

Hochschule Bonn-Rhein-Sieg University of Applied Sciences

Fachbereich Elektrotechnik, Maschinenbau und Technikjournalismus Studiengang Elektrotechnik Vertiefungsrichtung Medientechnik

Entwicklung eines

3D-Charakterisierungsmessplatzes mit anschließender Charakterisierung eines autostereoskopischen 3D-Displays

Wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des akademischen Grades eines Bachelor of Engineering (B.Eng.)

Stefan Schuster

Erstbetreuer: StD Dipl.-Ing. Gerd Heinen Zweitbetreuer: Prof. Dr. Uwe Braehmer

Abgabetermin 15.02.2011

Kurzfassung

Diese Bachelor-Thesis entwickelt ein Charakterisierungskonzept für ein autostereoskopisches 3D-Display. Der daraus entstandene Parametersatz ist die Grundlage für die Anforderungen eines 3D-Charakterisierungsmessplatzes. Die Arbeit zeigt die Auswahl geeigneter Komponenten und Methoden um einen 3D-Charakterisierungsmessplatz aufzubauen. Mithilfe des neuartigen Aufbaus wird ein autostereoskopisches Display charakterisiert. Nach der Auswertung der gewonnen Messwerte wird der ermittelte Parametersatz dem Lastenheft gegenübergestellt. Mögliche Fehlerquellen im Aufbau und der Ansteuerung des Displays werden lokalisiert und soweit es möglich ist behoben.

Schlagwörter: 3D Display, Autostereoskopisch, Charakterisierung, Messplatz, Optoelektronik, 3D Crosstalk, Prüfverfahren für Displays,

Abstract

This bachelor's thesis develops a characterization concept for an autostereoscopic 3D display. The resulting parameter set is the basis for the requirements of a 3D measuring system. This paper shows the selection of appropriate components and methods for the 3D measuring system setup. While using the new 3D measuring system an autostereoscopic display is characterized. After evaluation of measured data the parameter set will be compared with the product requirement document. Possible sources of error in setup and controlling of the display will be located and corrected where possible.

Keywords: 3D display, autostereoscopic, optical characterization, measuring station, optoelectronics, 3D crosstalk, display measurement

Inhaltsverzeichnis

Kurzf	assung	I
Abstr	act	I
Inhalt	tsverzeich	nisII
Abbil	dungsver	zeichnisV
Tabel	lenverzei	chnis VII
Abkü	rzungsve	zeichnisIX
Vorw	ort	1
1	Einlaite	ng und Übauhlist
1	1 1	A ktueller Stand der Technik
	1.1	Motivation
	1.2	Zielstellung und Zeitmanagement
	1.5	
2	Grundl	agen autostereoskopischer Displays
	2.1	Betrachtungsgebiete (Viewing- Zones)6
	2.1.1	Two-View Displays
	2.1.2	2 Multi-View Displays
	2.1.3	Eye-Tracking
	2.2	Bildwiedergabe
	2.2.1	Zeitmultiplex
	2.2.2	Raummultiplex
	2.3	Realisierungsmöglichkeiten
	2.3.1	Parallax-Barrier Displays
	2.3.2	Lentikular Displays
	2.3.3	Backlight-Direction Displays
	2.4	Funktionsweise des autostereoskopischen IPMS Demonstrators
	2.4.	OLED - Hintergrundbeleuchtung
	2.4.2	Mikrolinsenanordnung
	2.4.3	Das LC-Modul
	2.4.4	Die Ansteuerung
		6

3	Charak	terisierung autostereoskopischer Displays	19
	3.1	Optische 2D-Eigenschaften	20
	3.1.1	1 Leuchtdichte und Kontrast	20
	3.1.2	2 Elektro-optische Übertragungsfunktion (Gamma)	21
	3.1.3	3 Farbraum und Farbtemperatur	22
	3.1.4	4 Gleichmäßigkeit (Uniformity)	23
	3.1.5	5 Blickwinkelabhängigkeit	24
	3.2	Optische 3D-Eigenschaften	25
	3.2.2	1 3D-Übersprechen (3D-Crosstalk)	26
	3.2.2	2 3D-Leuchtdichte und 3D-Kontrast	27
	3.2.3	3 Kanalunterschied (3D- Channel Mismatch)	28
	3.2.4	4 Optimaler Betrachtungsabstand (OVD) und Betrachtungswinkel (OVA)	28
	3.2.5	5 3D-Bewegungsfreiheit (3D Viewing Freedom)	29
	3.2.0	6 3D-Gleichmäßigkeit (3D-Uniformity)	30
	3.2.7	7 3D-Betrachtungsbereich (Interocular 3D-Purity)	30
	3.3	Zeitliche Eigenschaften	31
	3.3.2	1 Bildaufbauzeit (Response Time)	31
	3.3.2	2 Flimmermessung	33
	3.4	Elektrische Eigenschaften	33
	3.4.2	1 Leistungsaufnahme	33
	3.4.2	2 Effizienz von Leuchtdichte zur Leistung	33
	3.5	Randbedingungen	34
	3.6	Schlussfolgerung für die Charakterisierung	34
4	Anford	erungen für einen 3D-Charakterisierungsmessplatz	35
	4.1	Mechanische Anforderungen	35
	4.2	Anforderungen an die Messwerterfassung	36
	4.3	Anforderungen an die Software	37
	4.3.2	1 Gerätekommunikation mit erweiterter Fehlerbehandlung	37
	4.3.2	2 Messung und Berechnung	37
	4.3.3	3 Bedienung und Ausgabe der Daten	38
	4.3.4	4 Speichern und Laden von Daten	38
	4.4	Anforderungsprofil	38

5	Entw	icklu	ung des 3D-Charakterisierungsmessplatzes	39
	5.1	K	onstruktion des 3D-Charakterisierungsmessplatzes	
	5.2	K	onstruktion und Konfiguration des Drehtellers	41
	5.3	Ве	etrachtungen zum optischen Messgerät	
	5.4	Pı	rogrammierung der Bediensoftware mittels LabVIEW	47
	5.	4.1	Bedienung der Software	
	5.	4.2	Messwertaufnahme	
	5.	4.3	Fehlerbehandlung	51
	5.	4.4	Interpolation der Messwerte	
	5.5	K	alibrierung und Justierung des 3D-Messplatzes	53
	5.6	Fe	ehlerbetrachtung des 3D-Charakterisierungsmessplatzes	
	5.7	М	Iodifizieren der 3D Displaysoftware	55
	5.8	Zı	usammenfassung	
6	Char	akte	risierung des 3D-Displays	56
	6.1	Ei	igenschaften des Backlights	
	6.2	Ei	igenschaften des autostereoskopischen Displays	
	6.	2.1	Optische 3D-Eigenschaften	60
	6.	2.2	Optische 2D-Eigenschaften	64
	6.	2.3	Zeitliche Eigenschaften	65
	6.	2.4	Elektrische Eigenschaften	69
	6.3	Zı	usammenfassung der Charakterisierung	70
7	Ausw	vertu	ing, Zusammenfassung und Ausblick	71
	7.1	0	ptimierungsvorschläge für das 3D-Display	71
	7.2	V	alidierung des 3D-Charakterisierungsmessplatzes	74
	7.3	Fa	azit und Ausblick	75
Lite	raturver	zeicł	hnis	76
Eide	sstattlic	he E	rklärung	79
			0	
Anh	ang	•••••		80

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1 Beispiele autostereoskopischer Konsumerprodukte	2
Abbildung 1.2 Übersicht Gantt-Plan	4
Abbildung 1.3 Gliederung der Bachelor-Thesis	5
Abbildung 2.1 Betrachtungsgebiete eines Two-View Displays (Dodgson, 2005)	6
Abbildung 2.2 Betrachtungsgebiete eines 16-View Displays (Dodgson, 2005)	7
Abbildung 2.3 Eye-Tracking bei autostereoskopischen Displays (Dodgson, 2005)	8
Abbildung 2.4 Zeitmultiplex mit schwarzen Zwischenbild	9
Abbildung 2.5 Pixelverteilung beim Raummultiplex	9
Abbildung 2.6 Funktionsweise Parallax-Barrier Display (Dodgson, 2005)	10
Abbildung 2.7 Schema mit Barriere-Maske auf Rückseite (Potel, 2005)	11
Abbildung 2.8 Funktionsweise Lentikular Display (Dodgson, 2005)	11
Abbildung 2.9 Funktionsweise Backlight-Direction Display (Harris, 2010)	12
Abbildung 2.10 Der zu charakterisierende IPMS - Demonstrator	13
Abbildung 2.11 Prinzipskizze des IPMS Demonstrators (Scholles, 2008)	14
Abbildung 2.12 Maße des Demonstrators ohne Steuerelektronik (Trost, 2008)	14
Abbildung 2.13 Schema OLED-Backlight in Anlehnung an Trost (2008)	15
Abbildung 2.14 Funktionsweise der Zylinderlinse (Scholles, 2008)	16
Abbildung 2.15 Leuchtstreifenverschiebung zur Linsenmitte	16
Abbildung 2.16 Schema der Ansteuerung (Scholles, 2008)	17
Abbildung 3.1 CIE 1931-Normfarbtafel mit Farbtemperaturbogen (Henker, 2005, S. 36)	22
Abbildung 3.2 Messpunkte für die Gleichmäßigkeit (DIN 9241 Teil 305, 2009)	24
Abbildung 3.3 Grafische Übersicht der 3D-Eigenschaften	26
Abbildung 3.4 Beispiel für 3D-Übersprechen	27
Abbildung 3.5 Zusammenhang zwischen Betrachtungswinkel und Betrachtungsabstand (Järvenpää & Salmimaa, 2008)	29
Abbildung 3.6 Schema der 3D-Bewegungsfreiheit (Holliman, 2005)	29
Abbildung 3.7 Beispiele für den 3D-Betrachtungsbereich (Horikoshi, et al., 2010)	30
Abbildung 3.8 Grau-zu-Grau Matrix (DIN 9241 Teil 305, 2009)	32
Abbildung 3.9 Messung der Reaktionszeiten (DIN 9241 Teil 305, 2009)	32
Abbildung 4.1 Draufsicht auf das Koordinatensystem eines 3D-Messplatzes	35
Abbildung 4.2 Testbildreihenfolge	37

