Hardware sowie Datenprozessierung behandelt.

¹Im Rahmen dieser Dissertation.

²Application Specific Integrated Circuit

4.2 Anforderungen an Displaypanel und Ansteuerelektronik

Wie erläutert, eignen sich neuere, kommerziell verfügbare Displays aufgrund der integrierten Datentreiber, welche für analoge Ansteuerung ausgelegt sind, nicht für die digitale Ansteuerung. Aus diesem Grund wurde in Zusammenarbeit mit der Firma Visionox (Shanghai) ein spezielles Panel zur Realisierung des digitalen Treiberschemas spezifiziert und durch KSFPD (Kunshan Flat Panel Display, Forschungsabteilung von Visionox) hergestellt. Die Vorarbeiten zur Auslegung sind teilweise im Rahmen der Diplomarbeit des Verfassers durchgeführt worden, vergleiche **Volkert2013**. Die Festlegung der Spezifikation und Realisierung fand zu Beginn der vorliegenden Arbeit statt. Nach erfolgreicher Implementierung des digitalen Treiberschemas und der Identifikation und Lösung visueller Probleme anhand des Visionox Prototypen zeigte auch die Firma Tianma Microelectronics (Shanghai) Interesse an der Umsetzung des digitalen Treiberschemas für ihre AMOLED-Displays. Da diese eine andere Technologie zur Herstellung der Schaltungen im Display verwenden, war die Auslegung eines weiteren Panels vielversprechend für die weitere Forschung am digitalen Treiberschema und entsprechend wurde auch mit Tianma ein Displayprototyp realisiert. Im Weiteren werden die wichtigsten Punkte der Auslegung, Aufbau und Performance der Displaypanels dargestellt.

4.2.1 Pixelbeschaltung

Wichtigste Anforderung für die Realisierung eines Prototypen eines digital angesteuerten Display war für die vorliegende Arbeit die Möglichkeit, die Daten für das Display vollständig mit einer externen Schaltung zuführen zu können. Diese ersetzt den im Normalfall auf dem Displayglas befindlichen Spaltentreiber. Begrenzend ist hier die fertigungstechnisch mögliche Dichte von Kontakten beziehungsweise Leitungen auf dem FPC³, welches die externe Schaltung mit dem Display verbindet. Um die Anzahl an Leitungen zu reduzieren, kann eine Demultiplexerstruktur auf dem Displayglas vorgesehen werden. Nachteilig ist hierbei jedoch, dass die zur Verfügung stehende Zeit zum Programmieren der angeschlossenen Pixel mit steigendem Teilungsverhältnis abnimmt, vergleiche 4.2.3. Die Spezifikation muss dies entsprechend berücksichtigen.

An der Grundstruktur des Displays müssen nur geringe Änderungen vorgenommen werden. So kann die Pixelstruktur, wie auch bei Verwendung eines analogen Treiberschemas, unterschiedlich realisiert werden. Es können Subpixel mit den Grundfarben als einzelne entsprechend farbige OLED oder auch weiße OLED mit Farbfilter eingesetzt werden. Da die Steuerung der OLED über die Spannung erfolgt, weisen weiße OLED einen Vorteil gegenüber farbigen auf. Da für alle OLED eine gemeinsame Versorgungsspannung verwendet wird, bewirkt eine Änderung dieser für farbige Subpixel in der Regel eine starke Verschiebung des Farbortes der Darstellung. Dies ergibt sich aus den unterschiedlichen Leuchtdichte-Spannungs-Kennlinien der OLED. Durch Verwendung weißer Subpixel mit Farbfiltern kann dies vermieden werden, jedoch sinkt hierdurch die Effizienz des Systems

³Flexible Printed Circuit

deutlich, da etwa $\frac{2}{3}$ des von der OLED produzierten Lichts durch den Farbfilter geschluckt wird.

Die Verteilung der Signale innerhalb des Displays kann gleich zu der Verteilung bei einem analog getriebenen Display realisiert werden. Aufgrund der höheren Programmiergeschwindigkeit müssen die Leitungen niederohmiger realisiert werden. Die Verwendung einer einfachen, platzeffizienten Pixelschaltungsstruktur lässt dies zu, ohne dass das Öffnungsverhältnis der emittierenden Fläche zur Gesamtfläche zu stark beeinflusst wird. Durch den Schaltbetrieb der Pixel treten höhere Ströme in den Versorgungsleitungen auf, sodass auch diese möglichst niederohmig ausgeführt sein müssen. In der Regel kommt für eine Elektrode eine flächige Metallisierung zum Einsatz, wodurch diese unkritisch ist. Die zweite Elektrode muss zeilen- oder spaltenweise zugeführt werden. Hier sind entsprechende Leitungswiderstände wirksam und sollten minimiert werden.

Hinsichtlich der Pixelschaltung ist für die digitale Ansteuerung mit einem PCM basierenden Treiberschema die einfachste Pixelschaltung mit 2 Transistoren und einer Kapazität ausreichend, siehe Abbildung 4.1. Hierbei sind V_{DD} und V_{SS} die zur Versorgung des Pixels notwendigen Spannungen, $Data$ sind die in der Regel spaltenweise zugespielten Bilddaten und Sel steht für ein Select-Signal, mit welchem die gewünschte Zeile zur Programmierung aktiviert wird. Die Schaltung muss so dimensioniert werden, dass zum einen der die OLED ansteuernde Transistor die nötigen Ströme treiben kann und zum anderen der programmierende Transistor, welcher das Gate des ansteuernden Transistors umlädt, eine hinreichend schnelle Programmierung des Displays ermöglicht, vergleiche 4.2.3. Auf die Auswahl einer passenden TFT-Technologie für diese Transistoren wird im Folgenden eingegangen.

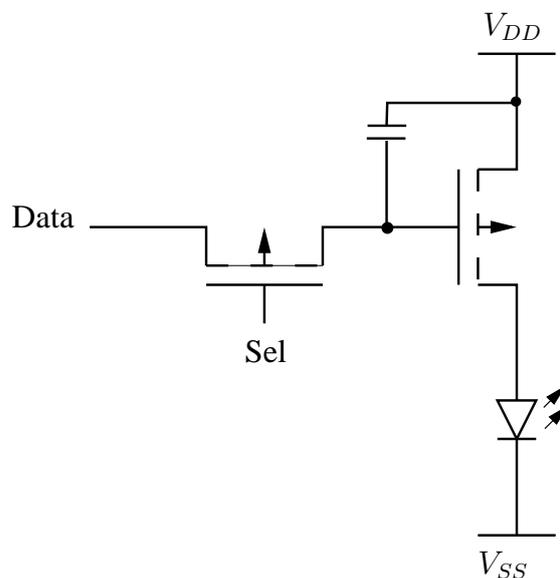


Abbildung 4.1: Einfache 2T1C Pixelschaltung.

4.2.2 TFT-Technologie

Wie in Kapitel 2 dargestellt, gibt es verschiedene TFT-Technologien, welche zur Verwendung in einem AMOLED-Display in Frage kommen. Jedoch ist es nicht möglich, alle Technologien auch für die digitale Ansteuerung zu verwenden. Unter Verwendung eines DPS Treiberschemas, vergleiche 3.2.3, muss der Spitzenstrom durch die OLED deutlich höher sein im Vergleich zur analogen Ansteuerung. Um zu einer Abschätzung für den Spitzenstrom durch die OLED zu gelangen, kann von einer Zielleuchtdichte für ein weißes Bild von $L_0 = 300 \frac{\text{Cd}}{\text{m}^2}$ ausgegangen werden, dies entspricht typischen Displayspezifikationen. Das Verhältnis von emittierender Fläche zur Gesamtfläche des Displays ist für eine Bottom-Emission-Struktur typischerweise im Bereich von 25%, vergleiche Kapitel 3.2. Für das verwendete DPS basierte digitale Treiberschema wird ein Verhältnis von emittierender Zeit zur Gesamtzeit von 0,5 angestrebt. Die notwendige Leuchtdichte $L_{0,OLED}$ der OLED ergibt sich somit zu:

$$L_{0,OLED} = \frac{1}{0,25} * \frac{1}{0,5} * L_0 = 2400 \frac{\text{Cd}}{\text{m}^2}. \quad (4.1)$$

Die Leuchtdichte L_0 der OLED ergibt sich als Produkt aus der Stromeffizienz η_I und dem Strom durch die OLED. Stand der Technik ist die Verwendung von phosphoreszenten OLED-Materialien für Rot und Grün sowie fluoreszenten für Blau. Typische Stromeffizienzen für am Markt beziehungsweise in der Forschung verfügbare Materialien sind⁴:

$$\eta_{I,red} = 30 \frac{\text{Cd}}{\text{A}} \quad (4.2)$$

$$\eta_{I,green} = 85 \frac{\text{Cd}}{\text{A}} \quad (4.3)$$

$$\eta_{I,blue} = 15 \frac{\text{Cd}}{\text{A}}. \quad (4.4)$$

An einem für den Menschen wahrgenommenen weißen Farbton haben die Grundfarben verschiedene Anteile. Die hier verwendeten OLEDs treffen im Farbort gut die Primärvalenzen des sRGB-Farbraums, sodass sich die Zusammensetzung eines weißen Pixels (mit dem Farbort des Referenzweiß D65) aus den Subpixeln mit den Anteilen:

$$Y = 0,297 * R + 0,627 * G + 0,076 * B \quad (4.5)$$

berechnen lässt (vergleiche **Simon2008**, Seite 113). Hieraus ergibt sich durch Gewichtung der Farben eine gemittelte Effizienz der OLED für die Darstellung von weißen Bildpunkten von

$$\eta_{I,mean} = 63,3 \frac{\text{Cd}}{\text{A}}. \quad (4.6)$$

Dieser Wert korreliert auch gut mit in der Literatur angegebenen Stromeffizienzen von weißen OLED mit Tandem-Struktur (vergleiche u.a. **Hatwar2010**). Die Berechnung ist

⁴Aus **UDC_OLED** (Rot, Grün) bzw. **Cha2015** (Blau).

entsprechend auch für weiße OLED zutreffend. Der Spitzenstrom I_{peak} lässt sich damit berechnen zu:

$$I_{peak} = \frac{L_{0,OLED} * A_{pix}}{\eta I_{mean}} \tag{4.7}$$

und ist abhängig von der Pixelfläche A_{pix} . In Tabelle 4.1 sind einige im Multimediabereich typische Displaygrößen und -auflösungen sowie die sich für diese ergebenden zu erwartenden Ströme durch die OLED aufgezeigt.

Für den die OLED ansteuernden Transistor kann über den Drainstrom I_D der notwendige Steilheitskoeffizient β (vergleiche **Tietze2011**, S. 185ff.) bestimmt werden⁵. Durch Umstellen der Stromgleichung des Transistors im linearen Bereich kann dieser ausgedrückt werden als:

$$\beta = \left[\frac{U_{DS}}{I_D} * \left(U_{GS} - U_{th} - \frac{U_{DS}}{2} \right) \right]^{-1} \tag{4.8}$$

U_{DS} , U_{GS} sind hierbei die anliegenden Spannungen zwischen Drain und Source beziehungsweise von Gate und Source des Transistors, U_{th} ist die Schwellspannung des Transistors. Über die Definition des Steilheitskoeffizienten ergibt sich die erforderliche Ladungsträgerbeweglichkeit zu:

$$\mu = \frac{\beta * L}{C'_{ox} * W} \tag{4.9}$$

mit C'_{ox} dem Kapazitätsbelag des Gate des Transistors und W, L der Kanalweite beziehungsweise -länge. In Tabelle 4.1 ist die jeweils notwendige Ladungsträgermobilität für einen Transistor mit $W = 10 \mu\text{m}$, $L = 8 \mu\text{m}$, $t_{ox} = 100 \text{ nm}$, $C'_{ox} = 345 * 10^{-6} \frac{\text{F}}{\text{m}^2}$, $U_{DS} < 0,1 \text{ V}$ und $U_{GS,eff} = 10 \text{ V}$ gegeben. Diese Transistorparameter entsprechen denen des realisierten Visionox-Prototypen, vergleiche Kapitel 5.2.

Displaydiagonale	Auflösung	Pixelgröße	Spitzenstrom (Gesamtpixel)	Ladungsträgermobilität
2,8 Inch (71 mm)	QVGA (320x240)	$(181 \mu\text{m})^2$	1,25 μA	29 $\frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}$
5 Inch (127 mm)	FullHD (1920x1080)	$(58,6 \mu\text{m})^2$	131 nA	3 $\frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}$
14 Inch (356 mm)	FullHD (1920x1080)	$(164 \mu\text{m})^2$	987 nA	23 $\frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}$
55 Inch (1397 mm)	UltraHD (3840x2160)	$(322 \mu\text{m})^2$	3,95 μA	92 $\frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}$

Tabelle 4.1: Vergleich der notwendigen OLED-Spitzenströme und Ladungsträgermobilitäten des ansteuernden TFT für verschiedene Displaygrößen.

Da bei Verwendung des DPS basierten Treiberschemas die OLED zeitweise komplett kurzgeschlossen ist, müssen beim Aktivieren der Pixelmatrix die OLED-Kapazitäten durch

⁵Die Modellgleichungen für MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) lassen sich auch für TFT grob anwenden, hierzu sei beispielsweise auf die Modelle des Rensselaer Polytechnic Institute verwiesen, welche im Bereich der TFT als Standardmodell dienen. Vergleiche unter anderen **CadenceDesignSystems2014**

den ansteuernden Transistor geladen werden. In diesem Fall müssen höhere Ströme fließen, sodass die obige Abschätzung für die Ladungsträgermobilität eine Untergrenze darstellt. Je nach verwendeter Subpixelstruktur und ansteuernder Pixelschaltung teilt sich der Strom auf mehrere Transistoren auf, wodurch entsprechend geringere Ladungsträgermobilitäten notwendig sind.

Die berechneten Werte können als Hilfsmittel zur Auswahl einer geeigneten Technologie genutzt werden. Wie ein Vergleich von Tabelle 4.1 mit Literaturwerten der technischen Parameter der verschiedenen TFT-Technologien zeigt⁶, ist für das digitale Treiberschema die Verwendung von LTPS Transistoren notwendig. LTPS wird auch bei aktuellen AMOLED-Displays als gängige TFT-Technologie eingesetzt und ist daher leicht am Markt verfügbar. Die aktuell in der Entwicklung befindliche Technologie der Oxide-TFT könnte zukünftig eine mögliche Alternative sein. Gleichzeitig ermöglicht die digitale Ansteuerung der TFT jedoch auch die Verwendung von LTPS TFT, da die schlechte Homogenität der Thresholdspannung der Transistoren für dieses keine sichtbare Auswirkung hat. Der von analog getriebenen AMOLED-Display bekannte Mura-Effekt wird vermieden (vergleiche Kapitel 5.2 und **DeRoose2014**).

Neben dem die OLED ansteuernden Transistor muss auch der Select-Transistor betrachtet werden, vergleiche Abbildung 4.1. Dieser muss genügend Strom treiben können, um die Storage-Kapazität wie auch die Gate-Kapazität des ansteuernden Transistors in der zur Programmierung zur Verfügung stehenden Zeit umladen zu können. Geht man von einer Programmierzeit⁷ $t_{prog} = 350$ ns (bei 1080 Zeilen), einer umzuladenden Kapazität $C_{tot} = 300$ fF und einer Spannungsdifferenz zwischen High- und Low-Pegel von $\Delta U = 15$ V aus, so ergibt sich ein mittlerer Strom I_{mean} durch den Select-Transistor von:

$$I_{mean} = \frac{C_{tot} * \Delta U}{t_{prog}} \geq 12 \mu A. \quad (4.10)$$

Um diesen Strom treiben zu können, muss eine entsprechende Dimensionierung des Transistors gewählt werden. Der zu erwartende Leckstrom durch den Transistor⁸ lässt sich abschätzen über:

$$I_{leak} \approx \left(\frac{I_{On}}{I_{off}} \right)^{-1} * I_{mean}. \quad (4.11)$$

Das Verhältnis des Stroms im leitenden Zustand zum Strom im Sperrzustand ist eine charakteristische Größe für verschiedene TFT-Technologien. Für die LTPS-Technologie beträgt dieses etwa 10^{-6} (vergleiche **Street2009**, **Gaspar2015**), sodass sich ein Leckstrom von $I_{leak} \geq 12$ pA ergibt. Dieser führt bei einer Dauer des längsten Subframes von $t_{SF,max} = 2,5$ ms (100 Hz Framerate, 13 Subframes) zu einem Abfall der programmierten Spannung von etwa $\Delta U = 0,1$ V. Für die digitale Ansteuerung ist dieser Wert

⁶Eine gute Übersicht zu aktuell verwendeten und in der Entwicklung befindlichen Technologien liefert hier **Chen2012**.

⁷Die Werte sind angelehnt an eine Spezifikation für ein FullHD-Display mit 13 Subframes, 100 Hz Bildwiederholrate und äquivalenter Programmier- und Leuchtphase.

⁸Stromfluss im Sperrzustand des Transistors. Dieser ist für TFT deutlich höher als für MOSFET Technologien.

noch unkritisch, jedoch muss diese Betrachtung bei der Dimensionierung der Storage-Kapazität beachtet werden. Es muss ein Kompromiss zwischen notwendiger Genauigkeit der programmierten Spannung und Größe des Select-Transistors gefunden werden. Die Verwendung von Oxide-TFT wäre hier vorteilhaft, da diese ein besseres Sperrverhalten aufweisen.

Aufgrund der verfügbaren Fertigungstechnik und der geeigneten Technologieeigenschaften kommen derzeit vorwiegend LTPS-TFT zum Einsatz. In geringen Stückzahlen finden bereits Versuche zur Verwendung von Oxide-TFT statt. Diese vermeiden zugleich die bei LTPS-TFT auftretenden örtlichen Variationen der TFT-Eigenschaften, verursacht durch den Rekristallationsprozess, welche sichtbare Mura-Artefakte hervorrufen. Herausforderung sind hier jedoch das Erreichen stabiler Prozesse und hinreichend hoher und stabiler Ladungsträgermobilität.

4.2.3 Zeilentreiber und Programmiergeschwindigkeit

Um die in Kapitel 3.2.1 erläuterte für eine flackerfreie Bilddarstellung notwendige Bildwiederholrate zu erreichen, muss das Programmieren der Pixelwerte für das digitale Treiberschema signifikant schneller erfolgen als bei Verwendung eines analogen Treiberschemas. Bereits die Grundfrequenz, typischerweise 60 Hz, muss erhöht werden und, da das gesamte Frame als Summe von Teilframes (vergleiche Kapitel 3.2.2) dargestellt wird, muss für jedes Frame eine Zahl n an Teilframes programmiert werden. Um diese hohe Programmierfrequenz zu erreichen, müssen Zeilen- wie Spaltentreiber angepasst werden. Auch die Pixelschaltung wird so ausgelegt, dass die kapazitiven Lasten für die Treiber möglichst klein sind. Gleichzeitig muss aber die zuvor erläuterte Treibfähigkeit sichergestellt werden.

Abbildung 4.2 zeigt die parasitären Elemente, welche geschwindigkeitsbegrenzend wirken. Es gibt es keine Verkopplung der Wirkung von Zeilen- und Spaltentreiber, sodass diese getrennt betrachtet werden können.

Bei Darstellung von num_{FR} Bildern je Sekunde, welche aus n Teilbildern bestehen, ergibt sich für eine gegebene Zeilenzahl num_{rows} eine je Zeile zur Verfügung stehende Zeit von:

$$t_{row} = \frac{1}{2} * \frac{1}{num_{FR}} * \frac{1}{n} * \frac{1}{num_{rows}} * 1 \text{ s.} \quad (4.12)$$

Der Faktor $\frac{1}{2}$ leitet sich wie zuvor von der Verwendung eines DPS basierenden Treiberschemas ab, bei welchem die Programmierzeit der Leuchtzeit entspricht. Die maximale Betriebsfrequenz für eine Zeile ergibt sich aus der Zeitkonstante τ_{sel} der RC-Kette welche die in der Zeile wirksamen Widerstände mit den Kapazitäten der Switch-Transistoren verursachen. Die Zeitkonstante der gesamten Kette lässt sich aus den Zeitkonstanten der Einzelglieder τ_{row} und ihrer Anzahl, welche der Zahl der Spalten num_{cols} multipliziert mit der Anzahl an Subpixeln num_{subpix} entspricht, berechnen. Für eine solche Kette an

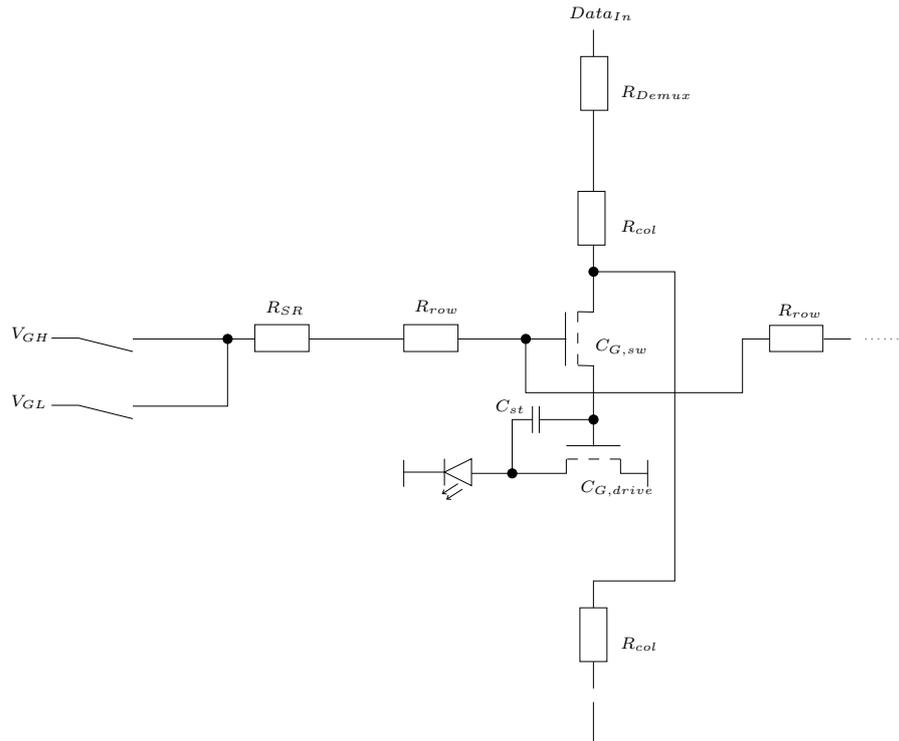


Abbildung 4.2: Parasitäre Elemente welche die Programmiergeschwindigkeit begrenzen.

RC-Gliedern lässt sich die Zeitkonstante näherungsweise bestimmen zu:

$$\tau_{row} = R_{row} * C_{G,sw} \quad (4.13)$$

$$\tau_{sel} = \frac{num_{cols} * num_{subpix} * (num_{cols} * num_{subpix} + 1)}{2} * \tau_{row} \quad (4.14)$$

Gleichung 4.14 lässt sich auch durch Schaltungssimulation bestätigen, siehe **Volkert2013**. Der Ausgangswiderstand des Zeilentreibers R_{SR} muss so klein dimensioniert werden, dass diese Darstellung Gültigkeit besitzt. Durch Parallelschalten einer hinreichenden Anzahl an Transistoren als Bufferstufe für das Zeilentreibersignal ist dies in der Regel leicht realisierbar.

Analog lässt sich auch eine Spalte als RC-Glied betrachten. Hier ist jedoch zu beachten, dass als Kapazitäten nur die Storage-Kapazität C_{st} sowie die Gate-Kapazität $C_{G,drive}$ des Treiber-Transistors der jeweils aktiven Zeile wirken. Die sich ergebende Zeitkonstante τ_{col} der Spalte muss in Relation zur zu Verfügung stehenden Zeit zur Programmierung der Spalte t_{col} gesetzt werden. Die Anzahl num_{demux} der Spalten, auf welche ein zugeführtes Datensignal intern verteilt wird, verringert zudem die Zeit zur Programmierung der Spalte. In der Regel wird mindestens auf die drei zusammengehörigen Subpixel ein Demultiplex durchgeführt. Die Zeit zur Programmierung sowie die Zeitkonstante der Spalte lässt sich

entsprechend darstellen als:

$$t_{col} = \frac{t_{row}}{num_{demux}} \quad (4.15)$$

$$\tau_{col} = (R_{demux} + R_{col,eff} + R_{sw}) * (C_{st} + C_{G,drive}). \quad (4.16)$$

$R_{col,eff}$ entspricht hier der Summe aller Spaltenwiderstände bis zur aktivierten Zeile. Maximal ergibt sich somit $R_{col,eff} = num_{rows} * R_{col}$.

Displaydiagonale	Auflösung	t_{row}	τ_{sel}	t_{col}	$\tau_{col,max}$
2,8 Inch (71 mm)	QVGA (320x240)	1,6 μ s	930 ps	533 ns	389 ps
5 Inch (127 mm)	FullHD (1920x1080)	356 ns	33,5 ns	119 ns	530 ps
14 Inch (356 mm)	FullHD (1920x1080)	356 ns	33,5 ns	119 ns	530 ps
55 Inch (1397 mm)	UltraHD (3840x2160)	178 ns	134 ns	59 ns	1,06 ns
55 Inch, 1:6 Demux	UltraHD (3840x2160)	178 ns	134 ns	30 ns	1,06 ns

Tabelle 4.2: Berechnete Ansteuerdauern und Zeitkonstanten der Zeilen- und Spaltensteuerung bei verschiedenen Auflösungen.

In Tabelle 4.2 sind die sich ergebenden Zeitkonstanten für die Programmierung der Zeilen und Spalten für verschiedene typische Displayauflösungen dargestellt. Für die Berechnung wurde eine Pixelstruktur, wie in Abbildung 4.3 skizziert, verwendet. Hierbei beträgt die Apertur 25%, die gesamte Pixelfläche ist mit $a * a$ angenommen. Die Breite der Select-Leitung beträgt $w_{sel} = 0,15 * a$, die der Datenleitung $w_{data} = 0,1 * a$. Über den Flächenwiderstand R_{sqr} können von der Pixelgröße unabhängige Spalten- und Zeilenwiderstände berechnet werden, sie ergeben sich zu $R_{row} \approx 2,33 * R_{sqr}$ und $R_{col} \approx 10 * R_{sqr}$. Als Material für die Leitungen wird, wie auch typisch in Displays verwendet, Aluminium mit einer Dicke von 500 nm und einem sich daraus ergebenden Flächenwiderstand von $R_{sqr} = 53 \text{ m}\Omega$ angenommen. Für die TFT wird eine Gatekapazität von 17,3 fF verwendet, welche sich für einen TFT mit $W = 10 \mu\text{m}$, $L = 5 \mu\text{m}$ und $t_{ox} = 100 \text{ nm}$ mit Siliziumdioxid als Gate-Isolator ergibt. Der Widerstand des Demultiplexer wurde mit $R_{demux} = 100 \Omega$ und der des Switch-Transistors mit $R_{sw} = 1 \text{ k}\Omega$ angenommen. Es werden $num_{subpix} = 3$ Subpixel je Pixel verwendet, für die Ansteuerung werden $num_{FR} = 100$ Bilder je Sekunde und $n = 13$ Subframes angenommen. Das Demultiplexerverhältnis beträgt 1:3. Die Annahmen entsprechen typischen Werten, wie sie in Literatur und Praxis zu finden sind.

Der Vergleich der Zeitkonstante und der zur Verfügung stehenden Zeit zeigt insbesondere für höhere Auflösungen, dass die Programmierung der Zeilen kritisch ist (Spalten t_{row} und τ_{sel}). Um hier eine möglichst hohe Geschwindigkeit realisieren zu können, müssen die Switch-Transistoren möglichst klein dimensioniert werden um die kapazitive Last für den Zeilentreiber und damit auch die Zeitkonstante der Leitung gering zu halten. Als Dimensionierungsziel kann die Näherung $t_{row} > 2,2 * \tau_{sel}$ verwendet werden. Diese ergibt sich aus der Annahme eines exponentiellen Umladeverhaltens (vergleiche RC-Glied) und der Forderung, dass innerhalb $t_{row} \approx 90\%$ des Spitzenwertes erreicht werden sollen. Gleichzeitig sollte der Widerstand der Zeile möglichst gering sein, was eine breite Leitung bedingt.

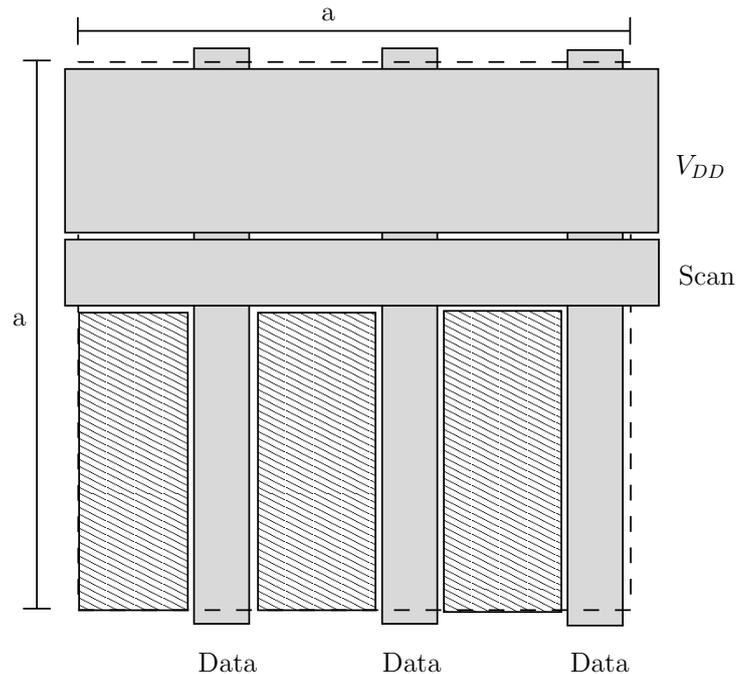


Abbildung 4.3: Idealisierte Pixelstruktur zur Berechnung der Zeitkonstanten der Select- und Datenleitungen.

In herkömmlichen Designs der Pixelschaltung wird die Zeilenleitung als Gateelektrode des Select-Transistors genutzt. Um hier eine ansteigende Kapazität des Transistors mit der Breite der Leitung zu umgehen, sollte die Gateelektrode als Abzweig der Zeilenleitung realisiert werden. Da im Vergleich zum analogen Treiberschema die Pixelschaltung selbst sehr wenige Bauelemente besitzt, ist der hierdurch steigende Platzbedarf vernachlässigbar. Eine Realisierung der schmalen Gateelektrode als Verengung in der Leitung, vergleiche Abbildung 4.4 (mitte), ist nicht zielführend, da insbesondere für hohe Pixeldichten der Widerstand der Zeilenleitung zu stark ansteigt. Zugleich kann anstelle der verwendeten einseitigen Zuführung der Zeilentreibersignale eine zweiseitige Anbindung realisiert werden. Typischerweise finden bei Systemen größerer Displaydiagonalen diskrete Zeilentreiber auf flexiblen PCB Verwendung, sodass lediglich eine Synchronisierung zwischen den beidseitigen Treibern stattfinden muss. Durch Halbierung der Zahl der von einem Treiber angesteuerten Spalten num_{cols} ergibt sich gemäß Gleichung 4.14 eine Reduktion der Zeitkonstante der Zeilenansteuerung um einen Faktor 4.

Die Berechnung zeigt, dass für den realisierten Prototypen mit QVGA⁹-Auflösung die zur Berechnung verwendete Dimensionierung der Leitungen und Transistoren ausreichend ist, um eine hinreichend schnelle Ansteuerung zu gewährleisten. Sie findet entsprechend Anwendung in der Auslegung des Displays, vergleiche auch Kapitel 5.2. Die Zeitkonstanten

⁹Quarter Video Graphics Array

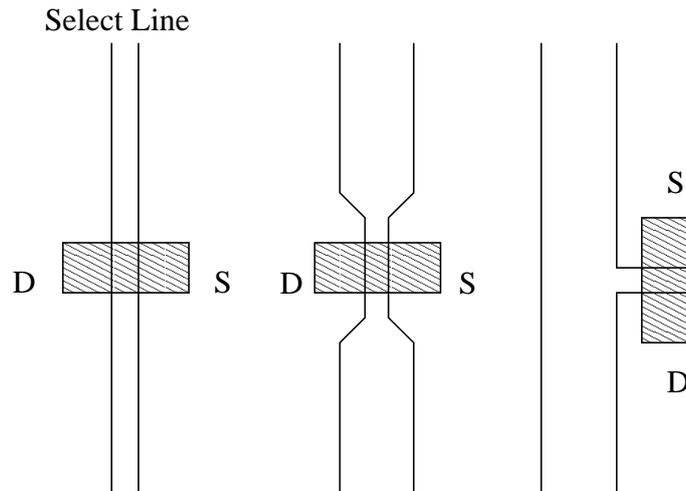


Abbildung 4.4: Typische Ausführung der Gateelektrode des Select-Transistors und Alternativen zur Verringerung der Zeitkonstante der Zeile.

der Spalten, die deren Ansteuerung begrenzen, sind wie in Tabelle 4.2 gezeigt, nur bei Verwendung größerer Demultiplex-Verhältnisse problematisch. Der Spaltentreiber muss dennoch entsprechend der elektrischen Anforderungen ausgelegt werden, hierauf wird nachfolgend näher eingegangen.

4.2.4 Spaltentreiber und Energieversorgung

Neben dem Zeilentreiber und der Pixelschaltung muss auch die Auslegung des Demultiplexers sowie des Spaltentreibers den Geschwindigkeitsansprüchen gerecht werden. Der Spaltentreiber besteht im realen System aus mehreren Treiber-IC¹⁰, welche durch Verwendung entsprechender IC-Technologien die gestellten Ansprüche leicht erfüllen können. Im Prototypen kommen diskrete Schaltungen für den Spaltentreiber zum Einsatz. Deren Auslegung wird im Kapitel 5 dargestellt. Der Ausgangstransistor des Demultiplexers besteht aus einer Parallelschaltung mehrerer Einzeltransistoren, sodass durch einfaches Erhöhen der Anzahl der Ausgangswiderstand hinreichend gesenkt werden kann. Die Geschwindigkeit des Spaltentreibers wird hauptsächlich durch die Abbildung 4.2 dargestellten parasitären Elemente beeinflusst. Diese müssen hinreichend schnell umgeladen werden können.

In Abbildung 4.5 ist die prinzipielle Funktionalität des Spaltentreibers dargestellt. Bei Verwendung einer digitalen Ansteuerung übernimmt der Spaltentreiber die einfache Funktion einer Push-Pull-Stufe, wobei zusätzlich eine Umsetzung der im Digitalteil (Grafikprozessor) verwendeten niedrigen Spannungspegel auf Pegel, welche zur Ansteuerung

¹⁰Integrated Circuit

der TFT geeignet sind, erfolgen muss. Die Ansteuerung der Pixel einer gesamten Zeile erfolgt immer parallel. Um einen Zustandswechsel eines Pixels herbeizuführen, muss die Eingangskapazität des die OLED treibenden Transistors (Drive-TFT) umgeladen werden. Überschlägig¹¹ kann der notwendige Strom I_{col} aus dem bekannten Spannungshub $U_{p,drive}$, der Summe aus TFT- und Speicher-Kapazität C_{tot} und der zur Verfügung stehenden Zeit $t_{load,col}$ berechnet werden. Wie in Gleichung 4.10 gezeigt, sind hier Ströme $\ll 1$ mA notwendig, welche von auf kristallinem Silizium gefertigten IC problemlos geschaltet werden können. Der den Strom begrenzende Faktor ist hier der Select-TFT.

Damit beim Programmieren der Pixel möglichst die gesamte Zeit zur Umladung der Gate- und Speicherkapazität zur Verfügung steht, muss der Spaltentreiber schnell zwischen seinen Ausgangspegeln umschalten können. Ausgehend von den bereits zur Berechnung verwendeten Spezifikationen eines QVGA-Displays (vergleiche Tabelle 4.2) ergibt sich eine Programmierzeit $t_{prog} \geq 500$ ns. Sollen 90% dieser Zeit zur Umladung zur Verfügung stehen, berechnet sich somit die notwendige Flankenheit des Treibers zu:

$$SR = \frac{U_{p,drive}}{0,1 * t_{prog}} \approx 300 \frac{V}{\mu s} \quad (4.17)$$

bei einem typischen Hub der Programmierspannung von $U_{p,drive} = 15$ V. Diese Anforderung kann mit gängigen Verstärkerschaltungen gedeckt werden. Zum Aufbau einer diskreten Ansteuerschaltung fiel die Wahl auf Operationsverstärker (spannungsrückgekoppelt), welche im Bereich der Telekommunikation zur Ansteuerung von Übertragungsleitungen eingesetzt werden. Diese erreichen Flankensteilheiten im Bereich $\geq 1000 \frac{V}{\mu s}$, vergleiche 5.4. Durch höhere Flankensteilheiten können in Grenzen kürzere Ansteuerdauern und damit höhere Farbtiefen (mehr Subframes) erzielt werden.

Als Schnittstelle zum Grafikprozessor bietet sich, um die Anzahl der Zuleitungen zu verringern, die Verwendung eines seriellen Interfaces an. Einkommende Daten werden deserialisiert, zwischengespeichert, um die gesamte Programmierzeit zur Übertragung der nächsten Daten zur Verfügung zu haben, und danach verstärkt, siehe Abbildung 4.5. Durch die einfache Struktur und geringe Zahl an Bauteilen kann zur Realisierung eines ASIC ein Hochspannungs-CMOS¹² Prozess verwendet werden, ohne dass aufgrund dessen großer Strukturbreite die Chipfläche groß und der Baustein somit teuer wird. Die notwendigen Spannungspegel und die Ströme zur Versorgung der IC müssen gesondert erzeugt und bereitgestellt werden.

Zur Energieversorgung wird in realen Displaysystemen meist ein IC verwendet, welcher das sogenannte Power Management übernimmt. Er erzeugt aus einer Hauptspannung mittels Konverterschaltungen die verschiedenen notwendigen Hilfsspannungen. Typischerweise werden separate Spannungen zur Ansteuerung der Spaltentreiber, Zeilentreiber und für die Versorgung der Pixelmatrix verwendet. Im Prototypen werden anstelle einer integrierten Lösung die Hilfsspannungen für Spalten- und Zeilentreiber getrennt zugeführt.

¹¹Der umladende Transistor befindet sich nicht während des gesamten Vorgangs im Sättigungsbetrieb, sodass die Annahme eines konstanten Stroms nicht der Realität entspricht. Bei entsprechender Auslegung der Endstufe kann jedoch näherungsweise davon ausgegangen werden.

¹²Complementary Metal Oxide Semiconductor

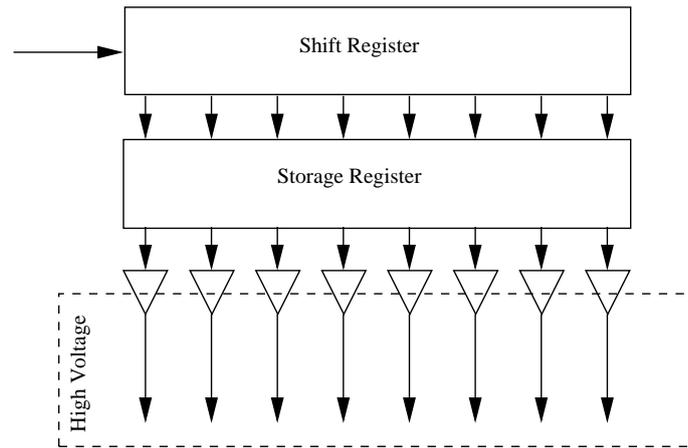


Abbildung 4.5: Aufbau des Spaltentreibers für digitale Ansteuerung.

Aus der Spannung für den Zeilentreiber wird die Versorgung der Pixelmatrix, um mögliche Störeinflüsse eines Schaltwandlers zu vermeiden, über Linearregler erzeugt. Um die realisierten Prototypen als Demonstratoren bei Messen oder Firmenbesuchen verwenden zu können, kommen wahlweise Schaltnetzteile zum Einsatz, deren Ausgangsspannung durch Filter zusätzlich geglättet wird. In Abbildung 4.6 ist das Versorgungskonzept skizziert. Dieses beinhaltet zudem einen Block, um das gesamte Display aktivieren und deaktivieren zu können.

Zur Realisierung definierter Subframezeiten, vergleiche Kapitel 3.2.2, ist in der negativen Versorgungsspannung des Displays eine Inverterstufe verbaut, welche diese auf V_{SS} beziehungsweise V_{DD} der Versorgung schaltet. Hierdurch ist ein definiertes Löschen der in den Kapazitäten der OLED und der gesamten Pixelmatrix gespeicherten Energie gesichert. Zusätzlich kann über einen austauschbaren Widerstand verschiedenes Löschverhalten erzwungen und Störeinflüsse begutachtet werden. Dieser Schaltblock übernimmt auch die für das DPS-basierte Treiberschema notwendig Aktivierung und Deaktivierung der Pixelmatrix in Leucht- und Programmierphasen.

4.2.5 Grafikprozessierung

In einem Displaysystem sind in der Regel mehrere Grafikprozessoren vorgesehen. Hauptaufgaben dieser sind Anpassung (Up- und Downscaling, Resizing) der zugespielten Bildinhalte an das Display sowie Manipulation der Bildinhalte zur Verbesserung der Bildqualität (Farbanpassung und ähnliches). Eine typische Prozessorstruktur ist beispielsweise in **Ibrahim2007** S. 315f. gezeigt. Für das zu realisierende digitale AMOLED-System wurde ein Ansatz mit nur einem physikalischen Prozessorbaustein gewählt, in welchem möglichst flexibel einzelne, funktionale Prozessorblöcke realisiert werden können. Des Weiteren werden nur digitale Schnittstellen zur Zuspiegelung von Bildinhalten vorgesehen. Mit

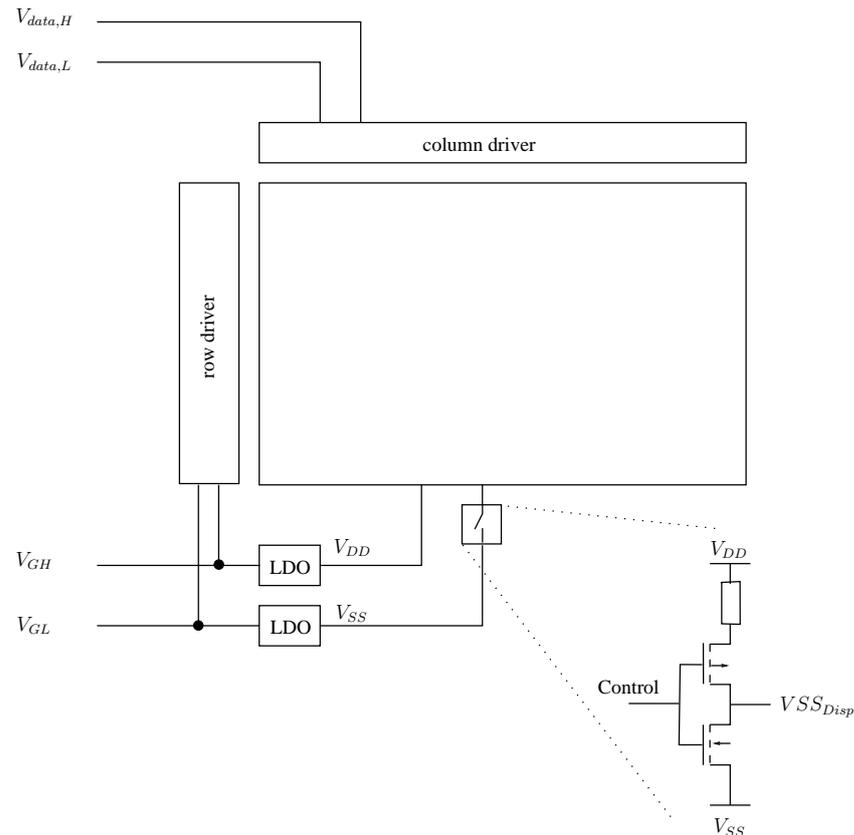


Abbildung 4.6: Konzept der Leistungsverorgung des Prototypen.

diesen Vereinfachungen ist es möglich, den gesamten Prozessor in einem kostengünstigen FPGA¹³ zu realisieren.