Abbildung 5.1 Entwurf 3D-Messplatz (Draufsicht)	40
Abbildung 5.2 Konstruktion Drehteller (Draufsicht)	41
Abbildung 5.3 Strahlengang Lochblende in Anlehnung an Schmidt-Ploch (2001)	45
Abbildung 5.4 Schema des 2° Gesichtsfeldwinkels	46
Abbildung 5.5 Schnittstellen und Verkabelung	47
Abbildung 5.6 Menüstruktur als Programmierbeispiel	48
Abbildung 5.7 Hauptfenster der Bediensoftware	49
Abbildung 5.8 Flussdiagramm Messwertaufnahme	50
Abbildung 5.9 Abfrage des Messgerätes mit Fehlerbehandlung	51
Abbildung 5.10 Flussdiagramm Messwertinterpolation	52
Abbildung 5.11 Messwerte für die Fehlerbestimmung	54
Abbildung 5.12 Außen- und Innenansicht des 3D-Messplatzes	55
Abbildung 6.1 2D-Messplatz Autronic-Melcher DMS 401	56
Abbildung 6.2 Elektro-optische Übertragungsfunktion des Backlights	57
Abbildung 6.3 Horizontale Betrachtungswinkelabhängigkeit	58
Abbildung 6.4 Farbtemperatur in Abhängigkeit vom Betrachtungswinkel	58
Abbildung 6.5 Optische Fehler in der Leuchtdichte des Backlights	59
Abbildung 6.6 3D-Übersprechen des Displays	60
Abbildung 6.7 3D-Übersprechen für die zentralen Viewing-Zones	61
Abbildung 6.8 3D-Crosstalk für die Farben Rot, Grün und Blau	61
Abbildung 6.9 3D-Betrachtungsbereich des autostereoskopischen Displays	63
Abbildung 6.10 Farbraum und Weißpunkt des 3D-Displays	64
Abbildung 6.11 Elektro-optische Übertragungsfunktion (Gamma)	65
Abbildung 6.12 Schaltung Timing-Messung	65
Abbildung 6.13 Timing des linken Teilbildes	66
Abbildung 6.14 Timing des rechten Teilbildes	66
Abbildung 6.15 Bildaufbauzeit des LC-Moduls mit permanenter Hintergrundbeleuchtung	67
Abbildung 6.16 Bildaufbauzeit mit vertikalen Synchronimpuls	68
Abbildung 6.17 Gewichtete Flimmermessung vom Display	69
Abbildung 7.1 Timing der Anschaltzeiten der Backlightsegmente	71
Abbildung 7.2 Subpixelanordnung des Displays	72
Abbildung 7.3 Verfälschungen der Justierung durch den Blickwinkel	73

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1 Eigenschaften des LC-Modules (TPO Displays Corporation, 2006)	17
Tabelle 3.1 Standards für die 2D Displaycharakterisierung	
Tabelle 3.2 Übersicht optischer 2D-Eigenschaften	
Tabelle 3.3 Gamma-Werte verschiedener Systeme (Poynton, 2002)	
Tabelle 3.4 Übersicht optischer 3D-Eigenschaften	
Tabelle 3.5 Wichtungsfaktoren für das Flimmern (DIN 9241 Teil 305, 2009, S. 69)	
Tabelle 4.1 Anforderungsprofil des 3D-Charakterisierungsmessplatzes	
Tabelle 5.1 Eigenschaften des Drehtellers (Owis GmbH, 2009):	
Tabelle 5.2 Trägheitsmomente des Drehtellers	
Tabelle 5.3 V(λ)-Werte für verschiedene Wellenlängen	
Tabelle 6.1 Eigenschaften des 2D-Messplatzes DMS 401	
Tabelle 6.2 Messwerte vom Backlight	
Tabelle 6.3 3D-Eigenschaften vom Display	
Tabelle 6.4 Bildaufbauzeiten für das linke und rechte Teilbild	67
Tabelle 6.5 Übersicht der Displaycharakterisierung	

Abkürzungsverzeichnis

2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
CCD-Array	Array lichtempfindlicher Fotodioden (Charge-Coupled Device)
CIE 1931	Normfarbsystem der internationalen Beleuchtungskommission (Commis- sion internationale de l'éclairage)
CPLD	programmierbarer Logikbaustein (Complex Programmable Logic Device)
D65	Unbunter Punkt im Normfarbsystem mit 6500K Farbtemperatur
DIN	Deutsches Institut für Normung
DMS	Display Measurement Standard
DMS 401	optisches Messgerät für die goniometrische Erfassung von Displays
DMT65	motorisierter Drehtisch
DPI	Punktdichte (dots per inch)
EBU	European Broadcasting Union
EN	Europäische Norm (European Normative)
EXCEL	Tabellenkalkulationsprogramm
FPDM	Flat Panel Display Measurement
Gantt-Plan	Balkenplan nach Henry L. Gantt für Projektmanagement
HDTV	Hochauflösendes Fernsehen (High Definition Television)
ICDM	International Committee for Display Metrology
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IMID	International Meeting on Information Display
IPD	Augenabstand (Interpupillary Distance)
IPMS	Fraunhofer-Institut für Photonische Mikrosysteme
ISO	International Organization for Standardization
ITU-R BT.709	HDTV Standards von der International Telecommunication Union
LabVIEW	Grafische Programmierumgebung für Ingenieure
LC	Flüssigkristallanzeige für Displays (liquid crystal)
LCD	Flüssigkristalldisplay (liquid crystal display)
LINUX	UNIX ähnliches Betriebssystem
OLED	organische Leuchtdiode (organic light emitting diode)
OVA	optimaler Betrachtungswinkel (optimal viewing angle)
OVD	optimaler Betrachtungsabstand (optimal viewing distance)

PAL	Phase-Alternation-Line-Verfahren zur Fernsehübertragung
РС	Personal Computer
PDA	kleiner tragbarer Computer (Personal Digital Assistant)
Ray-Casting	Schnelle Darstellung einer dreidimensionalen Szene
RGB	Farbmischung mittels Rot, Grün und Blau
RTL	privater Fernsehsender (benannt nach Radio Télé Lëtzebuerg)
SD-Karte	Speicherkarte (Secure Digital Memory Card)
SID	Society for Information Display
SID Digest	Sammlung wissenschaftlicher Texte der Displayentwicklung
sRGB	Farbraum für Internet und Computerdarstellung
TCO	Schwedischer Zusammenschluss professioneller Entwickler
	(Tjänstemännens Centralorganisation)
TECH	technische Veröffentlichung
USB	Bussystem (Universal Serial Bus)
$V(\lambda)$	Die Kurve beschreibt das spektrale Helligkeitsempfinden des Auges
VESA	Video Electronics Standards Association
VHDL	Hardwarebeschreibungssprache (Very High Speed Integrated Circuit
	Hardware Description Language)
XML	Skriptsprache (Extensible Markup Language)

Vorwort

Im Laufe der Evolution hat der Mensch die Wahrnehmung seiner Sinne verändert. Während vor vielen tausend Jahren noch der Tast- und Geruchssinn stark ausgeprägt waren, ist bei dem derzeitigen Menschen die Wahrnehmung über das Auge dominierend. Mithilfe komplexer Gehirnleistung und großer Funktionalität des Auges, wird die Welt mit einem Tiefeneindruck und in Farbe wahrgenommen. Im Laufe der Jahre hat der Mensch unbewusst die Fähigkeit entwickelt, seine Welt um sich herum dreidimensional zu ordnen und Arbeitsabläufe in mehrere Dimensionen auszuführen. Sei es die Gangschaltung beim Auto, Sportarten wie Golfen oder das Ordnen von Geschirr im Schrank: Der Mensch hat die Fähigkeit Tiefe im Raum wahrzunehmen und damit umzugehen.

Mit dem Anbruch des Computerzeitalters wurde aus der Dreidimensionalität technologisch bedingt ein zweidimensionaler Bildschirm. Es wurde in Fenstern gearbeitet und gedacht. Das Verdecken von Objekten und das Arbeiten in der Tiefe des Raums waren nicht mehr möglich. Dass dies dem Nutzer nicht reichen würde, zeigte das Aufkommen von 3D-Spielen am Anfang der 90er Jahre. Damals wurde mittels Ray-Casting dem Menschen einen pseudo 3D-Eindruck vermittelt.

Jetzt, im Jahre 2011, ist die elektronische Entwicklung soweit voran geschritten, dass die hochwertige Realisierung von autostereoskopischen 3D-Displays möglich ist. Die Datenverarbeitung hat mittlerweile eine ausreichende Leistung, so dass mehrere Teilbilder sequentiell wieder gegeben werden können. Dies ermöglicht das Erzeugen von hochwertigem Inhalts für autostereoskopische 3D-Displays. Als technologischen Zwischenschritt kamen 3D-Displays mit Brillentechnologie auf den Markt. In der ersten Phase nutze man sogenannte Shutterbrillen. Bei einigen Menschen traten Übelkeit und Kopfschmerzen nach langer Nutzung auf. Das verringerte die Akzeptanz dieser Technologie. In der zweiten Phase, wurden Shutterbrillen durch Polarisationsbrillen ersetzt. Dies ist für viele Menschen weiterhin eine Einschränkung des Sehens. Daher ist es wichtig, den Fokus auf die Entwicklung autostereoskopischer Displays zu legen, die ohne Brille eine hochwertige 3D-Wiedergabe bieten.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Charakterisierung eines beim Fraunhofer IPMS entwickelten autostereoskopischen Demonstrators. Dafür wurde ein neuartiger 3D-Charakterisierungsmessplatz entworfen.

1 Einleitung und Überblick

Die Entwicklung autostereoskopischer Displays findet seit einigen Jahren statt. Große Firmen wie Nokia, Samsung und Toshiba, aber auch die Fraunhofer Gesellschaft, forschen auf diesem Gebiet. Alle bis heute entwickelten autostereoskopischen Displays sind entweder Demonstratoren oder Nischenprodukte von kleinen Firmen.

Der Erfolg des 3D-Kinofilms "Avatar - Aufbruch nach Pandora" zeigte Ende 2009 die Massenmarkttauglichkeit von hochwertiger 3D-Wiedergabe. Dieser Hype wurde 2010 von der Fußball-Weltmeisterschaft unterstützt. Ausgewählte Spiele wurden in 3D produziert und live gezeigt. Seitdem gibt es einen 3D-Konsumermarkt mit großen Wachstumschancen (Brennesholtz & Chinnock, 2010).

Wie im Vorwort erwähnt, wird die Nutzung von 3D-Wiedergabegeräten mit Brillen, als 3D-Hilfsmittel, vom Konsumer nicht übermäßig akzeptiert. Die Hersteller abreiten intensiv an Produkten mit autostereoskopischer 3D-Wiedergabe. Die ersten Massenprodukte kommen Anfang 2011 auf den Markt und werden in dieser Arbeit kurz vorgestellt.

1.1 Aktueller Stand der Technik

Es existieren zahlreiche autostereoskopische Demonstratoren und Produkte auf dem Markt. Die meisten davon kann man nur in Japan, Südkorea oder China kaufen. Zurzeit werden die autostereoskopischen Displays z.B. in der Industrie und Medizintechnik verwendet. Die nachfolgend exemplarisch vorgestellten Produkte sollen in der Zukunft weltweit verfügbar sein und in großen Stückzahlen verkauft werden.



Abbildung 1.1 Beispiele autostereoskopischer Konsumerprodukte

Der Spielkonsolenhersteller Nintendo (2010) hat eine portable Spielekonsole namens 3DS entwickelt, welche über ein autostereoskopisches 3,53" Display verfügt. Es besitzt eine Auflösung von 800x240 Pixeln. Durch das Barrieren-Parallaxen-Design mit zwei Betrachtungsgebieten, reduziert sich die horizontale Auflösung auf 400 Pixel pro Auge. Das Gerät soll 230€ kosten und ab März 2011 verfügbar sein. Eine weitere Entwicklung kommt von der Firma Toshiba (2010) im vierten Quartal 2011 auf den Markt. Es handelt sich dabei um ein 21" autostereoskopisches Display. Die Auflösung von 1280x800 Pixeln und die Leuchtdichte von 480 cd/m² werden für ein Barrieren-Parallaxen-Design mit neun Betrachtungsgebieten verwendet. Es ergibt sich eine nahezu ineinander fließende 3D-Wiedergabe. Betrachter vor dem Bildschirm sehen von allen Positionen unterschiedliche, aber gute 3D-Eindrücke. Der Preis liegt wahrscheinlich bei 940€.

Auch im mobilen Bereich werden autostereoskopische 3D-Displays auf den Markt kommen (Zantke, 2010). Auf der IFA 2010 hat die Firma Sharp ein Handy namens LYNX 3D SH-03C angekündigt. Dieses verfügt über ein 3,8" Display mit einer Auflösung von 480x800 Pixeln. Es funktioniert durch ein Barrieren-Parallaxen-Design mit zwei Betrachtungsgebiete, welches im Kapitel 2.3.1 näher erklärt wird. Es soll im Januar 2011 auf den amerikanischen und asiatischen Markt kommen. Der Preis steht noch nicht fest.

Durch die verschiedenen Auflösungen und Technologien wird es notwendig sein, internationale Standards für die 3D-Charakterisierung festzulegen. Der Vergleich von autostereoskopischen Produkten ist zurzeit noch nicht möglich.

1.2 Motivation

Durch die Konstruktion eines polarisierten 3D-Monitors als Praxisprojekt im sechsten Semester und die Kalibrierung von Broadcastmonitoren im Praxissemester bei RTL wurde das Interesse für die Charakterisierung von 3D-Displays entdeckt.

Das Fraunhofer IPMS in Dresden entwickelte seit 2007 an einem autostereoskopischen 3,5" Demonstrator mit neuartiger Hintergrundbeleuchtung auf OLED-Basis. Aus Zeit- und Budgetgründen konnte nach der Entwicklung die Einhaltung des Lastenhefts allerdings nicht überprüft werden. Es fehlte der messtechnische Nachweis über die Qualität der 3D-Wiedergabe. Im Frühjahr 2010 wurde die Entwicklung eines 3D-Charakterisierungsmessplatzes mit anschließender Charakterisierung des Demonstrators als akademische Abschlussarbeit ausgeschrieben.

Bei der Literaturrecherche wurde festgestellt, dass dies ein sehr junges Thema ist und es keine ausführliche, gedruckte Literatur gibt. Viele verwendete Veröffentlichungen sind aus den letzen 5 Jahren. Dies weckte den Ehrgeiz eine zusammenfassende Arbeit zu schaffen, welche eine technische Einführung in autostereoskopische Displays gibt und dessen Charakterisierungsmerkmale für zukünftige Studenten oder Interessierte zusammenfassend darstellt.

1.3 Zielstellung und Zeitmanagement

Der Umfang der Arbeit wurde vom Betreuer im Fraunhofer IPMS (Kroker, 2010) festgelegt:

- Einarbeitung in die Grundlagen autostereoskopischer Systeme
- Erarbeitung eines Konzeptes für einen 3D-Charakterisierungsmessplatz
- Komponentenauswahl für den neuen Messaufbau
- Modifikation/Programmierung von Soft- und Hardware
- Aufbau und Inbetriebnahme des Messplatzes
- Charakterisierung der am Fraunhofer entwickelten 3D-Displays
- Auswertung der Messergebnisse
- Identifizierung der Fehlerquellen und geeigneter Gegenmaßnahmen

Die komplexe Aufgabenstellung der Bachelor Thesis lässt sich zu besseren Bearbeitung und Übersicht mit einem ausführlichen Projektplan strukturieren.

Nr.	Vorgangsname	Dauer		Aug '10	Sep'10	Okt '10	Nov '10		Dez '10	Jan '11	Fe	eb '11
			26	. 02. 09. 16. 23.	30. 06. 13. 20. 2	7. 04. 11. 18. 25.	01. 08. 15. 2	2. 2	9. 06. 13. 20. 27	. 03. 10. 17. 24.	31. 07	. 14. 21.
1	In der Hochschule	45 Tage?		W								
_												
5												
6	theoretische Vorbereitung	18 Tage?		Q	V							
18	Abgabe von Bestellungen / Werkstattaufträgen	1 Tag?			• 02.09.							
19												
20	praktische Vorbereitung	25 Tage?				Ö	mų					
27	Festlegung der genauen Aufgabenstellung	1 Tag?					01.11.					
28												
29	Durchführung der Bachelor Thesis	25 Tage?					A	-				
39	Messplatzaufbau funktionsfähig	1 Tag?						2	6.11.			
40	Praxisteil beendet	1 Tag?							17.12.			
41												
42	Schreiben der Bachelor Thesis	76 Tage?					ţ	-				
54	erste Reinfassung	1 Tag?									1.	
55	Abgabe Arbeit	1 Tag?										14.02.

Abbildung 1.2 Übersicht Gantt-Plan¹

Neben den organisatorischen Prozessen in der Hochschule wird die Projektphase in vier große Bereiche unterteilt. Im ersten Teil, der theoretischen Vorbereitung, wird sich mit dem Material und dem Arbeitsumfeld im Fraunhofer IPMS vertraut gemacht. Weiterhin wird die theoretische Grundlage für die Bearbeitung des Themas in dieser Zeit vertieft. Der Abschnitt zur praktischen Vorbereitung beinhaltet den Aufbau und die Programmierung des 3D-Messplatzes sowie die Modifizierung des vorhanden 3D-Displays. In der Phase der Durchführungen wird der entstandene Messplatz getestet und die Messungen aufgenommen, das Display charakterisiert und verschiedene Thesen validiert. Weiterhin wird in dieser Zeit die Arbeit geschrieben.

¹ Ausführlicher Gantt-Plan befindet sich im Anhang

Wie in Abbildung 1.2 zu sehen, existieren wichtige Meilensteine. Das Einhalten dieser Zeitpunkte ist besonders wichtig zur Vermeidung von Verzögerungen im Projekt.

Diese Bachelor-Thesis ist in sechs große Bereiche gegliedert:



Abbildung 1.3 Gliederung der Bachelor-Thesis

Im folgenden Kapitel werden die technischen Grundlagen von flachen autostereoskopischen Displays erklärt. Zusätzlich werden wichtige Begriffe, sowie die Entstehung der 3D-Wiedergabe und der zu charakterisierende 3D-Demonstrator beschrieben. Das Kapitel 3 erklärt die Auswahl relevanten Eigenschaften für die Charakterisierung von flachen autostereoskopischen Displays. Es ist die Grundlage für das darauffolgende Kapitel, welches die Anforderungen für ein neuartigen 3D-Charakterisierungsmessplatz beschreibt. Die Umsetzung und der Aufbau des speziellen 3D-Charakterisierungsmessplatzes werden im fünften Kapitel beschrieben. Im Kapitel 6 werden die Ergebnisse der Charakterisierung präsentiert. Das letzte Kapitel validiert den entwickelten 3D-Charakterisierungsmessplatz und wertet die Ergebnisse von Kapitel 6 aus. Es werden Optimierungsvorschläge für den 3D-Demonstrator gezeigt und die Arbeit ganzheitlich betrachtet.

2 Grundlagen autostereoskopischer Displays

Dieses Kapitel bietet einen Überblick über die Funktionsweise von flachen, autostereoskopischen Displays. Diese besitzen Unterschiede in den Betrachtungsgebieten, der Bildwiedergabe und im technologischen Aufbau. Mit der Kombination lassen sich Displays für unterschiedliche Einsatzzwecke und unterschiedlicher Bildwiedergabequalität entwickeln.

Die wichtigste Eigenschaft für den 3D-Eindruck ist bei autostereoskopischen Displays die Querdisparität im Auge. Das bedeutet, dass das linke und rechte Auge leicht versetzte Bildinformationen bekommt. Das Gehirn interpretiert dies als Tiefeneindruck. Um die verschiedenen Bildinformationen vor dem Display zu platzieren, haben autostereoskopische Displays unterschiedliche Betrachtungsgebiete für das jeweilige Auge.

2.1 Betrachtungsgebiete (Viewing- Zones)

Die Betrachtungsgebiete (engl. Viewing-Zones) charakterisieren die Art des 3D-Eindruckes. Ein realer Gegenstand hat unendlich viele Perspektiven für dessen Betrachtung. Durch die plane Oberfläche ist dieser Eindruck beim autostereoskopischen Display nicht möglich. Das liegt daran, dass die Betrachtungsgebiete sich ausschließlich vor dem Display ausbreiten. Somit existiert nur eine begrenzte Anzahl an Perspektiven zur Betrachtung. Nur wenn die Augen mit ihrem Abstand optimal in den verschiedenen Viewing-Zones liegen, wird ein guter 3D-Eindruck wahrgenommen. Bei der Kopfbewegung und dem damit verursachten Wechsel der Viewing-Zone wird der 3D-Eindruck unterbrochen.

2.1.1 Two-View Displays

Die am einfachsten zu realisierende Variante sind Two-View Displays. Diese stellt ein Teilbild für das linke Auge und eins für das rechte Auge dar. Die Betrachtungsgebiete entstehen in rhombenartiger Form, wie folgende Abbildung zeigt:



Abbildung 2.1 Betrachtungsgebiete eines Two-View Displays (Dodgson, 2005)

Wie in Abbildung 2.1 zu sehen, existiert nur ein kleiner Bereich des optimalen 3D-Eindrucks für den Betrachter. Selbst beim optimalen Betrachtungsabstand liegt die Chance bei 50% in einem pseudoskopischen Bereich zu sein und keinen 3D-Eindruck wahrzunehmen. Jede korrekte Betrachtungsposition liefert den gleichen 3D-Eindruck.

Für diese Art der Betrachtung gibt es eine große Anzahl an hochwertigen Wiedergabeinhalten. Aktuelle 3D-Kinofilme und die meisten stereoskopischen Fotografien werden nach der Methode aufgenommen, dass zwei unterschiedliche Teilbilder für beide Augen zur Verfügung stehen.

2.1.2 Multi-View Displays

Die Nachteile der Two-View Displays werden bei Multi-Views Displays minimiert. Die Verteilung von mehreren Viewing-Zones zeigt diese Abbildung:



Abbildung 2.2 Betrachtungsgebiete eines 16-View Displays (Dodgson, 2005)

Der Vorteil von 16 Viewing-Zones ist die Verschmelzung der einzelnen Zonen. Die benachbarten Zonen liefern ähnliche Bilder, die nur leicht versetzt sind. Der Betrachter nimmt dies als Verschiebung der Perspektive war. Er kann sich im Raum frei bewegen und sieht den 3D-Gegenstand einmal von der linken Seite und dann von der rechten Seite. Somit können mehrere Betrachter auf das Display schauen und jeder hat seinen individuellen 3D-Eindruck.