FPGA

FPGA sind variabel programmierbare Logikbausteine. Ihre logische Funktion wird in der Regel durch Beschreibung in einer Hardwarebeschreibungssprache bestimmt. Es können weitgehend beliebige logische Funktionen abgebildet werden. Im FPGA werden diese durch Verknüpfungen von einzelnen Logikzellen, welche LUTs zur Abbildung der gewünschten Logikfunktion enthalten und durch Nutzen vorgegebener Hardwareblöcke, beispielsweise ein DSP¹⁴, erzeugt. Durch diese sehr hardware-nahe Realisierung können FPGA mit hohen Taktraten arbeiten und somit hohe Geschwindigkeiten bei der Datenverarbeitung erreichen. Im Vergleich zu einem ASIC sind FPGA dennoch um etwa Faktor 10 langsamer.

¹³Field Programmable Gate Array

¹⁴Digital Signal Processor

Für übliche Anwendungen im Bereich der Videoprozessierung reicht ihre Leistungsfähigkeit jedoch aus.

Vorteil der Implementierung des Videoprozessors in einem FPGA ist die leichte Übertragbarkeit in ein mögliches reales Displaysystem. So sind in TV¹⁵-Geräten häufig FPGA verbaut, da der Hersteller über Firmware-Updates auch nach Auslieferung an den Kunden die Videoprozessierung hiermit leicht anpassen oder korrigieren kann. In Bereichen niedriger Stückzahlen sind FPGA in der Regel auch günstiger als speziell angefertigte ASIC, da keine Entwicklungskosten für die Hardware des ASIC anfallen. Für kosten-sensitive Anwendungen mit hohen Stückzahlen kann das Digital-Design in Form einer Hardwarebeschreibung zusätzlich leicht in ein Chip-Design für einen ASIC überführt werden.

Zur Verifikation eines FPGA-Designs gibt es verschiedene Ansätze. Eine formale Verifikation in Form mathematischer Beweisführung ist aufgrund der Komplexität eines Grafikprozessors nur für Teilsysteme möglich. Für die vorliegende Arbeit wurde daher auf die Methode des modellbasierten Testens mit definierten Testfällen zurückgegriffen. Unterstützt wurde dies durch Nutzung von Tools wie „Chipscope“, welche es ermöglichen, zur Laufzeit interne Signale des FPGA zu analysieren und mit Erwartungswerten zu vergleichen. Teile des Prozessors wurden auch in Software simuliert und die Ausgaben mit gemessenen Werten beziehungsweise Erwartungswerten verglichen. Diese Formen der Verifikation sind nie vollständig, da die Testfälle nicht alle möglichen Fälle abdecken. Durch Analyse von typischen Bildinhalten kann jedoch mit großer Sicherheit festgestellt werden, dass das Gesamtsystem in den typischen Anwendungsfällen zufriedenstellend arbeitet.

Notwendige Peripherie-Hardware wie beispielsweise Speicher-Bausteine sind auf gängigen FPGA-Boards häufig bereits integriert, sodass für das Prototyping hier keine speziellen Platinen entwickelt werden müssen. Zur genaueren Beschreibung der gewählten Hardware wird auf Kapitel 5.4.2 verwiesen.

Um die Ausgangsdaten des Videoprozessors auf das Displaypanel anzuwenden, müssen diese in der Regel noch verstärkt und im Spannungspegel angepasst werden. Auch hier bietet die Implementierung des Prozessors in einem FPGA indirekt Vorteile, da die entsprechenden Bausteine für Verstärkung und Pegelanpassungen in einem fortgeschrittenen Stadium des Prototyps in einem separaten Hochspannungs-ASIC realisiert werden können. Diese können mithilfe gängiger Prototyping Plattformen leicht an das FPGA-System angebunden werden, vergleiche Abschnitte 4.2.3 und 4.2.4.

Definition/Aufgaben

Abbildung 4.7 zeigt die Struktur des Grafikprozessors für das digitale AMOLED-System. Zur Zuspierung der Bilddaten wurde ein HDMI Interface als eine gängige Schnittstelle zu bildgebender Hardware wie Laptop beziehungsweise Computer gewählt. Das bei HDMI

¹⁵Television

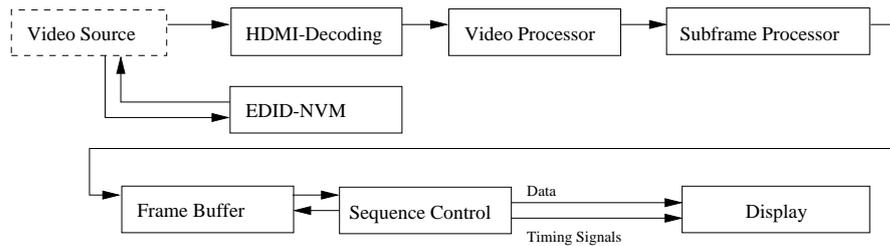


Abbildung 4.7: Blockdiagramm der Datenverarbeitung im digitalen AMOLED-System.

verwendete Protokoll FPD-Link¹⁶ basiert auf einer einfachen synchronen seriellen Datenübertragung. Dies ermöglicht eine einfache Deserialisierung der Daten ohne aufwendige Methoden wie Clock-Recovery¹⁷. Die Identifizierung des Displays durch das zuspieldende System geschieht durch Übertragung der EDID¹⁸ aus einem im Displaysystem vorhandenen nicht-flüchtigen Speicher (NVM¹⁹). Diese Daten lassen sich beliebig hinsichtlich des Timings für das jeweilige System anpassen, sodass hier Inkompatibilitäten auch für Displays mit geringer Auflösung ausgeschlossen werden können. Auch hier weist HDMI eine höhere Abwärtskompatibilität als andere digitale Schnittstellen auf. Für weitere Details zur Architektur von HDMI wird auf **Ibrahim2007** S. 295ff. verwiesen.

Nach der Decodierung der Bildinhalte folgt die eigentliche Videoprocessing. Im ersten Schritt werden die Bilddaten durch Anwendung einer γ -Korrektur linearisiert, ihr Ausgangswert ist danach direkt proportional zur physikalischen Leuchtdichte. Es erfolgt eine Korrektur des Weißpunktes sowie Algorithmen zur Erhöhung der darstellbaren Graustufen. Die Struktur des Videoprocessors wird in Kapitel 5.4.2 detailliert behandelt. Nach der Prozessierung der Daten erfolgt die Zerlegung in einzelne Subframes im Subframe-Prozessor, vergleiche Kapitel 3.2.2. Die Zuspieldung der Bilddaten erfolgt sequentiell pixelweise. Für das digitale Treiberschema wird jeweils gesamte Subframes benötigt. Die Zuspieldung und Wiedergabe der Daten auf dem Displaypanel erfolgt in der Regel mit verschiedenen Bildwiederholraten, da wie in Kapitel 3.2.1 gezeigt, die bei HDMI üblicherweise verwendeten 60 Hz Bildwiederholrate zu gering für eine flackerfreie Wiedergabe unter Verwendung eines digitalen Treiberschemas sind. Es ist daher notwendig, die Bilddaten zerlegt in vollständige Subframes in einem sogenannten Framebuffer vorzuhalten. Dieser muss genügend Speicherkapazität besitzen, um zwei komplette Frames vorzuhalten. Dies ist notwendig, um die zur Zuspieldung der Daten asynchrone Darstellung der Daten auf dem Displaypanel zu ermöglichen. Sonst könnten Artefakte auftreten, da während der Darstellung der Daten Teile bereits durch Folgedaten ersetzt werden. Die notwendige Anzahl an Bits N für den Speicher je Farbkanal ergibt sich direkt aus der

¹⁶Flat Panel Display Link

¹⁷Wiederherstellung des Datentakts aus den übertragenen Daten. Findet beispielsweise bei Display-Port Anwendung.

¹⁸Extended Display Identification Data

¹⁹Non-volatile Memory

Zahl n der Subframes (vergleiche 3.2.2) und der Auflösung des Panels:

$$N_{Framebuffer} = x_{res} * y_{res} * n. \quad (4.18)$$

Aufgrund der Größe bei höheren Auflösungen und der notwendigen Übertragungsgeschwindigkeit kommen hier externe Speicher wie DRAM²⁰ zum Einsatz. Diese stehen auch in üblichen Displaysystem zur Verfügung.

Die Steuerung des Displaypanels übernimmt der Block Sequence Control („Ablaufsteuerung“). Er liest die Daten aus dem Framebuffer. Die notwendigen Steuersignale für das Panel werden erzeugt und mit den Bilddaten synchron zugespielt. Dieser Block übernimmt gleichzeitig das gesamte Timing der Bilderzeugung. Er steuert die Länge der Subframes, die Bildwiederholrate und den Ablauf des Programmiervorgangs der Bilddaten. In kommerziellen Displaysystemen sind diese Funktionen im sogenannten Timing-Controller realisiert, welcher integraler Bestandteil des Displaypanels ist. Um den Prototyp wie hier vorgestellt zu realisieren, ist es daher notwendig, speziell angefertigte Panels zu verwenden, welche direkten Zugriff auf alle Ansteuersignale zulassen.

4.3 Fazit

Wie aufgezeigt, weichen die Anforderungen des digitalen Treiberschemas an ein Display deutlich von denen für ein analoges Treiberschema ab. Aus diesem Grund wurde beschlossen, Panels spezifisch für die zu realisierenden Prototypen anfertigen zu lassen. Um eine einfache Ansteuerung zu ermöglichen, wurden die Panels so designt, dass keine integrierten Spaltentreiber (Bilddaten) zum Einsatz kommen. Die Zeilentreiber sind wahlweise integriert auf dem Displayglas in TFT-Technologie beziehungsweise als diskrete IC auf dem Glas oder auf flexiblen Leiterplatten möglich. Um die Anzahl der Datenleitung zu reduzieren, kann ein Demultiplexer auf dem Displayglas realisiert werden, welcher das Datensignal auf verschiedene Subpixel aufschalten kann. Hier muss jedoch abgewogen werden, ob der hierdurch entstehende Nachteil aufgrund der verkürzten Programmierzeit nicht überwiegt.

Zur Steuerung des Stroms durch die OLED reicht für das digitale Treiberschema eine einfache Pixelschaltung mit zwei Transistoren und einer Kapazität aus. In vorangehenden studentischen Arbeiten (vergleiche unter anderen **Volkert2013**) wurde die Pixelschaltung durch Schaltungssimulation gemäß den Anforderungen des Treiberschemas dimensioniert. Im Vergleich zum analogen Treiberschema wird die Treibfähigkeit des ansteuernden Transistors durch Erhöhung seines Weite- zu Längenverhältnis erhöht. Da es nicht notwendig ist, die den ansteuernden Transistor steuernde Spannung mit hoher Genauigkeit zu programmieren, können sowohl der für die Programmierung verwendete Transistor als auch die zustandsspeichernde Kapazität verkleinert werden. Die Kapazität muss jedoch so groß sein, dass während der Leuchtzeit der die OLED steuernde Transistor im linearen Arbeitsbereich im eingestellten Arbeitspunkt gehalten wird.

²⁰Dynamic Random-Access Memory

Als weitere Randbedingung müssen die Geschwindigkeit begrenzende Faktoren wie RC-Glieder gebildet durch Leitungswiderstände und beispielsweise der Eingangskapazität des ansteuernden Transistors beachtet werden. Diese wurden unter anderem in **Volkert2013** und **Volkert2014** näher betrachtet. Auch können Schaltungskonzepte für den Zeilentreiber nicht direkt von analog angesteuerten Displays übertragen werden, da die Programmiergeschwindigkeit mindestens um den Faktor n der Anzahl der verwendeten Subframes erhöht ist. Einflüsse dieser parasitären Faktoren können durch entsprechende Dimensionierung der Displaykomponenten vermieden oder zumindest gemindert werden.

Mit Visionox (Kunshan, China) und Tianma (Shanghai, China) konnten zwei Hersteller gefunden werden, die Panels mit den geforderten Spezifikationen in geringen Stückzahlen herstellen konnten. Im weiteren Verlauf wird näher auf Details zu diesen Panels eingegangen, die realisierten Prototypen erläutert und die Identifikation und Lösung von Problemen, welche bei der Umsetzung des digitalen Treiberschemas auftraten, behandelt.

5 Technische Realisierung

Ein wichtiger Bestandteil der vorliegenden Arbeit ist die technische Realisierung eines Prototyps eines digital getriebenen AMOLED-Displays, auf welchem Algorithmen die im Zuge dieser Arbeit entwickelt wurden, erprobt und validiert werden können. Dieser muss eine hohe Ansteuergeschwindigkeit besitzen, da bei digitaler Ansteuerung viele Teilbilder je Frame dargestellt werden müssen und es muss ein direkter Zugriff auf die Datenleitungen der Pixel gegeben sein. Der meist integrierte Zeilentreiber muss auch den Geschwindigkeitsanforderungen genügen. Wie zuvor erläutert, gibt es keine am Markt verfügbaren AMOLED-Panel, welche für die digitale Ansteuerung ausgelegt sind, vergleiche Kapitel 4. Zur Realisierung eines ersten Prototyps, mit welchem die prinzipielle Machbarkeit und erste Erkenntnisse hinsichtlich möglicher visueller Artefakte und Herausforderungen des digitalen Treiberschemas erforscht werden sollten, wurden verschiedene kommerzielle Displays auf ihre Ansteuerbarkeit als digital getriebenes Panel untersucht. Mit den gewonnenen Erkenntnissen konnten Displayhersteller von den möglichen Vorteilen des digitalen Treiberschemas überzeugt werden, sodass diese speziell ausgelegte Panel für Prototypen herzustellen bereit waren. Im Folgenden wird die Auslegung und Realisierung der einzelnen Prototypenpanel sowie der notwendige Ansteuerelektronik und des Grafikprozessors detailliert beschrieben.

5.1 Prototyp: Kodak AM550L

Der erste realisierte Prototyp verwendete das erste am Markt verfügbare AMOLED-Display, das Modell AM550L der Firma Kodak. Dieses wurde in einer Digitalkamera eingesetzt. Da Kodak als Pionier im Bereich der AMOLED-Displays selbst auch an digitaler Ansteuerung forschte, war das Panel ein vielversprechender Kandidat, um es möglicherweise digital ansteuern zu können. Dieser Prototyp entstand in Vorarbeiten zur aktuell vorliegenden Arbeit (vergleiche **Volkert2013**) und wird hier nur im Sinne einer vollständigen Darstellung der Entwicklung kurz behandelt. Für eine ausführliche Darstellung sei auf die originale Quelle verwiesen.

5.1.1 Panel

Abbildung 5.2 zeigt das aus der Digitalkamera ausgebaute Display sowie seine Verwendung im Prototyp. Die notwendigen Ansteuersignale wurden durch Analyse der Signale in der Kamera abgeleitet. Das Display verfügt über eine sehr einfache Struktur. Als Pixelschaltung kommt die einfache 2T1C-Schaltung zum Einsatz, siehe Abbildungen

5.1 und 5.3. Diese ermöglicht es, das Display auch digital zu betreiben. Wie in Abbildung 5.1 gezeigt, erfolgt die Zuspiesung der Bilddaten seriell. Die Deserialisierung erfolgt auf dem Panel durch Demultiplexen der externen Datensignale auf die einzelnen Pixel (die drei Grundfarben werden parallel zugespielt), gesteuert durch ein auf dem Displayglas integriertes Schieberegister. Die integrierten Schieberegister sind bis etwa 6 MHz Schaltfrequenz betreibbar. Hierdurch ist die Bildwiederholrate auf etwa 160 Hz begrenzt. Aufgrund der notwendigen Zahl an Subframes ist eine flackerfreie Darstellung digital getriebener Bildinhalte für das menschliche Auge mit einer üblichen Farbtiefe von 8 bit nicht möglich. Es wären flackerfrei nur Bildinhalte mit einer maximalen Farbtiefe von ca. 2 bit darstellbar, was jedoch keine zufriedenstellende Lösung ist.

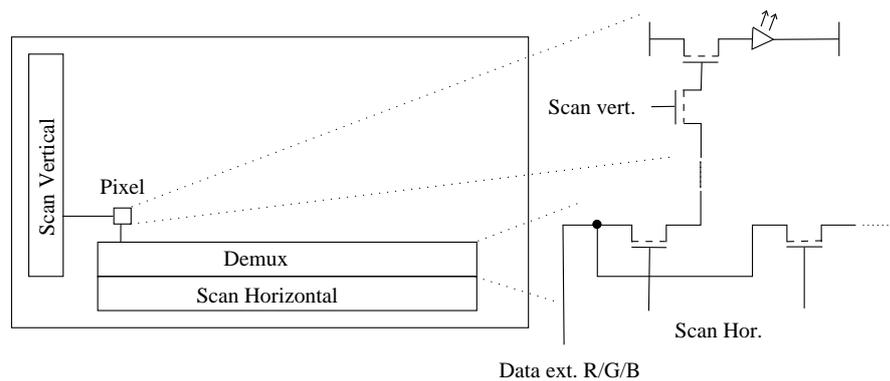


Abbildung 5.1: Struktur des Kodak AM550L AMOLED-Panels.

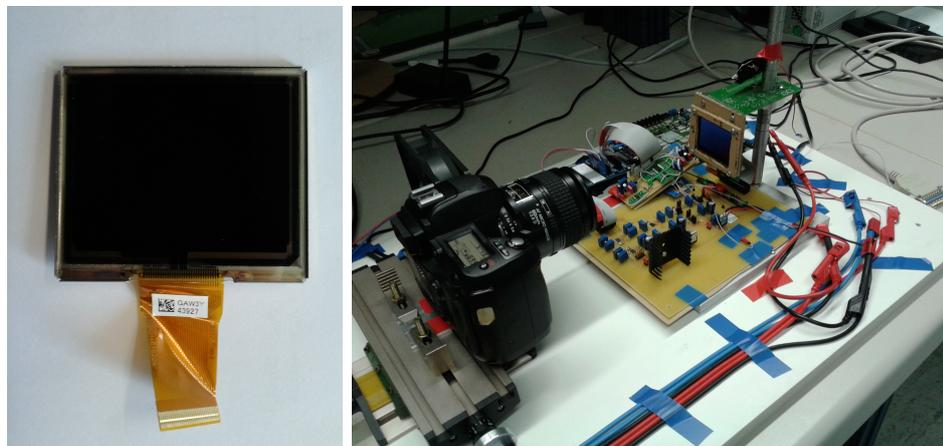


Abbildung 5.2: Kodak AM550L AMOLED-Panel (links) und Verwendung in Prototyp (rechts).

Das Panel verfügt über eine Auflösung von 173×218 Pixeln, die Pixelanordnung ist

eine Delta-Anordnung. Es kommen farbige OLED mit zusätzlichem Farbfilter (erweiterter Farbraum) zum Einsatz, vergleiche Abbildung 5.3.

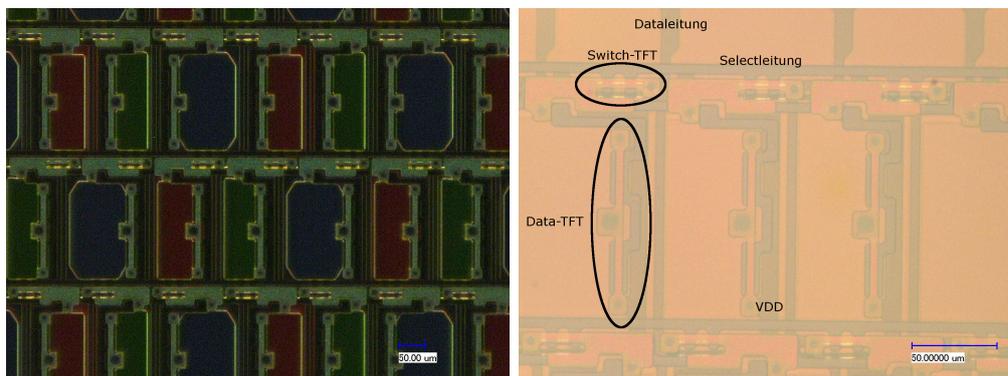


Abbildung 5.3: In Kodak AM550L verwendete Pixelschaltung (links) und Pixelstruktur (rechts).

5.1.2 Visuelle Bewertung

Da durch die geschilderten elektrischen Einschränkungen es nicht möglich ist, das Panel so zu betreiben, dass das Bild für das menschliche Auge nicht mehr wahrnehmbar flackert, war es notwendig, eine alternative Bildauswertung zu realisieren. Es wurde auf eine digitale Fotokamera als Integrator zurückgegriffen. Durch entsprechend lange Belichtungszeiten ist es mit dieser möglich, das Bild über mindestens einen gesamten Satz an Subframes zu integrieren. Mangels Kalibration der Kamera können jedoch keine Aussagen über absolute Werte wie Leuchtdichte und Farbort getroffen werden. Auch Artefakte die durch die menschliche Wahrnehmung entstehen, beispielsweise Konturartefakte, können nicht untersucht werden. Dennoch kann mit diesem System eine gute Vorhersage getroffen werden, wie die grundsätzliche Bildqualität bei einer höheren Bildwiederholfrequenz wäre.

5.1.3 Performance, Resultate

Durch Variation der Datenspannung und der Betriebsspannung konnte gezeigt werden, dass der Prototyp im digitalen Regime arbeitet (der ansteuernde Transistor arbeitet wie vorgesehen im linearen Bereich), vergleiche **Volkert2013**. Leuchtzeit der OLED und gemessene Leuchtdichte¹ zeigen einen guten linearen Zusammenhang. Störende Einflüsse auf die digitale Ansteuerung wie beispielsweise mangelnde Eignung der Pixelschaltung oder ähnliches können daher ausgeschlossen werden.

Da für dieses Display mit der Kamera, aus welcher es entnommen wurde, ein Gesamtsystem zur Verfügung steht, in welchem das Display analog angesteuert wird, konnte

¹Punktuelle Messung mittels Fotospektrometer.

eine Vergleichsmessung der Leistungsaufnahme des analogen relativ zum digitalen Treiberschema vorgenommen werden. In Abbildung 5.4 ist die von der Pixelmatrix (ohne Ansteuerschaltung) aufgenommene Leistung in beiden Fällen dargestellt. Die in der Pixelmatrix umgesetzte Leistung nimmt um mehr als 40% ab. Dies bestätigt die erwartete Energieeinsparung durch Verwendung des digitalen Treiberschemas. Aufgrund der notwendigen höheren Bildwiederholrate müssen jedoch noch kapazitive Verluste und die zusätzliche Leistungsaufnahme der Ansteuerschaltungen betrachtet werden. Da das Display keine digitale Steuerung mit vergleichbarer und visuell sinnvoller Bildwiederholrate zulässt, kann der zusätzlich Energiebedarf nur grob abgeschätzt werden. Die Bildwiederholrate für ein digitales Treiberschema liegt etwa 10 bis 15 mal höher, sodass sich eine Gesamtenergieaufnahme der Pixelansteuerung etwa 10% bis 20% annehmen lässt². Das Einsparpotential des digitalen Treiberschemas wurde entsprechend im Bereich von 20% bis 30% der Energieaufnahme eines vergleichbaren analog angesteuerten Displays abgeschätzt.

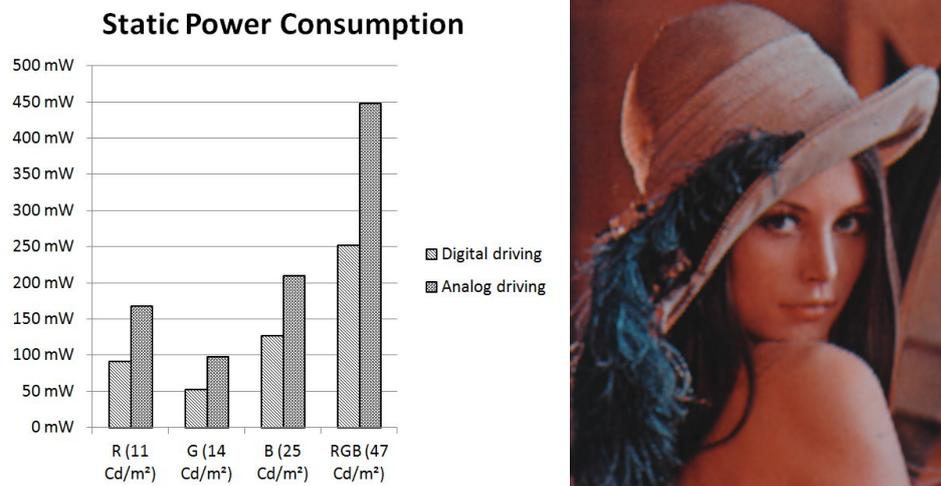


Abbildung 5.4: Vergleich der Energieaufnahme analog und digital(links) und Fotografie eines Testbildes auf Kodak AM550L (rechts).

Mit dem Kodak AM550L Panel konnte somit ein erster Prototyp realisiert werden, mit welchem die Machbarkeit des digitalen Treiberschemas aufgezeigt werden konnte. Dieser

²Dieser Wert ergibt sich aus einer Abschätzung mithilfe aus Datenblättern bekannten Werten. **SamsungMobileDisplay2012** liefert einen Anteil der Pixelansteuerung am Gesamtverbrauch des Displays von etwa 6%, **ChiMeiElCorporation2008** einen Anteil von 1%. Die Abweichung zwischen diesen Werten lässt sich durch effizientere Pixel und eine komplexere Prozessorstruktur des erstgenannten Displays erklären. Da für das analoge Treiberschema die gesamte AD-Wandlung innerhalb des Treibers entfällt und die Datenprozessierung weitestgehend unabhängig von der Bildwiederholrate ist, kann wiederum angenommen werden, dass nur ein Teil der aufgenommenen Leistung linear mit der Bildwiederholrate skaliert. Hieraus ergibt sich die Abschätzung, dass der zu erwartende Anteil der Energieaufnahme der Pixelansteuerung auf maximal 20% der Gesamtenergieaufnahme ansteigt.

war jedoch nur in der Lage statische Bildinhalte darzustellen und, wie erwähnt, nicht mit für die menschliche Wahrnehmung akzeptabler Bildwiederholrate. Das Ergebnis war jedoch so überzeugend, dass aus diesem Grund gemeinsam mit Partnern die Realisierung spezieller Displaypanels für das digitale Treiberschema angestrebt wurde.

5.2 Visionox Panel

Der erste voll funktionsfähige Prototyp entstand in Zusammenarbeit mit der Firma Visionox beziehungsweise deren Forschungsabteilung KSFPD. Beide sind bei Shanghai angesiedelt. Die Spezifikation des Panels entstand in Zusammenarbeit basierend auf den zuvor erläuterten Betrachtungen.

Visionox ist einer der Pioniere der OLED Fertigung in China. Etabliert war bereits die Fertigung von PMOLED-Displays, welche für Anwendungen mit geringerem Anspruch an Auflösung und Graustufendarstellung verwendet werden. Im Bereich der AMOLED versucht Visionox, bereits seit mehreren Jahren Produkte einzuführen. Es wurden verschiedene Prototypen präsentiert, jedoch ging keiner in Serienfertigung. In Zusammenarbeit mit Solomon Systech (Hong Kong, China) wurde ein Treiber für analoge Ansteuerung von AMOLED-Displays entwickelt³, auch hier wurde bis dato kein serienreifes Produkt vorgestellt. Hindernisgründe für die ausbleibende Markteinführung analog angesteuerter AMOLED-Displays sind primär Herausforderungen wie Homogenität, Ausbeute und Lebensdauer der Displays. Die Entwicklung eines digital angesteuerten Prototyps versprach hier eine starke Förderung der Position im Markt und wurde daher gemeinsam mit dem Lehrstuhl für Mikroelektronik, Saarbrücken durchgeführt. Die Grundstruktur des Displaypanels basiert auf einem Entwurf von Visionox unter Verwendung einer 2 Transistor Ansteuerung der OLED. Am Lehrstuhl für Mikroelektronik wurden die Dimensionierung der Schaltungen durch Schaltungssimulation, Tests an Einzelstrukturen des Panels (beispielsweise Geschwindigkeit Zeilentreiber) sowie strukturelle Anpassungen zur Anwendung des digitalen Treiberschemas (Datenzuführung extern, geringe Demux-Tiefe und ähnliches) durchgeführt und Visionox hierdurch bei der Entwicklung unterstützt.

5.2.1 Aufbau

In Abbildung 5.5 ist ein durch Visionox angefertigtes Prototypenpanel gezeigt. Die Fertigung der Panel erfolgte in einer bestehenden Prototypenlinie. Zur Senkung der Kosten wurden Auflösung und grundlegende Panelstruktur von anderen Prototypen übernommen. Die gefertigten Displays besitzen eine Auflösung von $240 \times 320 \times \text{RGB}$ (QVGA). Die Displaydiagonale beträgt 7,1 cm (2,8 inch), womit sich eine Pixelgröße von $180 * 180 (\mu\text{m})^2$ ergibt. Limitierend war hier die Herstellung der für das definierte Abscheiden des OLED-Materials notwendigen Schattenmasken. Die Pixel sind als Bottom-Emission OLED Typen ausgeführt. Dies ermöglicht die Verwendung einer metallisierten

³Vergleiche beispielsweise **Mertens2013**

Rückseite als gemeinsame Kathode der OLED. Hiermit können widerstandsbedingte Spannungsverschiebungen zwischen den Pixeln vermieden werden, vergleiche Abschnitt 4.2.1. Für die Subpixel wurden Emittiermaterialien verwendet, welche das notwendige Farbspektrum für Rot, Grün beziehungsweise Blau emittieren. Es sind daher keine zusätzliche Farbfilter notwendig. Details zu den für die OLED verwendeten Materialien durften nicht offen gelegt werden. Die bekannten Daten zu den OLED sind in Tabelle 5.1 auf Seite 57 zusammengefasst.

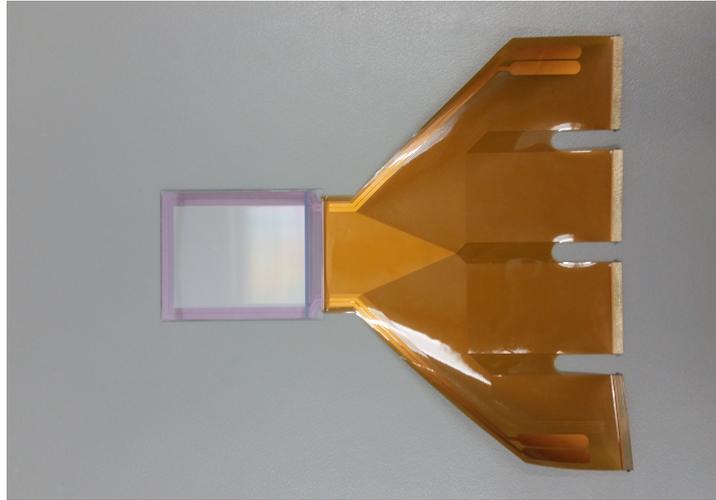


Abbildung 5.5: Durch Visionox angefertigtes Prototypenpanel.

Abbildung 5.6 zeigt eine vereinfachte, funktionsorientierte Darstellung der Displaystruktur. Zusätzliche Bauelemente wie TFT-Dioden als ESD⁴-Schutz wurden hier vernachlässigt. In der verwendeten Prototypenlinie können nur p-Typ LTPS TFT hergestellt werden. Die minimale Gateweite und -länge beträgt $\approx 5 \mu\text{m}$. Der Zeilentreiber des Displays ist in Form eines dynamischen Schieberegisters mit Bufferbausteinen (vergleiche auch Abbildung 5.7 und 5.8) unter Verwendung von TFT-Technologie als GIP⁵ Baustein ausgeführt. Das Schaltbild des Treibers ist in Abbildung 5.7 dargestellt. Die Auslegung des Zeilentreibers erfolgte so, dass eine Zeilenprogrammierzeit von $t_{row} \leq 2 \mu\text{s}$ möglich ist. Die ursprüngliche Spezifikation des Zeilentreibers sah eine Geschwindigkeit von $t_{row} = 40 \mu\text{s}$ vor. Durch Anpassungen der TFT-Dimensionen in den Einzelstufen des Zeilentreibers und durch eine hinreichend große Dimensionierung des Ausgangsbuffers konnte die notwendige Geschwindigkeit erreicht werden. Die Verwendung eines dynamischen Schieberegisters ist hier jedoch nachteilig, da die Funktionalität nur in einem eingegrenzten Frequenzbereich gegeben ist. Zur Realisierung eines statischen Schieberegisters waren jedoch nicht die notwendigen Technologien (CMOS) verfügbar und durch die Anpassung und Optimierung des dynamischen Schieberegisters und dem damit verbundenen Erreichen der gewünschten

⁴Electro Static Discharge

⁵Gate In Panel

Zielfrequenz waren nur geringe Abänderungen bestehender Masken notwendig, sodass die Entwicklungskosten gering gehalten werden konnten.

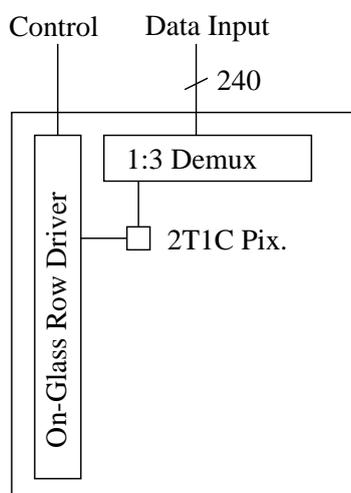


Abbildung 5.6: Struktur des Visionox Panels.

Des Weiteren befindet sich auf dem Glas ein 1 : 3 Demultiplexer zur Verteilung der Datensignale. Durch diesen reduziert sich die Zahl der externen Datenleitungen von 720 auf 240. Ein integrierter Spaltentreiber ist nicht vorgesehen, die Datensignale müssen von einer externen Schaltung generiert werden. Der Demultiplexer ist durch einfache parallele Schalter in Form von Transistoren realisiert. Um den Widerstand im geschalteten Zustand möglichst zu reduzieren, sind hierfür jeweils 12 Transistoren mit $W/L = 20/5$ parallel geschaltet.

Als Pixelschaltung wird die einfache 2T1C Schaltung verwendet. Der Drive-Transistor wird zwischen Anode und positive Versorgungsspannung der OLED geschaltet und steuert somit den Strom durch diese⁶. Gegenüber dem zur analogen Ansteuerung vorgesehenen Display wurden die Transistordimensionen angepasst (vergleiche 4.2.2 und 4.2.3) sowie die Storagekapazität auf 350 fF verkleinert. Durch Simulationen unter Cadence Spectre unter Verwendung der RPI-Modelle für Polysilizium TFT wurde sichergestellt, dass die einzelnen Funktionsblöcke (Pixelschaltung, Zeilentreiber, Demultiplexer) entsprechend der Anforderungen arbeiten. In Abbildung 5.8 ist eine mikroskopische Aufnahme der gefertigten Displaystruktur gezeigt.

Die notwendigen externen Signale werden über einen FPC zugespielt. Hierfür sind 240 Datenleitungen sowie 80 weitere Signal- und Versorgungsleitungen vorgesehen. Die Versorgungsspannungen der Displaymatrix sowie die Ansteuersignale für den Demultiplexer sind zweiseitig ausgeführt, um Spannungsabfälle zu reduzieren beziehungsweise eine hohe Geschwindigkeit des Demultiplexers sicherzustellen. Die wichtigsten technischen

⁶Gängigerweise spricht man hier von einer Highside-Ansteuerung.

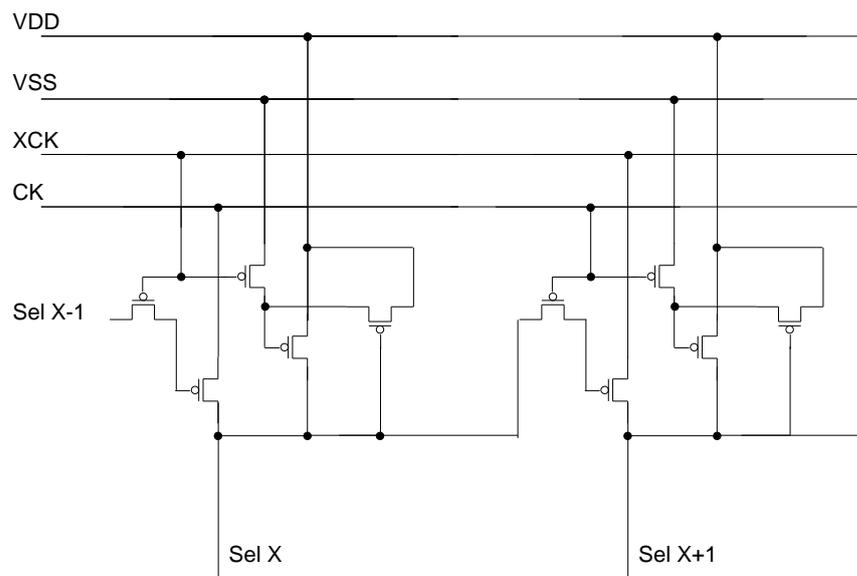


Abbildung 5.7: Schaltbild des auf dem Visionox Panel realisierten Zeilentreibers.

Randdaten des Visionox Prototyps sind in Tabelle 5.1 noch einmal zusammengefasst⁷.

5.2.2 Anwendbarkeit der digitalen Ansteuerung

Die Inbetriebnahme des Panels erfolgte mit der in Kapitel 5.4 beschriebenen Ansteuerhardware unter Verwendung des in Abschnitt 5.4.2 erläuterten Grafikprozessors. Dieser beinhaltete noch keine Verbesserungen hinsichtlich auftretender Artefakte, sodass hier erst nur auf die grundlegende Performance des Systems eingegangen wird. Detaillierte Behandlung visueller Artefakte und Lösungen für diese werden in Kapitel 6 und 7 vorgestellt.

Erste Untersuchungen galten der erreichbaren Geschwindigkeit des Zeilentreibers. Durch Anpassung der Ansteuersignale (erhöhter Phasenunterschied zwischen invertiertem und nicht-invertiertem Takt, Wartezeiten, vergleiche Kapitel 5.4.2) konnte eine stabile Betriebsfrequenz von $f_{SR} \geq 250$ kHz bei einem Hub der Spannungspegel der Selectleitung von mindestens ± 10 V erreicht werden. Der Spannungshub ergibt sich als notwendige Bedingung, um die für einen linearen Betrieb des Drive-Transistors notwendige Datenspannung

⁷Über den Arbeitspunkt bei welchem die gegebenen Effizienzen gemessen wurden wurde durch Visionox keine nähere Angabe gemacht. Die Daten sind daher nicht allgemein gültig für den im Prototypen verwendeten Arbeitspunkt.

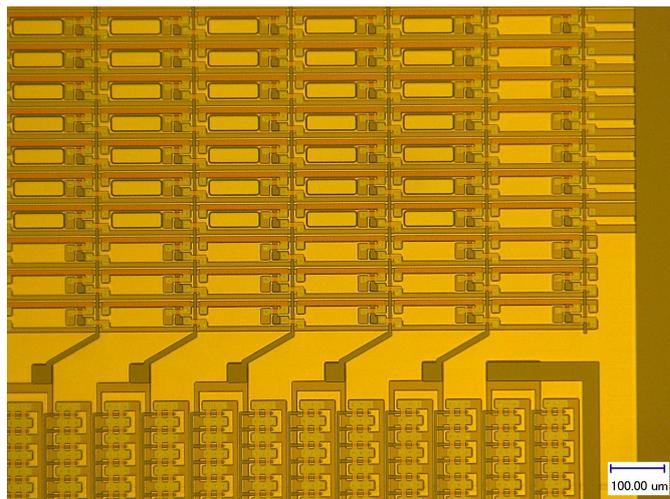


Abbildung 5.8: Mikroskopische Aufnahme der Zeilentreiberbuffer sowie der Pixelstruktur des Visionox Panels.

Parameter	Wert
Auflösung	320 × 240 × RGB (QVGA)
Pixeldichte	141 ppi
Displaydiagonale	7,1 cm (2,8 inch)
Apertur	23,9%
Demultiplexer	1 : 3
TFT	LTPS, PMOS
Threshold-Spannung	-1,5 V
Pixelschaltung	2 TFT, 1 Kapazität
Select-TFT (PMOS)	W = 10 μm, L = 5 μm
Drive-TFT (PMOS)	W = 10 μm, L = 8 μm
Buffer Demultiplexer	W = 120 μm, L = 5 μm
Buffer Zeilentreiber	W = 320 μm, L = 5 μm
Storage-Kapazität	350 fF
Effizienz OLED Rot ⁷	$\eta_{red} = 6 \frac{\text{Cd}}{\text{A}}$
Effizienz OLED Grün ⁷	$\eta_{green} = 17 \frac{\text{Cd}}{\text{A}}$
Effizienz OLED Blau ⁷	$\eta_{blue} = 4 \frac{\text{Cd}}{\text{A}}$

Tabelle 5.1: Technische Daten des Visionox Prototypen.

programmieren zu können. Zur Ermittlung der notwendigen Höhe der Datenspannung, wurde diese variiert und gleichzeitig die Leuchtdichte des Panels vermessen. Das Resultat einer solchen Messung ist in Abbildung 5.9 dargestellt. Aus dieser Messung kann die notwendige Ansteuerspannung bestimmt werden, sodass der TFT so betrieben wird, dass

nur sehr kleine Veränderungen im Strom durch die OLED bei kleinen Abweichungen in der programmierten Spannung auftreten. Zusätzlich kann die Speicherkapazität in der Pixelschaltung verkleinert werden, da über der Zeit nur eine geringere Genauigkeit der programmierten Spannung notwendig ist. Gleichzeitig wird der Einfluss des TFT auf das Leuchtverhalten der OLED minimiert. Insbesondere spielen Schwankungen in der Schwellspannung des TFT keine Rolle mehr, sodass eine hohe Ausbeute trotz des ungenauen LTPS-Prozesses erwartet werden kann.

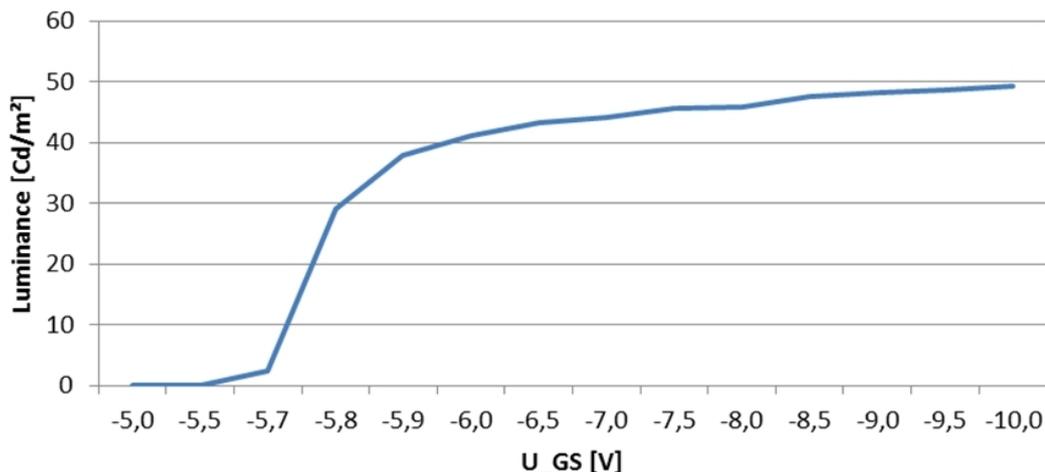


Abbildung 5.9: Abhängigkeit der Leuchtdichte der blauen OLEDs des Visionox Panels vom Pegel der ansteuernden Datenspannung.

Die Gate-Source-Spannung des Drive-Transistors ergibt sich direkt aus dem Pegel des Datensignals durch:

$$U_{GS} = U_{data,low} - V_{DD} \quad (5.1)$$

(vergleiche auch Abbildung 4.1 auf Seite 33). Zu beachten ist, dass bei dieser Messung die Versorgungsspannung der Pixelschaltung ($V_{DD} - V_{SS}$) im Bereich der Flussspannung der OLED gewählt wurde, sodass der Transistor bereits für kleine Ströme im linearen Bereich arbeitet. Es ist zu sehen, dass ab einer Gate-Source-Spannung von $U_{GS} \approx -6$ V die Abhängigkeit von U_{GS} zunehmend kleiner wird. Der Transistor ist hinreichend angesteuert, wodurch sein Einfluss auf den Strom durch die OLED vernachlässigbar wird. Durch die Wahl eines Arbeitspunktes mit $U_{GS,on} = -10$ V und $U_{GS,off} = 8$ V wird für alle Subpixel der lineare Betrieb sichergestellt.

Mit einer Betriebsfrequenz des Zeilentreibers von $f_{SR} \geq 250$ kHz werden für die Programmierung der 320 Zeilen weniger als $640 \mu s$ benötigt. Dies ergibt sich, da der Zeilentreiber jeweils auf der fallenden Flanke des Taktes sowie des invertierten Taktes umschaltet. Die Zeilenzeit entspricht daher der halben Periodendauer. Bei einem Verhältnis der Programmier- zur Leuchtzeit von 1 : 1 können somit 10 Subframes bei einer Bildwiederholrate von 78 Hz erreicht werden.