Der Nachteil ist eine aufwendige Bildverarbeitung. Filme werden für diesen Eindruck entweder mit 16 Kameras aufgenommen oder die einzelnen Betrachtungsgebiete mittels Tiefeninformation berechnet. Weiterhin ist eine hohe Auflösung oder eine schnelle Bildwiedergabe für das Display notwendig.

2.1.3 Eye-Tracking

Um das Problem des geringen Bewegungsspielraums bei Two-View Displays zu reduzieren, gibt es Produkte die eine Kamera besitzen. Ihre Aufgabe besteht darin, die Position der Augen vom Betrachter zu finden. Zwei verschiedene Arbeitsweisen werden von Dodgson (2005) gezeigt:



Abbildung 2.3 Eye-Tracking bei autostereoskopischen Displays (Dodgson, 2005)

Im Bereich a) der Abbildung 2.3 werden je nach Betrachtungswinkel die Viewing-Zones vertauscht und der pseudoskopische Bereich vermieden. Der Teil b) zeigt eine aufwendigere Variante des Eye-Tracking. Dort werden je nach ermitteltem Betrachtungswinkel die optischen Ebenen im Display so verschoben, dass die Viewing-Zones sich optimal auf den Betrachter ausrichten.

Damit die Kamera optimal arbeiten kann, müssen solche Displays in hellen Umgebungen verwendet werden. Eine Betrachtung von mehreren Nutzern ist nicht möglich.

2.2 Bildwiedergabe

Die große Herausforderung bei autostereoskopischen Displays ist es, die Bildinformationen in einer angemessenen Zeit mit einer akzeptablen Auflösung dem Betrachter zu präsentieren. Bei schlechter Umsetzung verringert sich der 3D-Eindruck. Es gibt als Lösungsansatz die sequentielle oder räumliche Verschachtelung der Bildinformationen.

2.2.1 Zeitmultiplex

Das Zeitmultiplex verschachtelt die kompletten Teilbilder der verschiedenen Viewing-Zones zeitlich. Somit wird die volle Auflösung vom Display genutzt. Die zeitliche Abfolge verdeutlicht folgendes Schema:



Abbildung 2.4 Zeitmultiplex mit schwarzen Zwischenbild

Die Verschachtelung von kompletten Bildern in hoher Auflösung lässt die Datenrate stark ansteigen. Eine hohe Bildwiederholrate ist notwendig. Während bei einem 2D-Display der flimmerfreie Eindruck mit 60 Hz realisiert wird, braucht ein Two-View Display 120 Hz für die optimale Bildwiedergabe. Das bringt die aktuelle LCD-Technologie an ihre Grenzen. Um das Übersprechen zwischen den einzelnen Teilbildern zu vermeiden wird ein Schwarzbild eingefügt, welches die benötigte Bildwiederholrate nochmals erhöht. Dies reduziert die Gesamtleuchtdichte des Systems. Die Realisierung von Multi-View Displays mit einer großen Anzahl von Viewing-Zones ist zurzeit mit zeitmultiplex noch nicht möglich (Dodgson, 2005).

2.2.2 Raummultiplex

Die Raummultiplex-Variante verteilt alle Teilbilder räumlich auf die horizontalen Pixel. Das wird in folgender Abbildung dargestellt:



Abbildung 2.5 Pixelverteilung beim Raummultiplex

Es werden zeitgleich alle Teilbilder dargestellt. Die Abbildung 2.5 zeigt, dass jedes Teilbild nur ein Viertel der Leuchtdichte und der Auflösung darstellt. Das reduziert den 3D-Eindruck qualitativ. Folglich müssen autostereoskopische Displays ein hochaufgelöstes Pixel-Array für dieses Verfahren verwenden (Dodgson, 2005).

2.3 Realisierungsmöglichkeiten

Ziel der optischen Realisierung ist es, die Lichtstrahlen der stereoskopischen Teilbilder für das jeweilige Auge zu separieren. Für die geeignete Bildwiedergabe mittels Betrachtungsgebieten haben sich drei verschiedene Bauweisen bei flachen autostereoskopischen Displays etabliert.

2.3.1 Parallax-Barrier Displays

Die einfachste und häufigste Variante sind Parallax-Barrier Displays. Dabei wird das Licht eines Pixels durch lichtundurchlässige vertikale Barrieren so verdeckt, dass die Lichtstrahlen an der optimalen Betrachtungsposition für ein Auge blockiert sind.



Abbildung 2.6 Funktionsweise Parallax-Barrier Display (Dodgson, 2005)

Das in der Abbildung 2.6 gezeigte Two-View Display reduziert durch raummultiplex die horizontale Displayauflösung um die Hälfte. Es wird abwechselnd eine Spalte für das linke und rechte Auge verwendet. Mittels weiterer Verringerung der Auflösung lassen sich Multi-View Displays mit dieser Technik ebenfalls realisieren.

Durch die verdeckenden Barrieren verringert sich die Leuchtdichte des Displays. Die vorgelagerte Position der Barrieren-Maske ermöglicht die einfache Umrüstung eines konventionellen Displays zu einem Autostereoskopischen. Dazu wird eine mit Streifen bedruckte lichtdurchlässige Folie verwendet.



Es gibt weiterhin die Möglichkeit die Barriere-Maske hinter dem LC-Modul anzuordnen:

Abbildung 2.7 Schema mit Barriere-Maske auf Rückseite (Potel, 2005)

Wird die statische Barriere-Maske in Abbildung 2.7 durch ein aktives LC-Modul ersetzt, ist die Realisierung eines autostereoskopischen und umschaltbaren 2D/3D Displays möglich.

2.3.2 Lentikular Displays

Eine bessere Variante sind Displays, welche ein lentikulares Linsenarray nutzen. Dies besteht aus vertikalen und halbzylindrischen Säulen, wie in folgender Abbildung zu sehen ist:



Abbildung 2.8 Funktionsweise Lentikular Display (Dodgson, 2005)

Auch in Abbildung 2.8 wird das Raummultiplex-Verfahren angewandt. Die Anzahl der Pixel unter einer Linse ergeben die Anzahl der Viewing-Zones. Je weiter ein Pixel am Rand einer Linse ist desto stärker wird der Lichtstrahl abgelenkt. Die Herstellung der Linsen-Arrays ist sehr kostenintensiv und stellt hohe Anforderungen an die Qualität der Linsen. Optische Fehler mindern den 3D-Eindruck stark. Durch die Lupenfunktion der Linsen wird der schwarze Rand der Subpixel störend vergrößert. Wegen der Linsenempfindlichkeit und der Anordnung in der ersten Ebene, eignen sich solche Displays für den mobilen Einsatz nicht. Außerdem wird der Betrachtungswinkel durch die Bündelung der diffusen Lichtstrahlen eingeschränkt (Holliman, 2005).

2.3.3 Backlight-Direction Displays

Die neueste Technologie stellen Backlight-Direction Displays dar. Das Ziel dieser Displays besteht darin, durch sequentielle Steuerung das Licht schon vor dem Pixel-Array so zu lenken, dass es in das richtige Auge leuchtet. Eine Realisierungsmöglichkeit wurde von der Zeitschrift IEEE Spectrum (Harris, 2010) vorgestellt:



Abbildung 2.9 Funktionsweise Backlight-Direction Display (Harris, 2010)

Das in Abbildung 2.9 gezeigte Two-View Display verwendet zwei Leuchtdioden, die abwechselnd mit einer Frequenz von 120 Hz Licht für das jeweilige Auge ausstrahlen. Das dazu synchronisierte LCD-Panel liefert die Teilbilder in voller Auflösung. Es wird das Zeitmultiplex-Verfahren angewandt. Diese Realisierung setzt sehr schnelle, kostenintensive LCD-Panels voraus.

Eine andere Umsetzung des Backlight-Direction Displays wurde vom Fraunhofer IPMS entwickelt. Dies ist das zu charakterisierende 3D-Display. Deswegen wird die Funktionsweise auf den folgenden Seiten ausführlicher behandelt.

2.4 Funktionsweise des autostereoskopischen IPMS Demonstrators

Der IPMS Demonstrator ist ein mobiles 3D-Display, welches 3D-Bilder autostereoskopisch darstellt:



Abbildung 2.10 Der zu charakterisierende IPMS - Demonstrator

Auf der Grundlage der Diplomarbeit "Systembetrachtung für ein gesteuertes OLED-Backlight für autostereoskopische 3D-Displays" (Kroker, 2007), konnte das Fraunhofer IPMS ein Projekt akquirieren, dass diese Entwicklung ermöglichte. Es wurde folgende Ziele vereinbart:

- Virtuelle autostereoskopische 3D-Wiedergabe als Two –View System
- Mehrere Betrachter gleichzeitig
- Teilbildwiedergabe als Zeitmultiplex
- Direkte Ansteuerung der Hintergrundbeleuchtung
- Mobile Hostplattform

Der Haupteinsatzbereich soll in der medizinischen Diagnostik und Therapie liegen.

Durch die Kombination aus strukturierter Hintergrundbeleuchtung, Mikrolinsenanordnung und einer synchronen Ansteuerung von LC-Modul und Leuchtstreifen lässt sich der Durchleuchtungswinkel des LC-Moduls steuern. Diese Funktionsweise wurde im Lastenheft (Scholles, 2008) dargestellt²:



Abbildung 2.11 Prinzipskizze des IPMS Demonstrators (Scholles, 2008)

Die Abbildung 2.11 zeigt, dass der Hintergrund aus Leuchtstreifen besteht. Die Mikrolinsenanordnung und das abwechselnde Anschalten der Leuchtstreifen bewirkt eine unterschiedliche Ablenkung der Lichtstrahlen in das linke oder rechte Auge. Der LC-Modulator ist für die Wiedergabe der Bildinformation zuständig. Jeder Pixel wird sequentiell von den zwei Lichtstrahlen der Teilbilder durchleuchtet.

Die Diagonale der aktiven sichtbaren Fläche beträgt bei diesem Demonstrator 3,5 Zoll. Weitere wichtige Maße zeigt die folgende Abbildung:



Abbildung 2.12 Maße des Demonstrators ohne Steuerelektronik (Trost, 2008)

² Weitere Parameter aus dem Lastenheft (Scholles, 2008) befinden sich im Anhang

2.4.1 OLED - Hintergrundbeleuchtung

Die Hintergrundbeleuchtung (engl. Backlight) stellt bei dem IPMS Demonstrator den Technologievorsprung dar. Dabei wird eine Hintergrundverdrahtung mittels Fotolithografie auf einen Silizium-Wafer aufgebracht. Bei diesen Verfahren wird eine komplette Metallschicht aufgetragen und anschließend, mittels Fotomaske, die nicht abgedeckten Bereiche weg geätzt. Die zwei Verdrahtungsebenen sind mit einer Oxidschicht isoliert. Anschließend wurden die einzelnen Schichten der OLED aufgedampft. Dafür wurde eine Schattenmaske für die Abdeckung der nicht relevanten Bereich genutzt. Die entstandene Hintergrundbeleuchtung besitzt 1312 Leuchtstreifen mit den Abmaßen von jeweils 80 µm x 27,5 mm (Trost, 2008). Diese sind beim IPMS Demonstrator in vier Quadranten aufgeteilt:



Abbildung 2.13 Schema OLED-Backlight in Anlehnung an Trost (2008)

Das Backlight besitzt vier Anschlüsse zur separaten Steuerung der Leuchtstreifen im jeweiligen Quadranten. Somit sind die Leuchtstreifen der jeweiligen Teilbilder, der Mitte und der Justierung getrennt steuerbar.