Um die korrekte Darstellung der Subframes sicher zu stellen, wurde zuerst geprüft, dass die Deaktivierung der Pixel während des Programmierens und die Aktivierung nach erfolgter Programmierung korrekt erfolgt. Hierfür wurde neben dem Verlauf der Spannungen auch der zeitliche Verlauf der Stromaufnahme der Pixelmatrix in der positiven Versorgungsleitung betrachtet⁸. Die dargestellten Subframes aktivieren dabei alle Pixel. In Abbildung 5.10 sind die Verläufe für das längste und das kürzeste Subframe dargestellt.

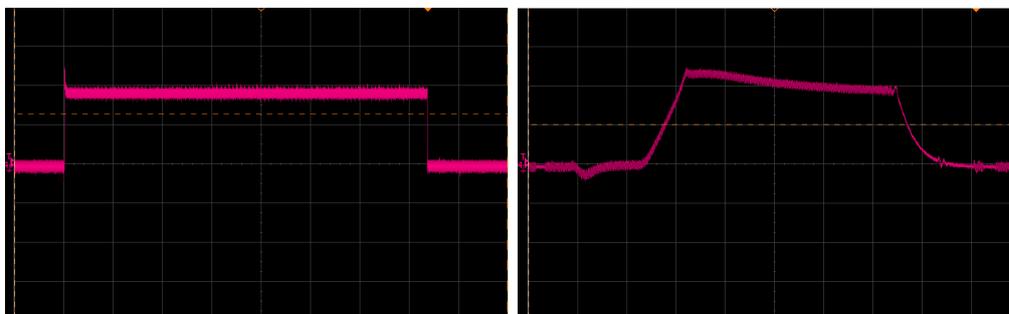


Abbildung 5.10: Zeitlicher Verlauf der Stromaufnahme der Pixel für zwei Subframes (x-Achse: links: 200 $\mu\text{s}/\text{div}$, rechts: 1 $\mu\text{s}/\text{div}$; y-Achse: 100 mA/div).

Zur Umschaltung kommt dabei die in Abschnitt 5.4 beschriebene CMOS-Schaltung zum Einsatz. Wie zu sehen, ist der Verlauf nahe am Ideal. Anstiegs- und Abfallzeiten betragen $\leq 500 \text{ ns}$ ⁹, sodass Subframezeiten $t_{SF} \geq 2 \mu\text{s}$ sicher darstellbar sind.

Zur Prüfung der korrekten Darstellung der einzelnen Subframes wurden Aufnahmen mithilfe einer High-Speed-Kamera angefertigt (FASTCAM SA3 model 120K-M2). Abbildung 5.11 zeigt die Darstellung der ersten vier Subframes eines schwarz-weißen Testbildes. Durch die Messungen konnte gezeigt werden, dass die Homogenität über dem Displaybereich den Erwartungen entspricht und sehr gleichmäßig ist. Die Spitzenhelligkeit der Pixel ist zwischen den Subframes vergleichbar¹⁰ und es zeigt sich keine örtliche Variation aufgrund von ungleichmäßiger Spannungs- oder Stromverteilung über das Display. Hinsichtlich der Reaktionszeit der Pixel verfügt die Kamera nicht über eine hinreichend hohe Framerate bei hoher Auflösung ($\geq 5000 \text{ fps}$ notwendig), jedoch konnte kein unerwartet langsamer Anstieg der Helligkeit beobachtet werden.

Zwei wichtige Parameter zur Beurteilung der visuellen Qualität und Performance eines Displays sind die Leuchtdichte, insbesondere hinsichtlich Ablesbarkeit in hellen

⁸Zur Messung des Stromverlaufs wurde eine resistive Messung mit Verstärkung der Shuntspannung mittels eines INA138 von Texas Instruments realisiert. Die begrenzte Bandbreite des Verstärkerbausteins (für die verwendete Beschaltung: $BW \leq 50 \text{ kHz}$) führt zu einer geringfügigen Verzerrung des Signals.

⁹Diese ergeben sich durch strombegrenzende Eigenschaften des verwendeten Messshunts sowie der Schaltung zur Umschaltung der negativen Versorgungsspannung des Displays. Auch ist die begrenzte Bandbreite und der interne Aufbau des Messverstärkers zu beachten, sodass aus dieser Messung abgeleitete Grenzen eine Worst-Case-Betrachtung darstellen.

¹⁰Im Zuge weiterer Untersuchungen der visuellen Performance muss diese Aussage relativiert werden, sie ist nicht für alle Testbilder gültig. Näheres hierzu vergleiche Kapitel 6.

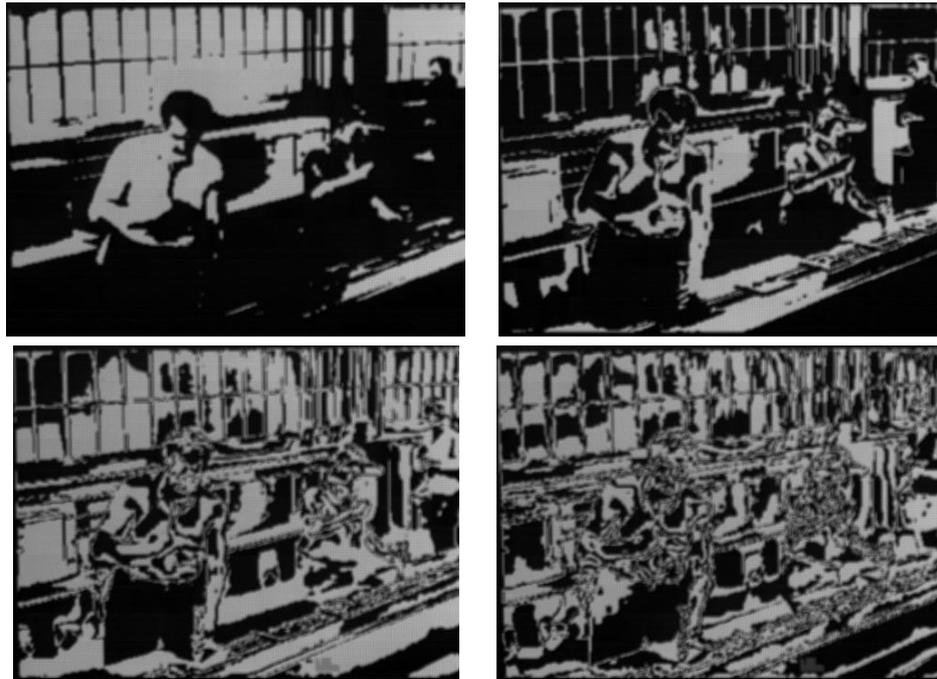


Abbildung 5.11: Highspeed-Aufnahmen der Darstellung der ersten vier Subframes eines Testbildes (Chaplin-Film) auf dem Visionox Panel.

Umgebungen, sowie der darstellbare Farbraum. Zur Beurteilung der Leuchtdichte ist zu beachten, dass das Panel über keinerlei Anti-Reflektions-Beschichtung oder -folien verfügt. Üblicherweise werden hierfür Polfilter eingesetzt¹¹, die jedoch auch das aus dem Display austretende Licht behindern und die Leuchtdichte um etwa 50% reduzieren. Um mit den am Markt verfügbaren Panels vergleichbare Werte zu erhalten¹², wurde eine Leuchtdichte von $400 \frac{\text{Cd}}{\text{m}^2}$ eingestellt. Hierfür ist eine Vorwärtsspannung der OLED von $\approx 5,4 \text{ V}$ notwendig. Aufgrund der Apertur des Displays¹³ und da die Lichtemission nur in der Hälfte der Framezeit stattfindet, ergibt sich eine notwendige effektive Leuchtdichte von $3334 \frac{\text{Cd}}{\text{m}^2}$. Mit einer mittleren Effizienz der Pixel von $9 \frac{\text{Cd}}{\text{A}}$ kann die notwendige Stromdichte in den OLED zu $37,3 \frac{\text{mA}}{\text{cm}^2}$ abgeschätzt werden. Dies entspricht etwa üblichen Grenzwerten für moderne OLED-Materialien, höhere Stromdichten führen

¹¹Es wird ausgenutzt, dass zirkular polarisiertes Licht bei Reflektion seine Chiralität (Händigkeit) wechselt. Wird das eintretende Licht bereits gefiltert, sodass nur eine Chiralität eintreten kann, wird diese nach Reflektion durch den Filter am Austreten gehindert. Identisches Verhalten lässt sich auch erzeugen, wenn lineare Polfilter in Kombination mit einer Viertel-Wellen-Retardationsschicht, welche die lineare in zirkulare Polarisierung wandelt, eingesetzt werden. Dies ist der übliche Weg, um kostengünstig zirkulare Polfilter zu erzeugen. Ein Beispiel hierfür ist die Nokia Clear Black Technologie, vergleiche **Souppouris2012**.

¹²Typisch sind Leuchtdichten im Bereich $200 \frac{\text{Cd}}{\text{m}^2}$ siehe beispielsweise **ChiMeiElCorporation2008**.

¹³Vergleiche Tabelle 5.1.

zu beschleunigter Schädigung des Materials¹⁴. Von höheren Leuchtdichten ist daher für den gegebenen Prototyp abzusehen. Der darstellbare Farbraum eines Displays lässt sich

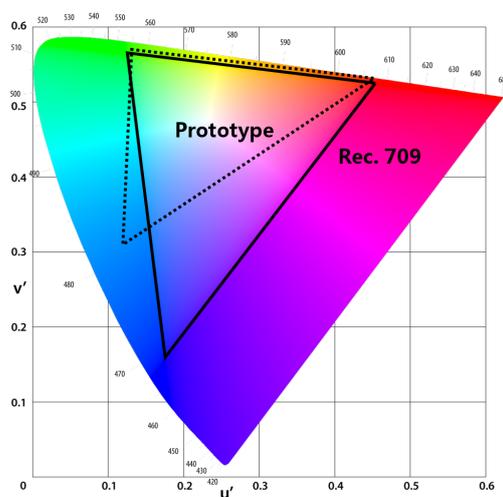


Abbildung 5.12: Vergleich des durch das Visionox-Panel darstellbaren Farbraum mit den Anforderung nach Rec. 709.

über die Farbkoordinaten der Primärfarben, kurz spricht man für diese Vektoren von den Primärvalenzen, bestimmen. In Abbildung 5.12 ist der gemessene Farbraum des Visionox-Panels im Vergleich zum durch Rec. 709¹⁵ geforderten Farbraum dargestellt. Aufgrund der schlechten Lage der blauen Primärvalenz kann nicht der gesamte Farbraum abgebildet werden. Dies muss entsprechend auch für den Weißabgleich des Displays beachtet werden, vergleiche Abschnitt 5.4.2.

Wie in Kapitel 3.2 dargestellt, ist einer der Hauptvorteile der digitalen Ansteuerung die Minderung des Einflusses von Abweichungen in den elektrischen Eigenschaften benachbarter TFT. Insbesondere für auf LTPS basierenden Pixelschaltungen treten hier bei analog angesteuerten Displays deutlich sichtbare Abweichungen in der Helligkeit benachbarter Pixel bei gleichem Grauwert auf. Dies ergibt sich aus der sequentiellen Bearbeitung der TFT im Herstellungsprozess, vergleiche Kapitel 2. Bezug nehmend auf das japanische Wort für Inhomogenität „Mura“ wird dieser Effekt häufig als Mura-Effekt bezeichnet. Für das menschliche Auge ist der Effekt besonders bei niedrigen Leuchtdichten in dunklen Umgebungen wahrnehmbar. Dies ergibt sich aus der höheren Empfindlichkeit des Auges und höheren relativen Unterschieden in diesem Falle.

In den Abbildungen 5.13 und 5.14 ist eine vergleichende Messung der Leuchtdichteverteilung verschiedener Displays bei einer Leuchtdichte von $0,2 \frac{\text{Cd}}{\text{m}^2}$ dargestellt. Bei den Displays der kommerziellen Produkte (Alcatel OneTouch, Samsung Tab 7.7) ist,

¹⁴Eine bekannter Grenzwert der Firma Novaled für ihre Materialien ist $30 \frac{\text{mA}}{\text{cm}^2}$.

¹⁵Dies ist die gängige Spezifikation für High-Definition (HD) Displays.

visuell wie auch in der Messung deutlich die hochfrequente Variation der Leuchtdichte zu erkennen. Für den digital getriebenen Prototyp ist die Leuchtdichteverteilung homogener und es gibt nur eine niederfrequente Variation, welche für das Auge nicht wahrnehmbar ist.

Ein niederfrequenter Anteil in der Leuchtdichteverteilung ist auch für die kommerziellen Displays erkennbar (Alcatel: rechter, oberer Quadrant; Samsung: oberer Rand; Visionox: rechter Rand). In allen Fällen beträgt der absolute Anstieg der Leuchtdichte etwa 15..20%. Durch Analyse des Aufbaus der Geräte beziehungsweise des Panels ließ sich zeigen, dass dieser Anstieg auf Wärmeeintrag durch dritte Komponenten zurückzuführen ist. Im Falle des verwendeten Prototypenpanels befindet sich auf der in Abbildung 5.13 rechten Seite der auf dem Glas integrierte Zeilentreiber. Dessen Verlustleistung führt zu einem Temperaturanstieg dieser Seite von etwa 3.5 °C verglichen zur gegenüberliegenden Seite des Displays¹⁶. Es ist notwendig, diese thermischen Einflüsse zu kompensieren oder durch verbessertes thermisches Management zu vermeiden, vergleiche hierzu Kapitel 6.4. Die übliche Spezifikation der Leuchtdichteveriation über der Fläche bei LCD, welche bis zu $\pm 25\%$ betragen darf, wird jedoch deutlich übertroffen.

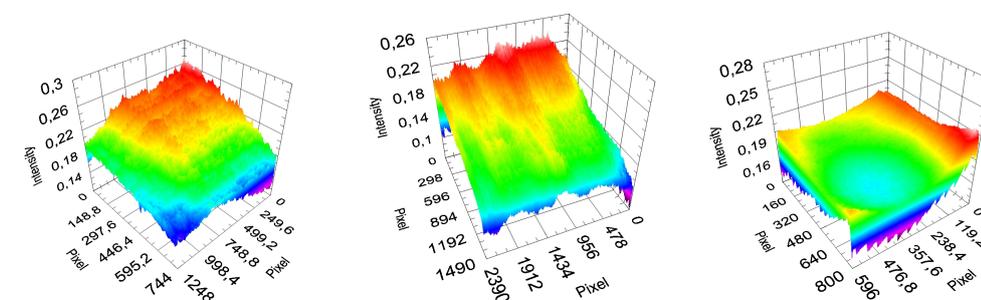


Abbildung 5.13: Vergleich der Homogenität der Leuchtdichteverteilung eines Alcatel Smartphones (links), Samsung Tablets (mitte) und des Visionox-Prototypen (rechts) bei einer Leuchtdichte von $0,2 \frac{\text{Cd}}{\text{m}^2}$.

Mangels eines gleich gebauten Panels mit analoger Ansteuerung lässt sich die propagierte Leistungseinsparung in der Displaymatrix von etwa 50%, vergleiche Kapitel 3.2, für das Visionox Panel nicht durch direkten Vergleich aufzeigen. Aus der Messung der Leistungsaufnahme lässt sich dennoch ein Vergleich mit den Datenblattwerten kommerziell verfügbarer Displays herleiten. Für das Visionox Panel ergibt sich bei einer mittleren Leuchtdichte von $L_{0,Vis} = 300 \frac{\text{Cd}}{\text{m}^2}$ ein Spitzenwert für den Strom je Pixel von $I_{max,pix} \approx 3 \mu\text{A}$ bei einer Versorgungsspannung der Displaymatrix von 5 V. Für die gesamte Pixelmatrix ergibt sich somit eine maximale Leistungsaufnahme von:

$$P_{max} = 320 * 240 * 3 \mu\text{A} * 5 \text{ V} = 1,15 \text{ W}. \quad (5.2)$$

Da durch Nutzung von Leucht- und Programmierzeiten für die Pixelmatrix, vergleiche

¹⁶Vergleiche Abbildung 9.1 im Anhang.

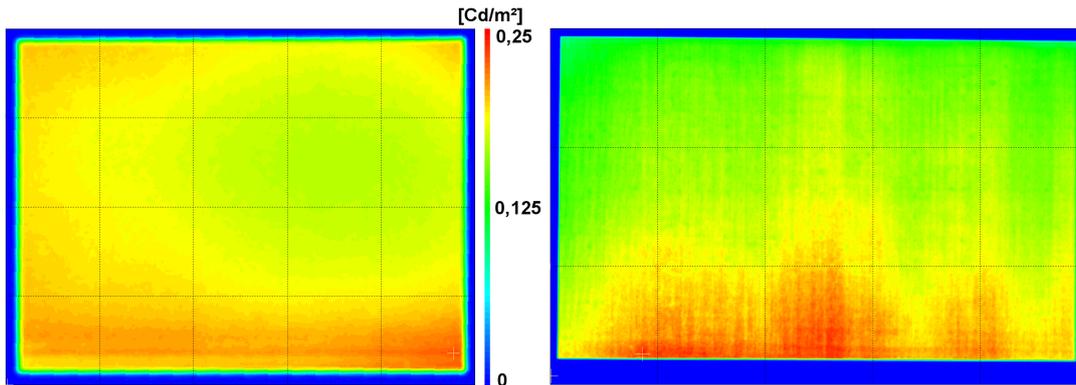


Abbildung 5.14: Leuchtdichteverteilung des Visionox-Prototypen (links) des Samsung Tablets (rechts) und bei einer Leuchtdichte von $0,2 \frac{\text{Cd}}{\text{m}^2}$.

Kapitel 3.2.3, die Pixel nur zeitweise emittieren, muss zur Vergleichbarkeit mit anderen Displays die mittlere Leistungsaufnahme bestimmt werden. Im realisierten Fall beträgt das Verhältnis von Leucht- zu Gesamtzeit 0,316, die mittlere Leistungsaufnahme bei maximaler Leuchtdichte beträgt somit:

$$P_{mean} = 0,316 * P_{max} = 0,36 \text{ W.} \quad (5.3)$$

Aus diesen Daten lässt sich zudem eine Stromeffizienz der Pixelmatrix bestimmen:

$$\eta_{I,tot.,Vis} = \frac{L_{0,Vis} * A_{active,Vis}}{0,316 * 320 * 240 * I_{max,pix}} = 10,25 \frac{\text{Cd}}{\text{A}} \quad (5.4)$$

($A_{active,Vis} = 2488 \text{ mm}^2$, vergleiche Tabelle 5.2) und die Leistungseffizienz zu:

$$\eta_{P,tot.,Vis} = \frac{L_{0,Vis} * A_{active,Vis}}{P_{mean}} = 2,05 \frac{\text{Cd}}{\text{W}}. \quad (5.5)$$

Die so berechnete Stromeffizienz stellt die Effizienz im zeitlichen Mittel dar und ist direkt vergleichbar zu Angaben von Displays mit analoger Ansteuerung. Die visuelle Leuchtdichte $L_{0,Vis}$ enthält den in 5.3 angeführten Faktor 0,316 von Leucht- zu Gesamtzeit, die Spitzenhelligkeit der OLED bei Aktivierung ist entsprechend höher. Zu beachten ist, dass diese Stromeffizienz gegenüber der Effizienz der OLED um die Apertur des Displays¹⁷ verzerrt ist. Um diese Werte mit anderen Displays vergleichen zu können, ist zudem wichtig, dass beim verwendeten Visionox Panel keine Anti-Reflex-Schicht, in der Regel ein Polfilter, aufgebracht ist. Diese lässt nur etwa 50% des emittierten Lichts passieren, sodass zum Vergleich eine Leuchtdichte von $L'_{0,Vis} = 150 \frac{\text{Cd}}{\text{m}^2}$ angenommen wird. Es ergibt sich analog eine geringere Stromeffizienz.

¹⁷Das Verhältnis emittierender Fläche zu Gesamtfläche.

Für die kommerziellen Displays wurden Datenblattwerte¹⁸ verwendet. Unter Annahme einer linearen Abhängigkeit der Leistungsaufnahme und der Leuchtdichte von der Displayfläche¹⁹ wurde eine auf das Visionox Panel skalierte Leistungsaufnahme bestimmt:

$$P_{scale,x} = \frac{A_{active,Vis}}{A_{active,x}} * \frac{L_{0,Vis}}{L_{0,x}} * P_{mean,x}. \quad (5.6)$$

A_{active} beschreibt hier die emittierende Fläche, L_0 die Leuchtdichte. Der Index x steht für das verglichene Display, der Index Vis für das Referenzdisplay von Visionox. Die von den kommerziellen Displays aufgenommene Leistung P_{mean} entspricht gemäß den Datenblättern rein der durch die Pixelmatrix aufgenommenen Leistung. Die für die Prozessierung und Ansteuerung benötigte Leistung ist separat ausgezeichnet. Somit kann ein direkter Vergleich mit der Messung am Visionox-Prototyp erfolgen. Die Ergebnisse werden in Tabelle 5.2 aufgezeigt.

	Visionox	Chi Mei El	Huawei (Samsung)
L_0	150 $\frac{\text{Cd}}{\text{m}^2}$	160 $\frac{\text{Cd}}{\text{m}^2}$	300 $\frac{\text{Cd}}{\text{m}^2}$
A_{active}	2488 mm ²	1798 mm ²	5080 mm ²
P_{mean}	0,36 W	0,86 W	1,75 W
P_{scale}	0,36 W	1,12 W	0,42 W
$\eta_{I,tot.}$	5,12 $\frac{\text{Cd}}{\text{A}}$	3,01 $\frac{\text{Cd}}{\text{A}}$	– $\frac{\text{Cd}}{\text{A}}$ ²⁰
$\eta_{P,tot.}$	1,02 $\frac{\text{Cd}}{\text{W}}$	0,33 $\frac{\text{Cd}}{\text{W}}$	0,87 $\frac{\text{Cd}}{\text{W}}$

Tabelle 5.2: Vergleich des Visionox-Prototypen mit kommerziellen Displays hinsichtlich Leistungsaufnahme, Strom- sowie Leistungseffizienz.

Mit Strom- beziehungsweise Leistungseffizienz steht eine von der Displayfläche und der Pixelstruktur unabhängige Vergleichsgröße zur Verfügung¹⁹. Erwartungsgemäß weist das digital angesteuerte Display die höchste Leistungseffizienz auf. Auch die Werte des Huawei-Displays, welches mit moderneren OLED-Materialien mit geringerer Vorwärtsspannung und höherer Stromeffizienz²⁰ hergestellt wurde, können übertroffen werden. Bei Verwendung ähnlicher Materialien im digital angesteuerten Prototyp, könnte die Effizienz entsprechend weiter erhöht werden. Zudem ist erkennbar, dass die im Prototypen

¹⁸Quelle: **ChiMeiElCorporation2008, SamsungMobileDisplay2012**. Beide verwenden farbig emittierende Materialien für die Subpixel. Im Samsung Display kommt anstelle der klassischen RGB-Stripe Anordnung eine Pentile Anordnung für die Subpixel zur Verwendung.

¹⁹Diese Annahme gilt nur bei einer vergleichbaren Apertur der Displays und einer vom Arbeitspunkt weitgehenden Unabhängigkeit der Stromeffizienz der OLED. Hinsichtlich der Apertur der Displays wurden die einzelnen Pixelstrukturen ausgewertet, die Aufnahmen hierzu finden sich im Anhang, Abbildungen 9.3 und 9.2. Diese sind grob vergleichbar. Für die Stromeffizienz lagen keine Daten vor, somit ist die Vergleichbarkeit eingeschränkt und nur als grober Richtwert zu verstehen.

²⁰Der Wert der Stromeffizienz kann nicht beziffert werden, da das Herstellerdatenblatt nur die Leistungsaufnahme vor Spannungspegelanpassung für die Displaymatrix benennt. Die Höhe der internen Versorgungsspannung ist unklar. Die Leistungseffizienz des Displays kann noch geringfügig höher als der hier errechnete Wert liegen, da Wandlungsverluste nicht berücksichtigt sind. Diese sollten jedoch im Bereich weniger Prozent liegen.

verwendeten OLED-Materialien im Arbeitspunkt der digitalen Ansteuerung eine sehr hohe Effizienz aufweisen. Eine starke Abhängigkeit der Stromeffizienz vom Arbeitspunkt ist typisch für OLED. Nach Aussage von Mitarbeitern eines Materialherstellers für OLED ist es möglich, durch Änderung der Materialzusammensetzung das Optimum des Arbeitspunktes in den gewünschten, hohen Arbeitspunkt zu verschieben. Es wäre damit möglich, die Stromeffizienz noch weiter zu steigern.

Die gezeigten Ergebnisse sind aufgrund der unterschiedlichen Hersteller und Bauformen nicht im gleichen Maße wie die Messungen am identischen Displaytyp, siehe Abschnitt 5.1, direkt vergleichbar. Dennoch zeigt die Auswertung, dass eine Erhöhung der Effizienz in der Pixelmatrix um etwa Faktor 2 realistisch erreicht werden kann, wie auch Messungen am Kodak Display zeigten.

Bei der zuvor erläuterten Betrachtung fehlt der Aspekt des Leistungsbedarfs der Datenprozessierung und der Ansteuerung der Pixelmatrix. Belastbare Messreihen hierzu ließen sich nur erstellen, wenn möglichst identische Displays mit je analoger und digitaler Ansteuerung zur Verfügung stünden. Leider war dies im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht realisierbar, sodass der hier zusätzlich notwendige Leistungsbedarf für ein digitales Treiberschema nur abgeschätzt werden kann. **Volkert2014** zeigt eine Abschätzung, dass trotz zusätzlicher Verluste durch schnelleres Programmieren des Displays insgesamt etwa 30% gegenüber einem analog angesteuerten Display eingespart werden können. Eine nähere Analyse der Datenblätter kommerziell verfügbarer AMOLED Displays zeigt, dass etwa 5% der gesamten Leistungsaufnahmen (bei maximaler Leuchtdichte) für die Ansteuerlogik benötigt werden. Nach Aussage eines Kooperationspartners entfallen hiervon $\approx 70\%$ auf die Digital-Analog-Umwandlung. Skaliert man den verbleibenden Teil mit einem Faktor 15²¹, so ergibt sich für die digitale Ansteuerung einen Bedarf der Logik von etwa 18% des Gesamtleistungsbedarfs des analog angesteuerten Displays. Hiervon ausgenommen ist der erhöhte Prozessierungsaufwand (Zwischenspeicherung) sowie die Verstärkung der Ausgangssignale der Logik zur Ansteuerung der Pixelschaltung. Aber auch diese Abschätzung lässt eine Gesamtersparnis von 20..30% für ein digital angesteuertes Display gegenüber analoger Ansteuerung realistisch erscheinen.

In Abbildung 5.15 ist der gesamte Aufbau zur Ansteuerung des Visionox-Panels gezeigt, sowie die Fotografie eines darauf dargestellten Testbildes, welche die gute Darstellungsqualität zeigt. Im Abschnitt 5.4 wird näher auf die Realisierung der elektrischen Ansteuereinheit eingegangen und in Abschnitt 5.4.2 der implementierte Datenprozessor behandelt. Tabelle 5.3 fasst noch einmal die für einen Betrieb mit einer Leuchtdichte von etwa $300 \frac{\text{Cd}}{\text{m}^2}$ verwendeten Spannungslevel zusammen.

5.2.3 Verbesserungsmöglichkeiten

Wie zuvor angesprochen, zeigt die niedrige Stromeffizienz der Pixelmatrix, dass die OLED nicht im optimalen Arbeitspunkt betrieben werden. Zur Verbesserung sollten

²¹Programmierte Anzahl an Subframes anstelle eines Frames.

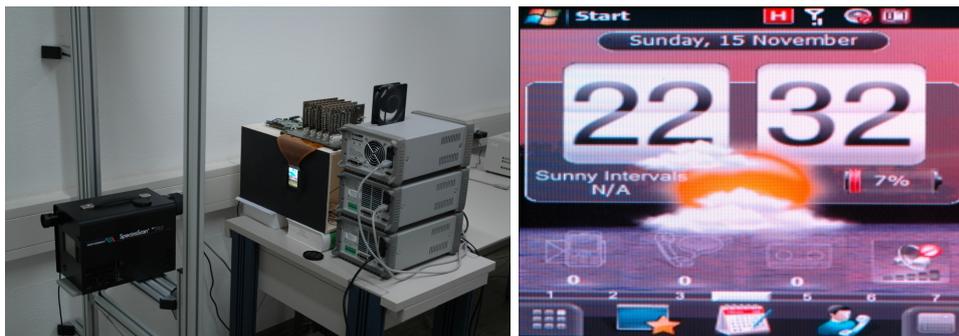


Abbildung 5.15: Gesamtaufbau zur Ansteuerung des Visionox-Panels (links) und ein vom Panel abfotografiertes Testbild (rechts).

Signal	Pegel
V_{DD}	5 V
V_{SS}	0 V
V_{GH}	12 V
V_{GL}	-12 V
$V_{Data,H}$	8 V
$V_{Data,L}$	-8 V

Tabelle 5.3: Spannungspegel zur Ansteuerung des Visionox Prototypen.

die OLED-Materialien entsprechend angepasst werden. Auch wären Materialien mit einer höheren Gesamteffizienz sowie verbesserten Farbkoordinaten wünschenswert. Durch Realisierung einer getrennten Spannungsversorgung für die Primärfarben, könnte jede Farbe in getrennten Arbeitspunkten betrieben werden. Dies würde den Weißabgleich vereinfachen sowie die Effizienz potenziell erhöhen.

Durch Verwendung eines CMOS basierten, auf dem Glas integrierten Zeilentreibers könnte dessen Verlustleistung deutlich gesenkt und somit eine geringere thermische Beeinflussung der Leuchtdichteverteilung des Displays erreicht werden. Zudem könnten hiermit höhere Programmiergeschwindigkeiten realisiert werden, um höhere Bildwiederholraten oder eine höhere Anzahl an Subframes darstellen zu können. Dies vermeidet²² zudem auf dem einfachen Prototyp wahrnehmbare Konturen. Starke Reflektionen des Umgebungslichts können durch Aufbringen einer entsprechenden Anti-Reflex-Schicht gemindert werden.

Insgesamt zeigt sich, dass die angestrebten, vorhergesagten Vorteile hinsichtlich Energiebedarf und Darstellungsqualität bei Verwendung einer einfachen Pixelstruktur und somit geringen Fertigungskosten erreicht werden können. Auftretende Artefakte und deren Vermeidung werden in Kapitel 6 näher behandelt. Durch Fertigung eines zwei-

²²Vergleiche Kapitel 6.

ten Prototypen-Panels bei Tianma konnten erste Verbesserungsmöglichkeiten bereits umgesetzt werden. Im Folgenden wird dieses Panel kurz vorgestellt.

5.3 Tianma

In Zusammenarbeit mit der Firma Tianma (Shanghai, China) konnte ein zweiter Prototyp zur Ansteuerung mit dem digitalen Treiberschema realisiert werden. Um auf beiden Seiten die notwendigen Änderungen und damit Kosten gering zu halten, wurde auf einen bestehenden Entwurf für ein 1,5 inch AMOLED Display zurückgegriffen. Es wurde eine externe Kontaktierung vorgesehen, die den Spaltentreiber ersetzt. Hierbei wurde eine zum Visionox Panel vergleichbare Flex-PCB²³ Lösung verwendet, sodass auch an der Ansterelektronik nur geringfügige Änderungen vorgenommen werden mussten. Im Vergleich zum Prototypen von Visionox wurden einige Verbesserungen implementiert. Das Panel verfügt über einen Zeilentreiber, welcher eine deutlich höhere Ansteuergeschwindigkeit zulässt. Die Pixeldichte entspricht der moderner Displays und es kommen verbesserte OLED-Materialien zum Einsatz. Zur weiteren Verbesserung der Bildqualität verfügt das Display über eine Anti-Reflex-Schicht. Hiermit ist das Display deutlich näher an einem fiktiven Zielsystem und ermöglicht so weitere Untersuchungen zur Eignung des digitalen Treiberschemas.

5.3.1 Aufbau

Abbildung 5.16 zeigt eine Fotografie des realisierten Panels. Es handelt sich hier um



Abbildung 5.16: Das gemeinsam mit Tianma realisierte 1.5 inch (3,81 cm) Panel.

²³Printed Circuit Board

ein Panel, welches beispielsweise für eine Smartwatch eingesetzt werden kann. Die Displaydiagonale beträgt 3,81 cm, die Displayauflösung 320 px * 320 px. Die technischen Daten, soweit bekannt und freigegeben, sind in Tabelle 5.4 zusammengefasst.

Parameter	Wert
Auflösung	320 × 320 × RGB
Pixeldichte	302 ppi
Displaydiagonale	3,8 cm (1,5 inch)
Apertur	≈ 40%
Demultiplexer	1 : 6
TFT	LTPS, CMOS
Pixelschaltung	2 TFT, 1 Kapazität
Select-TFT (NMOS)	$W = 5 \mu\text{m}, L = 8 \mu\text{m}$
Drive-TFT (NMOS)	$W = 7,75 \mu\text{m}, L = 5 \mu\text{m}$
Storage-Kapazität	180 fF

Tabelle 5.4: Technische Daten des Tianma Prototypen.

Die hohe Apertur kann erreicht werden, da Tianma eine Top-Emission-Struktur verwendet. Bei dieser liegt die Pixelschaltung unter der emittierenden Fläche der OLED. Durch verbesserte OLED Materialien wird ein größerer Farbraum abgedeckt. Dieser ist in Abbildung 5.17 dargestellt. Die höhere Pixeldichte entspricht dem aktuellen Stand der Technik, sodass eventuell auftretende visuelle Artefakte aufgrund dieser beobachtet werden können sollten. Um trotz der geringen Displaydimensionen eine externe Kontaktierung der Datenleitungen zu ermöglichen, wurde ein 1 : 6 Demultiplexer auf dem Glas integriert. Auch der Zeilentreiber wurde integriert hergestellt. Jedoch kommt hier eine CMOS Struktur zum Einsatz, womit sich höhere Programmiergeschwindigkeiten erreichen lassen und durch bessere Schaltgeschwindigkeit die kürzere Adressierzeit aufgrund des Demultiplexers teilweise kompensiert werden kann.

Als Pixelschaltung wurde wieder eine kostengünstige und einfache Schaltung aus zwei Transistoren und einer Kapazität hergestellt. Diese ist in Abbildung 5.18 gezeigt. Ursprünglich war ein High-Side p-Typ Treiber geplant, final umgesetzt wurde von Tianma aus fertigungstechnischen Gründen ein High-Side n-Typ Treiber. Dies ist für das digitale Treiben nicht die ideale Beschaltung, kann durch Anpassung der Pegel jedoch auch genutzt werden. Die Verwendung zweier TFT in Serie zum Programmieren der Datenspannung wird bei analoger Ansteuerung genutzt, um Leckströme zu mindern und hiermit fehlerhafte Darstellung auch bei niedriger Framerate und kleiner Speicherkapazität zu verhindern. Für die digitale Ansteuerung ist dies nicht notwendig da stets eine hohe Framerate angewendet wird und die Framezeiten deutlich kürzer sind. Jedoch wurde, um Kosten zu mindern, die ursprüngliche Struktur beibehalten. In Abbildung 5.19 ist die realisierte Pixelstruktur einmal von der Vorder- und einmal von der Rückseite abgebildet.

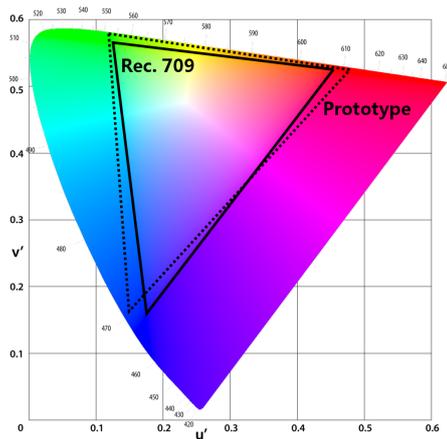


Abbildung 5.17: Auf dem Tianma Panel darstellbarer Farbraum.

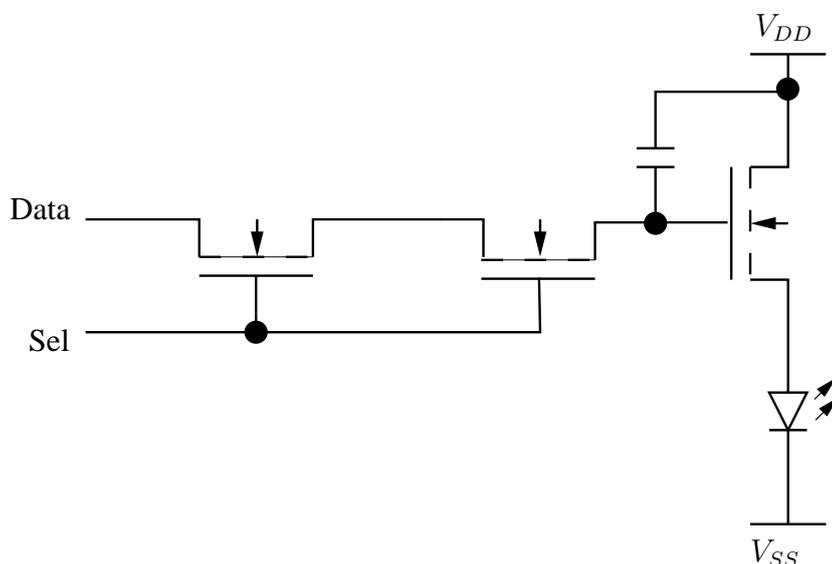


Abbildung 5.18: Pixelschaltung des Tianma Panels.

5.3.2 Anwendbarkeit der digitalen Ansteuerung

Die ansteuernden Spannungen wurden analog zu dem Verfahren wie beim Visionox Prototyp erläutert festgelegt. Ab einer Gate-Source-Spannung $U_{GS} > 7 \text{ V}$ befindet sich der die OLED ansteuernde TFT im linearen Bereich, sodass eine weitere Erhöhung dieser Spannung nur noch geringfügigen Einfluss hat. Um eine Leuchtdichte von $150 \frac{\text{Cd}}{\text{m}^2}$ zu erreichen, ist eine Flussspannung für die OLED von $\approx 5 \text{ V}$ notwendig. Hier ist zu

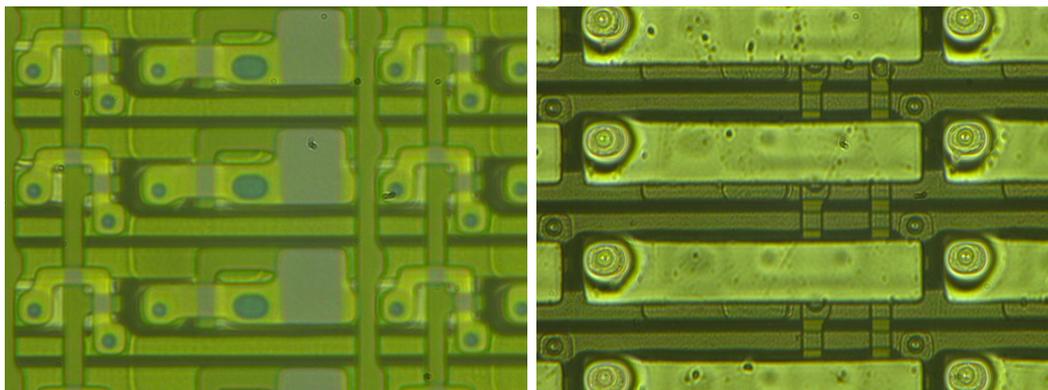


Abbildung 5.19: Pixelstruktur des Tianma Panels von Rückseite (links) und Vorderseite (rechts).

beachten, dass auf den Displays eine Anti-Reflex-Beschichtung in Form eines Polfilters angebracht ist.

Das Display weist eine sehr hohe Effizienz auf. Mit einer Versorgungsspannung von $V_{DD} - V_{SS} = 6,5 \text{ V}$ wird eine Leuchtdichte von $280 \frac{\text{Cd}}{\text{m}^2}$ bei einem gemittelten Strom von 8.3 mA erreicht. Hieraus ergibt sich eine Stromeffizienz des Gesamtsystems von $\eta_{I,tot.,Tianma} = 24,4 \frac{\text{Cd}}{\text{A}}$ beziehungsweise eine Leistungseffizienz von $\eta_{P,tot.,Tianma} = 3,7 \frac{\text{Cd}}{\text{W}}$. Diese Werten übertreffen die zuvor gemessenen Werte, vergleiche Tabelle 5.2, deutlich und sind auf die verbesserten OLED Materialien im Display zurückzuführen. Gleichzeitig weisen diese aber eine hohe Anfälligkeit für Alterung und Fertigungseinflüsse auf.

Die Leuchtdichteverteilung bei Verwendung der digitalen Ansteuerung entspricht den Erwartungen. Abbildung 5.20 zeigt die gemessene Leuchtdichteverteilung bei einem niedrigen Grauwert. Deutlich zu sehen ist eine Handschrift. Diese entspricht den Beschriftungen der Panel welche sich auf der Rückseite des Panels befindet. Auch noch nachdem sie entfernt wurde ist sie im Bild sichtbar. Im Zuge der Prozessierung muss es durch diese Beschriftung zu Abweichungen in den Eigenschaften der OLED gekommen sein. Dies erklärt laut Hersteller auch die Abnahme der Leuchtdichte hin zum oberen Rand des Displays. Eine detaillierte Fehlersuche steht derzeit noch aus.

Der integrierte Zeilentreiber befand sich bei dieser Messung auf der linken Seite des Displays. Im Vergleich zur Leuchtdichteverteilung beim Visionox-Prototypen, siehe Abbildung 5.13 auf Seite 62, ist zu erkennen, dass vom Zeilentreiber keine thermische Beeinflussung der Leuchtdichte ausgeht. Durch Verwendung einer CMOS Struktur kann der Zeilentreiber bis etwa 1 MHz betrieben werden, ohne dass er durch seine Verlustleistung das Display messbar erwärmt²⁴. Darüber hinaus tritt eine zunehmende Erwärmung ein. Stabiler Betrieb konnte bis 2 MHz erreicht werden, welcher zur Ansteuerung des Displays benötigt wird.

²⁴Vergleiche Abbildung 9.4 im Anhang.

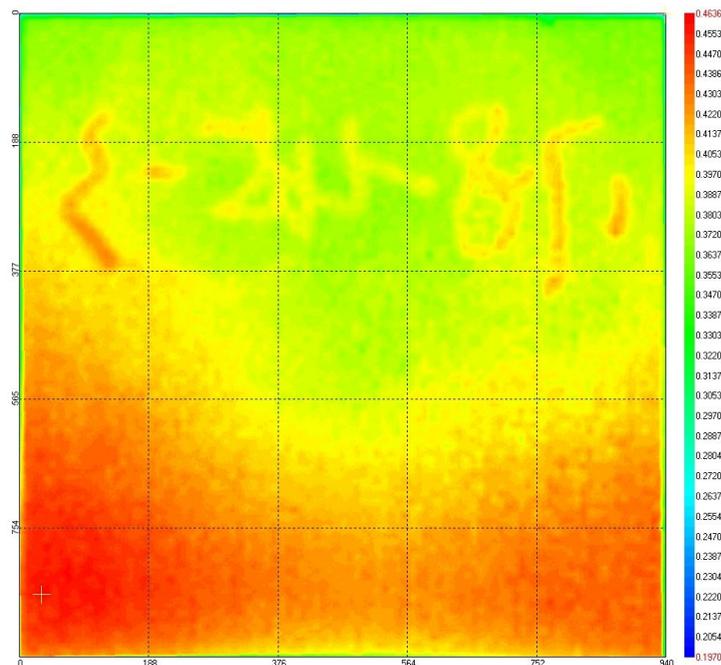


Abbildung 5.20: Gemessene Verteilung der Leuchtdichte für den Tianma Prototyp. Die Leuchtdichtewerte sind in Cd/m^2 angegeben.

In Abbildung 5.21 sind Fotografien der Darstellung zweier Testbilder auf dem Tianma Prototyp gezeigt. Es wurde eine gute visuelle Qualität erreicht. Die im Vergleich zum Visionox Prototypen etwas höhere Programmiergeschwindigkeit lässt es zu, die Bildwiederholrate weiter zu erhöhen, sodass sich insbesondere für bewegte Bilder Vorteile in der Darstellung ergeben. Auf die visuelle Performance im Allgemeinen und Methoden zur Behebung von Artefakten beziehungsweise zur Verbesserung der Bildqualität wird in Kapitel 6 näher eingegangen.

Eine Übersicht über die verwendeten Spannungspegel für eine Ansteuerung mit etwa $260 \frac{\text{Cd}}{\text{m}^2}$ findet sich in Tabelle 5.5. Die im Vergleich zum Visionox-Prototypen erhöhte Leuchtdichte wurde zusammen mit dem Hersteller festgelegt.

5.3.3 Verbesserungsmöglichkeiten

Nachteile beziehungsweise Probleme bestehen bei diesem Panel hauptsächlich in der Pixelstruktur und beim Demultiplexer. Die Verwendung eines Highside n-Typ TFT verlangt positive Signalpegel deutlich über der Anodenspannung der OLED und macht die Ansteuerung sensitiv für Änderungen in der Flussspannung der OLED. Durch Verwendung eines Lowside n-Typ Schalters würden diese möglichen Probleme vermieden.

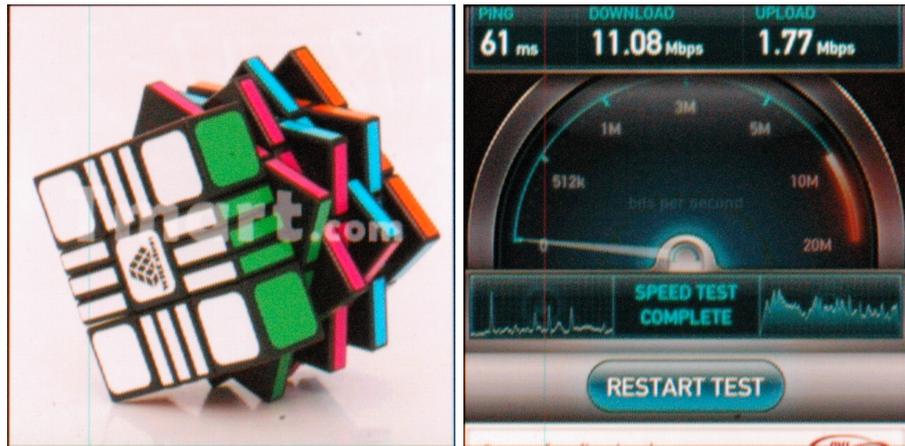


Abbildung 5.21: Auf dem Tianma Panel dargestellte Testbilder. Die vertikale blaue Linie ist ein Defekt in der Displaystruktur.

Signal	Pegel
V_{DD}	1,5 V
V_{SS}	-4V
V_{GH}	12 V
V_{GL}	-12 V
$V_{Data,H}$	10 V
$V_{Data,L}$	-5 V

Tabelle 5.5: Spannungspegel zur Ansteuerung des Tianma Prototypen.

Um die Programmierzeiten weiter zu verringern, sollte ein einzelner TFT statt zwei serieller für das Durchschalten der Programmierspannung an den ansteuernden TFT verwendet werden. Hierdurch sinkt die kapazitive Last für den Zeilentreiber, was zusätzlich auch dessen Verlustleistung verringert. Auch sollte der Demultiplexer auf ein Verhältnis von 1 : 3 verringert werden. Dies ist bei Verwendung eines integrierten (Chip on Glass) Spaltentreibers leicht möglich. Hierdurch lässt sich die Programmiergeschwindigkeit weiter erhöhen, um höhere Bildwiederholraten zu erreichen. Diese ermöglichen wiederum höhere Farbtiefen und komplexere Kompensationsansätze. Neben der Geschwindigkeit des Zeilentreibers ist auch die hinreichend schnelle Zuspiegelung der Daten begrenzend für die maximal erreichbare Bildwiederholrate. Im folgenden Kapitel wird die realisierte Ansteuerelektronik näher behandelt, welche diese Aufgabe übernimmt und somit das Äquivalent zu einem typischen Spaltentreiber darstellt.

5.4 Ansteuerelektronik

Zur Ansteuerung der Spalten, über welche die Datenspannungen in die Pixelschaltungen programmiert werden, dient üblicherweise ein auf dem Glas oder Flex-PCB als Chip integrierter Spaltentreiber. Dediziert zur digitalen Ansteuerung von AMOLED Displays konzipierte Bausteine sind nicht verfügbar. Aus diesem Grund wurde die Verwendbarkeit von Treiberbausteinen, welche für LCD oder analog angesteuerte AMOLED verwendet werden, geprüft. Diese können quasi-digital betrieben werden, sind jedoch nur für Bildwiederholraten von typischerweise maximal 120 Hz vorgesehen. Hiermit wäre keine flackerfreie Darstellung mit hinreichender Farbtiefe auf dem digital getriebenen AMOLED Display möglich, da bei digitaler Ansteuerung ein Bild aus beispielsweise 10 Teilbildern erzeugt wird und somit die effektive Bildwiederholrate nur 12 Hz betragen würde. Aus diesem Grunde wurde auf einen integrierten Spaltentreiber verzichtet und eine komplett externe Lösung realisiert. Auf dem Display befindet sich lediglich ein Demultiplexer (vergleiche Kapitel 5.2 und 5.3), um die Anzahl externer Datenleitungen zu reduzieren.

Ziel war es, den Aufbau möglichst kostengünstig und flexibel zu gestalten, sodass verschiedene Prototypen-Panel damit angesteuert werden können. Aus diesem Grund wurde das Konzept aufgeteilt in einen Schnittstellenwandler, dessen primäre Aufgabe die Umsetzung der Daten für das Panel ist und in einen Grafikprozessor, welcher die gesamte Datenverarbeitung übernimmt.

5.4.1 Schnittstellenwandler

Abbildung 5.22 zeigt ein Blockschaltbild des Schnittstellenwandlers. Dieser lässt sich grob in zwei Untereinheiten aufteilen, die Hauptplatine und die Verstärkerkarten. Vom FPGA werden verschiedene Steuerleitungen und die Displaydaten zugespielt. Die für das Display notwendigen Steuersignale²⁵ werden parallel übertragen, die Übertragung der Bilddaten erfolgt serialisiert. Somit ist es möglich, die Anzahl der Verbindungen zwischen FPGA und Schnittstellenwandler klein zu halten. Auch die Steuersignale könnten serialisiert übertragen werden. Hier verfügten die in Frage kommenden FPGA-Boards jedoch über hinreichend Anschlüsse, sodass dies nicht notwendig war. Ein serielles Interface für die Daten entspricht auch den üblichen Realisierungen in kommerziellen Displaysystemen und ermöglicht bei eventueller Weiterentwicklung eine leichte Umsetzung der Struktur in einem integrierten Baustein. Gleichzeitig vereinfacht es das Routing der Platine deutlich und senkt somit die Kosten. Randbedingung war es die Prototypen mit einfachen, zweilagigen Platinen, welche auch vor Ort gefertigt werden können, zu realisieren. Des Weiteren sind FPGA mit einer hohen Zahl an Ausgängen sehr kostenintensiv und zur Kontaktierung werden in der Regel anwendungsspezifische Platinen benötigt. Mit Verwendung einer seriellen Schnittstelle konnte hier ein sehr günstiges, kleines FPGA verwendet werden, vergleiche Abschnitt 5.4.2.

²⁵Je nach Ausführung etwa fünf bis zwölf.

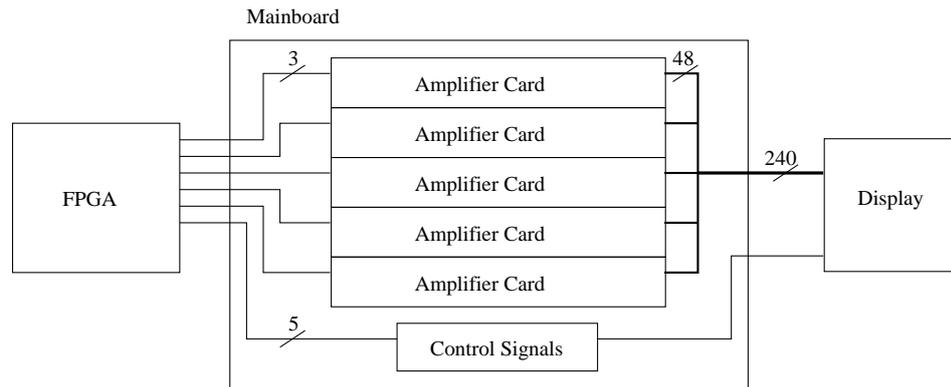


Abbildung 5.22: Blockschaltbild des Schnittstellenwandlers.

5.4.1.1 Hauptplatine

Die Hauptplatine, siehe Abbildung 5.23, dient vorwiegend der Signalverteilung sowie als Träger der Verstärkerkarten. Zusätzlich beinhaltet sie Verstärker²⁶ für die Steuersignale des Displays und Spannungsregler zur Erzeugung der verschiedenen notwendigen Zwischenspannungen. Um den Aufbau möglichst mobil zu gestalten, können alle Zwischenspannungen aus zwei externen Spannungen ($\pm 15\text{ V}$) generiert werden. Hierfür werden lineare Spannungsregler wie beispielsweise LM317²⁷ eingesetzt. Diese weisen im Vergleich zu Schaltreglern je nach Ausgangsspannung und Last einen deutlich niedrigeren Wirkungsgrad auf. Sie wurden in dieser Anwendung jedoch zur Vermeidung von Störeinflüssen und daraus folgenden EMV²⁸-Problemen sowie wegen der einfacheren Beschaltung und höheren Flexibilität eingesetzt.

Darüber hinaus enthält die Hauptplatine eine Einheit zur Umschaltung der negativen Versorgungsspannung (V_{SS}) des Displays. Wie in Kapitel 3.2.3 erläutert, wird während der Programmierphasen die Displaymatrix deaktiviert, sodass keine Lichtemission stattfindet. Hierfür dient eine einfache CMOS Push-Pull-Stufe, welche in dieser Zeit die displayinterne negative Versorgungsspannung von der externen abtrennt und mit der positiven Versorgungsspannung kurzschließt. Durch das Kurzschließen werden die internen OLED Kapazitäten sowie parasitäre Kapazitäten gezielt entladen, sodass das Display vor jedem Subframe in einem definierten Zustand und die Subframelänge festgelegt ist. Die in den Kapazitäten gespeicherte Energie wird hierbei in Wärme umgesetzt. Alternativ wäre auch eine hochohmige Entladung der negativen Versorgungsspannung des Displays zu den Programmierzeiten möglich. Dies führt jedoch zu Nachleuchten und einer Zustandsabhängigkeit des Emissionsverhaltens, welche zu Bildartefakten führen kann. Am Lehrstuhl

²⁶Die Beschaltung dieser ist identisch zur Beschaltung auf den Verstärkerkarten.

²⁷Datenblatt: **LM317**.

²⁸Elektromagnetische Verträglichkeit

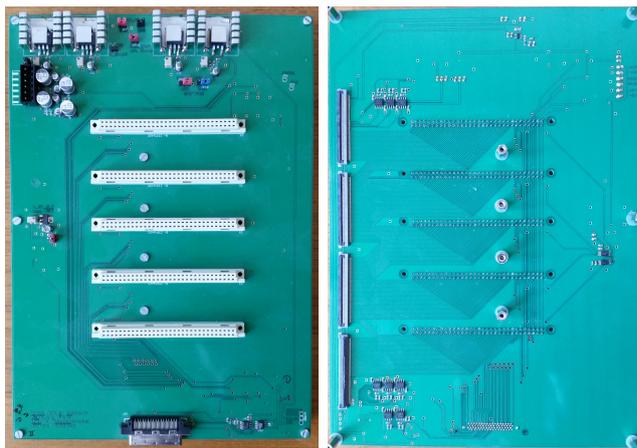


Abbildung 5.23: Vorder- und Rückseite der Hautplatine.

für Mikroelektronik wurde eine Methode entwickelt, diese Abhängigkeit für PMOLED Displays zu berechnen und auszunutzen, vergleiche **Codrea2015**. Eine Übertragung der Methode auf AMOLED Displays ist zu prüfen. Zur Umsetzung des Steuersignals des FPGA für die Push-Pull-Stufe dienen zwei Pseudo-NMOS bzw. Pseudo-PMOS Inverter.

Die Verteilung der eingehenden Datensignale auf die Verstärkerkarten erfolgt rein passiv. Lediglich der zugehörige Takt wird mittels eines PLL²⁹-Taktpuffers gepuffert, um die Karten möglichst voneinander zu entkoppeln und Quereinflüsse zu mindern. Als Steckverbinder wurden hinsichtlich Robustheit, Verfügbarkeit, Leitungsanzahl und Kosten Verbinder nach EN60603-2 ausgewählt. Für hohe Frequenz > 10 MHz sind diese nur bedingt geeignet, typischerweise werden sie in Frequenzbereichen bis 3 MHz eingesetzt. Versuche zeigten aber, dass sie die Anforderungen des Prototyps erfüllen.

5.4.1.2 Verstärkerkarten

In Abbildung 5.24 ist der Aufbau der Verstärkerkarten als Blockschaltbild dargestellt. Zur Deserialisierung der Daten dient ein Schieberegister mit einem integrierten Speicherregister³⁰. Hiermit ist es möglich gleichzeitig, während Daten programmiert werden, Daten für den nächsten Programmiervorgang zu übertragen. Die Geschwindigkeitsanforderungen an den seriellen Datenstrom ergeben sich aus den Programmierzeiten einer Zeile. Für den typischen Betrieb mit 100 Hz Bildwiederholrate, einer Darstellung von 13 Subframes und hälftiger Programmier- beziehungsweise Leuchtzeit ergibt sich für die Prototypen mit 320 Zeilen nach Gleichung 4.12 eine Programmierzeit je Zeile von $t_{row} = 1,2 \mu s$. In

²⁹Phase Locked Loop

³⁰Verwendet wurden Schieberegister vom Typ 74HC595.

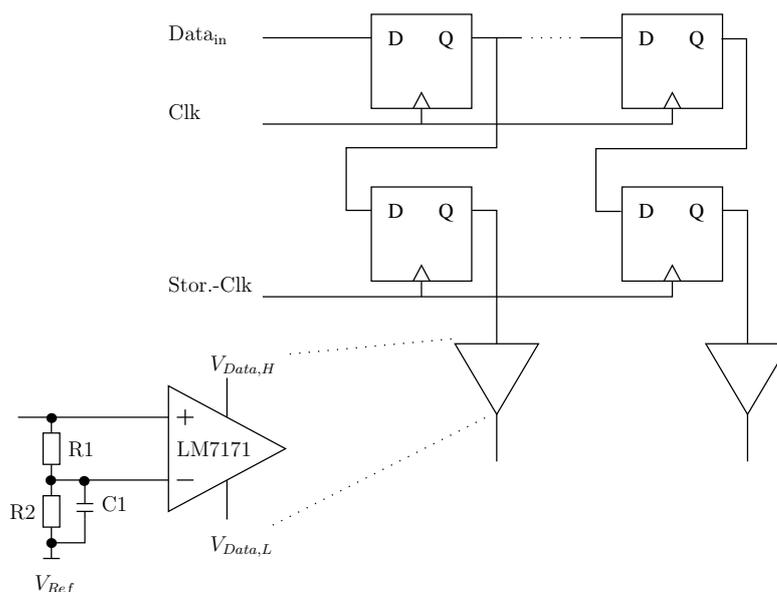


Abbildung 5.24: Blockschaltbild der Verstärkerkarten.

dieser Zeit müssen 3 beziehungsweise 6 Datensignale³¹ geschrieben werden. Entsprechend ergibt sich nach Gleichung 4.16 eine Zeit von $t_{col} = 400$ ns beziehungsweise $t_{col} = 200$ ns je Datum. In dieser Zeit müssen die gesamten Daten für den nächsten Programmiervorgang übertragen werden. Um die Anzahl der Datenleitung gering zu halten, ist es von Interesse, möglichst viele Register seriell zu verketteten. Dies steigert jedoch die notwendige Übertragungsrate. Mit der Verschaltung zweier Schieberegister zu je 8 bit in Reihe ergibt sich eine Übertragungsrate von 40 Mbit/s³² beziehungsweise 80 Mbit/s auf jeder Datenleitung. Die geplante Struktur wurde entsprechend ausgelegt und die Funktionalität in Messungen belegt³³.

Die deserialisierten Datensignale müssen auf die für das Display notwendigen Spannungspegel umgesetzt werden. Hierfür dient ein als Komparator verschalteter Operationsverstärker³⁴, siehe Abbildung 5.24. Die verwendete Eingangsbeschaltung mit einem Spannungsteiler und zusätzlicher Kapazität zwischen den Eingängen dient zur Vermeidung von auftretenden Verzögerungen. Die Hilfsspannung von $V_{ref} = \frac{V_{sig,amp}}{2}$ am negativen Eingang des Verstärkers verhindert, dass der Verstärker aufgrund der Single-Ended Ansteuerung in die Sättigung geht. Durch den Tiefpass gebildet aus R_1 und C wird

³¹3: Visionox Prototyp; 6: Tianma Prototyp.

³² $t_{data} = \frac{400}{16}$ ns = 25 ns.

³³Ab einer Übertragungsrate von etwa 60 Mbit/s ist es notwendig die Phasenlage des Taktes anzupassen um eine fehlerfreie Übertragung sicherzustellen. Zukünftige Realisierungen sollten, um höhere Datenraten zu erreichen, Techniken wie differentielle Takt- und Datenübertragung und getrennte Steckverbinder für die eingehenden und ausgehenden Datensignale verwenden.

³⁴Hierfür wurden Verstärker vom Typ LM7171 von Texas Instruments verwendet. Diese weisen eine sehr hohe Slew-Rate und Bandbreite auf und können mit den notwendigen Pegeln betrieben werden.

zusätzlich bei einem Wechsel des Eingangssignals die Differenz zwischen den beiden Eingängen des Verstärkers maximal, sodass das Ausgangssignal schneller steigt³⁵. Eine auftretende Verzögerung von ≈ 20 ns kann hierdurch nahezu komplett vermieden werden. Die Hilfsspannung V_{ref} wird auf der Hauptplatine erzeugt und den Karten zugeführt, wo sie mithilfe von LC-Filtern stabilisiert wird. Diese Schaltung findet auch Verwendung auf der Hauptplatine zur Verstärkung der Ansteuersignale für das Display.

Eine fertig bestückte Verstärkerkarte ist in Abbildung 5.25 gezeigt. Sie beinhaltet insgesamt 48 Datenkanäle, entsprechend 3 Schieberegisterketten zu 16 bit Tiefe. Diese sind auf der Rückseite der Platine im oberen Bereich zu sehen (ein IC enthält ein Schieberegister zu 8 bit). Neben der Deserialisierung und Verstärkung ist die Möglichkeit vorgesehen, die Versorgungsspannung für die Verstärker auf den Karten zu generieren oder extern zuzuführen. Hierfür dienen die Linearregler auf der rechten Seite der Vorderseite. Auf der gezeigten Platine ist der entsprechende Umschalter (im unteren Bereich der Vorderseite) durch Drahtbrücken ersetzt, da im Prototypenbetrieb meist nur die externe Versorgung (aufgrund höherer Flexibilität bei Variation der Versorgungsspannung) verwendet wurde.

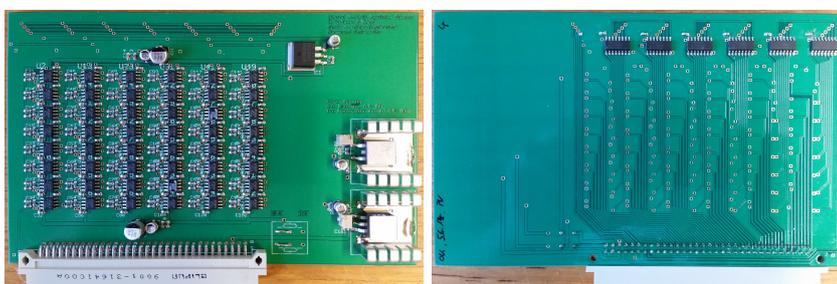


Abbildung 5.25: Vorder- und Rückseite der Verstärkerkarten.

Alternativ zur Realisierung mit Operationsverstärkern, könnten auch aus Einzeltransistoren aufgebaute Treiberschaltungen (Push-Pull-Stufe) verwendet werden. Hierfür sind eventuell mehrstufige Pegelwandlungen notwendig und die Schaltungen müssten hinsichtlich Schaltgeschwindigkeit und Symmetrie der Schaltflanken optimiert werden.

5.4.2 Grafikprozessor

Zur Ansteuerung des Displays fehlt dem zuvor beschriebenen Schnittstellenwandler noch eine Quelle für die Bilddaten. Hierfür dient der Grafikprozessor. Ziel war es, ein Displaysystem zu realisieren, welches möglichst wie ein kommerzielles Display ansteuerbar ist. Auch sollte es möglich sein, bewegte Bilder (Videos) auf dem Display zu betrachten, womit eine schnelle serielle Schnittstelle zur Bildquelle (PC oder andere Zuspierer) Mittel der Wahl ist. Im Bereich der Multimedia hat sich HDMI als Schnittstelle durchgesetzt,

³⁵Abbildung 9.5 im Anhang zeigt den Unterschied zwischen beiden Ansteuerungen in der Simulation. Messungen an der realen Schaltung bestätigen die theoretischen Resultate.

sodass diese auch hier Anwendung findet. Unter Verwendung dieser soll der Prozessor es ermöglichen, die digitale Ansteuerung durchzuführen und notwendige Korrekturen von Artefakten zu berechnen. Hierbei soll er möglichst flexibel und leicht für neue Anwendungen anpassbar sein. Es wurde daher auf einen stark modularen Ansatz gesetzt.

Wie in Kapitel 4 beschrieben, soll der Grafikprozessor für höhere Flexibilität in einem FPGA implementiert werden. Da am Lehrstuhl für Mikroelektronik vorwiegend Xilinx FPGA verwendet werden und diese FPGA mit passenden technischen Daten (Anzahl Gatter, Sonderfunktionen in Hardware), wurde ein Entwicklungsboard der Firma Digilent mit einem Spartan 6 FPGA³⁶ als Basis für die Implementierung ausgewählt. Dieses bietet zudem eine integrierte HDMI-Schnittstelle und ist mit einem DRAM Baustein bestückt, welcher zwingend zum Puffern von Bildern notwendig ist, vergleiche Kapitel 4. Des Weiteren sind 40 Ausgangssignale des FPGA auf einen VHDCI³⁷-Anschluss herausgeführt, mit welchem das FPGA-Boards an die Hauptplatine angebunden werden kann. Dieser Steckverbinder ermöglicht auch die Anbindung aller Signale unter der Verwendung von nur zweilagigen Platinen, was die Anforderungen hinsichtlich einer kostengünstigen Hauptplatine erfüllt. Zusätzlich können andere Komponenten wie der Pixelstromsensor über frei belegbare weitere Ein-/Ausgänge angesteuert werden.

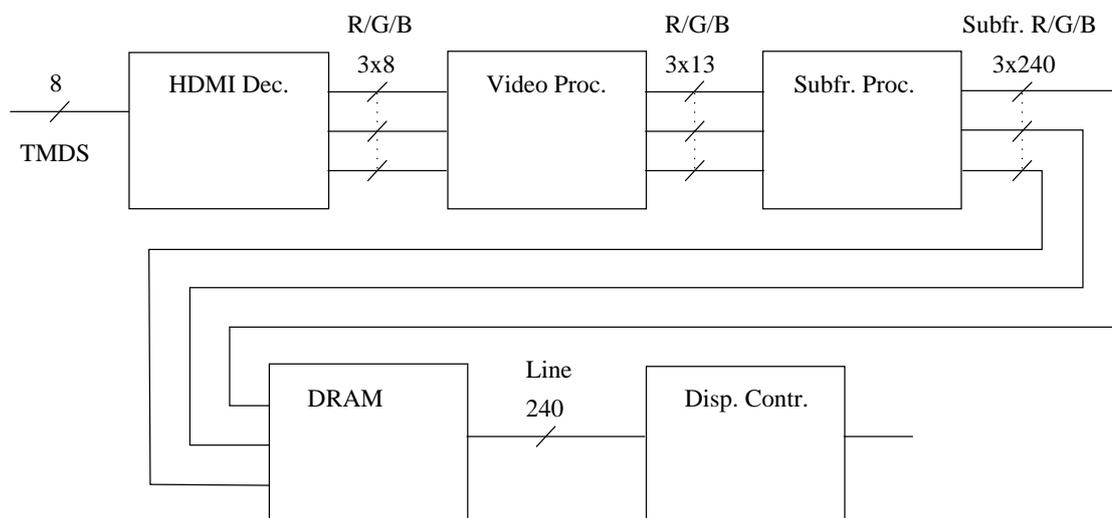


Abbildung 5.26: Blockschaltbild des einfachen Grafikprozessors.

In Abbildung 5.26 ist die prinzipielle Struktur eines einfachen Grafikprozessors gezeigt. Die einkommenden Bilddaten werden mittels eines LVDS³⁸-Interface als HDMI-konformer Datenstrom zugespielt. HDMI nutzt ein sehr einfaches Bitmuster und arbeitet zudem mit synchroner Datenübertragung, sodass keine Taktwiederherstellung notwendig ist und

³⁶Digilent Atlys Development Board, Spartan 6 LX45T.

³⁷Very High Density Cable Interconnect

³⁸Low Voltage Differential Signaling

die Deserialisierung des Datenstroms mittels fester Hardwareblöcke und darauffolgender Sortierung der Bits möglich ist. Daneben enthält der HDMI-Block noch Identifikationsdaten des Displays³⁹, welche zur Einstellung der Datenquelle auf das Timing des Displays notwendig sind. Für die beiden Prototypendisplays wäre aufgrund ihrer geringen Auflösung die Wahl eines niedrigen Pixeltakts von etwa 6 MHz für eine Dauer der Schwarzsultern⁴⁰ von 10% in horizontaler wie vertikaler Richtung bei einer Bildwiederholrate von 60 Hz ausreichend. Die Spezifikationen der VESA⁴¹ sehen jedoch einen Pixeltakt von mindestens 25,175 MHz vor. Versuche mit dem niedrigeren Takt zeigten, dass der implementierte Prozessor problemlos damit arbeiten kann, jedoch unterstützen nicht alle Bildquellen diesen nicht-standardkonformen Fall. Aus diesem Grund arbeitet der Eingangsteil des Prozessors mit dem höheren Pixeltakt von 25,175 MHz. Die Rechenzeiten in den in diesem Falle sehr langen Schwarzsultern werden nicht genutzt und stehen für mögliche Berechnungen zur Kompensation von Artefakten zur Verfügung. Als Ausgang des HDMI-Moduls stehen die Bilddaten je eines Pixels parallel zur Verfügung. Des Weiteren werden die standardmäßigen Steuersignale (DE, VSYNC, HSYNC) rekonstruiert und ausgegeben.

Die gesamte Bearbeitung der Daten erfolgt als Pipeline, eingangsseitig vom DRAM getaktet mit dem eingehenden Pixeltakt, ausgangsseitig mit einer variablen Taktfrequenz, mit welcher auch der Spaltentreiber des Displays bedient wird. Nach der Eingangsstufe mit der Dekodierung des HDMI-Signals folgt ein Videoprozessor. In diesem werden die eingehenden Daten manipuliert, die grundlegendste Operation ist hierbei die Gamma-Korrektur, vergleiche Kapitel 2. Im Falle des einfachen Grafikprozessor erfolgt sonst keine Änderung der Bilddaten. Durch die Bearbeitungen im Videoprozessor ist die Bitbreite der Ausgangssignale typischerweise größer als die der Eingangssignale, um Fehler durch Rundung zu vermeiden und eine gute visuelle Qualität sicherzustellen. In der vorliegenden Implementierung ist die Breite der vom Videoprozessor ausgehenden Pixelsignale gleichzeitig die Anzahl der später dargestellten Subframes.

Die vom Videoprozessor verarbeiteten Daten werden dem Subframeprozessor zugeführt. Dieser zerlegt die Daten in einzelne Subframes wie in Kapitel 3.2 dargestellt. Je nach gewählter Zerlegungsart, einfache binäre Zerlegung oder ein Teiler zwischen den Subframes, welcher < 2 ist, geschieht dies durch simple bitweise Aufspaltung oder über Hilfsberechnungen beziehungsweise eine LUT mit vorberechneten Werten. Da der folgende Speicher in Form eines DRAM effizient nur lange Wörter schreiben kann, wird im Subframeprozessor eine gesamte Zeile zwischengespeichert. Jeweils am Ende der Zeile wird diese dann in Subframes aufgeteilt und blockweise in den DRAM geschrieben. Die hierfür benötigte Zeit lässt sich abschätzen zu:

$$num_{clk,store} = \frac{3 * n * num_{cols}}{64} \quad (5.7)$$

mit n der Zahl der Subframes, 64 als kleinste Wortlänge die der DRAM schreiben kann⁴²

³⁹Extended Display Identification Data.

⁴⁰Gängig ist auch die aus dem Englischen übernommene Bezeichnung „blanking time“.

⁴¹Video Electronics Standards Association

⁴²Dies ist konfigurierbar. Eine Wortlänge von 64 bit ermöglichte für die verwendete Konfiguration

und num_{cols} der Zahl der Spalten. Da das Beschreiben des DRAM mit einem verglichen zum Pixeltakt höheren Takt erfolgt, werden für diesen Schreibvorgang nur wenige Pixeltakte benötigt⁴³. Dies bestimmt die kürzest mögliche Schwarzsulter. Zusätzlich werden die Daten so umsortiert und in den DRAM geschrieben, dass das Auslesen sequentiell erfolgen kann und somit die Geschwindigkeitsvorteile durch Techniken wie Prefetching erreicht werden können. In der Regel ist die Bildwiederholrate FR der Darstellung auf dem Display höher als die der Zuspiegelung. Hierdurch ergibt sich die höchste Übertragungsrate, welche zum Lesen benötigt wird. Die benötigte Bandbreite BW berechnet sich zu:

$$BW = (2 * FR * n * num_{rows} * num_{cols}). \quad (5.8)$$

Der Faktor 2 ergibt sich aus der Anforderung, dass Leuchtzeit und Programmierzeit des Displays identisch sein sollen. Für den Visionox-Prototyp ergibt sich eine Übertragungsrate ≈ 200 Mbit/s bei $n = 13$ und $FR = 100$ Hz. Höhere Auflösungen benötigen entsprechend höhere Übertragungsraten, sodass hier gegebenenfalls auf die Wahl der Speicherbausteine geachtet werden muss.

Wie erläutert greift der Subframeprozessor direkt auf den DRAM zu. Dies geschieht über einen Speichercontroller, welcher als konfigurierbarer IP-Block von Xilinx erhältlich ist. Da auf den DRAM stets gleichzeitig schreibend und lesend zugegriffen wird, wurde der Speichercontroller mit zwei directionalen Ports zu je 64 bit Breite konfiguriert. Für möglichst geringe Latenzen wird der DRAM mit einem Speichertakt von 200 MHz betrieben. Dies ergibt eine maximale Übertragungsrate von 1,6 Gbyte/s, welche die Anforderungen für die realisierten Prototypen deutlich übertrifft, jedoch eine höhere Flexibilität beziehungsweise weniger Zwischenspeicher ermöglicht. Im DRAM werden zwei getrennte Speicherbereiche genutzt, welche jeweils ein gesamtes Frame als Summe seiner Subframes enthalten. Sobald ein gesamtes Frame geschrieben ist, wird zwischen den Bereichen gewechselt. Nun wird der neu geschriebene Bereich gelesen und die bereits dargestellten Daten überschrieben. Dies vermeidet Artefakte aufgrund der unterschiedlichen Bildwiederholraten an Ein- und Ausgang. Da aufeinanderfolgende Bilder in der Regel sehr ähnlich sind (bei Videodaten), erzeugt ein Wechsel zwischen zwei Bildern während der Darstellung keine sichtbaren Artefakte. Durch die höhere Bildwiederholrate am Ausgang ist zudem sichergestellt, dass jedes Frame einmal komplett dargestellt wird. Dieser Ansatz lieferte für die Prototypen dieser Arbeit sehr gute Ergebnisse. Es ist dennoch möglich, dass hierbei Artefakte auftreten und es notwendig ist eventuelle Kompensationsmechanismen zu implementieren. Denkbar ist, bereits entwickelte Methoden wie eine Szenenwechselerkennung, vergleiche **Jung2014**, zu implementieren. Wenn diese starke inhaltliche Unterschiede zwischen zwei Bildern (ergo einen Szenenwechsel) erkennt, wird bei einem Sprung zwischen den Speicherbereichen die Darstellung abgebrochen und zum höchstwertigen Subframe des neuen Bildes gesprungen. Hiermit ist auch in diesem Fall eine hohe Bildqualität gesichert.

von FPGA und DRAM die Verwendung zweier bidirektionaler Ports, vergleiche Beschreibung der DRAM-Ansteuerung.

⁴³Bei einem Takt des DRAM von 200 MHz werden etwa 19 Pixeltakte bei 240 Spalten und 13 Subframes benötigt.

Der letzte Baustein in dieser Kette ist der Displaycontroller. Dieser enthält einen Zustandsautomaten, welcher den gesamten Ablauf der Displayansteuerung abbildet und alle notwendigen Ansteuersignale erzeugt. Die darzustellenden Bilddaten werden zeilenweise vom DRAM angefordert und subpixelweise an die Verstärkerkarten übertragen. Somit wird je eine Subpixelfarbe auf der selektierten Zeile programmiert und danach zur nächsten Farbe beziehungsweise Zeile übergegangen. Insbesondere beim Visionox Prototyp zeigte sich hier, dass der rein auf p-Typ TFT basierende Zeilentreiber die Selectleitungen $Sel(i)$ nicht hinreichend schnell umladen kann und es zu starken Verzögerungen kommt. Die gemessene Lage relativ zum Ansteuersignal ist in Abbildung 5.27 dargestellt. Durch angepasste Verschiebung der Demultiplexsignale bis in die (theoretische) Aktivierungszeit der nächsten Zeile hinein konnte dennoch eine Framerate von ≈ 100 Hz bei 13 Subframes erreicht werden. Alle die Signalabfolge beeinflussenden Parameter wurden so implementiert, dass sie im laufenden Betrieb angepasst werden können und so ein einfaches Korrigieren möglicher Fehler über eine spezielle UART⁴⁴-Schnittstelle geschehen kann. Ist ein komplettes Subframe auf dem Display programmiert, so wird die Pixelmatrix durch Aktivieren der negativen Versorgungsspannung zum Leuchten gebracht. Nach Ablauf der festgelegten Leuchtzeit wird der Vorgang erneut gestartet.

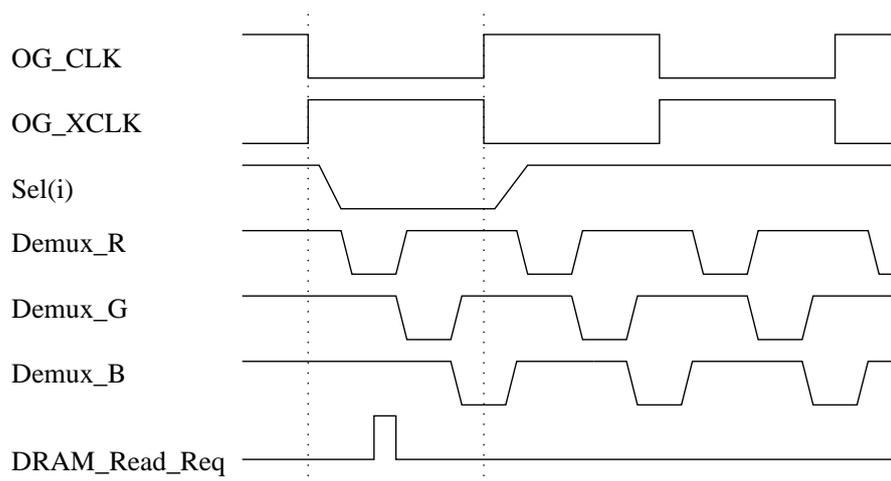


Abbildung 5.27: Zeitliche Abfolge der Ansteuersignale für den integrierten Zeilentreiber und den Demultiplexer. Nicht-lotrechte Flanken deuten transiente Verläufe an.

⁴⁴Universal Asynchronous Receiver Transceiver

5.5 Fazit

Mit dem beschriebenen Prototypensystem konnte beide Displays, Visionox wie Tianma, erfolgreich in Betrieb genommen werden. Für beide Prototypen ist die gewünschte Ansteuerung im Videobetrieb möglich. Es wurden Bildwiederholraten erreicht, welche für das menschliche Auge flackerfreie Bilddarstellung ermöglichen und somit die geforderten Mindest-Ansprüche an die visuelle Qualität erfüllen. Hiermit standen erstmals Prototypen zur Verfügung, welche es ermöglichten, die visuelle Qualität und Performance digitaler Ansteuerung von AMOLED Displays mit dem bloßen Auge zu untersuchen. Erwartungsgemäß treten bei der Ansteuerung ohne jegliche Kompensation Artefakte auf, welche inakzeptabel für eine mögliche kommerzielle Umsetzung des Treiberschemas sind. Hier sind insbesondere auftretende Konturen und Alterungseffekte wie Einbrennen zu nennen. Sie stellen die Haupthindernisse für den Einsatz digitaler Ansteuerung dar. Durch sukzessiven Ausbau der Prototypen konnten diese Probleme näher charakterisiert und auch beseitigt werden. Die flexible Gestaltung des Systems lässt hier hinreichend Freiheitsgrade beispielsweise zur Erweiterung mit notwendigen Sensoren. Als einfacher, zielführender Ansatz können Artefakte, welche bei digitaler Ansteuerung entstehen, durch Bildverarbeitungsalgorithmen vermieden und kompensiert werden. Entsprechend wurde bei dem hier vorgestellten System darauf geachtet, dass Anpassungen im Grafikprozessor leicht vorzunehmen sind. Im folgenden Kapitel werden diese Artefakte näher betrachtet und Lösungswege zur Behebung aufgezeigt.

6 Bildzerlegung

Mit dem in Kapitel 4 vorgestellten digitalen AMOLED-System kann neben dem Aufzeigen der reinen Machbarkeit nun auch die visuelle Qualität sowie die Wahrnehmung von Bildinhalten durch das menschliche Auge bewertet werden. Wie in Kapitel 3.2 angesprochen, kann die Verwendung eines auf zeitlicher Separation der Bildinhalte beruhenden Ansteuerschemas verschiedene visuelle Artefakte hervorrufen. Es wurde systematisch untersucht, ob diese auftreten und gegebenenfalls Kompensationsmethoden getestet und implementiert. Daneben konnten auch Artefakte identifiziert und kompensiert werden, die auf anderen Displaytypen (beispielsweise PDP), welche auch mit einem digitalen Treiberschema angesteuert werden, nicht auftreten und entsprechend in der Literatur noch nicht dokumentiert sind.

6.1 Weißabgleich

Eine wichtige Grundfunktion für jedes Displaysystem ist der so genannte Weißabgleich. Dieser ist notwendig, um eine hohe Farbtreue zwischen verschiedenen Darstellungssystemen zu gewähren. In Abbildung 5.12 beziehungsweise 5.17 sind die darstellbaren Farbräume für den Visionox/Tianma Prototypen abgebildet. Da die Primärvalenzen der Displays nicht mit denen des Zielfarbraumes übereinstimmen und ein definiertes Verhältnis der Grundfarben zum Erreichen des Weißpunktes notwendig ist, muss ein Weißabgleich erfolgen. Bei analoger Ansteuerung erfolgt dies durch die Anpassung des Verhältnisses der Stromamplituden der Subpixel. Da im digitalen Fall dies bei Verwendung einer gemeinsamen Versorgungsspannung nicht möglich ist, muss die Anpassung über eine Manipulation der Bilddaten erfolgen. Hierfür kann aus den gemessenen Farborten des Weißpunktes des Displays und mit dem Farbort des Zielweißpunktes eine lineare Anpassung der Bilddaten durchgeführt werden, vergleiche **Lindbloom2013**. Allgemein kann zwischen der Darstellung der Farbe eines Bildpunktes im CIE-Farbraum¹ $[X \ Y \ Z]$ und der Darstellung in einem $[R \ G \ B]$ Farbraum, aufgespannt durch die Farbvektoren der Primärvalenzen, einfach linear umgerechnet werden:

$$\begin{bmatrix} X_{pix} \\ Y_{pix} \\ Z_{pix} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_R & X_G & X_B \\ Y_R & Y_G & Y_B \\ Z_R & Z_G & Z_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}. \quad (6.1)$$

Der Vektor $[R \ G \ B]^T$ beschreibt den durch die Bilddaten vorgegebenen Grauwert im

¹CIE²

Wertebereich $(R,G,B) \in [0,1]$. Mittels Ansteuerung des Displays mit den drei Grundfarben können die einzelnen Farbkoordinaten der Primärvalenzen gemessen werden. Der Referenzweißpunkt $[X_{ref} Y_{ref} Z_{ref}]$ der gewünschten Normlichtart kann der Literatur entnommen werden. Durch Invertieren der Gleichung 6.1 kann der zugehörige Pseudo-Grauwert $GW_{ref} = [R_{ref} G_{ref} B_{ref}]$ bestimmt werden. Dieser muss auf den Wert seiner größten Komponente normiert werden um die Korrekturwerte $CV_{R,G,B}$ zu erhalten:

$$\begin{bmatrix} CV_R \\ CV_G \\ CV_B \end{bmatrix} = \frac{1}{\max(GW_{ref})} \begin{bmatrix} R_{ref} \\ G_{ref} \\ B_{ref} \end{bmatrix}. \quad (6.2)$$

Mithilfe der so gewonnenen Korrekturwerte können die einzelnen Farbkanäle manipuliert werden, um den gewünschten Weißpunkt zu erhalten. Dies kann durch Anpassung der LUT für Gamma-Korrektur und Bildzerlegung erfolgen.

Zu beachten ist, dass das Verhältnis der Leuchtdichten der Primärvalenzen sich bei Veränderung des Arbeitspunktes der OLED ändert. Dies ergibt sich bei Verwendung von RGB-OLED aus den unterschiedlichen L-V-Kennlinien der einzelnen für die Subpixel verwendeten OLED-Materialien. Hierdurch verschiebt sich auch der Korrekturwert für die einzelnen Farbkanäle. Bei Verwendung des digitalen Treiberschemas wird der Arbeitspunkt der Pixel nur angepasst, wenn eine globale Anpassung der Leuchtdichte beispielsweise zwecks höherer Displayhelligkeit erfolgen soll. In diesem Fall können die entsprechenden LUT anhand für das Display hinterlegter Messwerte neu berechnet werden. Aufgrund der sehr flachen Diodenkennlinien der OLED kann die relative Änderung der Leuchtdichten gut linear angenähert werden und eine Berechnung der neuen Korrekturwerte zum Weißabgleich kann mithilfe weniger Stützwerte erfolgen. Entsprechend muss auch der Arbeitspunkt des Pixels nur in engem Rahmen angepasst werden. Eine lineare Näherung der Diodenkennlinie beschreibt das Verhalten dieser hinreichend genau. Abbildung 6.1 zeigt vergleichend ein Testbild sowie die Darstellung auf dem Tianma Prototypen ohne und mit Weißabgleich. Abbildung 9.6 zeigt ein Beispiel für die Verschiebung des Weißpunktes des Visionox-Prototypen. Es ist zu sehen, dass das beschriebene Verfahren keinen Verlust in der Detaildarstellung verursacht. Zusätzlich wirkt die verwendete Digitalkamera hier farbverfälschend, weshalb sich ein optischer Unterschied zwischen Quell- und Zielbild ergibt.

6.2 Farbtiefe

Um nach Anwendung der Korrekturfaktoren alle Farbkanäle mit einer gleich hohen Auflösung darstellen zu können, ist es notwendig eine höhere Anzahl an Subframes, welche die kleinste aufzulösende Helligkeit vorgeben, darzustellen. Dies führt jedoch zu sehr hohen Programmieraten oder niedrigen Bildwiederholraten, sodass die maximale Anzahl an darstellbaren Subframes in der Regel begrenzt ist. Durch Verwendung von digitalen Halbtonverfahren kann jedoch die wahrgenommene Farbtiefe gegenüber der



Abbildung 6.1: Auswirkung des beschriebenen Weißabgleich auf dem Tianma Prototyp. Von links nach rechts: Quellbild, Darstellung ohne Weißabgleich, Darstellung mit Weißabgleich. Die vertikale Linie ist ein Defekt im Display.

dargestellten Farbtiefe erhöht werden, ohne dass hierfür zusätzliche Subframes notwendig sind.