Es stehen verschiedene OLED-Backlights mit weißer und grüner Lichtemission zur Verfügung. Die weißen OLEDs haben den Nachteil der geringeren Leuchtdichte und degradieren schneller.

2.4.2 Mikrolinsenanordnung

Ziel der Linsen ist es, den Lichtstrahl des Leuchtstreifens vom Backlight in das richtige Auge zu lenken. Das Linsen-Array wurde vom Fraunhofer IPMS speziell für diese Anwendung berechnet. Nach Lastenheft (Scholles, 2008) funktioniert dies wie folgt:



Abbildung 2.14 Funktionsweise der Zylinderlinse (Scholles, 2008)

Die Abbildung 2.14 zeigt, dass zwei Leuchtstreifen für das jeweilige Teilbild unter einer Linse angeordnet sind. Das Licht wird je nach Anordnung durch das Snelliussche Brechungsgesetz in das linke oder rechte Auge gelenkt. Dass jedes Auge von dem gleichen Pixel unterschiedliche Bildinformationen bekommt, wird durch die sequentielle und synchrone Ansteuerung von LC-Modul und Leuchtstreifen erzielt. Die Position der Leuchtstreifen zur Linsenmitte verschiebt sich nach außen, desto weiter die Linsen von der Displaymitte entfernt sind (Trost, 2008):



Abbildung 2.15 Leuchtstreifenverschiebung zur Linsenmitte

Dadurch wird erreicht, dass alle Leuchtstreifen Licht in Richtung der jeweiligen Viewing-Zone aussenden.

2.4.3 Das LC-Modul

Für die Pixelwiedergabe wurde das handelsübliche LCD TD035TTEA3 (TPO Displays Corporation, 2006) verwendet. Dieses 3,5" Aktiv-Matrix-Display wird in Smart-Phones und PDAs verwendet und zeichnet sich durch folgende Eigenschaften aus:

Parameter	Formelzeichen	Wert	Einheit
Auflösung		320x240	Pixel
Kontrast	Cr	300:1	
Bildwiederholrate	VRR	70	Hz
Bildaufbauzeit	T _r +T _f	20	Ms
Gleichmäßigkeit		80%	
Pixelabstand (quadratisch)		219	μm
Farbmischung RGB		6	Bit pro Kanal
Betrachtungswinkel	θ	35-60°	

Tabelle 2.1 Eigenschaften des LC-Modules (TPO Displays Corporation, 2006)

Für die Benutzung wurden die konventionelle Hintergrundbeleuchtung und das Touch-Panel entfernt. Deswegen werden Parameter der Leuchtdichte und des Farbraums nicht angegeben. Die Transmissionsmessung des LC-Moduls ergibt eine geringe Lichtdurchlässigkeit von 8% (Kroker, 2008).

2.4.4 Die Ansteuerung

Die Steuerung des IPMS-Demonstrators übernimmt eine eigens entwickelte Platine. Nach dem Lastenheft (Scholles, 2008) stellt die Abbildung 2.16 diese schematisch dar:



Abbildung 2.16 Schema der Ansteuerung (Scholles, 2008)

Das Prozessormodul ist ein Trizeps IV Modul (Keith & Koep GmbH, 2008) für Embedded Systems. Dieser Mini-Computer verfügt über wichtigen Schnittstellen wie USB, Netzwerk und Seriell sowie einen Videoausgang. Es besitzt eine Taktfrequenz von 520MHz. Über eine SD-Karte wird eine angepasste Version von Linux gestartet. Dies bildet die Grundlage für eine spezielle Bildbetrachtungssoftware, welche zwei getrennte Bilder mit der Auflösung von 320 x 240 Pixel zu einem großen 2D-Bild mit einer Auflösung von 768 x 1200 Pixeln zusammensetzt. Dieses beinhaltet zusätzlich Schwarzbilder und Pixel für den optimalen Bildaufbau im LC-Modul.

Bevor das LC-Modul die Bilddaten erhält, werden diese von einem CPLD Logikbaustein ausgewertet. Das 2D-Bild wird in die jeweiligen Teilbilder zerlegt und mithilfe von Pixelclock und vertikaler Synchronisation die Zeiten für das Einschalten der Leuchtstreifen ermittelt. Dieser Aufwand ist notwendig, da der Grafiktreiber vom Prozessormodul nur eingeschränkte Auflösungen und Bildwiederholraten zulässt.

Der weitere Funktionsumfang der Software besteht in einer Diashowfunktion. Das Display ist in der Lage automatischer mehrere Bilder aus einem Ordner wiederzugeben.

Weiterhin existiert eine komplexe Stromversorgung auf der Platine. Unterschiedliche Spannungen für OLED, Trizeps und andere Schaltkreise werden zur Verfügung gestellt. Um die Lebensdauer der OLED zu maximieren, wird ein konstanter Strom erzeugt. Dieser wird überprüft und je nach Degradierung oder gewünschter Helligkeit nachgeregelt.

3 Charakterisierung autostereoskopischer Displays

Im Mittelpunkt dieses Kapitels steht die Beschreibung und Auswahl von optischen 2D und 3D Eigenschaften. Sie sollen die optischen Eindrücke messtechnisch belegen und das Display charakterisieren.

Die zweidimensionale Display-Charakterisierung ist schon seit Jahren etabliert. Es folgen die wichtigsten Normen für verschiedene Anwendungsbereiche:

Standard/Norm	Verwendungshinweis
DIN EN ISO 9241-305	Optische Laborprüfverfahren für elektronische optische Anzeigen
DIN EN ISO 9241-307	Analyse und Konformitätsverfahren für elektronische optische Anzeigen
EBU – TECH 3320	Benutzeranforderungen für Videomonitore bei der Fernsehproduktion
EBU – TECH 3321	EBU Richtlinien für Konsumerflachbildschirme
EBU – TECH 3325	Messmethoden zur Charakterisierung von Studiomonitoren
ICDM DMS	Standards und Messrichtlinien für Displays von der SID;
	Veröffentlichung erst im Mai 2011
TCO'03	Richtlinien für Computerflachbildschirme
TCO'06	Richtlinien für Computerflachbildschirme mit multimedialen Anforderungen
VESA-2005-5	Umfassendes Werk zur Charakterisierung und Vermessung von Displays
(FPDM2)	

Tabelle 3.1 Standards für die 2D Displaycharakterisierung

Die meisten Normen sind Aufgrund der geringen Auflösung und der Größe (vgl. Kapitel 2.4) für den IPMS-Demonstrator ungeeignet. Für das Charakterisierungskonzept werden das VESA Dokument FPDM2 und die DIN 9241-305 verwendet. Beide Dokumente zeichnen sich in ausführlicher Beschreibung und Dokumentation der Messprozesse aus. Die DIN 9241-305 baut auf dem VESA-Dokument auf und ergänzt bzw. verfeinert einige Eigenschaften. Aufgrund des eingeschränkten Funktionsumfangs vom Demonstrator, wird nur eine Auswahl aller in den Dokumenten beschriebenen Parameter vorgestellt.

Eine Norm für die 3D-Charakterisierung gibt es zurzeit nicht. Das Konzept dafür basiert auf Vorträgen und Dokumenten von den großen Display-Tagungen der vergangenen Jahre. Wichtige Tagungen dafür sind die IMID oder die Konferenzen der SID.

3.1 Optische 2D-Eigenschaften

Die wichtigsten optischen Eigenschaften werden oft im Datenblatt konventioneller Displays angegeben. Diese zu beurteilen ist auch bei 3D-Displays sinnvoll. Sie bilden die Grundlage für die erweiterte 3D-Wiedergabe und dessen Qualität. Für die Charakterisierung des Demonstrators werden folgende betrachtet:

Name	Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
Leuchtdichte	L	cd/m ²	Menschliche Helligkeitsdarstellung vom
			Display
Kontrast	С	-	Unterschied zwischen hellster und dun-
			kelster Darstellung
Gamma	γ	-	elektro-optische Übertragung
Farbraum	Grafisch in CIE-1931	-	mögliche Farbwiedergabe
	Normfarbtafel		
Farbtemperatur	T _{CCT}	Kelvin	Farbstich vom Weiß
Weiße Farbkoordinate	х,у		Weißpunkt in der Normfarbtafel
Gleichmäßigkeit	Uniformity	%	Leuchtdichten- und Farbhomogenität
	Δ u'v'	-	auf der Displayfläche
Blickwinkelabhängigkeit	Blickwinkel	0	Leuchtdichten- und Farbhomogenität bei
			verschiedenen Betrachtungswinkeln

Tabelle 3.2 Übersicht optischer 2D-Eigenschaften

3.1.1 Leuchtdichte und Kontrast

Die Leuchtdichte L gibt bei Displays an, wie viel Lichtmenge pro Zeiteinheit von einer leuchtenden Fläche abgegeben und von einem Raumwinkel mit definierter Richtung aufgefangen wird. Bei der Charakterisierung entspricht der Raumwinkel dem Normbetrachtungswinkel des menschlichen Auges von zwei Grad. Dies wurde in der DIN 5033 Teil 2 (1992) und in der DIN 5031 Teil 3 (1982) als farbmetrischer Normalbeobachter für das Tagesehen festgelegt und ist für Leuchtdichten größer 10 cd/m² gültig. Die Einheit wird in Candela pro Quadratmeter (cd/m²) oder veraltet auch als Nits angegeben. Der Zusammenhang ist 1cd/m²=1 Nits.

Die Leuchtdichte von einem weißen Bild gibt an, wie hell ein Display ist und wie gut es sich vom Umgebungslicht abhebt. Im Konsumerbereich wird daher auch oft von Helligkeit oder Weißwert gesprochen.

Eine möglichst geringe Leuchtdichte ist beim schwarzen Bild notwendig, um einen grauen matten Eindruck zu verhindern. Diese Eigenschaft wird auch Schwarzwert genannt. Das Schwarz leuchtet bei konventionellen LC-Displays, da die Hintergrundbeleuchtung nicht abgeschaltet wird und durch die LC-Ebene durchscheint. Die Messungen für Schwarz sind sehr fehleranfällig, da hier der Rauschabstand vom Messgerät gering ist. Die Faktoren dafür sind Eigenrauschen des Messkopfes, zu hohes Umgebungslicht und Verunreinigungen bzw. Kratzer auf der Displayoberfläche. Es wird empfohlen, den Schwarzwert öfters zu messen und einen Mittelwert zu bilden. Mittels Weiß- und Schwarzwert lässt sich der Kontrast C wie folgt berechnet (VESA Display Metrology Committee, 2001):

$$C = \frac{L_w}{L_b} \tag{3.1}$$

L_w ... Leuchtdichte Weiß L_b... Leuchtdichte Schwarz

Dieser Wert ist ein wichtiger Indikator für die optische Bewertung. Je größer der Kontrast, desto besser ist das Display. Aktuelle Displays erreichen einen Kontrast von 1000:1 bei einer Leuchtdichte von 360cd/m² (EIZO Nanao Corporation, 2010).