In **Ney2014** wird die Verwendung und Optimierung verschiedener Halbtonverfahren für ein digital angesteuertes AMOLED-Display untersucht. Hierbei wurde der Fokus auf das Finden eines geeigneten Halbtonverfahrens durch objektive Bewertung mittels Auswertung einer Simulation der Wahrnehmung und Vergleich mit der subjektiven Wahrnehmung gelegt. Gleichzeitig sollte das Verfahren mit möglichst geringem Hardwareaufwand, insbesondere Speicherbedarf, auskommen. Hier sind vor allem Methoden welche nur auf in der Übertragung zeitlich nachfolgenden Pixeln arbeiten wie ED³, vergleiche **Ulichney1987**, und FRC⁴, vergleiche **Lei2003**, geeignet. Beide basieren auf dem Integrationsverhalten des Auges, ED auf dem räumlichen und FRC auf dem zeitlichen, und ermöglichen hierdurch die Darstellung wahrgenommener Graustufen, welche zwischen zwei darstellbaren Graustufen liegen.

Abbildung 6.2 zeigt vergleichend einen Graustufenverlauf der Graustufen 1 bis 16 mit und ohne aktiviertes ED und FRC. Das zeitliche Integrationsverhalten des Auges wurde durch Wahl einer entsprechend langen Belichtungszeit der Kamera simuliert. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Graustufenauflösung durch Verwendung eines solchen Halbtonverfahrens erhöht wird. Durch Anwendung der Verfahren auf größeren Pixelflächen können je bis zu 2 bit zusätzliche wahrgenommene Farbtiefe erzeugt werden. Jedoch müssen hierbei die Grenzen der Wahrnehmung zur Vermeidung zusätzlicher Artefakte beachtet werden, vergleiche auch **Ney2014**. Visuelle Tests ergaben eine gute Verwendbarkeit einer Kombination von ED und FRC zur Erzeugung von zwei zusätzlichen wahrgenommenen Subframes. Insbesondere zur Vermeidung von Konturartefakten,

³Error Diffusion

⁴Frame Rate Control

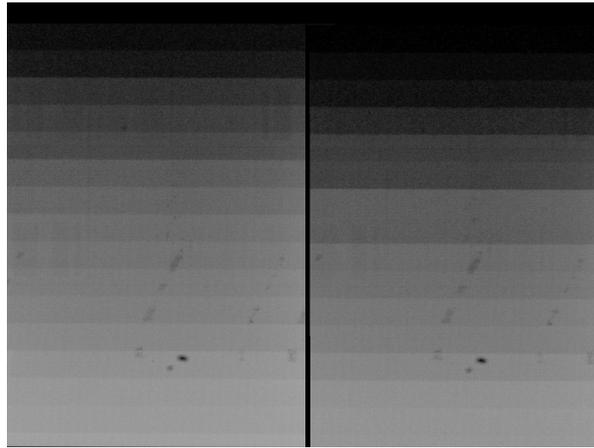


Abbildung 6.2: Darstellung eines Graustufenverlaufs (GW 1 bis 16) mit (links) und ohne (rechts) Verwendung von ED und FRC zur Erhöhung der wahrgenommenen Graustufen.

vergleiche 6.3, ist eine niedrigere Anzahl dargestellter Subframes zur Erhöhung der Bildwiederholrate von Interesse, was durch die Anwendung der digitalen Halbtonverfahren unterstützt wird. Bei gleicher Zahl wahrgenommener Subframes müssen weniger real dargestellt werden und somit kann die Bildwiederholrate höher liegen. Für PDP wurden bereits Algorithmen entwickelt, welche hinsichtlich der Vermeidung von Konturen optimiert wurden, vergleiche **Nagakubo2007**. Auf die Entstehung und visuelle Auswirkung der angesprochenen Konturartefakte wird im Folgenden näher eingegangen.

6.3 Konturvermeidung

Da im Gegensatz zum analogen Treiberschema bei der Verwendung des digitalen Treiberschemas die Bildinhalte nicht kontinuierlich sondern zeitdiskret dargestellt werden, vergleiche Kapitel 4, ist die Darstellung anfällig für Artefakte, welche aufgrund falscher Darstellung oder Wahrnehmung von Teilen des Bildes entstehen. Hier sind insbesondere entstehende Konturen hervorzuheben. Grundsätzlich lassen sich hierbei zwei Typen unterscheiden, statische und dynamische Konturen. Erstere sind auf Fehler in der physikalischen Darstellung des Bildes, zweitere auf Fehler in der Wahrnehmung beispielsweise durch Augenbewegungen zurückzuführen. Nachfolgend werden diese Artefakte und ihre Ursachen erläutert, auf Methoden zur Vermeidung eingegangen und deren Wirksamkeit gezeigt.

6.3.1 Statische Konturen

Wie angedeutet, ist die Entstehung statischer Konturen auf fehlerhafte Darstellung einzelner oder mehrerer Subframes zurückzuführen. Aufgrund der binären Gewichtung der Subframes ist das System sehr anfällig für Linearitätsfehler. Gemäß Gleichung 3.5 ist jedem Subframe ein Zielgrauwert zugeordnet. Wird dieser lokal für einzelne Pixel oder global für das gesamte Subframe nicht getroffen, so ergibt sich in der Summe eine falsche Helligkeit für den oder die entsprechenden Pixel. Die entstehende Abweichung ist zwar sehr homogen (alle betroffenen Bereiche gleichmäßig) aber an Rändern entstehen zu Nachbarbereichen nicht-monotone Übergänge (Sprünge in der Helligkeit). Hierdurch können leicht, sichtbare Konturen entstehen, siehe Abbildung 6.3.



Abbildung 6.3: Aufnahme eines Testbilds mit auffälliger statischer Kontur (oben links). Das Bild wurde zur besseren Erkennbarkeit im Druck nachträglich aufgehellt.

Gemäß Gleichung 3.8 kann ein fehlerhafter Grauwert des Subframes auf eine falsche Leuchtdichte der OLED L_0 oder falsche zeitliche Gewichtung zurückgeführt werden. Da die zeitliche Gewichtung durch die Ansteuerung vorgegeben und gesteuert wird, ist die Leuchtdichte L_0 der OLED als Ursache identifizierbar. Diese ergibt sich aus dem Strom I_0 durch die OLED wie aus ihrer Stromeffizienz η_I :

$$L_0 = I_0 * \eta_I. \quad (6.3)$$

Der Strom durch die OLED I_0 ergibt sich direkt aus dem Arbeitspunkt der OLED, welcher im digitalen Treiberschema durch die angelegte Betriebsspannung vorgegeben wird. Durch parasitäre Widerstände in den Versorgungsleitungen können Spannungsabfälle in diesen entstehen, sodass der Arbeitspunkt über die Displayfläche lokal variiert. In **Jung2006** sowie **Lebrun2011** wurden hierzu erste Untersuchungen vorgestellt. Insbesondere für

große Displaydiagonalen ergeben sich durch die Länge der Zuleitungen signifikante mögliche Abweichungen. Basierend auf diesem Ansatz wurde am Lehrstuhl für Mikroelektronik ein Verfahren entwickelt, welches die Verteilung der Pixelströme über dem gesamten Display für einen gegebenen Subframeinhalt unter Beachtung der physikalischen Randbedingungen in Form der parasitären Elemente der Versorgungsleitungen und der OLED berechnet. Dieses Verfahren ist in **Xu2013** offen gelegt. Die Displaystruktur lässt in der Regel je nach Realisierung eine zeilen- oder spaltenweise Simulation der Arbeitspunkte zu. Hierdurch ist es auch für hohe Auflösungen möglich in der Zeit, in der das entsprechende Subframe programmiert und dargestellt wird, die realen Arbeitspunkte der OLED und somit ihren Beitrag zum Pixelgrauwert zu berechnen. Hierüber kann der verbleibende darzustellende Grauwert ermittelt und mit den noch zur Verfügung stehenden Subframes dargestellt werden. Durch Vorhalten zusätzlicher Subframes zu Kompensationszwecken kann somit eine korrekte Darstellung sichergestellt werden. Da diese Methode an Hand von Literaturwerten und Simulationen von Displays entwickelt wurde, wurde am realen Prototyp in einem ersten Schritt die Abhängigkeit der Pixelleuchtdichte von der Zahl aktiver Pixel in einer Zuleitung untersucht.

Der Visionox Prototyp verwendet eine spaltenweise Zuführung der positiven Betriebsspannung an je eine Farbe der Subpixel, die negative Betriebsspannung wird über eine flächige Metallelektrode bereitgestellt. Auf dieser können Spannungsabfälle in guter Näherung vernachlässigt werden. Aus den Layout- und Materialparametern der Versorgungsleitung für die positive Versorgungsspannung kann ein Widerstand von etwa $1,2 \Omega$ zwischen je zwei Subpixeln berechnet werden. Bei einem Spitzenstrom⁵ von $\approx 1 \mu A$, beidseitiger Anbindung der Leitung an die externe Versorgungsspannung sowie Aktivierung aller an eine Leitung angebotenen Pixel ergibt sich eine Verschiebung des Arbeitspunktes der mittleren OLED um etwa 15 mV. Dieser Spannungsabfall und die damit verbundene Verschiebung des Arbeitspunktes des Pixels ist zu gering, um die auftretenden Abweichungen zu erklären.

Abbildung 6.4 zeigt das Ergebnis der Messung der Leuchtdichte des mittleren Punktes eines um die Displaymitte symmetrischen weißen Streifens (Breite: 11 Spalten) in Abhängigkeit der Anzahl der aktiven Pixel (gegeben durch die Länge des Streifens) bei verschiedenen Arbeitspunkten. Die Leuchtdichte zeigt eine lineare Abhängigkeit von der Anzahl der Pixel. Die nicht-lineare Abhängigkeit vom Arbeitspunkt ergibt sich durch den großen Variationsbereich, in diesem ist die I-V-Kennlinie der OLED nicht-linear. Identische Messungen wurden auch über die Zeilenrichtung durchgeführt. Hier ergab sich jedoch keine Variation der Leuchtdichte mit der Anzahl der aktiven Pixel einer Zeile, womit die Spalten als entkoppelte Teile des Display gesehen werden können. Dies deckt sich mit den Erwartungen, da die Gegenelektrode zu der zeilenweisen Zuführung der Versorgungsspannung eine flächige Elektrode auf der Rückseite des Displays ist. Der Zuleitungswiderstand über die Zeilen hat einen dominanten Einfluss. Messungen weiterer Punkte des angezeigten Streifens ergaben, dass die Leuchtdichte des Streifens global gleichmäßig abnimmt und unabhängig vom Ort ist. Hieraus kann geschlossen werden, dass parasitäre Elemente außerhalb der eigentlich Pixelmatrix wie beispielsweise

⁵Vergleiche Tabelle 4.1.

Übergangswiderstände der Vias welche die einzelnen Versorgungsleitungen an die globale Zuführung kontaktieren, für die fehlerhafte Darstellung verantwortlich sind.

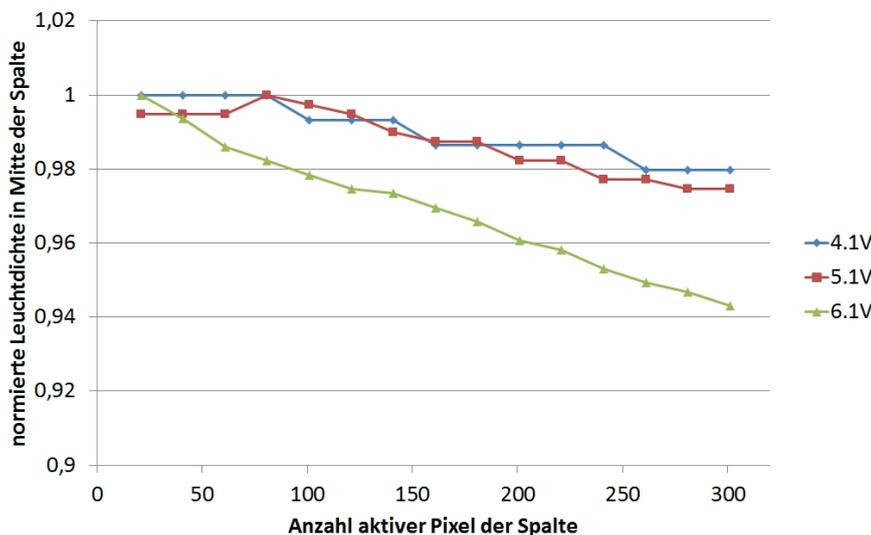


Abbildung 6.4: Normierte Leuchtdichte des mittleren Punktes eines um die Displaymitte symmetrischen Streifens in Richtung der Displayspalten über variabler Länge des Streifens bei verschiedenen Arbeitspunkten.

Da neben der Anbindung der lokalen Versorgungsleitungen auch die globale Versorgung über mehrere Kontaktstellen⁶ angebunden ist und somit mögliche parasitäre Widerstände existieren, wurde eine analoge Messung über die Anzahl der global aktivierten Pixel vorgenommen. Das Ergebnis ist in Abbildung 6.5 dargestellt. Hier konnte ein Einbrechen der Leuchtdichte um bis zu 30% für einen sehr hohen Arbeitspunkt und um 20% für übliche Betriebsbedingungen gemessen werden. Neben den nur lokal auf die einzelnen Spalten wirkenden Einflüsse wie parasitäre Widerstände sind auch globale zu beachten, welche trotz kleinerer Dimension aufgrund des höheren Gesamtstromes starken Einfluss haben können. Um auszuschließen, dass dieser Effekt nur für einzelne Subframes auftritt, beispielsweise aufgrund zu kurzer Speicherung der programmierten Spannung in der Pixelschaltung insbesondere für sehr lange Subframes, wurde der Verlauf der Leuchtdichte über dem zugespielten Grauwert gemessen und relativ zur maximalen Leuchtdichte der jeweilig aktiven Fläche (Pixelanzahl) betrachtet. Je nach Grauwert sind gemäß Gleichung 3.5 verschiedene Subframes aktiv. Das Ergebnis dieser Messung ist in Abbildung 6.6 dargestellt. Der Fehler tritt gleichmäßig über alle Grauwerte auf womit insbesondere Effekte, die durch die aktive Zeit des Subframes bestimmt würden, ausgeschlossen werden können.

Die Messungen bestätigen, dass bei starken Differenzen in der Besetzung der Subframes

⁶Stecker FPC, FPC zu Glas, Vias zwischen verschiedenen Metallebenen auf dem Glas.

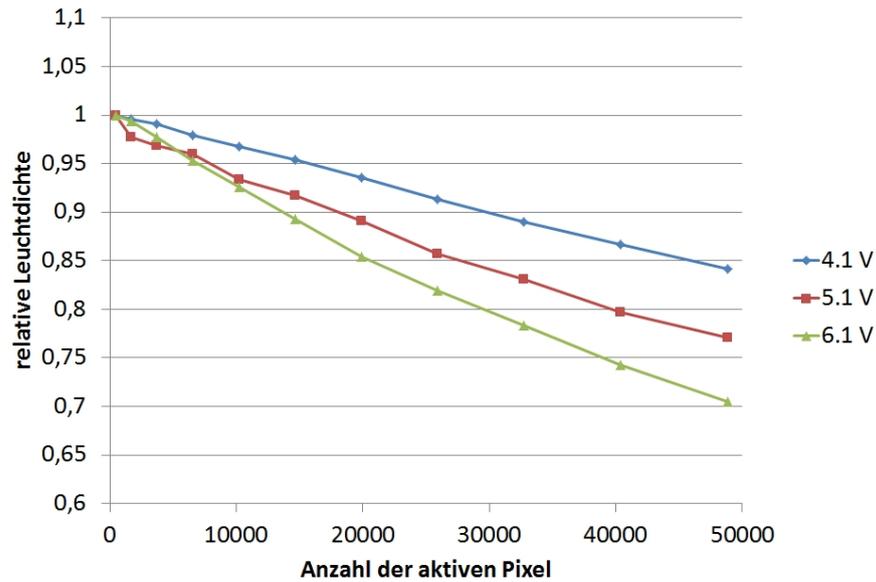


Abbildung 6.5: Normierte Leuchtdichte des mittleren Punktes einer symmetrisch um die Displaymitte verteilten Fläche variabler Größe bei verschiedenen Arbeitspunkten.

wie vermutet die relativen Helligkeiten falsch sein können, womit signifikante Linearitätsfehler wie in Abbildung 6.3 auftreten können⁷. Dies ist insbesondere für graue Flächen und Bilder der Fall, da hier die drei Primärfarben identisch angesteuert werden. Der hohe Strom führt zu Spannungsabfällen über den Zuleitungswiderständen und beeinflusst damit den Strom durch die OLED. Zur Korrektur dieses Effektes kann direkt die Anzahl der aktiven Pixel in einem Subframe verwendet werden. Zur Kompensation der globalen Auswirkungen bietet es sich an, statt mittels einer Manipulation der Grauwerte die Leuchtdichteverhältnisse durch Manipulation der Subframezeiten gemäß Gleichung 3.8 zu korrigieren. Hierfür wurde ein Modul implementiert, welches die Zahl num_{act} der aktiven Pixel des Subframes bestimmt. Durch zuvor gemessene und in einer LUT hinterlegte Abhängigkeit der Leuchtdichte von num_{act} , vergleiche Abbildung 6.5, kann eine korrigierte Subframezeit bestimmt werden:

$$t_{SF,corr} = t_{SF} * \left[(1 - \Delta_{abs}) + \Delta_{abs} * \frac{num_{act}}{num_{cols} * num_{rows}} \right] \quad (6.4)$$

mit Δ_{abs} dem entstehenden relativen Leuchtdichtefehler bei Aktivierung der gesamten Pixelfläche und t_{SF} der Leuchtzeit des Subframes. In Abbildung 6.7 ist vergleichend der Verlauf der Leuchtdichte eines zentralen Punktes über der aktiven Fläche mit und ohne

⁷Abbildung 9.7 im Anhang zeigt vergleichend die Übereinstimmung der Lage der Konturen in einem Testbild mit der Subframedarstellung gemessen durch eine Hochgeschwindigkeitsaufnahme.

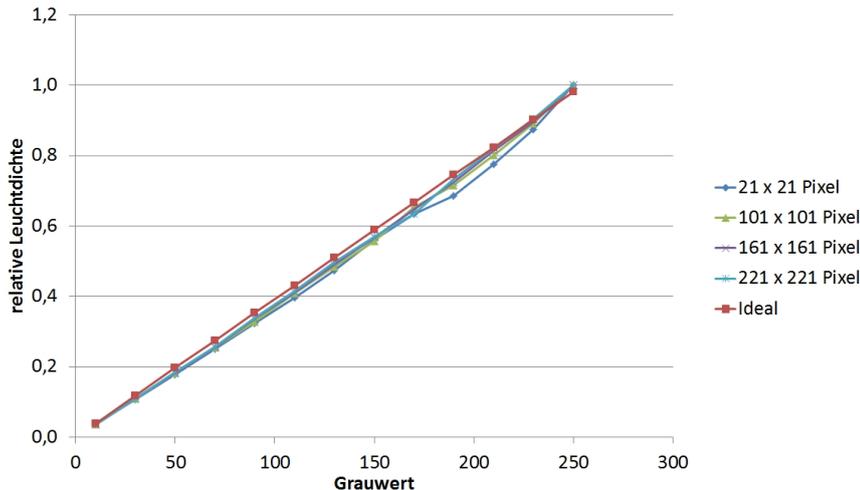


Abbildung 6.6: Normierte Leuchtdichte des mittleren Punktes einer symmetrisch um die Displaymitte verteilten Fläche variabler Größe über dem Grauwert der zugespilten Bilddaten.

der vorgestellten Korrektur gezeigt. Der Fehler kann im gezeigten Fall durch die globale Korrektur auf $\approx 2\%$ gemindert werden. Der verbleibende Fehler ergibt sich aus dem Fehlen einer Korrektur der lokalen Leuchtdichteänderung in einzelnen Spalten. Diese kann durch Manipulation des Bildinhaltes basierend auf einer Berechnung analog zu Gleichung 6.4 erfolgen. Abbildung 9.8 im Anhang zeigt eine entsprechend berechnete Korrektur für den in Abbildung 6.4 gemessenen Fehler. Für Bilder mit natürlichen Inhalten kommen vollbesetzte Spalten in Nachbarschaft gering besetzter Spalten, ein denkbarer Fall in welchem die Leuchtdichteveriation sichtbar wäre, aber nur in ohnehin sehr kontrastreichen Bildabschnitten vor. Nichtlinearitätsfehler sind jedoch nur in Bereichen sanfter Übergänge von Grauwerten wahrnehmbar. Für das in der Arbeit verwendete Testset an Bildern und Videos waren entsprechende sichtbare Abweichungen nicht erkennbar. Im Sinne des Hardwareaufwandes wurde daher kein separates Modul zur Kompensation der einzelnen Spalten integriert.

Eine identische Charakteristik konnte auch beim Tianma Prototypen gemessen werden. Dort beträgt $\Delta_{abs} = 15\%$. Neben der vorgestellten Methode der Korrektur anhand Analyse der Bilddaten sollten zusätzlich hardwareseitige Verbesserungen im Power-Management vorgesehen werden. Durch Integration der Spannungsregelung auf dem Displayglas und Verbesserungen in der Struktur der zuführenden Leitungen können Konturen reduziert werden. Eine Charakterisierung in der Fertigung zur Ermittlung der Kennlinie wie in Abbildung 6.5 ist auch leicht möglich. Zur Verwendung verschiedener Arbeitspunkte und damit Displayhelligkeiten muss eine getrennte Charakterisierung dieser oder eine Interpolation zwischen bekannten Werten erfolgen. Abbildung 6.8 zeigt das identische Testbild wie Abbildung 6.3 unter Verwendung der beschriebenen Methode

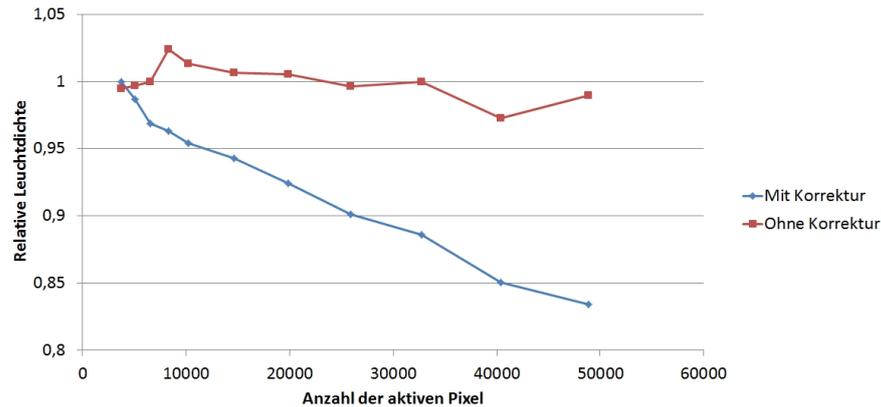


Abbildung 6.7: Vergleich der normierten Leuchtdichte des mittleren Punktes einer um die Displaymitte symmetrischen Fläche ohne und mit Verwendung der beschriebenen Kompensation.

zur Kompensation statischer Konturen. Insbesondere in der linken oberen Ecke ist das Vermeiden der Kontur deutlich sichtbar und die visuelle Qualität erheblich verbessert. Abbildung 6.9 zeigt vergleichend die Auswirkung der Korrektur mit verschiedenen Δ_{abs} .

Bei Verwendung von Displays mit größeren Diagonalen und damit eventuell höheren Zuleitungswiderständen kann eine Kombination der lokalen Kompensation mittels Simulation und der beschriebenen globalen Kompensation angewendet werden. Hierfür muss lediglich der anhand der Subframebelegung neu berechnete Subframewert als Basiswert für die lokale Simulation genutzt werden.

6.3.2 Dynamische Konturen

Neben den beschriebenen statischen Konturen können bei Displays mit zeitdiskreter Ansteuerung auch sogenannte dynamische falsche Konturen (DFC⁸) entstehen. Ihr Auftreten lässt sich aus einer Relativbewegung von Auge zu Bild erklären. In Abbildung 6.10 ist dies schematisch dargestellt (Quelle: **Doyen2003**). Diese Relativbewegung kann sowohl, wie in der Darstellung angedeutet, daraus resultieren, dass das Auge bewegten Bildinhalten folgt, als auch durch Bewegung des Displays wie beispielsweise in Automotiv-Anwendungen (Vibrationen). Hierdurch können nicht nur für bewegte Bilder falsche Konturen entstehen, auch für Standbilder ist dieser Effekt existent. Daneben führt das menschliche Auge verschiedene unwillkürliche Mikrobewegungen (Sakkaden, Tremor, vergleiche u.a. **Purves2004**) durch, welche ebenso zur Wahrnehmung falscher Konturen führen können. DPS-basierte digitale Treiberschemata sind aufgrund der stärkeren zeitlichen Trennung der einzelnen Lichtpulse anfälliger für DFC im Vergleich zu zu digitalen

⁸Dynamic False Contour



Abbildung 6.8: Aufnahme des Testbilds aus Abbildung 6.3 mit Korrekturalgorithmus zur Vermeidung statischer Konturen. Das Bild wurde zur besseren Erkennbarkeit im Druck nachträglich aufgehellt.

Treiberschemata, die Ansätze wie SES oder $\Delta\Sigma$ -Modulation verwenden.

Das Auftreten von DFC ist bereits von PDP bekannt. Hier wurden verschiedene Lösungsansätze erarbeitet, deren Anwendbarkeit auf AMOLED-Displays untersucht und teilweise getestet wurde. Dem Großteil der Verfahren gemein ist, dass sie versuchen, die zeitlichen Unterschiede im Grauwert benachbarter Pixel zu reduzieren. Hierdurch kann falsche Integration durch das Auge vermieden werden. Mögliche Verfahren sind unter anderem in **Xu2003**, **Thebault2013** und **Weitbruch2011** beschrieben. Ein weiterer Ansatz ist, die Bildwiederholrate zu erhöhen. Mit der begrenzten Bewegungsgeschwindigkeit des Auges wird hierbei die Wahrscheinlichkeit der Integration über nicht zusammengehörige Lichtpulse gesenkt. In **Kawabe2009** wurde dieser Ansatz für ein AMOLED-Display mit weißen OLED bei geringer Farbtiefe untersucht und die Wirksamkeit aufgezeigt.

Im hier vorgestellten digitalen AMOLED-System hat sich die Anwendung einer Kombination der genannten Methoden als hinreichend wirksam erwiesen. Zur Darstellung von 2^n Graustufen (physikalisch) wird eine Subframezahl $m > n$ gewählt, sodass ein Teilungsverhältnis $x < 2$ zwischen den Zeiten benachbarter Subframes gewählt werden kann. Hierdurch entstehen Mehrdeutigkeiten in der Möglichkeit, eine Graustufe als Summe der einzelnen Subframes darzustellen, vergleiche Kapitel 4. Ein Beispiel hierfür ist die Verwendung eines Teilers von 1,5. Als Subframewerte ergeben sich nach Runden auf ganze Zahlen die Zeiten wie in Tabelle 6.1 dargestellt.

Durch das geminderte Teilungsverhältnis sind nur noch 113 Grauwerte darstellbar, es ergeben sich jedoch verschiedene Darstellungsmöglichkeiten für einzelne Grauwerte.



Abbildung 6.9: Visuelle Auswirkungen der Korrektur statischer Konturen aufgrund ungleichmäßiger Subframebelegung. Ohne Korrektur (links), korrigiert (mitte) und überkompensiert (rechts).

Num. SF	GW(SF)
0	1
1	2
2	2
3	3
4	5
5	8
6	11
7	17
8	26
9	38

Tabelle 6.1: Beispiel für eine Zerlegung mit Teiler 1,5 zwischen benachbarten Subframezeiten.

Beispielsweise ist der Grauwert 64 darstellbar als:

$$\text{a) } 64 = 1 * 38 + 1 * 26 + 0 * 17 + 0 * 11 + 0 * 8 + 0 * 5 + 0 * 3 + 0 * 2 + 0 * 2 + 0 * 1 \quad (6.5)$$

$$\text{b) } 64 = 0 * 38 + 1 * 26 + 1 * 17 + 1 * 11 + 1 * 8 + 0 * 5 + 0 * 3 + 0 * 2 + 1 * 2 + 0 * 1 \quad (6.6)$$

Ziel ist es stets, für benachbarte Grauwerte⁹ möglichst ähnliche Lösungen zu finden, wobei Ähnlichkeit hier über Gleichheit der binären Darstellung definiert ist. Aus diesem Grund bietet es sich an, als Indikator den Hammingabstand d_H der binären Darstellung

⁹Die Zahl benachbarter Grauwerte, welche zur Betrachtung herangezogen wird, kann variiert werden. Insbesondere für helle Grauwerte muss diese jedoch möglichst groß sein.

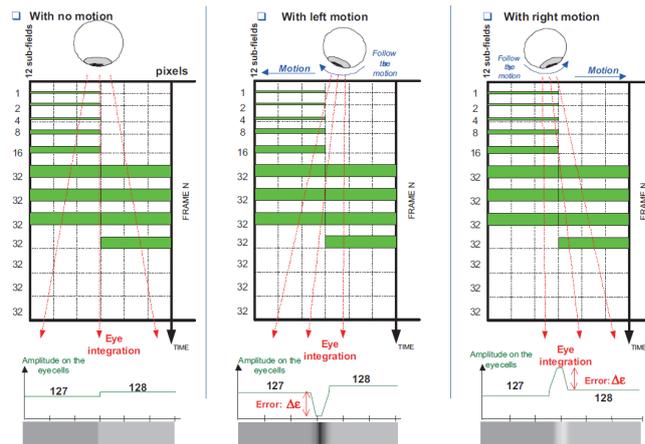


Abbildung 6.10: Entstehung falscher Konturen aus einer Relativbewegung des Auges zum Bildinhalt (aus: **Doyen2003**).

zweier Grauwerte GW heranzuziehen:

$$d_H = \sum_{i=0}^m |b(GW_1)[i] - b(GW_2)[i]| \tag{6.7}$$

mit $b(GW)[i]$ dem binären Wert der binären Darstellung des Grauwerts GW an der Position i . Für binäridentische Werte ergibt sich d_H zu Null. Je verschiedener die Werte, desto höher der Abstand. Da mit steigender zeitlicher Wertigkeit und damit mit steigendem Einfluss eines Subframes die Gefahr für Konturen bedingt durch dieses Subframe ansteigt, bietet es sich an, den Hamming-Abstand zusätzlich zu gewichten:

$$d_{H,w} = \sum_{i=0}^m |b(GW_1)[i] - b(GW_2)[i]| * t_i \tag{6.8}$$

mit t_i der Leuchtdauer des Subframes oder einer anderen, der Subframegewichtung proportionalen Zahl. Über das beschriebene Verfahren wird ein Satz an Zerlegungen für jeden Grauwert bestimmt und im Prozessor in einer Tabelle abgespeichert. Für kritische Übergänge mit hohem Hamming-Abstand wird zudem erlaubt, die aneinandergrenzenden Grauwerte in einer Umgebung $GW \pm \epsilon$ anzupassen, um den Abstand zu verringern und somit die Gefahr von Konturen zu mindern. Ausgehend vom obigen Beispiel werden zwei benachbarte Pixel mit Grauwert 63 und 64 angenommen. Eine Darstellung für Grauwert 63 ist:

$$63 = 0 * 38 + 1 * 26 + 1 * 17 + 1 * 11 + 1 * 8 + 0 * 5 + 0 * 3 + 0 * 2 + 0 * 2 + 1 * 1 \tag{6.9}$$

Je nach Darstellung des benachbarten Pixels mit Grauwert 64 (vergleiche Tabelle 6.1)

ergibt sich ein gewichteter Hamming-Abstand von:

$$\begin{aligned} \text{a) } d_{H,w,a} &= |(1 - 0)| * 38 + |(0 - 1)| * 17 + |(0 - 1)| * 11 + |(0 - 1)| * 8 + |(0 - 1)| * 1 \\ &= 75 \end{aligned} \tag{6.10}$$

$$\text{b) } d_{H,w,b} = |(1 - 0)| * 2 + |(0 - 1)| * 1 = 3. \tag{6.11}$$

Durch Wahl der Darstellung b) kann dieser leicht auf $d_{H,w} = 3$ reduziert werden. Das Risiko für Konturen wird stark gemindert, da insbesondere die höherwertigen Subframes identisch belegt sind. Lediglich in den niedrigwertigen Subframes treten Differenzen auf. Sichtbare falsche Konturen entstehen hier jedoch nicht.

Um die durch die geänderte Zerlegung (Faktor < 2 zwischen benachbarten Subframes) verlorene Graustufenauflösung auszugleichen, kommen die in Kapitel 6.1 beschriebenen digitalen Halbtonverfahren zum Einsatz. Zusätzlich zur Anpassung der Zerlegung wurde eine möglichst hohe Bildwiederholrate realisiert. Für den Prototyp mit dem Display von Visionox ergibt sich, begrenzt durch die Ansteuergeschwindigkeit des Zeilentreibers, eine maximale Bildwiederholrate von ≈ 90 Hz bei Verwendung von 13 Subframes, welche linear dargestellt 10 Graustufen auflösen und weitere 2 Graustufen realisiert durch Halbtonverfahren. Mit diesem System konnten digitale falsche Konturen zufriedenstellend unterdrückt werden.

In Ermangelung an Prototypen konnten falsche Konturen auf größeren Displaydiagonalen noch nicht untersucht werden. Jedoch ließen sich weitere bekannte Methoden von PDP auf ein digitales AMOLED System übertragen, sodass hier kein Hindernis zu erwarten ist. Zu diesem Zweck stehen auch spezielle Prozessoren am Markt zur Verfügung, wie beispielsweise in **Doyen2003** beschrieben. Zur weiteren Verbesserung der Methode, sollte eine Analyse der dargestellten Bilder hinsichtlich ihrer Anfälligkeit für falsche Konturen erfolgen, um gegebenenfalls eine leichte Verschlechterung der Bildqualität zugunsten der Vermeidung von Konturen zu erlauben. Dies ist durch Parametrisierung der zuvor beschriebenen Methode leicht zu erreichen.

Abbildung 6.11 zeigt eine Übersicht der beschriebenen Ansätze zur Bildzerlegung sowie ihre zeitliche Abfolge bei der Anwendung auf Bilddaten. Nach Einspielen der Daten werden diese deserialisiert und einer Gamma- sowie Weißpunkt Korrektur unterzogen. Danach sind die Datenwerte auf die menschliche Wahrnehmung angepasst. Zur Erhöhung der darstellbaren Farbtiefe kommen zusätzlich Halbtonverfahren wie ED und FRC zur Anwendung. Hiernach werden die Bilddaten in einzelne Subframes zerlegt. Algorithmen zur Vermeidung von dynamischen, falschen Konturen können hier angewendet werden, indem die Zerlegung wie zuvor beschrieben entsprechend manipuliert wird. Die Daten werden im DRAM abgelegt, dieses dient als Zwischenpuffer. Aus diesem werden sie zur Darstellung auf dem Display ausgelesen. Zum Vermeiden statischer Konturen kann entsprechend dem vorgestellten Verfahren die Ansteuerdauer des Displays basierend auf dem Inhalt der Subframes angepasst werden. Hierfür werden die Bilddaten der sogenannten „Hamming Weight Correction“ (HWC) zugeführt. Weitere Verfahren zur Vermeidung von Temperatureinflüssen oder zur Alterungskorrektur greifen auf die für das menschliche Auge linearen Daten zu. Diese Mechanismen setzen daher im Bereich

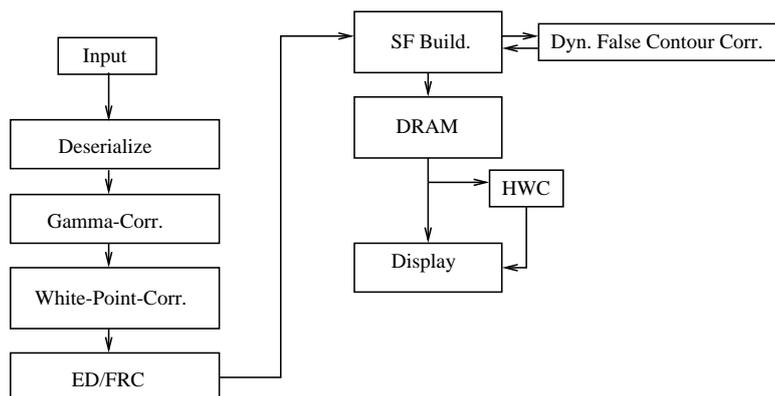


Abbildung 6.11: Übersicht der zur Bildzerlegung verwendeten Ansätze und Ablauf der Zerlegung.

vor der Gamma- und Weißpunkt Korrektur an.

6.4 Kompensation von Temperatureinflüssen

In einem Displaysystem gibt es verschiedene Quellen für Temperatureintrag. Die einflussreichsten sind hier Effekte basierend auf Eigenerwärmung der Displaymatrix sowie Temperatureintrag von Systemkomponenten wie Prozessoren. Die Einflüsse der Temperaturänderungen auf ein AMOLED-System lassen sich getrennt als Einflüsse auf die OLED selbst und als Einflüsse auf die TFT-Matrix betrachten. Änderungen in der TFT-Matrix lassen sich vorwiegend als Änderungen in der Schwellspannung und in der Ladungsträgermobilität der TFT identifizieren, vergleiche unter anderen **Tai2005** und **Shen2011**. Da diese bei Verwendung eines analogen Treiberschemas, vergleiche Abschnitt 3.1, direkten Einfluss auf den durch die OLED fließenden Strom und somit auf die Helligkeit nehmen, konzentrieren sich bisher untersuchte Ansätze der Temperaturkompensation auf das Ausgleichen dieser Einflüsse. Für das in dieser Arbeit verwendete digitale Treiberschema haben Änderungen in den TFT-Eigenschaften nur geringen Einfluss, weswegen die Analyse des Temperaturverhaltens der OLED selbst im Vordergrund stand. Aufgrund der komplexen Bauteilstruktur insbesondere von SMOLED und der Vielzahl an verwendeten Materialien lassen sich aus der Literatur bekannte Resultate, vergleiche beispielsweise **Suo2008**, nur bedingt auf real verwendete OLED-Materialien übertragen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde daher eine Masterthesis betreut, welche sich mit dem Thema der Temperaturabhängigkeit der OLED-Charakteristik näher beschäftigte. Zur Untersuchung dienten hierbei aktuelle Materialien von namhaften Herstellern, wie sie auch in kommerziellen Displays zum Einsatz kommen. Die Ergebnisse sollen hier nur der Vollständigkeit halber kurz vorgestellt werden, detaillierte Resultate und Angaben können in **Kanakasundaram2016** nachgelesen werden.

Untersuchungen an den von Merck und Novaled zur Verfügung gestellten OLED zeigten eine Änderung des Stromes I durch die OLED bei konstanter Spannung mit einer mittleren Temperaturabhängigkeit von

$$\frac{\Delta I/I_{ref}}{\Delta T} \approx +3 \frac{\%}{K}. \quad (6.12)$$

Gleichzeitig wurde die gemittelte Temperaturabhängigkeit der Leuchtdichte L zu

$$\frac{\Delta L/L_{ref}}{\Delta T} \approx +3,6 \frac{\%}{K} \quad (6.13)$$

gemessen. Hieraus lässt sich bereits schlussfolgern, dass der überwiegende Anteil des durch Temperaturdifferenzen entstehenden Fehlers auf den Strom durch die OLED zurückführbar ist. Dies deckt sich mit den gängigen Modellen für den Strom(-transport) durch eine SMOLED, vergleiche **So2010** und **Nowy2010**. Durch den Temperatureintrag können Injektionsbarrieren für die Ladungsträger leichter überwunden werden beziehungsweise die Mobilität der Ladungsträger nimmt zu¹⁰. Es ergibt sich somit eine starke Temperaturabhängigkeit des Stroms durch die OLED. Die Umsetzung des Stroms in sichtbares Licht kann als Stromeffizienz der OLED ausgedrückt werden. Diese kann durch geeignete Materialwahl und Zusammensetzung weitgehend unabhängig von der Temperatur gestaltet werden, wie beispielsweise in **Murata1999** gezeigt wird. Das digitale Treiberschema profitiert hier zudem von einem weitgehend konstanten Arbeitspunkt der OLED, was eine temperaturunabhängige Gestaltung der Stromeffizienz erleichtert. **Kanakasundaram2016** zeigt auch Messreihen, welche am Visionox Prototypen vorgenommen wurden und eine weitgehende Unabhängigkeit der Stromeffizienz von der Temperatur bestätigen. Es ist somit nur notwendig, die Verschiebung des Arbeitspunktes der OLED zu kompensieren um Auswirkungen der Temperatur auf die Leuchtdichte des Displays zu vermeiden. Einflüsse der Temperatur auf das Emissionsspektrum der OLED sind vernachlässigbar gering, wie Messungen zeigten. Durch höhere Temperaturen nimmt die Reaktionsgeschwindigkeit der OLED, im Sinne von Lichtextraktion nach Beaufschlagung mit Strom, zu. Bei sehr tiefen Temperaturen kann hier ein Nachteil für digitale Ansteuerung entstehen, da sehr kurze Lichtpulse, wie sie für niedrigwertige Bits notwendig sind, eventuell nicht mehr dargestellt werden können. Die hierfür notwendigen Temperaturen¹¹ liegen jedoch weit außerhalb des üblichen Anwendungsbereichs von Displays im Massenmarkt. Für Sonderanwendungen muss dies jedoch beachtet und gegebenenfalls eine Beheizung des Displays vorgesehen werden.

Zur Temperaturkompensation werden zwei getrennte Ansätze verfolgt, globale und lokale Kompensation. Allgemeines Ziel ist, Temperatureintrag von externen Komponenten wie Prozessoren in einem Displayssystem möglichst gleichmäßig auf die gesamte

¹⁰Für eine OLED muss zwischen verschiedenen den Strom begrenzenden Mechanismen unterschieden werden. Es kann ein Mechanismus vorherrschen, welcher den Strom durch begrenzte Ladungsträgerinjektion begrenzt oder der Strom wird durch Transporteffekte begrenzt. Welcher Mechanismus wirkt, ist abhängig von den verwendeten OLED Materialien wie auch dem Arbeitsregime der OLED. Die Betrachtung kann sich daher nicht allgemein auf nur einen Mechanismus beschränken.

¹¹Messungen am Lehrstuhl zeigten bei Temperaturen bis zu $\approx 5 \text{ }^\circ\text{C}$ noch keine sichtbaren Artefakte.

Displayfläche zu verteilen. Hierdurch ergibt sich nur eine globale Leuchtdichteänderung, welche vom Nutzer weniger wahrgenommen wird. Mögliche Systemansätze hierzu sind beispielsweise in **Miwa2015** beschrieben. Zur Kompensation eines solchen globalen Temperaturanstiegs wird an verschiedenen Orten in der Pixelmatrix der Strom durch die OLED bei bekannter Spannung gemessen und verglichen¹². Liegt eine Abweichung in zuvor definierten Grenzen vor, kann von globalem Einfluss ausgegangen werden. Über eine LUT oder Berechnung zur Laufzeit wird daraus ein Kompensationsfaktor ermittelt, um welchen der Strom korrigiert werden muss. Die Korrektur kann durch Anpassung der Ansteuerzeit der OLED und/oder durch Anpassung der globalen Versorgungsspannung erfolgen. Das Vorgehen ist in Abbildung 6.12 veranschaulicht. Es ergibt sich somit eine Abhängigkeit der Versorgungsspannung und/oder der Grauwerte von der Temperatur:

$$V_{OLED} = f(T) \quad (6.14)$$

$$GV_{comp.} = f(T, GV_{in}). \quad (6.15)$$

Bei einer Korrektur über die Versorgungsspannung ist zu beachten, dass bei der Verwendung von RGB-OLED der Weißpunkt der Darstellung verschoben wird. Dies muss durch entsprechende Bildprozessierung korrigiert werden. In **Kanakasundaram2016** ist die Wirksamkeit dieses Ansatzes dargestellt.

Durch die Verwendung von Metallen als Leitungs- und Deckschichten besitzt die Displaymatrix eine hohe Wärmeleitfähigkeit. Hierdurch werden lokale Temperaturerhöhungen stark verschmiert und eine lokale Kompensation ist nicht nötig. In Extremfällen kann dennoch eine lokale Korrektur angesetzt werden. Hierfür muss die Stromverteilung über dem Display bestimmt und Bildinhalte entsprechend korrigiert werden. Das notwendige Verfahren gleicht dem verwendeten Verfahren zur Kompensation von Alterungseffekten, welches nachfolgend beschrieben wird.

Insgesamt stellen Temperatureinflüsse einen großen Störfaktor für ein AMOLED-Displaysystem dar. Durch Verwendung des digitalen Treiberschemas wird das System abhängig von Verschiebungen in den Kennlinien der OLED. Mit der beschriebenen Methode können diese mit geringem Rechenaufwand und ohne zusätzlichen Hardwareaufwand einfach kompensiert werden. Da Temperaturänderungen durch die thermische Kapazität des Systems nicht abrupt sondern mit großer Zeitkonstante erfolgen, ist zudem eine Kompensation mit großen Zeitabständen¹³ ausreichend, was den Rechen- und Energieaufwand weiter senkt.

6.5 Fazit

Mit dem hier vorgestellten Prototypensystem konnten die bei einem digital angesteuerten AMOLED Display auftretenden Artefakte hinsichtlich ihrer Ursache charakterisiert und Verfahren zur Vermeidung dieser aufgezeigt werden. Resultat ist eine konturenfreie

¹²Siehe auch Ansatz zur Strommessung in Kapitel 7.

¹³Im Bereich mehrerer Sekunden bis hin zu einer Minute.

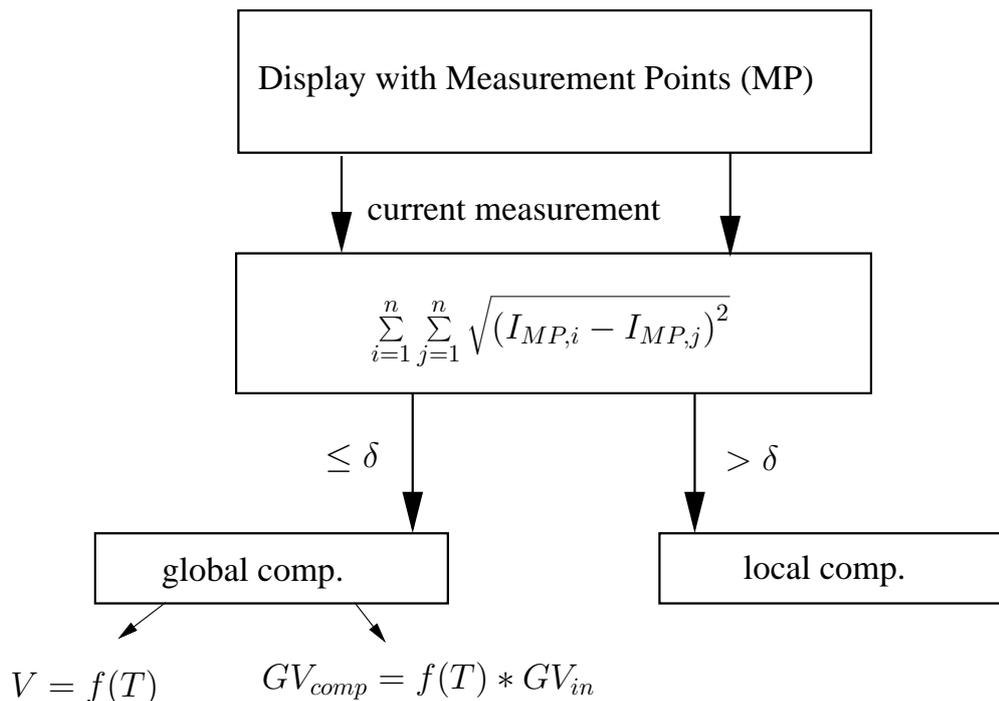


Abbildung 6.12: Vorgehen zur Detektion und Kompensation globaler Temperatureinflüsse.

Darstellung mit hoher Bildqualität, welche zudem von Temperaturabhängigkeiten befreit ist. Ein zusätzlicher Vorteil ergibt sich in Form der konstanten Leistungsaufnahme, welche unabhängig von der Temperatur ist. Durch Techniken wie ED und FRC kann eine gleiche oder gar höhere Farbtiefe im Vergleich zu analog angesteuerten Displays erreicht werden, ohne dass bei der Farbtreue, kompensiert durch entsprechend angepassten Weißabgleich, Nachteile entstehen.

Mit diesen Verbesserungen muss das digitale Treiberschema zukünftig auch auf Displays mit verschiedenen insbesondere aber großen Displaydiagonalen validiert werden. Hierbei liegt ein Fokus auf der Vermeidung von Konturartefakten. Gegebenenfalls sind weitere Methoden zur Vermeidung dieser, zum Beispiel „Motion Estimation and Compensation“, wie beschrieben zu testen und im Grafikprozessor zu integrieren. Dieser kann zudem weiter verbessert werden, indem die Subframezerlegung effizienter gestaltet wird und Methoden wie SES zur Anwendung kommen, um weitere Steigerungen der Bildwiederholrate zu ermöglichen. Sofern durch Eigenschaften der neuen Prototypen-Panels bedingt, müssen Methoden wie die Kompensation von Spannungsabfällen ergänzt werden und in die Pixel-Pipeline integriert werden.

7 Alterung

Alterungseffekte der lichtemittierenden Elemente eines Displays stellen für alle Displaysysteme eine Herausforderung dar. Systeme, welche eine globale oder wenige stark verteilte Lichtquellen verwenden (beispielsweise LCD), verlieren bei Abnahme deren Intensität nur geringfügig an Darstellungsqualität. Es nimmt die Spitzenhelligkeit und damit der darstellbare Kontrast ab. Da dieser Vorgang jedoch kontinuierlich und sehr langsam erfolgt, sind die Auswirkungen für den Endnutzer in der Regel nur im direkten Vergleich mit einem neuwertigen Display gleichen Typs sichtbar und daher akzeptiert. Da keine Einbrenneffekte existieren, ist auch kein Bildschirmschoner notwendig.

Bei Displaysystemen, welche aktiv emittierende Pixel verwenden, wie beispielsweise CRT, PDP und AMOLED, stellt Alterung eine deutlich größere Herausforderung dar. Die Kompensation dieser kann als eines der maßgeblichen Qualitätskriterien für solche Displaysysteme gesehen werden.

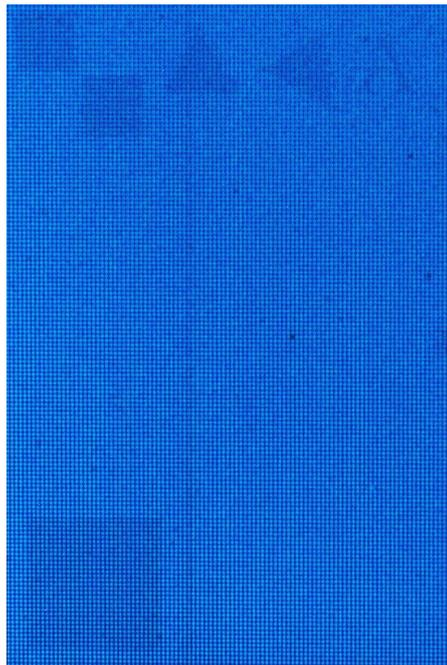


Abbildung 7.1: Ausgewählter Bereich der Darstellung eines homogen blauen Bildinhaltes auf einem AMOLED-Display mit Einbrenneffekt.

Abbildung 7.1 zeigt die sichtbaren Auswirkungen der Alterung von Pixeln auf die Darstellungsqualität eines AMOLED-Displays¹. Grundlegend ist der Effekt darauf zurückzuführen, dass die Leuchtdichte eines Pixels mit der Zeit, in welcher er aktiv ist, abnimmt. Durch langzeitige Darstellung von Bildinhalten mit statischen Anteilen kommt es dazu, dass benachbarte Pixel unterschiedliche Leuchtdichten bei identischem Grauwert besitzen. Dieses Phänomen ist als „Image Sticking“ (zu deutsch etwa: Festkleben von Bildinhalten) bekannt. Da das menschliche Auge in der Lage ist, bei homogenen Flächen bereits Abweichungen im Bereich von 0,5 % der Leuchtdichte zwischen zwei benachbarten Pixeln aufzulösen², ist es notwendig, diesen Effekt zu kompensieren, um eine gute Darstellungsqualität sicher zu stellen. Image Sticking stellt derzeit eines der größten Probleme bei AMOLED Displays und damit auch ein großes Markthindernis dar. Auf die physikalischen und chemischen Hintergründe wird im Folgenden kurz eingegangen und der in dieser Arbeit entwickelte Ansatz und die Methode zur Kompensation der Leuchtdichteabnahme eines digital angesteuerten AMOLED-Displays dargelegt.

7.1 OLED-Alterung und Alterungsmodell

Zur Entwicklung einer Kompensationsmethode ist es vorab notwendig, die Mechanismen und Auswirkungen der Alterung in einem AMOLED-Panel zu verstehen. Aus diesem Verständnis heraus muss ein Modell abgeleitet werden, welches optische Größen (Leuchtdichte) mit messbaren, in der Regel elektrischen Größen (Pixelstrom) verknüpft. Hierüber kann umgekehrt aus der Messgröße eine Information über den optischen Zustand des Pixels gewonnen werden. In einem ersten Schritt muss die Ursache der Abnahme der Leuchtdichte verstanden werden. An der Lichtemission sind grundlegend zwei Bauteile beteiligt, der ansteuernde Transistor sowie die lichtemittierende OLED selbst, vergleiche Kapitel 2. Beide können von Effekten betroffen sein, welche ihre Eigenschaften über der Betriebsdauer beeinflussen.

Der die OLED ansteuernde TFT verändert durch Belastung seine Schwellspannung und auch die Ladungsträgerbeweglichkeit im TFT und somit die Leitungseigenschaften variieren. Dies stellt bei Verwendung eines analogen Treiberschemas eine große Herausforderung dar, weshalb dort verschiedene intern kompensierte Schaltungen zum Einsatz kommen. Wie auch in **DeRoose2014** gezeigt, ist bei Verwendung eines digitalen Treiberschemas der Einfluss von Eigenschaftsänderungen des TFT auf den OLED-Strom vernachlässigbar, sodass hier keine Kompensation notwendig ist. Für moderne TFT-Prozesse konnte zudem die Langzeitstabilität der TFT deutlich erhöht werden, sodass deren Zeitkonstante deutlich größer ist als die der Änderung der OLED Eigenschaften und daher ein Fokus auf die Kompensation der OLED-Degradation gelegt werden kann.

¹Es wird darauf hingewiesen, dass die zur Illustration von Alterungseffekten verwendeten Bilder in dieser Arbeit zur besseren Sichtbarkeit des Effektes in der gedruckten Version teilweise durch Kontrast- und Helligkeitsanpassung nachbearbeitet wurden. Dies ist notwendig, da der begrenzte Farbraum und die Dynamik des Druckbildes nicht ausreichend ist, um alle Effekte gut sichtbar darzustellen.

²Vergleiche beispielsweise **Chen2012**, Seiten 111 ff.

Die genauen Alterungsmechanismen in der OLED selbst sind Gegenstand aktueller Forschung. Frühe Arbeiten von **Kobrin2003** oder auch **Soh2006** betrachten das Emissionsverhalten der OLED über der Zeit bei verschiedenen Ansteuerbedingungen. Es zeigt sich, dass das Alterungsverhalten von der Amplitude und Dauer der Ansteuerung abhängig ist. Für einzelne OLEDs kann die zeitliche Abnahme der Leuchtdichte L_0 mit einer Halbwertszeit t_{50} sowie einem Fitparameter α durch eine Gleichung der Form

$$L(t) = \frac{L_0}{1 + (t/t_{50})^\alpha} \quad (7.1)$$

gut beschrieben werden. Die chemischen und physikalischen Prozesse dahinter sind jedoch stark abhängig von den im Einzelfall verwendeten Materialien und Strukturen, womit sich der Fitparameter α nicht allgemein festlegen lässt. Wie **Soh2006** zeigt, ist zudem die Halbwertszeit t_{50} abhängig von der Ansteuerung der OLED. Ebendiese variiert für ein reales Displaysystem jedoch stark. So wird stets eine Modulation der Amplitude (analoge Ansteuerung) beziehungsweise der Ansteuerzeit (digitale Ansteuerung) vorgenommen, um verschiedene Pixelhelligkeiten zu realisieren. Zudem können auf einem Display lokal verschiedene Einflüsse wie Temperatur und andere Umwelteinflüsse nicht ausgeschlossen werden. Eine exakte Modellierung des Alterungsverhaltens der OLED, welche all diese Einflüsse hinreichend genau abbildet, ist nicht möglich, sodass es notwendig ist, eine Messgröße für den Alterungszustand einer OLED zu finden. Einfache, auf der Messung der aktiven Zeit der OLED basierende Vorhersagen sind daher nicht ausreichend, um einen Ansatz zur Alterungskompensation zu realisieren.

Um das Alterungsverhalten der OLED genauer zu betrachten, bietet sich der Weg über die gängige Modellierung des Emissionsverhaltens der OLED an. Als stromgesteuertes Bauelement kann dieses abhängig von der Ansteuerspannung V und der Zeit t dargestellt werden als

$$L_{OLED}(V,t) = I_{OLED}(V,t) * \eta_I(V,t) \quad (7.2)$$

mit η_I der Stromeffizienz der OLED in Cd/A. $I_{OLED}(V,t)$ beschreibt die Diodenkennlinie der OLED, welche durch die Shockley-Gleichung beschrieben werden kann. Durch Akkumulation von Ladungsträgern in den Injektionsschichten der OLED, Abnahme der Ladungsträgerinjektion durch chemische Veränderungen der Schichten sowie Änderungen in den Materialeigenschaften des Schichtaufbaus der OLED verschiebt sich diese Kennlinie mit der Zeit t in welcher die OLED aktiv war. Eine detaillierte Darstellung hierzu findet sich unter anderen in **So2010**. Während die Drift der I-V-Kennlinie bei analoger Ansteuerung unkritisch ist, muss sie bei digitaler Ansteuerung kompensiert werden, da sich der OLED-Strom bei konstanter Spannung ändern würde, vergleiche Abbildung 7.5. Um sicherzustellen, dass die OLED die gewünschte Leuchtdichte beibehält, muss diese Änderung des Stroms kompensiert werden.

Auch die Stromeffizienz der OLED $\eta_I(V,t)$ ist abhängig vom Arbeitspunkt der OLED und verändert sich mit der Betriebsdauer t . Die zugrundeliegenden physikalischen Mechanismen sind umstritten und auch stark von der Materialwahl abhängig. **So2010** oder auch **Schmidt2013** liefern Erklärungsansätze. Gemeinsam ist allen Ansätzen die Annahme,

dass überwiegend die Abnahme der Quanteneffizienz der OLED die Abnahme der Gesamteffizienz verursacht. Es finden Rekombinationen in der Emitterschicht statt, welche jedoch keine Photonen und somit kein Licht erzeugen. Effekte auf die Lichtauskopplung aus der OLED sind vernachlässigbar. Eine sehr umfassende Darstellung der Mechanismen findet sich in **Scholz2015**. Auf diese soll hier jedoch nicht weiter eingegangen werden, da die Realisierung der Alterungskompensation im Fokus dieser Arbeit steht.

Soll die Abnahme der OLED-Leuchtdichte nicht wie zuvor vorgestellt nur anhand der (aufsummierten) Leuchtdauer modelliert werden, so ist es notwendig, eine messbare Größe welche charakteristisch für den Alterungszustand der OLED ist, zu finden. In einem Displaysystem sind grundsätzlich nur elektrische Messgrößen leicht zu realisieren. Die Erfassung optischer Größen wie der Leuchtdichte wäre bei einem Gerät im realen Einsatz nicht durchführbar. Die Stromeffizienz η_I muss aus diesen elektrischen Messgrößen abgeleitet werden können. Dieser Rückschluss aus den elektrischen auf die optischen Eigenschaften der OLED stellt eine große Herausforderung dar, vergleiche auch **Schmidt2015**. Wie in **So2010** dargelegt, existieren Anhaltspunkte, dass für die in ihren Untersuchungen verwendeten OLED für die optische und elektrische Alterung unabhängige Mechanismen verantwortlich sind. Somit wäre ein Rückschluss, wie zuvor beschrieben, nicht möglich. Um dies weiter zu untersuchen, wurden Proben real in Displaysystemen verwendeter OLED-Strukturen näher untersucht. Die Ergebnisse entstanden in Zusammenarbeit mit Herrn Xingtong Jiang und sind teilweise in **Jiang2015** veröffentlicht.

Die untersuchten OLED-Proben wurden über mehrere Wochen angesteuert und in regelmäßigen Abständen deren Leuchtdichte sowie Diodenkennlinie gemessen³. Im Vordergrund stand das Etablieren einer Methode wie sie im realen System auch leicht implementierbar wäre. Transiente und frequenzbasierte Messansätze wie Impedanzspektroskopie und C-V-Messung erfordern starke Anpassungen an der Displaystruktur sowie aufwendige zusätzliche Messtechnik und Prozessierung im Gerät. Diese Ansätze werden in teilweise bereits kommerziell verfügbaren Systemen wie der „Max Life“ Technologie von IGNIS verwendet. Sie erfordern aber speziell angefertigte Displays, vergleiche beispielsweise **Nathan2012**. Anpassungen der OLED-Materialien führen zudem zu starken Unterschieden in der Sensitivität der C-V-Messungen hinsichtlich Änderungen der OLED durch Alterung. So existieren Materialien, welche starke Abhängigkeiten zeigen, andere wiederum weisen praktisch keine Sensitivität auf. Eine einfache Messgröße, welche bei digitaler Ansteuerung leicht erfassbar ist und auch im Feld zur Verfügung steht, stellt eine Charakterisierung der I-V-Kennlinie dar. Diese ist auch im fertig gestellten System und sogar im Feld bei Verwendung des Displays beim Endnutzer messbar. Voraussetzung ist lediglich ein System zur Messung des Stromes durch die OLED bei bekannter angelegter Spannung. Es muss jedoch gezeigt werden, dass es möglich ist, über die gemessene

³Anfängliche Messungen mit der in **Nowy2010**, **Schmidt2013** vorgeschlagenen Methode der Impedanzspektroskopie zur Analyse des Alterungszustandes zeigten keine Sensitivität bei den verwendeten Materialien. Darum wurde von weiteren Untersuchungen abgesehen. Im Gespräch mit Prof. Dr. Brütting und Dr. Schmidt, beide Universität Augsburg, wurde erläutert, dass auch dort bekannt ist, dass die Impedanzmessung nicht bei allen OLED-Materialien gleiche Sensitivität zeigt. Die Ursachen hierfür sind Gegenstand aktueller Forschung.

elektrische Kennlinie die notwendigen Rückschlüsse auf den optischen Eigenschaften des Displays zu ziehen. Zudem müssen Untersuchungen an Materialien verschiedener Hersteller durchgeführt werden, ob eine Korrelation zwischen elektrischen und optischen Eigenschaften stets gegeben ist. Hierfür werden im Folgenden die Messergebnisse der OLED-Charakterisierung gezeigt und diskutiert, die eigentliche Kompensationsmethode dargestellt und die Realisierung eines Gesamtsystems vorgestellt.

7.2 Zustandserfassung im Displaysystem

Die vorgestellten Kompensationsansätze für Alterung und Temperatur benötigen eine Messung der Verteilung der Pixelströme auf der gesamten Displayfläche. Hierfür wurde ein separates Modul realisiert, welches in der positiven Versorgungsleitung des Displays eingeschleift wird. Abbildung 7.2 zeigt das Prinzipschaltbild der Sensorschaltung.

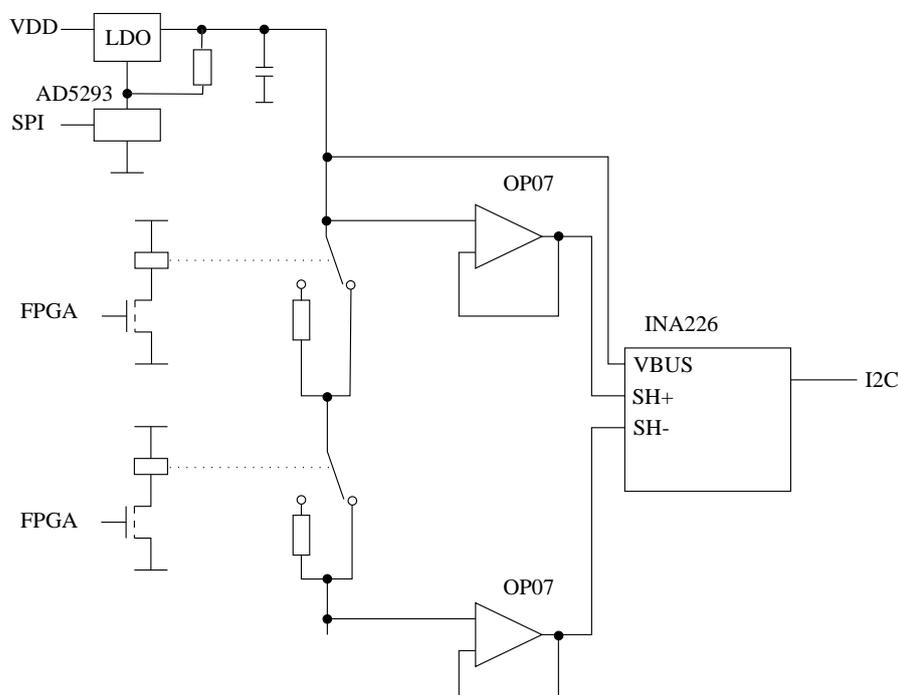


Abbildung 7.2: Prinzipschaltbild des Pixelstromsensors.

Zur Messung des Stroms werden Shuntwiderstände verwendet. Für eine höhere Flexibilität können diese durch einen parallelen Schalter beziehungsweise ein Relais zu und weggeschaltet werden, um beispielsweise verschiedene Messbereiche zu ermöglichen. Das Umschalten zwischen den Messbereichen wird vom FPGA gesteuert. Der entstehende Spannungsabfall wird von einem integrierten Strommonitor⁴ ausgewertet. Dieser bietet

⁴INA226 von Texas Instruments.

ein digitales Interface (I2C) zum direkten Rücklesen der Messwerte beispielsweise in das FPGA. Um Verfälschungen des Messwertes durch Ströme in die Eingänge des Bausteins zu vermeiden, wird das Spannungssignal mithilfe von Low-Offset-Operationsverstärkern gepuffert.

Neben der Messeinheit steht ein linearer Spannungsregler zur Variation der positiven Versorgungsspannung zur Verfügung. In Abbildung 7.2 befindet dieser Block sich im oberen linken Bereich. Dessen Ausgangssignal wird durch ein in die Rückkopplung eingefügtes digitales Potentiometer⁵ variiert, welches wiederum via SPI vom FPGA angesteuert werden kann. Der Strommonitor besitzt neben dem differentiellen Eingang für das Shunt-Signal einen zusätzlichen Eingang, mit welchem die positive Versorgungsspannung gemessen werden kann. Hiermit ist im FPGA eine Regelschleife realisiert, die eine Einstellung der Spannung mit einer hinreichenden Genauigkeit < 20 mV zulässt. Diese kann beispielsweise zur Kompensation von Temperaturartefakten oder zur Regelung der Displayhelligkeit verwendet werden. Zudem lässt sie es zu, den Strom durch die Pixel bei verschiedenen Spannungen zu messen und somit Abschnitte der I-V-Kennlinie der Pixel zu analysieren.

Mit diesem Schaltkreis können mithilfe großer Shuntwiderstände auch kleine Ströme zuverlässig gemessen werden. Begrenzt ist die Genauigkeit der Schaltung durch Rauschen und aufgrund externer Störungen wie eingekoppelte Signale. Durch Schirmung der Messschaltung können diese weitgehend unterdrückt werden. Die Eignung der Schaltung für Messungen zu Kompensationszwecken beim digitalen Treiberschema wurde mithilfe Vermessung bekannter Widerstände und Statistik hinsichtlich Wiederholbarkeit und Stabilität aufgezeigt⁶. Hierzu wurde auch der zeitliche Verlauf des Stromes in die Pixel betrachtet, vergleiche beispielsweise Abbildung 5.10 in Abschnitt 5.2.

Die erforderliche Auflösung des gemessenen Stroms ergibt sich durch die maximal vom menschlichen Auge auflösbare Abweichung der Leuchtdichte in homogenen Flächen von etwa 0,5%. Bei Verwendung eines digitalen Treiberschemas entspricht dies auch 0,5% Abweichung des Stroms im Arbeitspunkt. Dies ergibt eine notwendige effektive Auflösung des Messsystems von 9 bit. Typische Ströme durch ein Pixel bewegen sich im Bereich von $\approx 1\mu\text{A}$, sodass Stromdifferenzen von etwa $1..10$ nA darstellbar sein müssen. Durch Verwendung eines hochohmigen Shuntwiderstands kann dies leicht erreicht werden. Hier ist es jedoch notwendig, dass das System keine Offsetströme besitzt, welche den Messbereich übersteigen und somit das System in Sättigung bringen. Durch die Trennung der ansteuernden Elektronik von der eigentlichen Pixelmatrix war dies für beide verwendeten Prototypen realisierbar. Zum Ausgleich verbleibender geringer Offsetströme, beispielsweise durch schlechte Isolation oder parasitäre Effekte, wurde die Methode des CDS⁷ verwendet und diese hierdurch rechnerisch eliminiert. Durch die hohe Verstärkung kleiner Ströme im hochohmigen Shunt muss der gesamte Aufbau gegen externe Felder, insbesondere Einflüsse des 50 Hz Stromnetzes, geschirmt werden und der Leiterplatten-aufbau entsprechend optimiert sein. Durch entsprechende Bandsperrfilter lassen sich

⁵AD5293 von Analog Devices.

⁶Auszüge hierzu finden sich im Anhang.

⁷Correlated Double Sampling

bekannte Einflüsse in den Daten herausfiltern, statistische Rauschquellen können durch Mittelwertbildung über mehrere Messwerte eliminiert werden. Zum Erreichen eines höheren Signal-Rausch-Abstandes kann zudem für die Messung die Betriebsspannung der OLED deutlich angehoben werden, um größere Stromsignale zu erzeugen. Bei Verwendung dieses Verfahrens muss jedoch die Übertragung der Charakteristik der OLED in verschiedenen Arbeitspunkten für die im System verwendeten OLED bekannt und modelliert sein. Mangels verfügbarer Materialproben für die in den Prototypendisplays verwendeten Materialien wurde auf diesen Messansatz zugunsten der erreichbaren Genauigkeit verzichtet.

Neben der Messgenauigkeit ist die notwendige Zeit, in welcher die Stromverteilung über dem gesamten Display bestimmt werden kann, ein ausschlaggebender Faktor für die Eignung der Erfassungsmethode. Beim verwendeten Visionox Prototypen beträgt die Zeit für die Programmierung der gesamten Pixelmatrix etwa $600 \mu\text{s}$. Bei einer Wandlerzeit von $200 \mu\text{s}$ und einer notwendigen Einschwingphase von etwa $200 \mu\text{s}$ nach dem Aktivieren des Displays⁸ wird für die Charakterisierung eines Subpixels also etwa 1 ms benötigt. Die Erfassungszeit für das gesamte Display ergibt sich somit zu:

$$t_{meas} = 320 * 240 * 3 * 1 \text{ ms} \approx 230 \text{ s.} \quad (7.3)$$

Skaliert⁹ auf ein Full-HD Display ergäbe sich eine Messzeit von circa 2 Stunden, für ein 4k Display etwa 8 Stunden. Dies ist selbst bei Verwenden der Standby Phasen zur Charakterisierung unpraktikabel. Durch Aktivierung einer Zeile und Umschalten der aktiven Pixel durch den Spaltentreiber ohne erneute Programmierung der gesamten Displaymatrix kann für den Prototypen eine Messzeit von

$$t_{meas,opt} = 320 * (600 \mu\text{s} + 240 * 3 * 200 \mu\text{s}) \approx 47 \text{ s} \quad (7.4)$$

erreicht werden. Skaliert ergeben sich 20 Minuten für Full-HD und 80 Minuten für ein 4k Display. Eine Charakterisierung des Displays nach der Nutzung beispielsweise in nächtlichen Standby Phasen ist somit leicht möglich. Zur Realisierung dieser Methode ist es notwendig, Zeilentreiber zu verwenden, welche statische Ansteuerung ermöglichen oder es muss sichergestellt werden, dass die Ansteuerung der Zeile über die Messzeit hinreichend stabil ist.

In Abbildung 7.3 ist die gemessene Stromverteilung über einem Visionox Prototypendisplays gezeigt. Die Erhöhung des Stromes um etwa Faktor 2 auf der rechten Seite der Matrix ist auf Temperatureinflüsse des dort angebrachten Zeilentreibers zurückzuführen. Deutlich erkennbar sind die eingebrannten Muster im mittleren und linken unteren Bereich des Displays. Die Abweichungen im Strom betragen hier etwa 5%. Die Muster wurden so stark eingebrannt, dass die Artefakte deutlich sichtbar sind. Auch sind leichte

⁸Diese Zeit wurde aus Messungen ermittelt. Innerhalb dieser schwingen die kapazitiven Ströme in die Displaymatrix aus und die Versorgungsspannung stabilisiert sich, sodass sich ein stabiler Gleichstrom ergibt, welcher durch den Strom durch den aktivierten Pixel dominiert wird.

⁹Bei höheren Displayauflösungen müssen die Zeilentreiber höhere Geschwindigkeiten ermöglichen, sodass diese Abschätzung sehr konservativ ist.

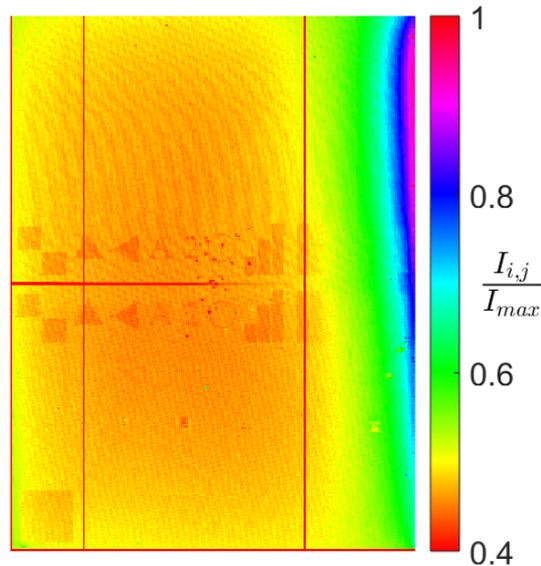


Abbildung 7.3: Gemessene Verteilung der Pixelströme auf einer Pixelmatrix.

Welligkeiten in der Stromverteilung, besonders im oberen mittleren Bereich zu sehen, welche auf Einkopplung von 50 Hz Signalen von der Stromversorgung zurückzuführen sind.

Um aus diesen Daten verwendbare Kompensationsfaktoren zu gewinnen, wird zuerst mit einem gleitenden Mittelwertfilter mit großer Filterumgebung¹⁰ für jeden Pixel ein Referenzstrom I_0 bestimmt, auf welchen der gemessene Strom normiert wird, vergleiche Gleichung 7.6. Zudem erfolgt im gleichen Berechnungsschritt für jeden Pixel eine Plausibilitätsabschätzung durch Betrachtung des Gradienten zu Nachbarwerten und des Absolutwertes um Fehlmessungen auszuschließen. Fehlerhaft gemessene Pixel werden durch Mittelwerte benachbarter Pixel korrigiert. Durch diese Filterung werden die Einflüsse mit niedriger örtlicher Frequenz eliminiert. Höherfrequente Störungen können durch erneute Mittelwertbildung mit engerer Filterumgebung oder durch Anwenden von auf FFT¹¹ basierenden Filtern beseitigt werden. Die Wahl der Filter hängt stark von der Art der Störung ab, nach Möglichkeit und um die Resultate nicht zu verfälschen, sollten Störungen durch externe Maßnahmen wie Abschirmung vermindert werden, sodass keine Filterung notwendig ist. Abweichungen in der Stromverteilung mit sehr geringem Gradienten können zusätzlich zugelassen werden, da diese für das Auge nicht wahrnehmbar sind.

Das Resultat einer solchen Berechnung ist in Abbildung 7.4 gezeigt, der erkennbare

¹⁰Die Wahl der Größe abhängig von den Eigenschaften des Displays sowie der eingebrannten Strukturen.

Im Zielsystem ist diese adaptiv durch Analyse der gemessenen Stromverteilung einzustellen.

¹¹Fast Fourier Transformation

Anstieg des Stromfaktors in der normierten Darstellung (rechte Abbildung) auf der rechten Seite des Displays ist für das Auge nicht sichtbar. Die abrupten Änderungen an den Kanten der eingebrennten Bereiche trotz geringerer Amplitude jedoch deutlich. Mit den so gewonnenen Daten kann eine Kompensation nach der im Folgenden vorgestellten Methode erfolgen.

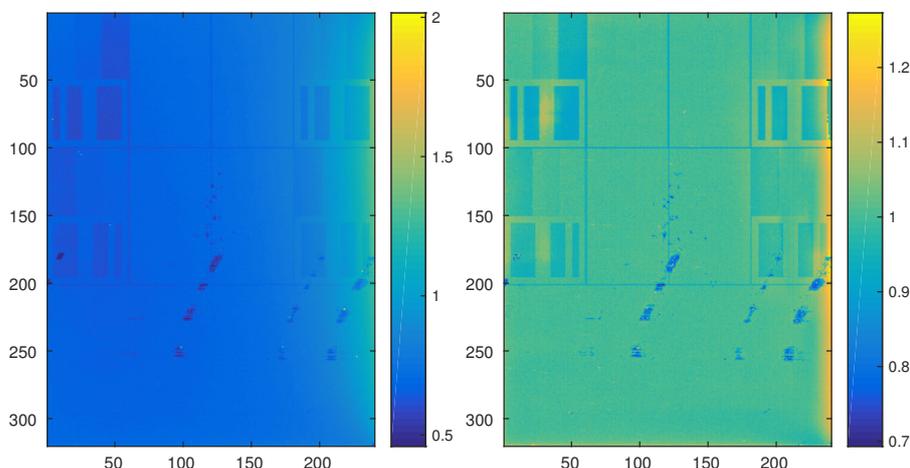


Abbildung 7.4: Gemessene Stromverteilung (links) auf einer Pixelmatrix (blauer Farbkanal) und normierte, gefilterte Darstellung (rechts).

7.3 Kompensationsmethode

Abbildung 7.5 zeigt die gemessene I-V-Kennlinie einer OLED im neuwertigen (englisch „pristine“) und gealterten („aged“) Zustand. Es zeigt sich die angesprochene Verschiebung der Kennlinie. Bei gleicher angelegter Spannung fließt weniger Strom durch die OLED. Betrachtet man den angestrebten Arbeitspunkt („desired operation point“), so ergeben sich unterschiedliche Anforderungen an Kompensationen für analoge beziehungsweise digitale Treiberschemata. Im analogen Fall kann der Strom durch die OLED konstant gehalten werden, so lange die treibende Stromquelle die zusätzliche notwendige Spannung zur Verfügung stellen kann. Die Stromquelle muss stets in der Sättigung betrieben werden und muss mit entsprechender Reserve dimensioniert werden. Aufgrund der gemeinsamen Versorgungsspannung verursacht diese notwendige Spannungsreserve zusätzliche Verlustleistung bei nicht gealterten Pixeln in der Displaymatrix. Jedoch ist es leicht möglich, gealterte OLED rein schaltungstechnisch zu kompensieren.

Im Vergleich hierzu wird bei digitaler Ansteuerung die OLED mit konstanter Spannung angesteuert, vergleiche Kapitel 3.2, womit der Strom durch die OLED mit Verschiebung der Kennlinie signifikant abnimmt. Um eine vergleichbare Lebensdauer (definiert über eine begrenzte Abnahme der Leuchtdichte) wie bei analoger Ansteuerung zu erreichen,

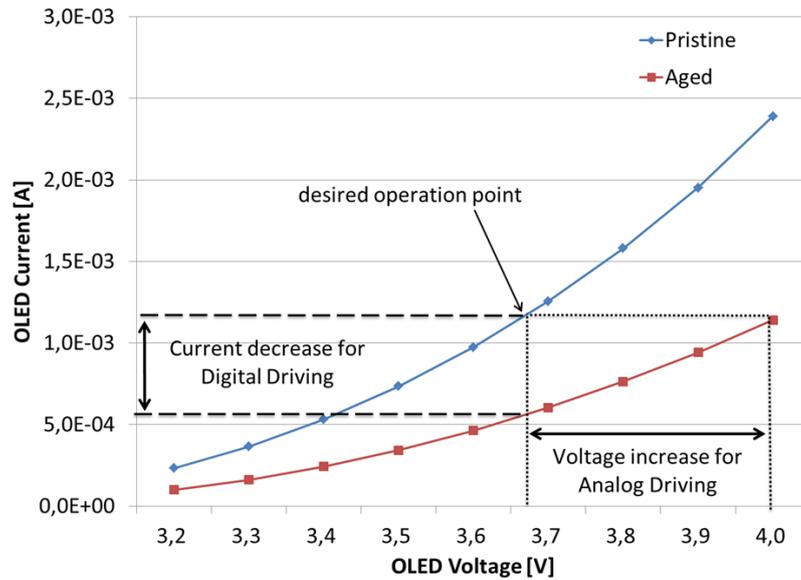


Abbildung 7.5: I-V-Kennlinie einer OLED im ungealterten und gealterten Zustand (vergleiche **Volkert2015a**).

muss diese Stromabnahme kompensiert werden. Da die Versorgungsspannung global für alle Pixel verwendet wird, kann eine Anpassung über diese nicht realisiert werden. Es ist notwendig, die Ansteuerzeit des Pixels, welche äquivalent zu seinem Grauwert gesehen werden kann, zur Korrektur zu verwenden. Dies kann als

$$GV_{comp,I} = f(I_{meas}, I_0) * GV_{orig} \quad (7.5)$$

allgemein ausgedrückt werden. I_{meas} ist hierbei der gemessene, bei einem bestimmten Arbeitspunkt durch die OLED fließende Strom. I_0 entspricht dem Erwartungswert, welcher Strom bei diesem Arbeitspunkt durch eine ungealterte OLED fließen sollte. Der funktionale Zusammenhang f kann displayspezifisch sein. Für die in dieser Arbeit verwendeten Displays zeigte sich ein, zu erwartender, linearer Zusammenhang des Stroms zum Grauwert über alle Grauwertbereich, vergleiche Kapitel 5.2. Damit ist es möglich den angepassten Grauwert mit

$$GV_{comp,I} = \left(\frac{I_{meas}}{I_0} \right)^{-1} * GV_{orig} \quad (7.6)$$

zu berechnen. Um die Korrektur für alle Grauwerte auf diese Art vornehmen zu können, muss bei Design des Systems eine Möglichkeit zur Bestimmung des Pixelstroms I_{meas} mit hinreichend genauer Auflösung (vergleiche Kapitel 7.2) sowie genügend Puffer im maximalen Grauwert vorgesehen werden, um gealterte Pixel entsprechend länger anzusteuern. Die genaue Wahl der Modellierung des funktionalen Zusammenhangs ist abhängig vom

Alterungsverhalten der eingesetzten OLED-Materialien. Alternativ kann die Korrektur auch über Anheben der Versorgungsspannung in Abhängigkeit des Zustandes der maximal gealterten OLED erfolgen:

$$V_{OLED} = g(\max(I_0 - I_{meas,ij})). \quad (7.7)$$

Die Funktion g ergibt sich aus der Diodenkennlinie der OLED. In diesem Fall ist es umgekehrt notwendig die Ansteuerzeiten, ergo den Grauwert, der nicht gealterten Pixel anzupassen. Zusätzlich ergeben sich durch den verschobenen Arbeitspunkt Nachteile wie Farbverschiebung oder Änderung der Stromeffizienz, sodass eine Korrektur nur anhand der Ansteuerzeit zu bevorzugen ist.

Wie in Gleichung 7.2 bereits angeführt, ändert sich durch Alterung jedoch nicht nur die I-V-Kennlinie, auch die Stromeffizienz der OLED wird beeinflusst. Abbildung 7.6 zeigt die gemessenen Verlauf der Stromeffizienz über dem Arbeitspunkt einer OLED in verschiedenen Alterungszuständen normiert auf die anfängliche Effizienz. Zur besseren Vergleichbarkeit der Auswirkungen auf analoge beziehungsweise digitale Ansteuerung ist der Arbeitspunkt hier als der die OLED durchfließende Strom aufgetragen.

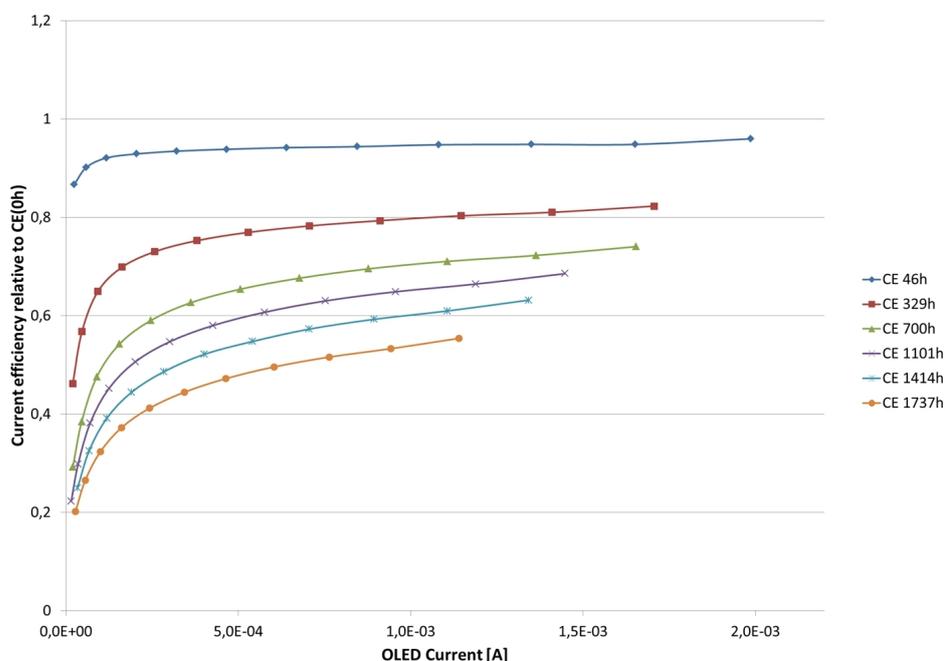


Abbildung 7.6: Stromeffizienz einer OLED relativ zum Ursprungszustand über dem OLED-Strom in verschiedenen Alterungszuständen.

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Stromeffizienz abnimmt, jedoch ist die Abnahme auch abhängig vom Arbeitspunkt. Bei analoger Ansteuerung wird ein sehr breites Band an Arbeitspunkten, beispielsweise von 1 nA bis 10 μ A genutzt. Die starke Änderung

der Stromeffizienz, absolut und relativ zu benachbarten Arbeitspunkten, muss hier aufwendig gemessen, berechnet und korrigiert werden. Zusätzlich schränkt die begrenzte analoge Auflösung der DAC die Möglichkeiten hier ein. Im Falle der Verwendung eines digitalen Ansteuerschemas ist der verwendete Arbeitspunkt stark begrenzt und verschiebt sich durch Alterung nur bedingt. Die entsprechende Effizienzänderung kann durch die zur Verfügung stehende Manipulation der Ansteuerzeit zudem sehr genau ausgeglichen werden und eine Modellierung ist stark vereinfacht, da die Dynamik der Effizienzabnahme beschränkt ist.

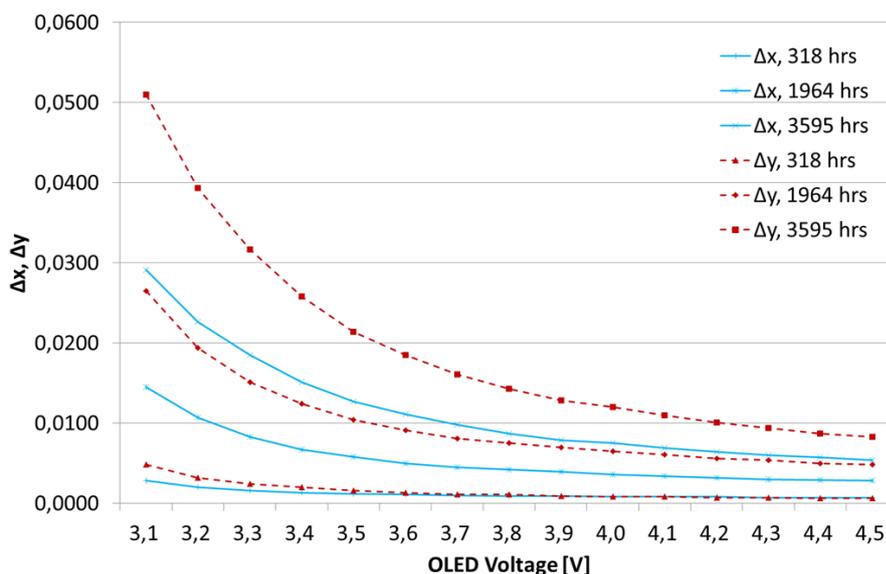


Abbildung 7.7: Änderungen in den Farbkoordinaten einer OLED in Abhängigkeit vom Arbeitspunkt bei verschiedenen Alterungszuständen.