Die Messung der Leuchtdichten wird mittels vollflächigen, weißen und schwarzen Testbildes durchgeführt. Das Spotmessgerät wird mittig und senkrecht mit einem Abstand von 50cm vor dem Display platziert (VESA Display Metrology Committee, 2001, S. 44).

3.1.2 Elektro-optische Übertragungsfunktion (Gamma)

Elektronische Anzeigegeräte stellen unterschiedliche Helligkeitsstufen nicht linear dar. Das ist zum einen systembedingt und liegt zum anderen am menschlichen Auge, welches ein logarithmisches Helligkeitsempfinden hat. Die Aufgabe der elektro-optischen Übertragungsfunktion ist es, alle möglichen Graustufen so wieder zu geben, dass der Betrachter einen möglichst linearen Graustufenverlauf wahr nimmt. Damit dieselbe Aufnahme auf unterschiedlichen Betrachtungssystemen einheitlich aussieht, wurden verschiedene Gamma-Werte definiert:

System	Gamma-Wert
Kathodenstrahlröhre für PAL - Fernsehen	2,55
Flachbildschirm für HDTV nach ITU-R BT.709	2,22
Computerflachbildschirm mit sRGB Farbraum	2,2
Drucker	1,75

Tabelle 3.3 Gamma-Werte verschiedener Systeme (Poynton, 2002)

Im Computerbereich wird nach obiger Tabelle ein Gamma-Wert von 2,2 angestrebt. Kann dieser Wert nicht erreicht werden, ist eine Korrektur mittels Lookup-Table für die Helligkeitsstufen erforderlich. Um das Gamma aufzunehmen, wird die Leuchtdichte von 8 oder optional 16 gleichmäßigen und vollflächigen Grauabstufungen gemessen³. Das Gamma γ wird aus der gemessenen Leuchtdichte L, der Nummer des Testbildes a und dem dazugehörigen Sollgrauwert V im FPDM2 Dokument (VESA Display Metrology Committee, 2001, S. 49) wie folgt berechnet:

$$\gamma = \frac{\lg(V) + \lg(a)}{\lg(L - L_b)}$$
(3.2)

Dabei ist L-L_b die Leuchtdichte L vom Grauwert abzüglich der Leuchtdichte L_b vom Schwarz. Stellt man die Formel als Funktion vom logarithmischen Grauwert V zur logarithmischen Nettoleuchtdichte dar ist das Gamma γ die Steigung der linearen Geraden.

3.1.3 Farbraum und Farbtemperatur

Der Mensch kann nur eine definierte Anzahl von Farbtönen und mit entsprechender Farbsättigung sehen. Dieser Farbraum ist mit der CIE1931-Normfarbtafel und mittels xy-Farbenskala definiert:



Abbildung 3.1 CIE 1931-Normfarbtafel mit Farbtemperaturbogen (Henker, 2005, S. 36)

Die Abbildung 3.1 zeigt die Spektralkurve des sichtbaren Lichtes zwischen 380 und 780 nm. Die Ränder dieser Kurve entsprechen der maximal sichtbaren Sättigung vom Auge. Je mittiger die Farbkoordinate liegt desto weniger Farbsättigung ist vorhanden. Die Farbkoordinate wird mit einer xy-Skala angegeben. Diese wird mithilfe der drei Empfindlichkeitskurven XYZ des Auges für Rot, Grün und Blau berechnet. Bei der xy-Angabe wird der Vektor Z wegelassen, da die Summe aller Kurven auf Eins normiert ist. Das bedeutet X+Y+Z=1.

³ Die berechneten RGB-Werte für die Testbilder befinden sich im Anhang

Die zweidimensionale Darstellung des Farbraums wird wie folgt berechnet (DIN 5033 Teil 2, 1992):

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \tag{3.3}$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} \tag{3.4}$$

In der Mitte der Abbildung 3.1 gibt es eine unbunte Kurve auf der die Farbtemperatur abgebildet wird. Die Farbtemperatur bezieht sich auf den weißen Eindruck des Displays. Dieser ist mit dem D65 Punkt auf 6500 Kelvin genormt und entspricht dem Weiß des mittleren Tageslichts aus Richtung Norden kommend. Wie in Abbildung 3.1 zu sehen, wird bei steigender Farbtemperatur das Weiß bläulicher bzw. kälter und bei fallender Farbtemperatur das Weiß roter bzw. wärmer. Wenn sich die Farbtemperatur der Umgebung zu der des Displays stark unterscheidet, kommt es zu einem Farbstich, da das Auge sich auf das Weiß der Umgebung einstellt.

Die Farbtemperatur wird in Kelvin angegeben und mit der Gleichung von McCamy wie folgt berechnet (DIN 9241 Teil 305, 2009, S. 118):

$$T_{CCT} = 437n^3 + 3061n^2 + 6861n + 5517 \tag{3.5}$$

Dabei wird der Wert n aus den Farbkoordinaten xy bestimmt:

$$n = \frac{x - 0.3320}{0.1858 - y} \tag{3.6}$$

Aus technischen Gründen kann bis jetzt noch kein Anzeigesystem den kompletten Farbraum des menschlichen Auges darstellen. Daher ist es wichtig einen definierten Farbraum abzustecken, welcher die Mindestanforderung für das jeweilige Display darstellt. Für das Internet bzw. der Computerdarstellung hat sich der sRGB-Farbraum etabliert. Dieser ist als weißes Dreieck in Abbildung 3.1 markiert.

3.1.4 Gleichmäßigkeit (Uniformity)

Diese Eigenschaft beschreibt die gleichmäßige Verteilung der Leuchtdichte auf dem Display. Langsame Veränderungen können vom Auge nicht wahrgenommen werden. Für die richtige Beurteilung von Farben und Helligkeit an verschiedenen Stellen im Display ist diese Eigenschaft daher sehr wichtig. Laut DIN 9241 Teil 305 (2009, S. 92) wird sie wie folgt berechnet:

$$Uniformity = 100\% * \left(\frac{L_{min}}{L_{max}}\right)$$
(3.7)

L_{min}... kleinste Leuchtdichte aller Messpunkte

Lmax... größte Leuchtdichte aller Messpunkte

In der Literatur wird oftmals auch die Ungleichmäßigkeit angegeben. Diese wird wie folgt aus der Gleichmäßigkeit berechnet:

$$Non - Uniformity = 100\% - Uniformity$$
(3.8)

Dabei wird die Leuchtdichte L an folgenden neun bzw. fünf Messpunkten auf einem weißen Testbild gemessen:



Abbildung 3.2 Messpunkte für die Gleichmäßigkeit (DIN 9241 Teil 305, 2009)

Die OLED-Hintergrundbeleuchtung zeigt in bestimmten Bereichen Degradierungen. Das sind helle oder dunkle Punkte (engl. bright or dark spots) bzw. Kurzschlüsse in den OLED-Leuchtstreifen. Deswegen werden diese bei der Charakterisierung der Gleichmäßigkeit mit angegeben.

Zusätzlich wird untersucht, ob die Farbkoordinate des Weißes über der Displayfläche sich verändert. Dazu werden die Messpunkte aus Abbildung 3.2 verwendet. Die Farbabweichung berechnet sich wie folgt und ist einheitenlos (DIN 9241 Teil 305, 2009):

$$\Delta u'v' = \sqrt{(u_1' - u_2')^2 + (v_1' - v_2')^2}$$
(3.9)

Wobei $u'_1 - u'_2$ und $v'_1 - v'_2$ die größtmögliche Differenz in u- und v- Richtung darstellt. Diese ist mit x- und y- Richtung vergleichbar. Allerdings werden in den Formeln (3.3) und (3.4) die Faktoren für XYZ anders gewichtet.

3.1.5 Blickwinkelabhängigkeit

Diese Eigenschaft charakterisiert die Leuchtdichten- und Farbveränderung beim Neigen des Displays. Dabei werden bei einem weißen Testbild mittig die Leuchtdichte und die Farbkoordinate gemessen. Der Neigungswinkel des Messgerätes wird in horizontaler und vertikaler Richtung verändert. Berichtet werden die Differenz der beiden Neigungswinkel, bei denen die Leuchtdichte auf 50% der maximalen Leuchtdichte fällt und wo Δ u'v' den Wert 0,01 überschreitet (VESA Display Metrology Committee, 2001, S. 127). Bei aktuellen Displays beträgt der Betrachtungswinkel 178° (EIZO Nanao Corporation, 2010). Für das 3D-Display als Komplettsystem hat die Blickwinkelabhängigkeit keine Relevanz, da sich die Helligkeit im Betrachtungsgebiet für das jeweilige Auge bei der Ausbildung der Viewing-Zone sich verändert.

3.2 Optische 3D-Eigenschaften

Dieses Kapitel beschreibt wichtige 3D-Eigenschaften für autostereoskopische 3D-Displays. Mit diesen ist es möglich, Aussagen über die Qualität der 3D-Wiedergabe zu machen. Die Eigenschaften als Übersicht:

Name	Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
3D-Übersprechen	X _{3D}	%	Abbildung des falschen Teilbilds im jeweiligen
			Auge
3D-Leuchtdichte	Y_{3DW}	cd/m ²	Helligkeitswahrnehmung an der optimalen
			Betrachtungsposition
3D-Kontrast	CR _{3D}	:1	Verhältnis zwischen dunkelster und hellster
			Wahrnehmung an der optimalen Betrach-
			tungsposition
Kanalunterschied	ΔY_{C3D}	%	Abweichung der Leuchtdichte zwischen bei-
			den Teilbildern
Betrachtungsabstand	OVD	cm	optimaler Betrachtungsabstand
Betrachtungswinkel	OVA	0	optimaler Betrachtungswinkel
3D-Gleichmäßigkeit	ΔY_{3D}	%	Homogenität der Leuchtdichte in der
			Viewing-Zone
3D-Bewegungsfreiheit	W _{3D}	cm	Bereich in dem bei konstanter 3D-
			Wiedergabequalität Kopfbewegungen möglich
			sind.
3D-Betrachtungsbereich	Grafische Wie-	-	Grafische Darstellung des 3D-Eindruckes
	dergabe		

Tabelle 3.4 Übersicht optischer 3D-Eigenschaften

Hierbei sind die Formelzeichen den englischen Bezeichnungen der jeweiligen Quellen angelehnt. Ein Teil der 3D-Eigenschaften lassen sich von der Leuchtdichtemessung für das linke und rechte Teilbild ableiten:



Abbildung 3.3 Grafische Übersicht der 3D-Eigenschaften

3.2.1 3D-Übersprechen (3D-Crosstalk)