Durch den eingegrenzten Bereich des OLED-Arbeitspunktes beim digitalen Treiberschema ergeben sich weitere Vorteile. In Abbildung 7.7 ist die gemessene Verschiebung im Farbort einer OLED über dem Arbeitspunkt in verschiedenen Alterungszuständen abgebildet. Diese betrifft insbesondere die niedrigen Leuchtdichten, im Bereich höherer Leuchtdichten ist sie deutlich geringer. Digital angesteuerte AMOLED-Displays zeigen daher eine höhere Farbstabilität über verschiedene Graustufen im gealterten Zustand. Der gepulste Betrieb der OLED kann zu Vorteilen das Alterungsverhalten betreffend führen. In **Kim2012** wird eine Studie präsentiert, die aufzeigt, dass gepulst betriebene OLED eine geringere Abnahme der Leuchtdichte bei gleicher Betriebsdauer aufweisen. Insbesondere nehmen Alterungseffekte wie die Verschiebung der Vorwärtsspannung, mit steigender Frequenz der Pulse ab. Dies lässt sich durch geringeres „Charge Trapping“¹² erklären. Somit ist ein digitales Treiberschema aufgrund der fehlenden intrinsischen Kompensation

¹²Ansammeln von ortsfesten Ladungsträgern insbesondere in den Injektions- und Transportschichten.

der Zunahme der Vorwärtsspannung zwar anfälliger für Alterungseffekte, jedoch kann durch die zur Verfügung stehenden Freiheitsgrad (Ansteuerzeit, Betriebsspannung) leicht eine Korrektur erfolgen. Negative Seiteneffekte wie Farbverschiebung können hier aktiv vermieden werden.

Zur Kompensation der Abnahme der Stromeffizienz ist es entsprechend notwendig, den Effizienzstatus der OLED zu überwachen. Dies ist aufgrund der fehlenden Messung der optischen Eigenschaften nicht unmittelbar möglich. Es wurde daher nach einer Möglichkeit gesucht, die Effizienz aus einer elektrischen Messgröße, welche im Displaysystem erfasst werden kann, abzuleiten. Die Abnahme der Effizienz ist auf Veränderungen in den emittierenden Schichten in der OLED zurückführbar. Bestehende Ansätze zur Messung basieren vorwiegend auf der Analyse des transienten Verhaltens der OLED - vergleiche beispielsweise **Schmidt2013**, **Scholz2015** - da Auswirkungen auf die I-V-Kennlinie nur geringfügig vorhanden und bei analoger Ansteuerung gegebenenfalls stark überlagert. Um ein empfindliches Überwachungssystem zu erhalten, welches zudem nur geringfügige Änderungen gegenüber bestehenden Systemen verlangt, wurde untersucht, inwiefern sich die I-V-Kennlinie der OLED bei digitaler Ansteuerung eignet, um daraus auch auf den Zustand der OLED-Stromeffizienz zurückzuschließen. Wertet man den Zusammenhang I-V-L bei verschiedenen konstanten Spannungen aus, erhält man direkt den funktionalen Zusammenhang von Strom und Effizienz und kann hieraus ein Modell erstellen. Entsprechende Messungen erfolgten wie zuvor an einzelnen Testmustern. Abbildung 7.9 zeigt das Resultat einer solchen Messreihe. Es konnte eine hohe Korrelation zwischen der Änderung der Stromeffizienz $\Delta\eta$ und der Abnahme des Stromes ΔI bei einem definierten Arbeitspunkt gemessen werden. Ein einfacher linearer Zusammenhang beschreibt die Messergebnisse bereits zufriedenstellend:

$$\Delta\eta = k_I * \Delta I + \Delta\eta_0 \quad (7.8)$$

mit einem von der Betriebsspannung V abhängigen Vorfaktor $k_I = f(V)$ sowie einem Offset in der Effizienzabnahme $\Delta\eta_0$. Bei Betrachtung des Offset fällt auf, dass dieser nur geringfügig variiert und für alle Arbeitspunkte negativ ist. Dies ist durch schnelle Veränderungsprozesse, die zu Beginn der OLED-Ansteuerung (in den ersten Stunden) in den Kontakt und Transportschichten stattfinden, erklärbar. Typischerweise spricht man hier von „Burn-In-Effekten“. Betrachtet man die Abnahme des OLED-Stromes über der Zeit in einem konstanten Arbeitspunkt, so äußert sich dies durch eine hohe Abnahmerate zu Beginn bedingt durch diese raschen Änderungen, danach flacht die Kurve deutlich ab. Hier überwiegen nun Änderungen in Schichten, welche auch die Stromeffizienz beeinflussen, sodass diese dort messbar wird. In Abbildung 7.8 ist die gemessene Änderung des Stroms durch eine bei konstanter Spannung gealterte OLED aufgezeigt. Die Trendlinie ($f(x) = 1,9614 * x^{-0,182}$) dient zur Veranschaulichung. Die Abweichungen im Bereich um 500 Stunden ließen sich auf unkonstante Testbedingungen zurückführen. Die Messdaten sind der Arbeit von Herrn Xingtong Jiang entnommen. Ein entsprechendes Modell ist gültig für $\Delta I > -\frac{\Delta\eta_0}{k_I}$, darunter ist ein einfaches lineares Modell ansetzbar. Abnahmen der Effizienz im Bereich $< 1\%$ sind zudem tolerierbar, da sie nicht zu sichtbaren Artefakten führen. Eine detaillierte Charakterisierung der

Effizienzabnahme zu Beginn der Alterung der OLED ist Gegenstand einer Bachelorarbeit, welche zum Zeitpunkt dieser Arbeit noch nicht abgeschlossen war.

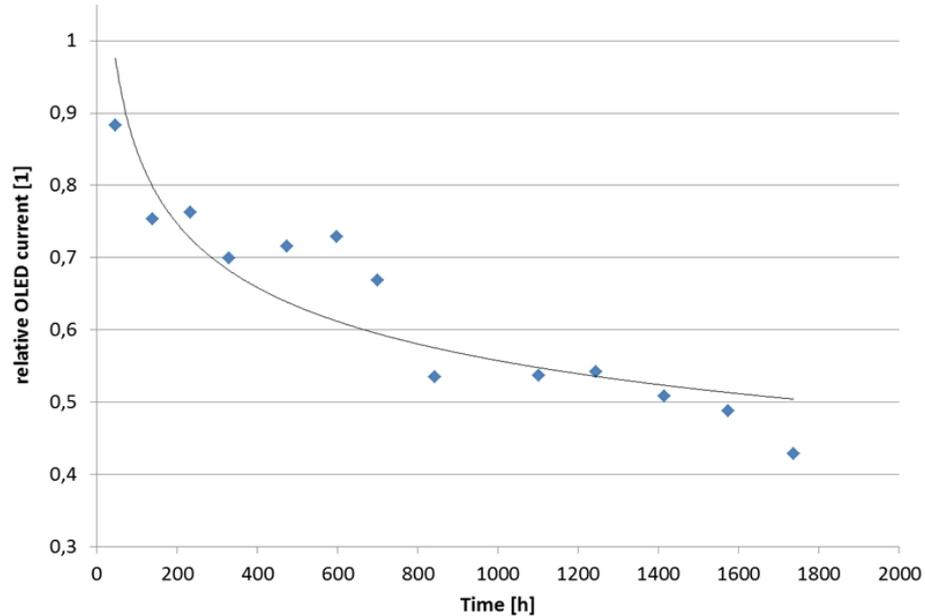


Abbildung 7.8: Strom durch eine OLED relativ zum Strom bei $t = 0$ h über der Zeit bei Alterung mit konstanter Spannungsbelastung.

Mit einer Modellierung der Effizienzabnahme nach Gleichung 7.8 kann bei Messung der Stromabnahme $\Delta I = I_{meas} - I_0$ diese kompensiert werden. Identisch zur Kompensation der Stromabnahme kann dies über Korrektur des Grauwertes des Pixels oder über dessen Betriebsspannung erfolgen:

$$GV_{comp,\eta} = \left(\frac{\eta_{meas}}{\eta_0} \right)^{-1} * GV_{orig} \quad (7.9)$$

$$V_{OLED} = h(\eta_{meas}) \quad (7.10)$$

worin $h()$ den Zusammenhang der Stromeffizienz und der Betriebsspannung im gemessenen Alterungszustand beschreibt. Bei Kompensation über die Betriebsspannung sind die gleichen Einschränkungen zu beachten wie bei der Kompensation der Stromabnahme über die Betriebsspannung.

Sollen nun sowohl Strom- als auch Stromeffizienzabnahme gemeinsam korrigiert werden, so ergibt sich bei Kompensation rein über die Betriebsspannung die Forderung:

$$\eta(t,V) * I(t,V) \stackrel{!}{=} \eta_0 * I_0. \quad (7.11)$$

Diese Forderung ist nicht allgemein erfüllbar, da ein Arbeitspunkt, welcher diese Forderung erfüllt, nicht immer existiert. Zudem ergibt sich für AMOLED-Displays in der Regel das

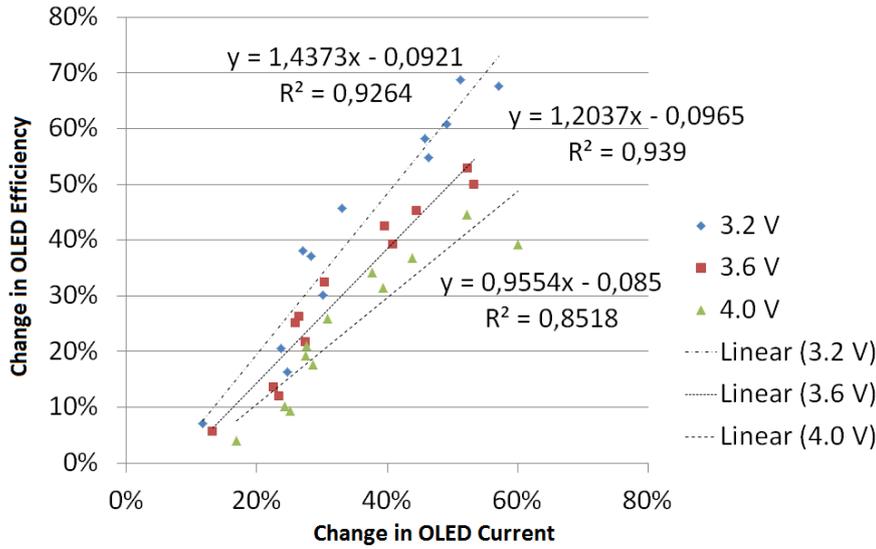


Abbildung 7.9: Zeitliche, prozentuale Änderung der Stromeffizienz über der Änderung des Stroms einer OLED bei verschiedenen Belastungen.

Problem, dass alle Pixel nur über eine gemeinsame Betriebsspannung verfügen und somit Quereinflüsse auftreten, welche wiederum aufwendig kompensiert werden müssen. Eine Kompensation rein über Manipulation des Grauwertes ist daher zielführender oder es wird ein kombiniertes Verfahren aus Anpassung der Betriebsspannung und des Grauwertes angewendet. Zur Kompensation rein über den Grauwert muss die Beziehung

$$GV_{comp} = f(I_{meas}, \eta_{meas}) * GV_{orig} \quad (7.12)$$

$$GV_{comp} = \left[\left(\frac{I_{meas}}{I_0} \right)^{-1} + \left(\frac{\eta_{meas}}{\eta_0} \right)^{-1} \right] * GV_{orig} \quad (7.13)$$

erfüllt sein. Ersetzt man $\eta_{meas} = \eta_0 - \Delta\eta = \eta_0 - \Delta\eta_0 - k_I * \Delta I$ gemäß Gleichung 7.8 und $\Delta I = I_0 - I_{meas}$ ergibt sich:

$$GV_{comp} = \left[\left(\frac{I_{meas}}{I_0} \right)^{-1} + \left(\frac{\eta_0 - \Delta\eta_0 - k_I * \Delta I}{\eta_0} \right)^{-1} \right] * GV_{orig} \quad (7.14)$$

$$= \left[\left(\frac{I_{meas}}{I_0} \right)^{-1} + \left(1 - \frac{\Delta\eta_0}{\eta_0} - \frac{k_I}{\eta_0} * I_0 + \frac{k_I}{\eta_0} * I_{meas} \right)^{-1} \right] * GV_{orig}. \quad (7.15)$$

Gleichung 7.15 lässt sich allgemein ausdrücken als

$$GV_{comp} = \left[(C_I * I_{meas})^{-1} + (C_{\eta,0} + C_{\eta} * I_{meas})^{-1} \right] * GV_{orig}. \quad (7.16)$$

Das Modell unterliegt den gleichen Einschränkungen wie Gleichung 7.8. Für kleine Änderungen der Effizienz muss ein separates Modell angesetzt werden. Es ergibt sich somit eine abschnittsweise Definition der Effizienzabnahme.

Mit Kenntnis der Messgröße I_{meas} und der Kompensationsfaktoren C_I für den Strom beziehungsweise C_η für die Stromeffizienz lassen sich somit die gealterten Pixel auf den gewünschten Grauwert einstellen. Insbesondere für stark gealterte OLED stellt dies eine Herausforderung dar, da eine entsprechend große Reserve im darstellbaren Grauwert vorgesehen werden muss. Hier wäre es möglich, die Betriebsspannung soweit zu manipulieren, dass das am stärksten gealterte Pixel mit der zur Verfügung stehenden Grauwertdynamik dargestellt werden kann. In diesem Fall muss jedoch auch für ungealterte Pixel eine Korrektur vorgenommen werden. Für diese muss der maximale Grauwert abgesenkt werden, was die Auflösung der Helligkeit für diese Pixel reduziert und daher zu Artefakten führen kann. Eine Kompensation rein über den Grauwert ist daher zu bevorzugen. Die darstellbare Reserve an Grauwerten muss so gewählt werden, dass die geforderte Lebensdauer des Displays erreicht wird.

Da die notwendige Bestimmung des OLED Stroms für jeden Pixel insbesondere für hochauflösende Displays mehrere Minuten benötigen kann und alle nicht zu vermessenden Pixel währenddessen deaktiviert sein müssen (vergleiche Abschnitt 7.2), ist eine Nachkalibrierung der Darstellung während der Nutzung des Displays nicht möglich. Sollte das Display über längere Zeit aktiv sein, sodass von Qualitätsverlust durch Alterungseffekte auszugehen ist, kann die beschriebene Methode durch Anwenden einer sogenannten „Data Counting“ Methode gestützt werden, vergleiche beispielsweise **Antonio-Torres2005** und **Jiang2016**. Hierbei wird ein funktionaler Zusammenhang zwischen der aktiven Zeit des Pixels und der Abnahme der Leuchtdichte ΔL bei gegebener Helligkeit des Displays L_0 vorab empirisch ermittelt und beispielsweise in einer LUT abgelegt. Zusätzliche Einflüsse wie die Temperatur T können auch entsprechend gemessen und abgebildet werden. Durch Aufsummieren der Grauwerte, welche ein Pixel i,j vom Einschalten des Displays bei $t = 0$ bis zur aktuellen Zeit $t = x$ darstellt, kann hierüber ein weiterer Kompensationsfaktor ermittelt und angewendet werden:

$$C_{DC} = f \left(L_0, \sum_{t=0}^x GV_{i,j,t}, T \right). \quad (7.17)$$

Je nach Charakteristik der verwendeten OLED ist es ausreichend, ein Modell für alle Alterungsstadien (sehr gleichmäßige Alterung) zu verwenden oder es muss zwischen verschiedenen Modellen gewechselt werden, siehe auch **Lee2012**. Da über dieses Verfahren nur geringe Variationen kompensiert werden, sind geringfügige Modellabweichungen kaum sichtbar. Nach einer festgelegten Betriebszeit ist eine Nachkalibrierung des Displays durch Bestimmung der Stromverteilung jedoch zwangsläufig notwendig. Bei einem linearen Zusammenhang, welcher für kleine aktive Zeiten gegeben ist, kann Gleichung 7.16 hiermit erweitert werden zu:

$$GV_{comp} = \left[(C_I * I_{meas})^{-1} + (C_{\eta,0} + C_\eta * I_{meas})^{-1} + C_{DC} * \sum_{t=0}^x GV_{i,j,t} \right] * GV_{orig}. \quad (7.18)$$

Der Zeitpunkt $t = 0$ stellt hier immer den Zeitpunkt dar, in welchem zuletzt durch Stromverteilungsmessung kalibriert wurde. Sollen größere Abstände zwischen den Nach-

messungen liegen, so ist es je nach Charakteristik des Displays notwendig, den Zusammenhang von aktiver Zeit und Leuchtdichteabnahme durch ein Polynom höheren Grades zu modellieren.

Soll das vorgestellte Verfahren auf ein analoges AMOLED System übertragen werden oder liegt ein digitales System vor bei dem der Arbeitspunkt stark variiert, so müssen die geführten Betrachtungen in jedem dieser Arbeitspunkte erfolgen. Zusätzlich kann sich durch Verschiebungen des Arbeitspunktes durch die Ansteuerung (Höhe des Displaystroms) eine rekursive Abhängigkeit der Kompensation und der Bilddaten ergeben. Durch die Kompensation werden die Ansteuerbedingungen soweit verändert, dass andere Arbeitspunkte vorliegen und geänderte Kompensationswerte angewendet werden müssen. Zur Lösung einer solchen Abhängigkeit können iterative Lösungsverfahren eingesetzt werden. In **Xu2013** ist ein solches Verfahren zur Anwendung bei Variation des OLED Arbeitspunktes durch die Darstellung von Bildinhalten dargelegt. Dieses kann mit geringen Abwandlungen auch auf das Problem der Alterungskompensation angewendet werden, vergleiche **Volkert2015a**. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit erfolgte jedoch keine vollständige Umsetzung des Ansatzes, sodass dieser hier nur im Sinne eines Ausblicks Erwähnung findet.

Mit dem hier vorgestellten Ansatz zur Kompensation von Alterungseffekten kann basierend auf einer einfachen Messmethodik die Abnahme der Darstellungsqualität erfolgreich vermieden werden. Zur Kompensation der Stromeffizienzabnahme wurden als erste Versuche Bereiche des Displays händisch vermessen und ein einfacher linearer Zusammenhang der Änderung des Stroms zur Änderung der Stromeffizienz abgeleitet. Bei geringer Variation der Einbrenndauer ist es mit diesem Faktor bereits mit hinreichender visueller Qualität, möglich die Abnahme zu kompensieren. Zukünftig muss hier eine verfeinerte Modellierung, wie zuvor vorgestellt, realisiert und implementiert werden.

7.4 Implementierung der Kompensation und Resultate

Eine Kombination aus dem notwendigen Grafikprozessor zur digitalen Ansteuerung, vergleiche 3.2, und der Bearbeitung der Stromverteilungsdaten zur Alterungskompensation überschreitet die Kapazitäten des im hier verwendeten Prototypen FPGA. Aus diesem Grund wurde eine Hybridlösung realisiert. Auch im realen System erfolgt die Akquise und Bearbeitung der Messdaten nur in großen zeitlichen Abständen und muss nicht in Echtzeit erfolgen, sodass der hier vorgestellte Ansatz leicht übertragbar ist. Es ist vorstellbar, dass zur Messwertverarbeitung ein spezieller Ablauf im FPGA geladen und gestartet wird, welcher die Filterung und Verarbeitung der Daten übernimmt. Dieser muss nicht zeitgleich zum eigentlichen Grafikprozessor aktiv sein, wodurch hier auch ein kostengünstigerer FPGA eingesetzt werden kann.

Abbildung 7.10 zeigt die Messwertverarbeitung durch FPGA und PC (Arbeitsplatzrechner). Die Ansteuerung und Auswertung des Stromsignals wird vom FPGA übernommen, welcher die Rohdaten an den PC sendet. Dieser übernimmt die Filterung, Normierung und andere gewünschte Anpassungen an den Daten. Als Resultat werden eine oder

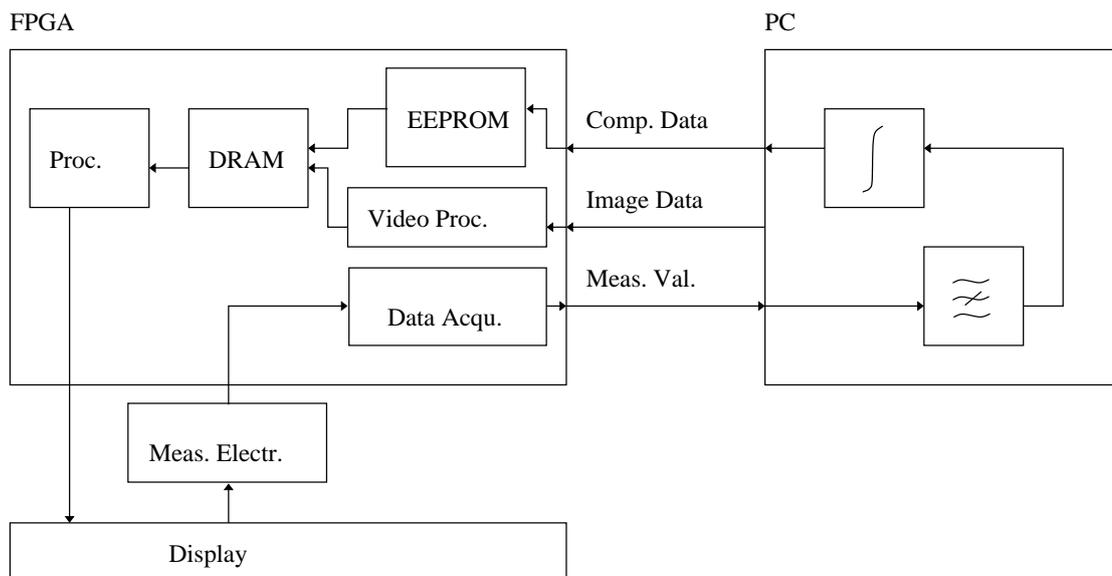


Abbildung 7.10: Hybride Verarbeitung der Messwerte durch PC und FPGA.

mehrere Matrizen mit Kompensationsdaten, in der Regel mindestens 3 für die unabhängige Kompensation der drei Farbkanäle, in ein EEPROM¹³ gespeichert, auf welches der FPGA Zugriff hat. Bei Start des Systems wird der entsprechende Bereich in das DRAM geladen, womit die Daten mit sehr geringer Latenz zur Verfügung stehen und in Echtzeit auf eingehende Bilddaten angewendet werden können. Hierdurch ist es möglich, auch Bewegtbilder (Videos) zu kompensieren. Zusätzlich können Faktoren wie zur Kompensation der Abnahme der Stromeffizienz in der Kompensationsmatrix hinterlegt werden oder als feste Faktoren dem FPGA zur Verfügung gestellt werden. Der Bereich der Messelektronik ist nur symbolisch im FPGA platziert, im realen System stellt er einen separaten Schaltungsteil dar. Zur Minderung von Störeinflüssen sollte er nahe zur Pixelmatrix platziert werden, die Übergabe der Messwerte an den eigentlichen Prozessor erfolgt digital.

Die Berechnung der kompensierten Bilddaten erfolgt im Takt des eingehenden Datenstroms, sodass hier keine zusätzliche Verzögerung erfolgt. Hierfür ist es notwendig, die Kompensationsdaten für eine Zeile (bei zeilenweiser Zuspiegelung der Bilddaten) in einen dedizierten SRAM¹⁴ Bereich zu laden. Auf diesen kann mit entsprechend hoher Taktung zugegriffen werden. Der Transfer der Daten vom DRAM in das SRAM erfolgt in den Schwarzschildern (Blanking) des Bilddatenstroms. Die Gesamtperformance der Bildarstellung wird somit nicht beeinträchtigt, sodass negative Effekte auf die visuelle Qualität wie beispielsweise die Bildwiederholrate ausgeschlossen sind.

¹³Electronic Erasable Programmable Read Only Memory

¹⁴Synchronous Random Access Memory



Abbildung 7.11: Auf dem Prototypen dargestelltes Testbild ohne (links) und mit Kompensation (rechts) der eingebrannten Bereiche.

Die Abbildungen 7.11 und 7.12 zeigen die Darstellung zweier Testbilder ohne und mit Kompensation auf einem Prototypendisplay mit eingebrannten Bildbereichen. Im kompensierten Zustand sind diese für das Auge nicht mehr von den anderen Bildbereichen differenzierbar, die ursprüngliche Darstellungsqualität des Displays ist wieder hergestellt. Durch das vorgestellte Verfahren konnten Abnahmen in der Leuchtdichte von bis zu 20% erfolgreich kompensiert werden. Eine übliche Grenze für die Verwendbarkeit von Displays ist eine Differenz in der Leuchtdichte benachbarter Pixel bei identischem Grauwert von 5%, sodass hier von einer Vervielfachung der Displaylebensdauer ausgegangen werden kann. Durch verbesserte Modellierung des Alterungsverhaltens und verfeinerte Messverfahren kann die vorgestellte Methode weiter verbessert und die Lebensdauer des Displays weiter gesteigert werden.

7.5 Integration in Gesamtsystem und Ausblick

In Abbildung 7.13 ist eine Gesamtübersicht über den realisierten Grafikprozessor zur Ansteuerung des digital gesteuerten Prototyps gezeigt. Neben den bereits in Kapitel 6 erläuterten Komponenten sind hier nun auch die Komponenten zur Alterungskompensation enthalten. Wie zu erkennen, benötigen mehrere Teileinheiten Zugriff auf den zentralen Speicher im DRAM. Um diese Speicherzugriffe zu entkoppeln, müssen, wie zuvor bereits erläutert, entweder Zeiten genutzt werden, in welchen der Bilddatenstrom nicht aktiv ist. Bei Verwenden hoher Auflösungen und fehlenden Blanking-Zeiten ist die



Abbildung 7.12: Auf dem Prototypen dargestelltes Testbild ohne (links) und mit Kompensation (rechts) der eingebrannten Bereiche.

Verwendung getrennter Speichercontroller für Bilddarstellung und Alterungskompensation empfehlenswert.

Der Block „Calc“ ist bisher nur als hybride Lösung im PC realisiert, eine Integration in das FPGA muss noch erfolgen. Hier entsteht aufgrund der notwendigen Filterung der Messdaten, eventueller Datenprozessierung wie FFT und anzuwendender Rechenoperationen ein hoher Hardwareaufwand. Das bestehende Prozessorsystem muss hierfür auf einen FPGA mit hinreichend Logikeinheiten übertragen werden. Auch ist bei Verwendung von Displays mit höheren Auflösungen eine größere Bit-Breite der Anbindungen von Subframe-Prozessor zum DRAM und vom DRAM zum Timing-Controller notwendig.

Der Block der Alterungskompensation in Form der Manipulation der Eingangsdaten ist bereits im Grafikprozessor integriert. Für zukünftige Prototypen muss die Messtechnik auf dem Displaypanel integriert werden. Hierbei ist denkbar, dass für eine kostengünstige Lösung ein Nachbau der hier vorgestellten Messtechnik auf dem FPC zum Display realisiert wird. Bei Entwurf eines ASIC zur Ansteuerung des Displays, in welchem auch das Power-Management integriert ist, kann die vorgestellte Messmethodik leicht im Chip realisiert werden.

Die Modellierung des Alterungsverhaltens muss durch weitere Messungen an einzelnen OLED und auch im Gesamtsystem durch die verbesserte Pixelstrommessung verbessert werden. Weitere Messungen an verschiedenen Prototypen müssen Materialabhängigkeiten und Einflüsse der TFT-Strukturen näher analysieren und in die Modellierung einbeziehen. Ziel ist ein verfeinertes, empirisches Alterungsmodell, welches in Folge mithilfe der

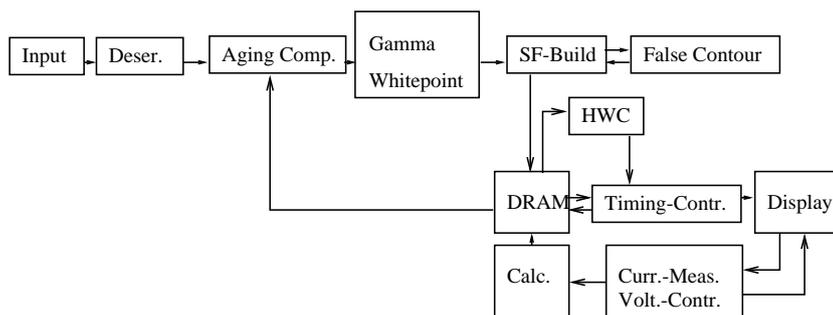


Abbildung 7.13: Übersicht über den realisierten Grafikprozessor zur Ansteuerung des digital gesteuerten Prototypen mit Alterungskompensation.

genaueren Pixelstrombestimmung im Gesamtsystem validiert werden muss. Um dieses im realen System anwenden zu können, müssen beschriebene Methoden zur Beschleunigung der Zustandserfassung wie zeilenweise oder gruppierte Strommessung ausgetestet werden. Auch müssen Verbesserungen an der Berechnung der kompensierten Pixelwerte vorgenommen werden, um eine artefaktfreie Kompensation für möglichst viele Anwendungsfälle sicherzustellen.

Die Ansteuerung des Displays im verbesserten System, vergleiche Abbildung 7.14, sollte Teile der aktuellen Prototypenhardware in Form eines ASIC beinhalten. Für große Auflösungen, welche entsprechend hohe Programmiergeschwindigkeiten benötigen, müssen integrierte Zeilentreiber anstelle von TFT-Schaltungen in Form von GIP verwendet werden. Diese werden typisch als „Chip on Glas“ oder „Chip on Flex“ am Display befestigt. Für den Spaltentreiber sollte eine Kombination aus einem ASIC, welcher auf dem Displayglas platziert wird, und einem FPGA eingesetzt werden. Die notwendigen Datenprozessoren werden weiterhin im FPGA realisiert. Anstelle der diskreten Treiberschaltungen kommt ein ASIC zum Einsatz, welcher die Anpassung der Spannungspegel zur Ansteuerung der Pixel vornimmt. Er muss neben der Pegelübersetzung einen Logikteil enthalten, der das Interface zum FPGA dargestellt. Dieser sollte vorzugsweise wie im aktuellen Prototyp die Daten über ein serielles Interface empfangen. Ein möglicher Ansatz wäre hier die Verwendung des Framebuffers in Form von DRAM als Schnittstelle zwischen Eingangslogik und der Pegelübersetzung, welche auch einen Bereich der mit höheren Spannungen¹⁵ arbeitet beinhaltet. Der Speicher kann als „embedded DRAM“ auf dem ASIC realisiert werden. Die Speicherverwaltung wird somit vom FPGA ausgelagert und im ASIC realisiert. Sie nimmt eingehende Daten an und legt sie entsprechend ab, sodass sie zur Darstellung auf dem Panel zur Verfügung stehen. Hierdurch kann die Breite der Datenschnittstelle gering gehalten werden. Neben der ansteuernden Funktion kann auch die Energieversorgung und Messtechnik hier integriert werden. Somit ist die Realisierung einer bereits angesprochenen zeilenweise Pixelstrommessung möglich. Zusätzlich zur

¹⁵ „High Voltage“ ist hier im Sinne der Mikroelektronik zu verstehen. Wie in der Arbeit aufgezeigt werden etwa 30 V Spitzenspannung benötigt.

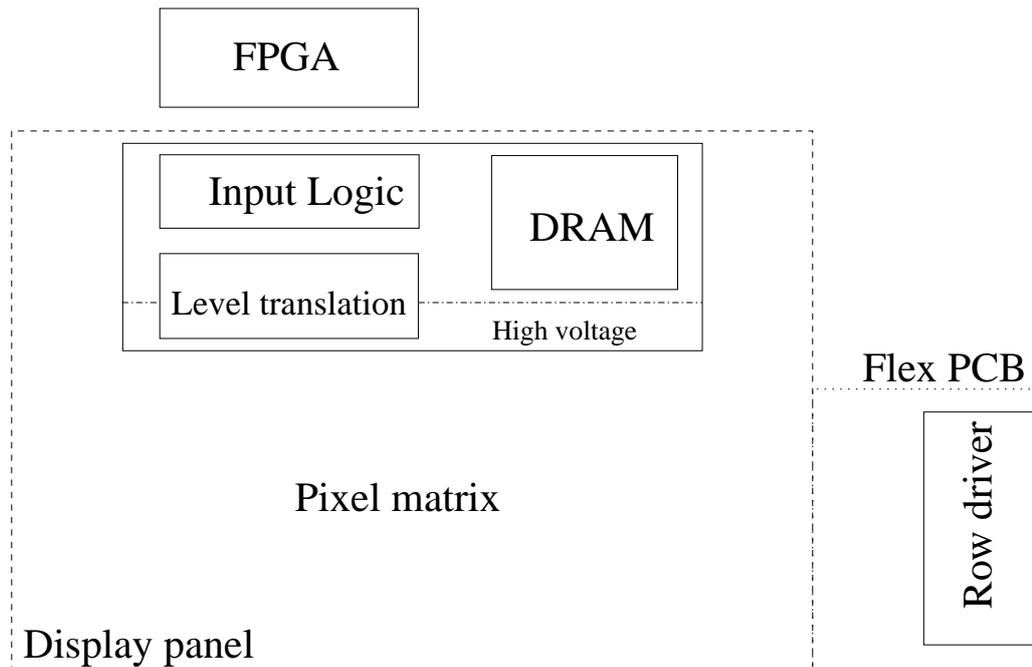


Abbildung 7.14: Skizze des verbesserten Gesamtsystems mit HV-ASIC zur Ansteuerung von Zeilen und Spalten.

Verbesserung der peripheren Hardware sind auch Verbesserungen an Pixelschaltung und OLED im Panel notwendig. Es müssen wie beschrieben OLED-Materialien entwickelt werden, welche im (bevorzugten) Arbeitspunkt der digitalen Ansteuerung ihre höchste Effizienz aufweisen und ein möglichst lineares Alterungsverhalten besitzen.

7.6 Fazit

Alterung ist eines der Haupthindernisse für OLED am Markt. Die abnehmende Bildqualität, welche bis zur de facto Unbrauchbarkeit des Displays führen kann, ist für Kunden nicht hinnehmbar. Analog angesteuerte AMOLED-Displays können Alterungseffekte in Grenzen bereits kompensieren, für digitale Ansteuerung steht jedoch bisher kein Konzept zur Verfügung. Mit dem hier vorgestellten Ansatz konnten erfolgreich Alterungsartefakte detektiert und basierend auf dem aufgezeigten Kompensationsansatz unter Verwendung eines Alterungsmodells so ausgeglichen werden, dass sie für den Nutzer nicht mehr sichtbar sind. Es wurde aufgezeigt, wie der Ansatz einfach im Gesamtsystem integriert werden und somit ein kostengünstiges, langlebiges AMOLED-Display unter Verwendung digitaler Ansteuerung realisiert werden kann.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Im Zuge der Arbeit wurde ein System entwickelt und umgesetzt, welches das digitale Treiberschema auf AMOLED-Displays anwendet. Durch geeignete Konzeption von Panels und Kooperation mit Displayherstellern wurden zwei verschiedene Prototypen realisiert. Diese verwenden PMOS¹- beziehungsweise CMOS-Technologie für die auf dem Display integrierten Schaltungen. Die Ansteuerung beider Typen ist möglich. Das realisierte System ermöglicht es, die visuelle Qualität des digitalen Treiberschemas mit dem menschlichen Auge zu bewerten und Verbesserungen an System, Treiberschema und Datenprozessierung mit direkter, realer Bewertbarkeit der Ergebnisse zu entwickeln und durchzuführen. Die Struktur des Prototypen wurde so entwickelt, dass es leicht möglich ist, Displays mit verschiedenen Parametern und Eigenschaften wie Pixelaufösung anzusteuern. Neben der Hardware wurden auch die im Grafikprozessor implementierten Algorithmen so realisiert, dass sie schnell auf neue Displays adaptierbar sind. Diese hohe Flexibilität ermöglichte eine schnelle Umsetzung auf einen zweiten Prototypen und kann auch andere Displaytypen abdecken.

Mithilfe der zwei realisierten Prototypen konnten grundlegende Untersuchungen zum Verständnis auftretender visueller Artefakte wie beispielsweise Konturen und Alterung durchgeführt werden. Anhand der gewonnenen Erkenntnisse wurden Methoden und Algorithmen entwickelt, um diese Artefakte zu vermeiden und zu kompensieren.

Es wurden Algorithmen untersucht und implementiert, mit welchen die Farbtiefe durch Anwendung von Halbtonverfahren erhöht wird, gleichzeitig wird durch Anpassung der Bilddaten der Weißpunkt des Displays angepasst. Durch Berücksichtigung der Zuleitungswiderstände und darauf basierender Änderung der Darstellung der Bildinhalte können statische Konturen gänzlich vermieden werden. In Kombination mit einer redundanten Zerlegung und durch Erhöhen der Bildwiederholrate können auch dynamische Konturen unterdrückt werden. Es wurde eine Methode zur Temperaturkompensation vorgestellt, welche basierend auf einer Messung des Pixelstroms den Temperatureinfluss auf das Display und damit auf die Darstellungsqualität dezimiert. Durch die digital ansteuerbaren Displaypanels, die realisierte Ansteuerelektronik, die entwickelten Methoden zur Bildzerlegung sowie zur Artefaktkompensation konnten Prototypen gezeigt werden, welche eine vergleichbar hohe Bildqualität wie kommerziell verfügbare analog angesteuerte AMOLED-Systeme aufweisen, jedoch die hohen Kosten und die geringe Energieeffizienz der herkömmlichen analogen Ansteuerung vermeiden. Der bei analog angesteuerten Displays stets problematische und gefürchtete Mura-Effekt kann ausgeschlossen werden.

In Form einer aktiven Alterungskompensation, welche den Zustand der Pixel in der Pi-

¹P-Channel Metal Oxide Semiconductor

xelmatrix erfasst und darauf basierend Kompensationswerte berechnet, konnte ein Ansatz vorgestellt werden, welcher zudem die Nachteile der digitalen Ansteuerung hinsichtlich Lebensdauer ausgleicht. Die I-V-Drift der Pixel kann durch Erfassen des Pixelstroms jedes OLED-Pixels kompensiert werden. Darauf basierend wurde ein Ansatz für ein Korrelationsmodell entwickelt, welches auch die Variation der Stromeffizienz der OLED anhand der Messung des Pixelstroms kompensieren kann. Mit diesem Alterungsmodell und der Kompensationsmethode ist es möglich, die Nachteile der digitalen Ansteuerung hinsichtlich geringerer Lebensdauer auszugleichen. Sogar eine höhere Lebensdauer im Vergleich zu analoger Ansteuerung ist nun möglich, da die Kompensationsmethode effektiver ist als bestehende Methoden für die analoge Ansteuerung.

In der Arbeit konnte aufgezeigt werden, dass die bekannten Probleme digitaler Ansteuerung, insbesondere Image Sticking und Konturen, lösbar sind. Die vorgestellten Methoden und Algorithmen ermöglichen es, digital angesteuerte Displays im Markt zu etablieren und neue Anwendungen zu erschließen. Bei Vorstellungen und Veröffentlichungen der Ergebnisse² wurde hier bereits Interesse bekundet.

8.1 Einsatzmöglichkeiten

Bei Kriterien wie Komplexität des Displayaufbaus, Robustheit sowie Lebensdauer des Displays und Kosten des Gesamtsystems bietet das digitale Treiberschema deutliche Vorteile im Vergleich zur Anwendung eines klassischen analogen Treiberschemas. Im Fokus aktueller Entwicklungen von Displaytechnologien stehen insbesondere Systeme für tragbare Anwendungen, für welche flexible Displays (biegbar, faltbar etc.) eingesetzt werden sollen. Hier sind AMOLED-Displays ein vielversprechender Kandidat, da diese auf flexiblen Substraten wie Plastikfolien gefertigt werden können. Die Anwendung eines analogen Treiberschemas stellt hier sehr hohe Anforderungen an die Langzeitstabilität der Pixelschaltung. Diese kann häufig nicht gewährleistet werden, vor allem da die wechselnde mechanische Beanspruchung die elektrischen Eigenschaften der TFT stark beeinflusst. Digitale Ansteuerung benötigt keine präzise eingestellten und stabilen TFT-Eigenschaften und kann somit als Treiber für die Realisierung und weitere Entwicklung von flexiblen Displays dienen. Auch die erhöhte Energieeffizienz kann bei mobilen Anwendungen ihre Vorteile ausspielen.

Anwendungen im Automobil stellen meist statische Bildinhalte mit scharfen Übergängen dar und sind daher sehr empfindlich für Image Sticking. Herkömmliche AMOLED-Displays erreichen hier nicht die geforderte Lebensdauer und finden daher keinen Einsatz im Massenmarkt. Mit den in dieser Arbeit vorgestellten Kompensationsmethoden kann ein digital angesteuertes Display realisiert werden, welches Image-Sticking-Artefakte unterdrückt und eine hinreichende Lebensdauer erreicht.

Ein weiterhin stark wachsender Markt für Displays sind Multimedia-Anwendungen wie TV, Laptop und Tablet. Neben den bereits erwähnten Vorteilen hinsichtlich Kosten und

²Dobrev2013, Volkert2014, Volkert2015, Volkert2015a, Jiang2015, Xu2016 und Xu2017.

Lebensdauer wird hier auch ein Schwerpunkt auf die Darstellungsqualität der Displays gelegt. Wie aufgezeigt, kann die digitale Ansteuerung nicht nur gleichwertige Bildqualität wie analoge Ansteuerung liefern. Durch die auf zeitlicher Auflösung basierende Farbdarstellung können höhere Farbdynamiken erreicht werden. Hierdurch können Ansprüche, wie sie für „High Dynamic Range Image“ (HDR) gefordert werden, erfüllt werden.

Zunehmend wachsend ist auch der Bereich der virtuellen Realität. Hier finden kleine Displaysysteme Anwendung, welche im nahen Sehfeld des Auges platziert werden. Durch Verwenden zweier Displays können stereoskopische Bildinhalte und somit wahrgenommene Dreidimensionalität realisiert werden. Eine Schwierigkeit liegt hier derzeit im Anspruch an die Reaktionsgeschwindigkeit der Displays beispielsweise zur Darstellung schneller Bewegungen. Untersuchungen zeigen, dass bei niedrigen Bildwiederholraten zunehmend Unwohlsein bei Nutzern dieser Systeme auftritt („Motion Sickness“). AMOLED-Displays sind herkömmlichen LCD hier deutlich überlegen. Zudem werden in diesen Anwendungen Displays mit sehr hohen Pixeldichten benötigt, da die Displaydiagonalen relativ klein sind, aber dennoch hohe Auflösungen erreicht werden müssen. Auch hier ist AMOLED vorteilhaft, die Verwendung eines digitalen Ansteuerschemas ermöglicht es, aufgrund der einfachen Pixelschaltung (2T1C) Pixel mit geringeren Abmessungen im Vergleich zur analogen Ansteuerung zu realisieren und ist somit eine gut geeignete Methode.

Es ergeben sich somit vielfältige Perspektiven zur Anwendung des digitalen Treiber-schemas, welche eine weitere Forschung an diesem Thema stark befürworten. Neben den in dieser Arbeit bereits erreichten Lösungen bestehen weiterhin offene Punkte, an welchen weiter geforscht werden sollte, diese werden im nächsten Abschnitt näher erläutert.

8.2 Ausblick und weiterführende Arbeiten

Zur Erschließung der dargelegten Anwendungsfelder für digital angesteuerte AMOLED-Displays ist eine konsequente Fortführung der in dieser Arbeit begonnenen Entwicklung vonnöten. Offene Punkte betreffen vorwiegend systematische Verbesserungen, welche nur in Kooperation mit einem Displayhersteller angegangen werden können, sodass das Finden eines dauerhaften Kooperationspartner vorrangig betrieben werden sollte.

Im Vergleich zu den in der Arbeit verwendeten Displays betreffen die Verbesserungen in aktuellen Displays insbesondere die TFT-Technologie und die Diagonale des Displays. Die Strukturen der TFT werden zunehmend kleiner, hiermit ändert sich auch das dynamische Verhalten. Die in der Arbeit vorgestellten Methoden müssen daher auf Displays mit höherer Auflösung validiert und gegebenenfalls weiterentwickelt werden. Die Wahrnehmung von Konturen kann sich mit Vergrößerung der Bilddiagonale ändern. Die Wirksamkeit der hier gezeigten Kompensationsmethoden ist daher ebenso zu überprüfen und weiterzuentwickeln.

Die Qualität des OLED-Alterungsmodells, welches zur Kompensation von Image-Sticking-Artefakten verwendet wird und deren Erfolg bestimmt, hängt stark von spezifischen Eigenschaften der OLED ab. Hier sind tiefere Forschungen notwendig,

welche physikalische und chemische Einflüsse auf die Alterung näher beleuchten und die Anwendung unterstützender Methoden wie beispielsweise Data-Counting untersuchen. Das hier vorgestellte Modell kann mit Erkenntnissen aus diesen Untersuchungen erweitert und Einflüsse wie Temperatureffekte können einbezogen werden. Hierfür muss auch die Zustandsbestimmung im Displaysystem, welche die Basis für die Modellierung darstellt, weiterentwickelt werden.

Auch ist für Forschungszwecke ein Display mit integrierter Leuchtdichtemessung mittels im Panel integrierter Fotodioden denkbar. Ansätze werden in der Literatur³ bereits beschrieben. Hierdurch erhält man eine direkte Rückkopplung zur Kompensation der Degradation der OLED-Effizienz, sodass die Alterungskompensation präziser und effektiver wird.

Ziel der weiteren Arbeit muss es sein, die sehr positive Resonanz aus der Industrie auf die bisherige Arbeit zu nutzen und eine Umsetzung der digitalen Ansteuerung in einem realitätsnahen System mit Eigenschaften wie Auflösung, Pixeldichte etc., die den aktuellen kommerziellen System entsprechen, anzutreiben. Mit diesem können die in der Arbeit beschriebenen offenen Punkte tiefgehend untersucht und letztendlich der Einsatz des digitalen Treiberschemas und das Nutzen seiner Vorteile in einem kommerziellen Displaysystem ermöglicht werden.

³Beispielsweise **Fish2005**.

9 Anhang

Weitere Abbildungen

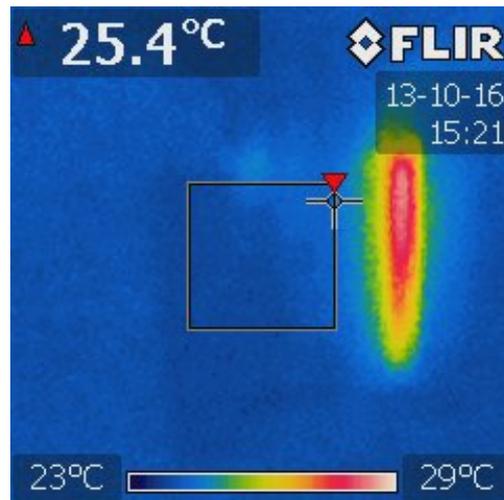


Abbildung 9.1: Infrarot-Aufnahme zum Aufzeigen der Erwärmung des Visionox Prototypen Panels durch den auf dem Glas integrierten Zeilentreiber.

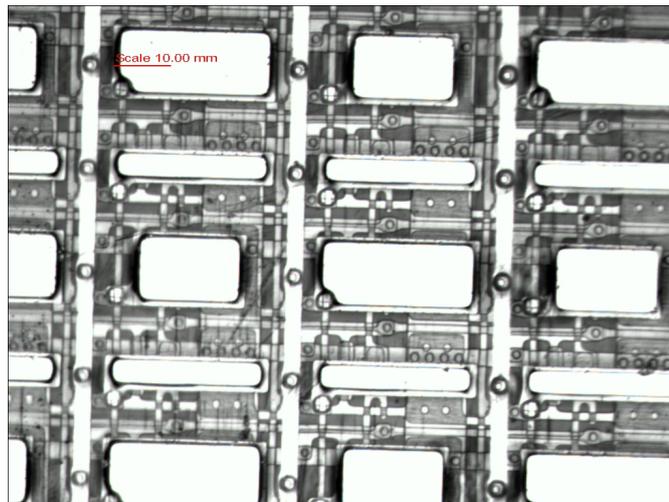


Abbildung 9.2: Pixelstruktur des Huawei 4.3 inch qHD AMOLED-Panels AMS429QC15-1 (gefertigt von Samsung). Die gezeigte Skala ist falsch.

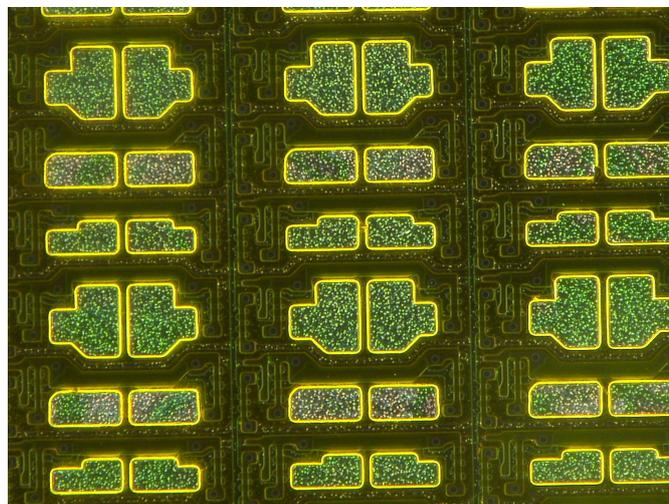


Abbildung 9.3: Pixelstruktur des Chi Mei El C0240QGLB-T AMOLED-Panels.

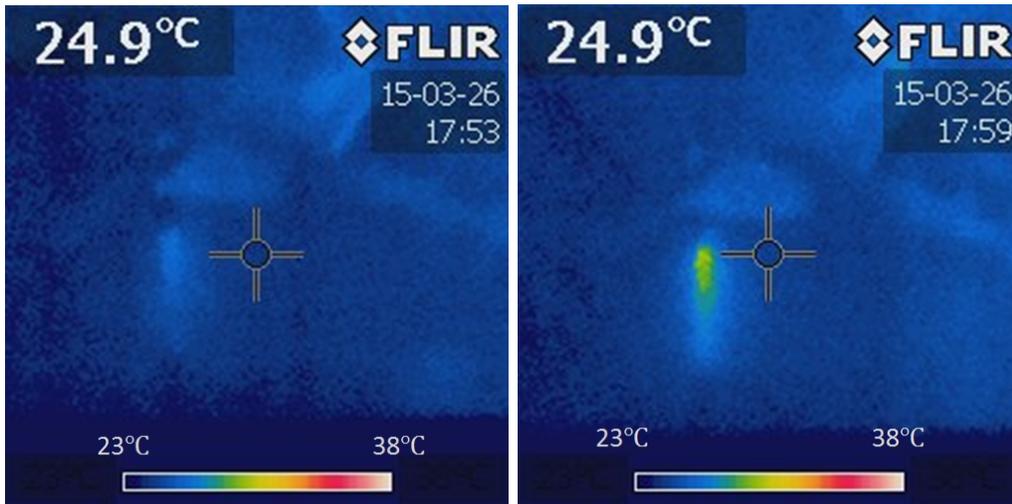


Abbildung 9.4: Gemessene Temperaturverteilung auf dem Tianma Display bei einer Taktfrequenz des Zeilentreibers von 1 MHz (links) beziehungsweise 2 MHz (rechts).

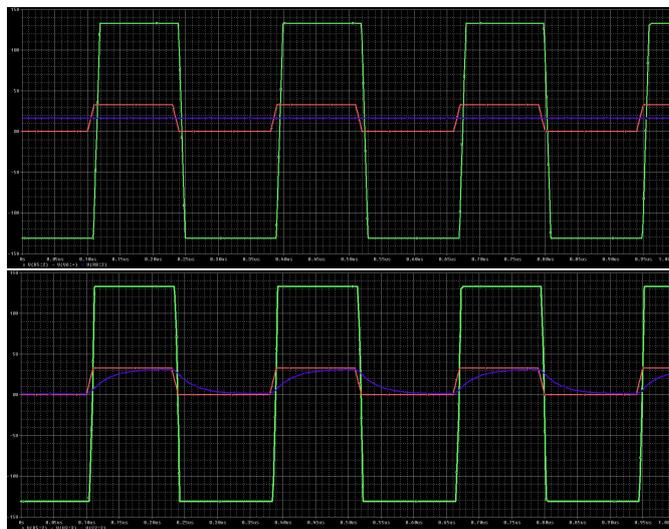


Abbildung 9.5: Ausgangssignal der Verstärkerschaltung ohne (oben) und mit (unten) Kompensationsschaltung am Eingang.

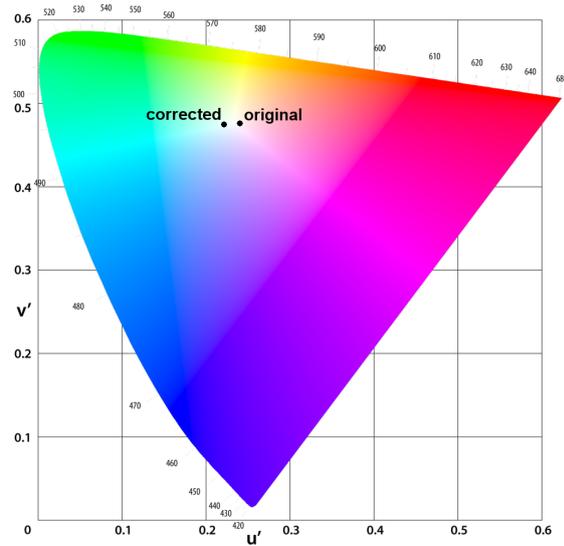


Abbildung 9.6: Beispiel für die Lage des Weißpunkt des Visionox-Prototyps ohne und mit Weißabgleich.



Abbildung 9.7: Aufnahme eines Testbilds mit statischen Konturen und Aufnahme der Subframedarstellung mittels Hochgeschwindigkeitskamera. Die Testbildaufnahme wurde zur besseren Erkennbarkeit im Druck nachträglich aufgehellt.

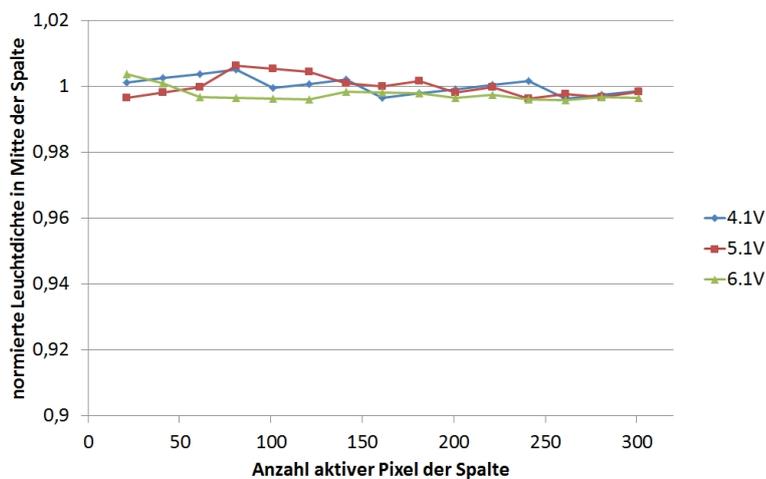


Abbildung 9.8: Berechnete normierte Leuchtdichte des mittleren Punktes eines um die Displaymitte symmetrischen Streifens in Richtung der Displayspalten über variabler Länge des Streifens bei verschiedenen Arbeitspunkten unter Verwendung der beschriebenen Kompensation.

Statistische Bewertung Messschaltung

- Shunt: $R_S = 3 \text{ k}\Omega$
- $V_{DD} = 5,2 \text{ V}$
- 1 LSB entspricht 0,763 nA (eingestellt in INA226)
- Verwenden verschiedener Widerstände (ungetrimmt) als Dummy-Last
- 76800 Messungen in Folge
- Einstellung INA226: 4 Average, 332 μs conversion time, shunt only, continuous

Dummy-Last	330 k Ω	1 M Ω	4,7 M Ω	10 M Ω
σ [A]	$4,9 * 10^{-9}$	$5,0 * 10^{-9}$	$3,8 * 10^{-9}$	$5,4 * 10^{-9}$
σ [bit]	6,42	6,57	4,96	7,01
Mittelwert [A]	$1,71 * 10^{-5}$	$5,68 * 10^{-6}$	$1,20 * 10^{-6}$	$5,73 * 10^{-7}$
Mittelwert [bit]	22360	7447	1577	751
Median [A]	$1,71 * 10^{-5}$	$5,68 * 10^{-6}$	$1,20 * 10^{-6}$	$5,72 * 10^{-7}$
Median [bit]	22360	7447	1577	750

Ergebnisse:

- Normalverteilung der Messwerte (Median gleich Mittelwert als Indikator)
- keine systematischen Messfehler erkennbar, statistische Abweichungen durch Rauschen etc.
- konstante Standardabweichung von ≈ 7 LSB
- notwendige Genauigkeit nur durch hinreichende Mittelwertbildung erreichbar
- Messbereich möglichst ausnutzen für hohe Auflösung

Verwendete Messtechnik

- Photospektrometer: Eldim UMaster
- Spektrometer: Photo Research Spectrascan PR730
- Hochgeschwindigkeitskamera: Fastcam SA3 model 120k-M2
- Spiegelreflexkamera: Nikon D-Serie
- Parameter-Analysator: Agilent E5270 Series
- qualitative Leuchtdichtemessung: Keithley PicoAmMeter mit Fotodiode

10 Abkürzungsverzeichnis

ADC	Analog Digital Converter
AMLCD	Active Matrix Liquid Crystal Display
AMOLED	Active Matrix Organic Light Emitting Diode
ASIC	Application Specific Integrated Circuit
CDS	Correlated Double Sampling
COFF	Critical Flicker Frequency
CIE	Commision Internationale de l'Éclairage
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
CRT	Cathode Ray Tube
DAC	Digital Analog Converter
DFC	Dynamic False Contour
DLP	Digital Light Processing
DPS	Display Period Separated
DRAM	Dynamic Random-Access Memory
DSP	Digital Signal Processor
ED	Error Diffusion
EEPROM	Electronic Erasable Programmable Read Only Memory
EDID	Extended Display Identification Data
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
ESD	Electro Static Discharge
FFT	Fast Fourier Transformation
FPC	Flexible Printed Circuit
FPD-Link	Flat Panel Display Link
FPGA	Field Programmable Gate Array
FRC	Frame Rate Control
GIP	Gate In Panel
HDMI	High Definition Multimedia Interface

HUD	Head Up Display
IC	Integrated Circuit
IPS	In Plane Switching
ITO	Indium Tin Oxide
LCD	Liquid Crystal Display
LTPS	Low Temperature Polycrystalline Silicon
LUT	Look-Up Table
LVDS	Low Voltage Differential Signaling
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
NVM	Non-volatile Memory
OLED	Organic Light Emitting Diode
PCB	Printed Circuit Board
PCM	Pulse Code Modulation
PDM	Puls Density Modulation
PDP	Plasma Display Panel
PLL	Phase Locked Loop
PMOLED	Passive Matrix Organic Light Emitting Diode
PMOS	P-Channel Metal Oxide Semiconductor
PSR	Panel Self Refresh
PWM	Puls Width Modulation
QVGA	Quarter Video Graphics Array
SES	Simultaneous Erase Scan
SID	Society for Information Display
SMOLED	Small Molecule OLED
SRAM	Synchronous Random Access Memory
TFT	Thin Film Transistor
TV	Television
UART	Universal Asynchronous Receiver Transceiver
VESA	Video Electronics Standards Association
VHDCI	Very High Density Cable Interconnect

11 Tabellenverzeichnis

4.1	Vergleich der notwendigen OLED-Spitzenströme und Ladungsträgermobilitäten des ansteuernden TFT für verschiedene Displaygrößen.	35
4.2	Berechnete Ansteuerdauern und Zeitkonstanten der Zeilen- und Spaltenansteuerung bei verschiedenen Auflösungen.	39
5.1	Technische Daten des Visionox Prototypen.	57
5.2	Vergleich des Visionox-Prototypen mit kommerziellen Displays hinsichtlich Leistungsaufnahme, Strom- sowie Leistungseffizienz.	64
5.3	Spannungspegel zur Ansteuerung des Visionox Prototypen.	66
5.4	Technische Daten des Tianma Prototypen.	68
5.5	Spannungspegel zur Ansteuerung des Tianma Prototypen.	72
6.1	Beispiel für eine Zerlegung mit Teiler 1,5 zwischen benachbarten Subframezeiten.	94

12 Abbildungsverzeichnis

1.1	Erwartete Entwicklung des Weltmarktes für Flachbildschirme (Quelle: Park2016).	1
1.2	Gemessener und erwarteter Marktanteil verschiedener Displaytechnologien (Quelle: IHS2015). Die vertikale Achse sind Milliarden US\$ (sic).	3
1.3	Marktanteil für kleine bis mittelgroße Displays verschiedener Displayhersteller (Quelle: IHS2016).	4
2.1	Kathodenstrahlröhre nach Braun, 1897 (Quelle: Nesper1921).	7
2.2	Typische Struktur eines AMOLED-Display (Quelle: providecoalition.com).	8
2.3	Top- und Bottomemissionstruktur eines AMOLED-Pixels (Quelle: kompendium.infotip.de).	9
2.4	0,77" Mikrodisplay, Auflösung SXGA (1292*1036), Pixelpitch 12 μm (Quelle: eMagin Corp.).	10
2.5	AMOLED-Display auf flexiblem Substrat (Quelle: LG; redorbit.com).	10
2.6	Photonenemission bei fluoreszenten und phosphoreszenten OLED-Materialien (Quelle: Adachi2015).	11
2.7	Verlauf der Stromeffizienz einer OLED über ihrer Leuchtdichte (Quelle: Wu2016).	12
3.1	Pixelschaltung zur analogen Modulation des Stroms durch die OLED durch Programmierung mittels Referenzstrom (Quelle: Chen2009a).	16
3.2	Vorhersage des Marktanteiles flexibler und starrer AMOLED-Displays am Gesamtmarkt für AMOLED (Quelle: IHS2016a).	18
3.3	Verlauf der CFF über der retinalen Position in Abhängigkeit der mittlere Leuchtdichte des Stimuli (Quelle: Hartmann1979).	20
3.4	Verlauf der CFF über der retinalen Position in Abhängigkeit des Verhältnisses von aktiver zu inaktiver Zeit der Lichtquelle (Quelle: Hartmann1979).	21
3.5	Darstellung der Zerlegung, gewichteten Zerlegung und Aufsummierung der Teilbilder für ein Testbild (von oben nach unten).	22
3.6	Vereinfachte Darstellung der Pixelansteuerung bei Verwendung eines digitalen Treiberschemas.	24
3.7	Vereinfachte Darstellung der Pixelansteuerung mit Möglichkeit zur Steuerung der Leuchtzeit bei Verwendung eines digitalen Treiberschemas.	25
3.8	Abfolge der Programmier- und Leuchtphase für das DPS-Schema.	26
3.9	Abfolge der Programmier- und Leuchtphase für das angepasste DPS-Schema.	27
4.1	Einfache 2T1C Pixelschaltung.	33

4.2	Parasitäre Elemente welche die Programmiergeschwindigkeit begrenzen.	38
4.3	Idealisierte Pixelstruktur zur Berechnung der Zeitkonstanten der Select- und Datenleitungen.	40
4.4	Typische Ausführung der Gateelektrode des Select-Transistors und Alternativen zur Verringerung der Zeitkonstante der Zeile.	41
4.5	Aufbau des Spaltentreibers für digitale Ansteuerung.	43
4.6	Konzept der Leistungsversorgung des Prototypen.	44
4.7	Blockdiagramm der Datenverarbeitung im digitalen AMOLED-System.	46
5.1	Struktur des Kodak AM550L AMOLED-Panels.	50
5.2	Kodak AM550L AMOLED-Panel (links) und Verwendung in Prototyp (rechts).	50
5.3	In Kodak AM550L verwendete Pixelschaltung (links) und Pixelstruktur (rechts).	51
5.4	Vergleich der Energieaufnahme analog und digital(links) und Fotografie eines Testbildes auf Kodak AM550L (rechts).	52
5.5	Durch Visionox angefertigtes Prototypenpanel.	54
5.6	Struktur des Visionox Panels.	55
5.7	Schaltbild des auf dem Visionox Panel realisierten Zeilentreibers.	56
5.8	Mikroskopische Aufnahme der Zeilentreiberbuffer sowie der Pixelstruktur des Visionox Panels.	57
5.9	Abhängigkeit der Leuchtdichte der blauen OLEDs des Visionox Panels vom Pegel der ansteuernden Datenspannung.	58
5.10	Zeitlicher Verlauf der Stromaufnahme der Pixel für zwei Subframes (x-Achse: links: 200 μ s/div, rechts: 1 μ s/div; y-Achse: 100 mA/div).	59
5.11	Highspeed-Aufnahmen der Darstellung der ersten vier Subframes eines Testbildes (Chaplin-Film) auf dem Visionox Panel.	60
5.12	Vergleich des durch das Visionox-Panel darstellbaren Farbraum mit den Anforderung nach Rec. 709.	61
5.13	Vergleich der Homogenität der Leuchtdichteverteilung eines Alcatel Smartphones (links), Samsung Tablets (mitte) und des Visionox-Prototypen (rechts) bei einer Leuchtdichte von $0,2 \frac{\text{Cd}}{\text{m}^2}$	62
5.14	Leuchtdichteverteilung des Visionox-Prototypen (links) des Samsung Tablets (rechts) und bei einer Leuchtdichte von $0,2 \frac{\text{Cd}}{\text{m}^2}$	63
5.15	Gesamtaufbau zur Ansteuerung des Visionox-Panels (links) und ein vom Panel abfotografiertes Testbild (rechts).	66
5.16	Das gemeinsam mit Tianma realisierte 1.5 inch (3,81 cm) Panel.	67
5.17	Auf dem Tianma Panel darstellbarer Farbraum.	69
5.18	Pixelschaltung des Tianma Panels.	69
5.19	Pixelstruktur des Tianma Panels von Rückseite (links) und Vorderseite (rechts).	70
5.20	Gemessene Verteilung der Leuchtdichte für den Tianma Prototyp. Die Leuchtdichtewerte sind in Cd/m^2 angegeben.	71

5.21	Auf dem Tianma Panel dargestellte Testbilder. Die vertikale blaue Linie ist ein Defekt in der Displaystruktur.	72
5.22	Blockschaltbild des Schnittstellenwandlers.	74
5.23	Vorder- und Rückseite der Hautplatine.	75
5.24	Blockschaltbild der Verstärkerkarten.	76
5.25	Vorder- und Rückseite der Verstärkerkarten.	77
5.26	Blockschaltbild des einfachen Grafikprozessors.	78
5.27	Zeitliche Abfolge der Ansteuersignale für den integrierten Zeilentreiber und den Demultiplexer. Nicht-lotrechte Flanken deuten transiente Verläufe an.	81
6.1	Auswirkung des beschriebenen Weißabgleich auf dem Tianma Prototyp. Von links nach rechts: Quellbild, Darstellung ohne Weißabgleich, Darstellung mit Weißabgleich. Die vertikale Linie ist ein Defekt im Display.	85
6.2	Darstellung eines Graustufenverlaufs (GW 1 bis 16) mit (links) und ohne (rechts) Verwendung von ED und FRC zur Erhöhung der wahrgenommen Graustufen.	86
6.3	Aufnahme eines Testbilds mit auffälliger statischer Kontur (oben links). Das Bild wurde zur besseren Erkennbarkeit im Druck nachträglich aufgehellt.	87
6.4	Normierte Leuchtdichte des mittleren Punktes eines um die Displaymitte symmetrischen Streifens in Richtung der Displayspalten über variabler Länge des Streifens bei verschiedenen Arbeitspunkten.	89
6.5	Normierte Leuchtdichte des mittleren Punktes einer symmetrisch um die Displaymitte verteilten Fläche variabler Größe bei verschiedenen Arbeitspunkten.	90
6.6	Normierte Leuchtdichte des mittleren Punktes einer symmetrisch um die Displaymitte verteilten Fläche variabler Größe über dem Grauwert der zugespielten Bilddaten.	91
6.7	Vergleich der normierten Leuchtdichte des mittleren Punktes einer um die Displaymitte symmetrischen Fläche ohne und mit Verwendung der beschriebenen Kompensation.	92
6.8	Aufnahme des Testbilds aus Abbildung 6.3 mit Korrekturalgorithmus zur Vermeidung statischer Konturen. Das Bild wurde zur besseren Erkennbarkeit im Druck nachträglich aufgehellt.	93
6.9	Visuelle Auswirkungen der Korrektur statischer Konturen aufgrund ungleichmäßiger Subframebelegung. Ohne Korrektur (links), korrigiert (mitte) und überkompensiert (rechts).	94
6.10	Entstehung falscher Konturen aus einer Relativbewegung des Auges zum Bildinhalt (aus: Doyen2003).	95
6.11	Übersicht der zur Bildzerlegung verwendeten Ansätze und Ablauf der Zerlegung.	97
6.12	Vorgehen zur Detektion und Kompensation globaler Temperatureinflüsse.	100

7.1	Ausgewählter Bereich der Darstellung eines homogen blauen Bildinhaltes auf einem AMOLED-Display mit Einbrenneffekt.	101
7.2	Prinzipschaltbild des Pixelstromsensors.	105
7.3	Gemessene Verteilung der Pixelströme auf einer Pixelmatrix.	108
7.4	Gemessene Stromverteilung (links) auf einer Pixelmatrix (blauer Farbkanal) und normierte, gefilterte Darstellung (rechts).	109
7.5	I-V-Kennlinie einer OLED im ungealterten und gealterten Zustand (vergleiche Volkert2015a).	110
7.6	Stromeffizienz einer OLED relativ zum Ursprungszustand über dem OLED-Strom in verschiedenen Alterungszuständen.	111
7.7	Änderungen in den Farbkoordinaten einer OLED in Abhängigkeit vom Arbeitspunkt bei verschiedenen Alterungszuständen.	112
7.8	Strom durch eine OLED relativ zum Strom bei $t = 0$ h über der Zeit bei Alterung mit konstanter Spannungsbelastung.	114
7.9	Zeitliche, prozentuale Änderung der Stromeffizienz über der Änderung des Stroms einer OLED bei verschiedenen Belastungen.	115
7.10	Hybride Verarbeitung der Messwerte durch PC und FPGA.	118
7.11	Auf dem Prototypen dargestelltes Testbild ohne (links) und mit Kompensation (rechts) der eingebrannten Bereiche.	119
7.12	Auf dem Prototypen dargestelltes Testbild ohne (links) und mit Kompensation (rechts) der eingebrannten Bereiche.	120
7.13	Übersicht über den realisierten Grafikprozessor zur Ansteuerung des digital gesteuerten Prototypen mit Alterungskompensation.	121
7.14	Skizze des verbesserten Gesamtsystems mit HV-ASIC zur Ansteuerung von Zeilen und Spalten.	122
9.1	Infrarot-Aufnahme zum Aufzeigen der Erwärmung des Visionox Prototypen Panels durch den auf dem Glas integrierten Zeilentreiber.	127
9.2	Pixelstruktur des Huawei 4.3 inch qHD AMOLED-Panels AMS429QC15-1 (gefertigt von Samsung). Die gezeigte Skala ist falsch.	128
9.3	Pixelstruktur des Chi Mei E1 C0240QGLB-T AMOLED-Panels.	128
9.4	Gemessene Temperaturverteilung auf dem Tianma Display bei einer Taktfrequenz des Zeilentreibers von 1 MHz (links) beziehungsweise 2 MHz (rechts).	129
9.5	Ausgangssignal der Verstärkerschaltung ohne (oben) und mit (unten) Kompensationsschaltung am Eingang.	129
9.6	Beispiel für die Lage des Weißpunkt des Visionox-Prototyps ohne und mit Weißabgleich.	130
9.7	Aufnahme eines Testbilds mit statischen Konturen und Aufnahme der Subframedarstellung mittels Hochgeschwindigkeitskamera. Die Testbildaufnahme wurde zur besseren Erkennbarkeit im Druck nachträglich aufgehellt.	130

-
- 9.8 Berechnete normierte Leuchtdichte des mittleren Punktes eines um die Displaymitte symmetrischen Streifens in Richtung der Displayspalten über variabler Länge des Streifens bei verschiedenen Arbeitspunkten unter Verwendung der beschriebenen Kompensation. 131

13 Literatur

- Adachi2015** C. Adachi. „Organic molecules for efficient bendable displays and lighting“. In: *SPIE Newsroom* (2015). DOI: 10.1117/2.1201505.005959.
- Akimoto2002** H. Akimoto u. a. „An Innovative Pixel-Driving Scheme for 64-Level Gray-Scale Full-Color Active Matrix OLED Displays“. In: *SID Digest* 33 (2002), S. 972–975.
- Antonio-Torres2005** D. Antonio-Torres, P. Lister und P. Newbury. „LUT-based compensation model for OLED degradation“. In: *Journal of the SID* 13/5 (2005), S. 435–441.
- CadenceDesignSystems2014** Inc. Cadence Design Systems. *Virtuoso® Simulator Components and Device Models Reference*. Techn. Ber. 2014.
- Cha2015** S.-J. Cha u. a. „Efficient deep blue fluorescent emitter showing high external quantum efficiency“. In: *Dyes and Pigments* 120 (2015), S. 200–207. DOI: 10.1016/j.dyepig.2015.04.020.
- Chen2009a** C. Chen u. a. „AM-OLED Pixel Circuits Based on a-InGaZnO Thin Film Transistors“. In: *SID Digest* 40.1 (Juni 2009). DOI: 10.1889/1.3256484.
- Chen2012** J. Chen, W. Cranton und M. Fihn. *Handbook of Visual Display Technology*. Hrsg. von J. Chen, W. Cranton und M. Fihn. Springer, 2012.
- ChiMeiElCorporation2008** Chi Mei El Corporation. *Datasheet C0240QGLB-T Version 1.6*. Techn. Ber. 2008.
- Codrea2015** C. Codrea. „State-dependent Charge-controlled Driving Scheme -SQC- A Power Saving Technology for PMOLED Displays“. Diss. Universität des Saarlandes, 2015.
- DeRoose2014** F. De Roose u. a. „Reducing Influence of Bias Stress on AMOLED Displays by Driving in Linear Regime: a Sensitivity Perspective“. In: *Proceedings of IDW* 21 (2014), S. 1382–1385.
- Dobrev2013** Y. Dobrev, P. Volkert und C. Xu. „Feasibility Study of Digital Driving for AMOLED Displays“. In: *SID Proceedings Eurodisplay* 1 (2013). Submitted at SID, S. 24–27.
- Doyen2003** D. Doyen u. a. „Compensation of False Contour on a PDP using a Pixel Based Motion Estimator Combined with an Efficient Coding Technique“. In: *SID Digest* 34 (2003), S. 780–783.
- Fish2005** D. Fish u. a. „Optical Feedback for AMOLED Display Compensation using LTPS and a-Si:H Technologies“. In: *SID Digest* 36 (2005).

- Gaspar2015** D.-J. Gaspar und E. Palikarpov, Hrsg. *OLED Fundamentals*. CRC Press, 2015.
- Hartmann1979** E. Hartmann, B. Lachenmayr und H. Brettel. „The Peripheral Critical Flicker Frequency“. In: *Vision Research* 19 (1979), S. 1019–1023.
- Hatwar2010** T.-K. Hatwar u. a. „Hybrid Tandem White OLEDs with High Efficiency and Long Life-time for AMOLED Displays and Solid-State Lighting“. In: *SID Digest* 41 (2010), S. 778–781.
- Hecht1933** S. Hecht, S. Shlaer und C.D. Verrijp. „Intermittent Stimulation by Light: II. The measurement of the critical fusion frequency for the human eye“. In: *The Journal of General Physiology* 17.2 (1933), S. 237–249.
- Hecht1936** S. Hecht und E. L. Smith. „Intermittent Stimulation by Light: VI. Area and the relation between critical frequency and intensity“. In: *The Journal of General Physiology* 19.6 (1936), S. 979–989.
- IHS2015** IHS. *Flat Panel Display Revenues Forecast to Fall in 2015, IHS Says*. Online. abgerufen am 04.12.2016. Juli 2015. URL: <http://news.ihsmarket.com/press-release/technology/flat-panel-display-revenues-forecast-fall-2015-ihs-says>.
- IHS2016** IHS. *With AMOLED Shipments Rising, Samsung Display Led the Small-Medium Display Market in 2015, IHS Says*. Online. abgerufen am 11.12.2016. Apr. 2016. URL: <http://news.ihsmarket.com/press-release/amoled-shipments-rising-samsung-display-led-small-medium-display-market-2015-ihs-says>.
- IHS2016a** IHS. *Seeing the future in flexible AMOLED displays, manufacturers expand production capacity in 2016*. Online. abgerufen am 11.12.2016. Feb. 2016. URL: <http://electroiq.com/blog/2016/02/seeing-the-future-in-flexible-amoled-displays-manufacturers-expand-production-capacity-in-2016/>.
- Ibrahim2007** K.-F. Ibrahim. *Newnes Guide to Television & Video Technology*. Newnes, 2007.
- Inukai2000** K. Inukai u. a. „4.0-in. TFT-OLED Displays and a Novel Digital Driving Method“. In: *SID Digest* 31 (2000), S. 924–927.
- Jang2010** J.-H. Jang u. a. „A PDM-Based Digital Driving Technique Using Delta-Sigma Modulation for QVGA Full-Color AMOLED Display Applications“. In: *Journal of Display Technology* 6.7 (2010), S. 269–278.
- Jiang2015** X. Jiang, P. Volkert und C. Xu. „Degradation Behavior of blue OLEDs“. In: *Digest of Eurodisplay 2015* 1 (2015), S. 62. DOI: 10.1002/sdtp.10538.
- Jiang2016** X. Jiang und C. Xu. „Data-Counting Model for Empirical Prediction of OLED Degradation“. In: *Proceedings of IDW* (2016), S. 651–653.

- Jin-Young2016** C. Jin-Young. *LG Display, Samsung Display Changing OLED Panel Business Strategies*. Online. abgerufen am 11.12.2016. Apr. 2016. URL: www.businesskorea.co.kr/english/news/industry/14512-switching-strategy-lg-display-samsung-display-changing-oled-panel-business.
- Jung2006** M.-H. Jung, O. Kim und H.-J. Chung. „Voltage Distribution of Power Source in Large AMOLED Displays“. In: *Journal of the Korean Physical Society* 48 (2006), S. 5–9.
- Jung2014** T. Jung. „Methoden zur Sicherstellung der visuellen Qualität in lokal gedimmten Backlightsystemen“. Diss. Universität des Saarlandes, 2014.
- Kanakasundaram2016** S. P. Kanakasundaram. „Characterization and Compensation of Temperature Related Image Artifacts In a Digitally driven AMOLED Display System“. Magisterarb. Universität des Saarlandes, 2016.
- Kawabe2009** K. Kawabe u. a. „Digital Drive with White OLEDs“. In: *SID Digest* 40 (2009), S. 5–8.
- Kim2012** H. Kim, S. Kim und Y. Hong. „Frequency Dependency of Multi-layer OLED Current Density-voltage Shift and Its Application to Digitally-driven AMOLED“. In: *Journal of the Optical Society of Korea* 16 (2012).
- Kobrin2003** P. Kobrin u. a. „Time Dependence of OLED Luminance“. In: *SID Digest* 34 (2003), S. 539–541.
- LM317** Texas Instruments. *Datasheet LM317*. Online. abgerufen am 06.02.2017. Sep. 1997. URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm317.pdf>.
- Lebrun2011** H. Lebrun. „Impact of I-R-Drops in the Power Lines of AMOLED Displays on the Design and the Technology“. 2011.
- Lee2012** K.-Y. Lee u. a. „Establishing a Compensation Algorithm of AMOLED Display Degradation with the Particular Principle of Model Measurement“. In: *SID Digest* 43 (2012), S. 1231–1234.
- Lei2003** J. Lei und X. Zou. „Dynamic dithering algorithm and frame rate control technique for liquid crystal display controller“. In: *Proceedings of ASIC 2* (2003), S. 740–743.
- Lin2014** C.-C. Lin u. a. „A New Pixel Circuit to Compensate Panel Non-uniformity and OLED Degradation on Large IGZO AMOLED Panel“. In: *SID Digest* 45 (2014), S. 1013–1016.
- Lindbloom2013** B. Lindbloom. *RGB/XYZ Matrices*. Online. abgerufen am 10.03.2016. Juni 2013. URL: http://brucelindbloom.com/Equn_XYZ_to_RGB.html.
- Mertens2013** R. Mertens. Online. abgerufen am 23.02.2016. Sep. 2013. URL: <http://www.oled-info.com/solomon-systech-and-visionox-developed-qhd-amoled-driver-ic>.
- Mertens2016** R. Mertens. Online. abgerufen am 23.03.2016. März 2016. URL: <http://www.oled-info.com/lgd-and-sdc-consider-dedicated-oled-production-lines-vr-applications>.

- Miwa2015** K. Miwa u. a. „The Thin and Slim Design for 65-inch UHD OLED TV“. In: *SID Digest* 46.1 (2015), S. 946–949.
- Mizukami2000** M. Mizukami u. a. „6-Bit Digital VGA OLED“. In: *SID Digest* 31 (2000), S. 912–915.
- Murata1999** H. Murata u. a. „Molecular organic light-emitting diodes with temperature-independent quantum efficiency and improved thermal durability“. In: *Applied Physics Letters* 75 (1999). DOI: 10.1063/1.125315.
- Nagakubo2007** T. Nagakubo u. a. „Dithering Algorithm using Multi-Threshold Level on PDP“. In: *SID Digest* 38 (2007), S. 1621–1624.
- Nathan2012** A. Nathan und G. Chaji. „OLED Luminance Degradation Compensation“. En. Pat. 8279143B2. 2012.
- Nesper1921** E. Nesper. *Handbuch der drahtlosen Telegraphie und Telephonie*. J. Springer, 1921.
- Ney2014** M. Ney. „Steigerung der Anzahl der wahrgenommenen Farbabstufungen bei Displays durch digitale Halbtonverfahren“. B.S. Thesis. Lehrstuhl für Mikroelektronik, Saarbrücken: Universität des Saarlandes, 2014.
- Nowy2010** S. Nowy. „Understanding losses in OLEDs: optical device simulation and electrical characterization using impedance spectroscopy“. Diss. Universität Augsburg, 2010.
- Park2016** R. Park. *Flat Panel Display Revenues Forecast to Increase in 2017, IHS Markit Says*. online. abgerufen am 04.12.2016. Nov. 2016. URL: <https://technology.ih.com/585847/flat-panel-display-revenues-forecast-to-increase-in-2017-ih-markit-says>.
- Purves2004** D. Purves u. a. *Neuroscience*. Sinauer Associates, Inc., 2004.
- SamsungMobileDisplay2012** Samsung Mobile Display. *Datasheet AMS429QC15-1 Rev. 1.1*. Techn. Ber. 2012.
- Schmidt2013** T. Schmidt. „Photophysics of organic light-emitting diodes - Device efficiency and degradation processes“. Diss. Augsburg University, 2013.
- Schmidt2015** T. D. Schmidt u. a. „Analyzing degradation effects of organic light-emitting diodes via transient optical and electrical measurements“. In: *Journal of Applied Physics* 117 (2015). DOI: 10.1063/1.4921829.
- Scholz2015** S. Scholz u. a. „Degradation Mechanisms and Reactions in Organic Light Emitting Devices“. In: *Chemical Reviews* 115 (2015), S. 8449–8503.
- Shen2011** C.-H. Shen u. a. „Modeling temperature and bias stress effects on threshold voltage of a-Si:H TFTs for gate driver circuit simulation“. In: *International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices Digest* 1 (2011), S. 251–254.
- Simon2008** K. Simon. *Farbe im digitalen Publizieren*. Springer, 2008.

- So2010** F. So und D. Kondakov. „Degradation Mechanisms in Small-Molecule and Polymer Organic Light-Emitting Diodes“. In: *Advanced Materials* 22 (2010), S. 3762–3777.
- Soh2006** K.-M. Soh, C. Xu und C. Hitzelberger. „Dependence of OLED Display Degradation on Driving Conditions“. In: *SID Mid Europe Chapter Fall Meeting*. 2006.
- Souppouris2012** A. Souppouris. *Nokia’s ClearBlack Display technology explained*. online. abgerufen am 16.11.2016. Feb. 2012. URL: <http://www.theverge.com/2012/2/7/2781915/nokia-clearblack-display-explained>.
- Street2009** R. A. Street. „Thin-Film Transistors“. In: *Advanced Materials* 21 (2009), S. 1–16.
- Suo2008** F. Suo u. a. „Study on temperature characteristics of organic light-emitting diodes based on tris-(8-hydroxyquinoline)-aluminum“. In: *Chinese Science Bulletin* 53 (2008), S. 624–631. URL: <http://www.springerlink.com/content/q6r1386k36207464/>.
- Tagawa2004** A. Tagawa, T. Numao und T. Ohba. „A Novel Digital-Gray-Scale Driving Method with a Multiple Addressing Sequence for AM-OLED Displays“. In: *Proceedings of IDW 1* (2004), S. 279–282.
- Tai2005** Ya-Hsiang Tai und Yan-Fu Kuo. „Statistical study on the temperature dependence of the turn-on characteristics for p-type LTPS TFTs“. In: *Proc. 18th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society LEOS 2005*. 2005, S. 936–937.
- Tanada2004** Y. Tanada u. a. „VGA (188 ppi) AMOLED Display with a New Driving Method“. In: (2004).
- Thebault2013** C. Thébault, C. Correa und Wei. „Method and apparatus for processing video pictures“. EN. Pat. EP1256924B1. 2013.
- Tietze2011** U. Tietze und Ch. Schenk. *Halbleiter-Schaltungstechnik*. Springer, 2011.
- UDC_OLED** Online. abgerufen am 17.02.2016. URL: http://www.universaldisplay.com/img/PHOLED_Data_Chart%202012.jpg.
- Ulichney1987** R. Ulichney. *Digital Halftoning*. MIT Press, 1987.
- Volkert2013** P. Volkert. „Charakterisierung visueller Artefakte digital angesteuerter AMOLED-Displays sowie Methode zur Verbesserung der Bildqualität“. Diplomarbeit. Universität des Saarlandes, Lehrstuhl für Mikroelektronik, 2013.
- Volkert2014** P. Volkert und C. Xu. „Principle and validation of digital driving for active matrix organic light emitting diodes displays“. In: *Journal of the SID* 22 (2014), S. 43–54.
- Volkert2015** P. Volkert und C. Xu. „Compensation of OLED I-V-Drift for Suppressing Image Sticking in a Digital AMOLED Display Module“. In: *SID Digest* 46 (2015), S. 258–261.

- Volkert2015a** P. Volkert, X. Jiang und C. Xu. „Characterization and compensation of OLED aging in a digital AMOLED system“. In: *Journal of the Society for Information Display* 23.12 (2015), S. 570–579.
- Weitbruch2011** S. Weitbruch, C. Thébault und I. Doser. „Method and apparatus for processing video pictures in particular film mode sequences“. EN. Pat. 7911545B2. 2011.
- Wu2016** S. Wu u. a. „Highly Efficient White Organic Light-Emitting Diodes with Ultrathin Emissive Layers and a Spacer-Free Structure“. In: *Scientific Reports* 6 (Mai 2016). DOI: 10.1038/srep25821.
- Xu2003** B. L. Xu u. a. „Improve in PDP Image Quality by Suppressing Dynamic False Contour While Maintaining High Brightness“. In: *SID Digest* 34 (2003), S. 455–457. URL: http://134.96.61.61/papers/Konferenz/SID/SID_2003/docs/p_62.pdf.
- Xu2013** C. Xu. „Active Matrix Organic Light-Emitting Diode Display and Method for driving the same“. EN. Pat. 20130141469A1. 2013.
- Xu2016** C. Xu und P. Volkert. „Active Matrix Organic Light-Emitting Diode Display Device and Method for Driving the same“. Patentanmeldung. 2016.
- Xu2017** C. Xu, P. Volkert und X. Jiang. „Acquiring Longer Lifetime of AMOLED with Digital Aging Compensation“. accepted for SID Symposium 2017, Session 16, Paper 4. 2017.
- Zhang2013** Y. Zhang und W. Chen. „A new LTPS TFT AC pixel circuit for an AMOLED“. In: *Journal of Semiconductors* 34.1 (2013). DOI: 10.1088/1674-4926/34/1/015009.