Das 3D-Übersprechen (engl. 3D-Crosstalk) ist die wichtigste Eigenschaft für ein autostereoskopisches 3D-Display. Es gibt an, wie stark das eine Auge Lichtinformationen bekommt, die nur für das andere Auge bestimmt sind. Zu hohes 3D-Übersprechen erzeugt Geisterbilder und vermindert den 3D-Eindruck. Wie klein der Wert sein muss, hängt stark vom Motiv ab. Für die naturgetreue 3D-Wiedergabe wird ein Wert von $\leq 2\%$ angegeben (Seuntiens, Meesters, & Ijsselsteijn, 2005). Der 3D-Crosstalk für das jeweilige Auge wird in Abhängigkeit vom Betrachtungswinkel θ nach Järvenpää & Salmimaa (2008, S. 829) wie folgt berechnet:

$$X_{3D1}(\theta) = \frac{Y_{3D2}(\theta) - Y_{3DK}(\theta)}{Y_{3D1}(\theta) - Y_{3DK}(\theta)}$$
(3.10)

X_{3D1} ... 3D-Crosstalk für Betrachtungsgebiet 1

Y_{3D1}... Leuchtdichte des ersten Teilbildes

Y_{3D2}... Leuchtdichte des zweiten Teilbildes

Y_{3DK}... Leuchtdichte der schwarzen Wiedergabe

 θ ... Betrachtungswinkel


Die grafische Darstellung sieht wie folgt aus:

Abbildung 3.4 Beispiel für 3D-Übersprechen

In Abbildung 3.4 bilden sich für das linke (Blau) und das rechte (Rot) Auge die Betrachtungsgebiete aus. Der anzugebende Zahlenwert des 3D-Crosstalks ist der Mittelwert der Minima vom linken und rechten Auge, d.h. bei den Betrachtungswinkeln θ_1 und θ_2 . Er wird in Prozent angegeben.

3.2.2 3D-Leuchtdichte und 3D-Kontrast

Analog zur 2D-Leuchtdichte ist es wichtig eine Aussage zum Kontrast und zur Leuchtdichte der 3D-Wiedergabe zu machen. Beide Eigenschaften definieren, wie gut ein 3D-Bild in heller oder dunkler Umgebungsbeleuchtung zu sehen ist. Anders als beim 2D-Display erfolgt die Angabe dieser Werte für die Winkel, wo der 3D-Crosstalk für das jeweilige Auge den kleinsten Wert hat. Da diese unterschiedlich sind, wird von den Messwerten der beiden Augen ein Mittelwert gebildet. Järvenpää & Salmimaa (2008, S. 830) definieren die Formeln für die 3D-Leuchtdichte Y_{3DW} und den 3D-Kontrast CR_{3D} so:

$$Y_{3DW} = \frac{1}{\# of \ v \ iews} \sum_{i=1}^{\# of \ views} Y_{3DW}(\theta_i)$$
(3.11)

$$CR_{3D} = \frac{1}{\# \ of \ views} \sum_{i=1}^{\# \ of \ views} \frac{Y_{3DW}(\theta_i)}{Y_{3DK}(\theta_i)}$$
(3.12)

i ... Nummer des aktuellen Teilbilds

Y_{3DW} ... Leuchtdichte vom Weiß

Y_{3DK}... Leuchtdichte vom Schwarz

 θ_{i} ... Betrachtungswinkel mit kleinstem 3D-Crosstalk fürs jeweilige Teilbild

Dabei spielen die Anzahl der Viewing-Zones und die Leuchtdichte von einem weißen und schwarzen Testbild eine Rolle. Der 3D-Kontrast wird als Verhältnis zu Eins angegeben und ist einheitenlos. Die 3D-Leuchtdichte wird in cd/m² angegeben.

3.2.3 Kanalunterschied (3D- Channel Mismatch)

Dieser Wert gibt prozentual an, wie stark die Helligkeit im linken Auge sich von der im rechten Auge unterscheidet. Ein zu großer Unterschied wird vom Menschen als Fehler und störend wahrgenommen. Deswegen sollte der Kanalunterschied ΔY_{C3D} 0% betragen. Dieser wird wie folgt berechnet (Järvenpää & Salmimaa, 2008, S. 269):

$$\Delta Y_{C3D} = \frac{|Y_{3Da}(\theta_i) - Y_{3Db}(\theta_j)|}{\max[Y_{3Da}(\theta_i), Y_{3Db}(\theta_j)]}$$
(3.13)

 $Y_{3Da}(\theta_i)$... Leuchtdichte des linken Teilbildes für den optimalen Winkel $Y_{3Db}(\theta_j)$... Leuchtdichte des rechten Teilbildes für den optimalen Winkel

3.2.4 Optimaler Betrachtungsabstand (OVD) und Betrachtungswinkel (OVA)

Mithilfe der beim minimalen 3D-Crosstalk für beide Augen ermittelten Winkel, lässt sich unter Berücksichtigung des Augenabstands (IPD), der optimale Betrachtungsabstand (OVD) und die optimale Neigung (OVA) zum Display berechnen. Der gesamte Zusammenhang wird in folgender Abbildung deutlich:



Ríght

θ₂-θ

IPD/2

Left eye

Mithilfe der trigonometrischen Funktion lässt sich der Betrachtungsabstand wie folgt berechnen:

$$OVD = \frac{IPD}{2 * \tan\left(\frac{\theta_2 - \theta_1}{2}\right)}$$
(3.14)

Er wird in cm angegeben. Der optimale Betrachtungswinkel in Grad ist folglich:

$$OVA = \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \tag{3.15}$$

3.2.5 3D-Bewegungsfreiheit (3D Viewing Freedom)

Die 3D-Bewegungsfreiheit gibt an, wie weit der Betrachter sich nach links oder rechts bewegen kann ohne den 3D-Eindruck zu verlieren. Die Eigenschaften der Viewing-Zones und der Augenabstand beeinflussen die 3D-Bewegungsfreiheit:



Abbildung 3.6 Schema der 3D-Bewegungsfreiheit (Holliman, 2005)

Nach der statistischen Erhebung von der Ansur Datenbank (Dodgson, 2004) ist der mittlere Augenabstand 65 mm bei Männern und 62 mm bei Frauen. Das Minima und Maxima liegt bei 50 mm und 75 mm. Somit ist die individuelle 3D-Bwegungsfreiheit unterschiedlich und sollte mindestens 25 mm betragen.

Messtechnisch wird nach Järvenpää & Salmimaa (2008) die 3D-Bewegungsfreiheit über den 3D-Crosstalk ermittelt. Dabei wird vom optimalen Betrachtungswinkel aus (vgl. Abbildung 3.4), das Erreichen des zu erwartenden maximalen 3D-Crosstalk nach links und rechts gesucht. Für die Charakterisierung wird die kleinste, mögliche 3D-Bewegungsfreiheit in Zentimeter angegeben.

3.2.6 3D-Gleichmäßigkeit (3D-Uniformity)

Diese gibt prozentual an, wie stark die Helligkeit in dem Bereich der 3D-Bewegungsfreiheit schwankt. Analog zu 2D-Gleichmäßigkeit wird auch bei dieser Eigenschaft häufig die 3D-Ungleichmäßigkeit angegeben. Nach Järvenpää & Salmimaa (2008) wird die 3D-Ungleichmäßigkeit ΔY_{3D} wie folgt berechnet:

$$\Delta Y_{3D} = \frac{\max[Y_{3D}(\theta_i)] - \min[Y_{3D}(\theta_i)]}{\max[Y_{3D}(\theta_i)]}$$
(3.16)

 $Y_{3D}(\theta_i)$... Leuchtdichte im Bereich der 3D-Bewegungsfreiheit

3.2.7 3D-Betrachtungsbereich (Interocular 3D-Purity)

Anders als bei den 3D-Betrachtungsgebieten (engl. Viewing-Zone), gibt der 3D-Betrachtungsbereich den 3D-Eindruck des Betrachters an einer Position vor dem Display wieder. Es wird eine qualitative 3D-Bewertung grafisch dargestellt. Dieses verdeutlichen folgende Abbildungen (Horikoshi, et al., 2010):



Abbildung 3.7 Beispiele für den 3D-Betrachtungsbereich (Horikoshi, et al., 2010)

Die Abbildung 3.7 ist eine Draufsicht auf das Gebiet vor dem links, platzierten Display. Wenn der Betrachter sich mit der Nasenspitze in den roten Bereich aufhält, nimmt er einen 3D-Eindruck wahr. Die Skala ist bei einem idealen Display ohne 3D-Crosstalk von -1 bis 1 definiert. Je dunkler die rote Farbe ist und je näher der Wert sich der 1 nähert desto besser der 3D-Eindruck. In dem grünen Bereich gibt es keinen 3D-Eindruck.

Die blauen Stellen werden pseudoskopische Bereiche genannt. In diesem Bereich sind die Bildinformationen für das linke und rechte Auge vertauscht. Weil die monookulare Wahrnehmung, das heißt der 3D-Eindruck durch Verdeckung und Perspektive, gegenüber der interokularen Wahrnehmung (z.B. Querdisparität) höher gewichtet ist, existiert in diesem Bereich kein stereoskopischer 3D-Eindruck.

Die Messungen und Berechnungen des 3D-Betrachtungsbereichs sind nicht trivial. Dazu wird im Bereich vor dem Display gerastert die Leuchtdichte für das linke und rechte Auge gemessen und anschließend mit Hilfe von linearer Interpolation die grafische Ansicht nach folgender Formel berechnet (Horikoshi, et al., 2010, S. 331):

Interocular 3DPurtiy
$$\left(i + \frac{e}{2}, j\right) = \frac{1}{M} \sum_{M} \sqrt{\left(\frac{I_k^M(i,j)_{left}}{\sum_{n=1}^N I_n^M(i,j)}\right) * \left(\frac{I_l^M(i+e,j)_{right}}{\sum_{n=1}^N I_n^M(i+e,j)}\right)}$$
(3.17)

Dabei ist e der Augenabstand IPD und M der Messrichtungsindex. Es wird die jeweils aktuelle Leuchtdichte I_k bzw. I₁zu allen anderen Leuchtdichten der einzelnen Viewing-Zones an dem jeweiligen Punkt ins Verhältnis gesetzt. Für das Two-View Display wird die Formel vereinfacht:

$$Interocular \ 3DPurtiy\left(i + \frac{e}{2}, j\right) = \sqrt{\left(\frac{I_1(i,j)_{left}}{I_{Ges}(i,j)}\right) * \left(\frac{I_2(i+e,j)_{right}}{I_{Ges}(i+e,j)}\right)} - \sqrt{\left(\frac{I_2(i,j)_{left}}{I_{Ges}(i,j)}\right) * \left(\frac{I_1(i+e,j)_{right}}{I_{Ges}(i+e,j)}\right)}$$
(3.18)

I1... Leuchtdichte Teilbild 1left... Position linkes AugeI2... Leuchtdichte Teilbild 2right... Position rechtes AugeIGes... Gesamtleuchtdichte an der entsprechenden Position

3.3 Zeitliche Eigenschaften

Die wichtigsten zeitlichen Eigenschaften sind die Bildaufbauzeit und das Flimmern. Sie werden durch die Messung der Leuchtdichte der kompletten Displayfläche in kurz aufgelösten Zeitintervallen ermittelt. Als Prüfmuster werden ein vollflächiges Weiß und vollflächiges Schwarz genutzt.

3.3.1 Bildaufbauzeit (Response Time)

Die Bildaufbauzeit (engl. Response Time) gibt an, wie schnell die Gesamtschaltzeit aller Pixel vom LC-Modul ist. Diese Zeit ist für Videowiedergabe und Spiele wichtig. Je kleiner der Wert, desto schärfer werden die Bewegungen auf dem Display dargestellt. Es gibt zwei verschiedene Methoden: Im Konsumerbereich wird oft der Grau-zu-Grau Wechsel angegeben. Werte aktueller 24" Displays liegen bei 6 ms (EIZO Nanao Corporation, 2010).

Laut DIN 9241 Teil 305 (2009, S. 67) berechnet sich der Grau-zu-Grau Wert mithilfe der Umschaltdauer von verschieden Grautafeln zueinander. Die zeitlichen Unterschiede werden in einer Matrix angegeben:



Abbildung 3.8 Grau-zu-Grau Matrix (DIN 9241 Teil 305, 2009)

In Abbildung 3.8 ist abzulesen, dass der Wechsel des Grauwerts von 127 auf 0 länger dauert als der Wechsel von 0 auf 255. Durch die Mittelwertbildung fällt die zu berichtende Bildaufbauzeit kleiner aus, als bei der Messung von einem Schwarz-Weiß Wechsel. Dieser wird bei professionellen Anwendungen angegeben und beträgt bei aktuellen Displays 16 ms (EIZO Nanao Corporation, 2010). Das Messverfahren veranschaulicht folgende Abbildung:



Abbildung 3.9 Messung der Reaktionszeiten (DIN 9241 Teil 305, 2009)

Deutlich ist zu erkennen, dass die Zeiten für Bild an und Bild aus jeweils nur zwischen 10% und 90% der maximalen Helligkeit gemessen werden. Daraus berechnet sich die Bildaufbauzeit T_f wie folgt (DIN 9241 Teil 305, 2009, S. 64):

$$T_f = T_{on} + T_{off} \tag{3.19}$$

3.3.2 Flimmermessung

Gewöhnliche LC-Module kommen durch den doppelten Bildaufbau für das linke und rechte Auge zeitlich an ihre Grenzen. Die resultierende kurze Anschaltzeit der Pixel verursacht einen optischen Flimmereindruck. Dies wird von Betrachtern als störend empfunden. Mittels Fast Fourier Transformation oder einem Frequenzanalyzer werden verschiedene Flimmerfrequenzen und deren Stärke sichtbar gemacht.

Das Auge nimmt höhere Flimmerfrequenzen schlechter wahr. Deswegen gibt es folgende Gewichtung der Frequenzen:

Frequenz f [Hz]	Gewichtung [dB]	Gewichtung als Faktor	
20	0	1	
30	-3	0,708	
40	-6	0,501	
50	-12	0,251	
≥60	-40	0,010	

Tabelle 3.5 Wichtungsfaktoren für das Flimmern (DIN 9241 Teil 305, 2009, S. 69)

Diese Werte sind linear zu interpolieren. Es werden Flimmerfrequenzen bis maximal 150Hz und einem Pegel größer -60dB angegeben. Frequenzen außerhalb davon, werden vom Menschen nicht wahrgenommen.

3.4 Elektrische Eigenschaften

3.4.1 Leistungsaufnahme

In den Zeiten von verstärktem Energiebewusstsein, ist die Angabe der Leistungsaufnahme P notwendig. Diese wird durch die Strom- und Spannungsmessung vom Display ermittelt und in Watt angegeben. Im Weiteren dient die Messung zur Überwachung der elektrischen Randbedingungen aus Kapitel 3.5.

3.4.2 Effizienz von Leuchtdichte zur Leistung

Mit der gewonnenen Leistungsaufnahme P und der ermittelten Leuchtdichte für Weiß L_w wird nach FPDM2 (VESA Display Metrology Committee, 2001, S. 162) die Effizienz des Displays berechnet:

$$\epsilon = \frac{L_w}{P} \tag{3.20}$$

Die Einheit von ϵ ist cd/(m²W)und beschreibt das Verhältnis von gewonnener Leuchtdichte zur notwendigen Leistungsaufnahme. Aktuelle 24" LC-Displays haben eine Effizienz von 3,79 cd/(m²W) (EIZO Nanao Corporation, 2010).

3.5 Randbedingungen

Für die Messungen sind konstante Umgebungsbedingungen notwendig. Folgende werden für die Charakterisierung von (VESA Display Metrology Committee, 2001) vorgegeben:

- Konstante Stromversorgung mit einstellbarer Spannung und einem Anzeigefehler von maximal 1 Prozent
- Konstante klimatische Verhältnisse mit
 - \circ Temperatur von 20 °C ±5 °C
 - o Relative Luftfeuchtigkeit von 25% 85%; nicht kondensierend
 - o Luftdruck von 860 hPa bis 1060 hPa
- Angemessene Aufwärmzeit für das Display von ca. 20min
- Einstellungen im Displaymenü während der Messung nicht verändern.
- Dunkle Messumgebung ohne Reflexionen auf dem Display. Dabei wird eine Beleuchtung von ≤ 1 Lux empfohlen. Das entspricht einer Leuchtdichte von 0,32cd/m² auf einer weißen Fläche. Generell sollte die gemessen Leuchtdichte im Raum mindestens 1/10 des kleinsten Messwertes vom Display betragen.
- Der Standardmesswinkel beträgt 90°±0,3°. Für Winkelmessungen soll der Drehpunkt auf dem LC-Layer liegen.
- Die Standardmessposition ist mittig im Schnittpunkt beider Displaydiagonalen mit einer Abweichung von maximal 3 Prozent.
- Der Öffnungswinkel des Messgerätes beträgt maximal 2° und schließt mindestens 500 Pixel ein.
- Angemessene Messzeit nutzen um Messfehler durch zeitliche Helligkeitsunterschiede wie z.B. Flimmern zu minimieren

Die Randbedingungen für die klimatischen Verhältnisse werden in einem klimatisierten Labor erreicht.

3.6 Schlussfolgerung für die Charakterisierung

Dieses Kapitel zeigt die relevanten Eigenschaften für die Charakterisierung des autostereoskopischen 3D-Displays. Die Umsetzung dieses minimalen Parametersatzes in einem neu entwickelten 3D-Charakterisierungsmessplatz ist nicht in dem zeitlichen Rahmen dieser Bachelor-Thesis realisierbar. Zur Vereinfachung wird festgelegt, dass die optischen 2D-Eigenschaften mit dem vorhandenen OLED-Charakterisierungsmessplatz Autronic-Melcher DMS 401 gemessen und die Timing-Eigenschaften mit einem Fototransistor und einem Oszilloskop ausgewertet werden. Nur für die optischen 3D-Eigenschaften wird ein neuer 3D-Charakterisierungsmessplatz entworfen. Die notwendigen Anforderungen werden im folgenden Kapitel 4 beschrieben.

4 Anforderungen für einen 3D-Charakterisierungsmessplatz

Dieses Kapitel beschreibt die Anforderungen an einen 3D-Charakterisierungsmessplatz für flache autostereoskopische Two-View Displays.

Der 3D-Charakterisierungsmessplatz soll alle optischen 3D-Eigenschaften aus Kapitel 3.2 berechnen bzw. grafisch darstellen können. Dafür ist es notwendig die Leuchtdichte von unterschiedlichen Testbildern an verschiedenen Positionen im Raum zu messen. Folgendes Koordinatensystem wird verwendet:



Abbildung 4.1 Draufsicht auf das Koordinatensystem eines 3D-Messplatzes

Allgemeine Voraussetzung ist, dass die Randbedingungen aus Kapitel 3.5 erfüllt werden.

4.1 Mechanische Anforderungen

Der Messkopf wird für die Nullpunktmessung orthogonal, mittig vor dem Display positioniert. In Anlehnung an die Randbedingungen aus Kapitel 3.5 entspricht dies einem Standardmesswinkel von 90°±0,3° und einem Schnittpunkt der Displaydiagonalen mit ±3% für die Standardposition in X- und Y-Richtung. Der Standardmesswinkel von 90° entspricht dem Betrachtungswinkel von 0° aus Abbildung 4.1. Da die Viewing-Zones sich in horizontaler Richtung ausbilden, ist eine variable Veränderung des Messkopfs in der Y-Richtung und die Neigung des Displays in vertikaler Richtung ist nicht erforderlich.

Die Veränderung der Position auf der X- und Z- Achse ist für die 3D-Charakterisierung notwendig. Aus dem Lastenheft (Scholles, 2008) ist zu entnehmen, dass es maximal sechs Betrachtungsbereiche bei einem Betrachtungsabstand von 50 cm geben soll. Bei einer einzelnen Breite von 6 cm und genauso vielen pseudoskopischen Bereichen dazwischen, ist ein minimaler Messweg von \pm 36 cm in X- Richtung notwendig. Für die Messwerterfassung in Z-Richtung ist ein Bereich von 0 cm bis 200 cm erforderlich (Horikoshi, et al., 2010). Die automatisierte Positionierung in der Z- und X-Achse soll eine Auflösung von 1 mm mit einer Ungenauigkeit von maximal $\pm 0,2$ mm betragen. Die Anforderungen an die Auflösung des Betrachtungswinkels θ ist $\leq 1,5'$. Die Einstellmöglichkeit soll mindestens $\pm 48^{\circ}$ betragen (Scholles, 2008).

Um die konstante und verdunkelte Umgebungsbeleuchtung von kleiner ein Lux zu gewährleisten (Randbedingungen aus Kapitel 3.5), ist eine Blackbox um den Messaufbau notwendig. Damit die reflektierenden Lichtstrahlen die Messwerte nicht beeinflussen, sollte die Leuchtdichte von der Wand nicht größer als die Messunsicherheit des Messgerätes sein. Dementsprechend sind der Abstand vom Display zur Wand und der Reflexionsgrad des Wandmaterials zu wählen.

Weiterhin ist es notwendig, eine geeignete Einspannvorrichtung für 3D-Displays zu entwerfen. Diese soll das Display während der Messungen an der definierten Position halten und leicht justier bar sein. Außerdem ist eine flexible Anpassung an unterschiedliche Displaytypen bzw. Displaygrößen notwendig. Die Einspannvorrichtung soll optisch nicht die Messung beeinflussen.

4.2 Anforderungen an die Messwerterfassung

Für die Messung von optischen 3D-Eigenschaften sind die aktuellen 2D-Messgeräte nur bedingt nutzbar. Ein fester Fokussierabstand der Messoptik ist der Grund dafür. Der zu entwerfende Messplatz benötigt einen Messkopf, der flexibel an verschiedenen Stellen im Betrachtungsraum positioniert wird und eine große Schärfentiefe besitzt. Der Öffnungswinkel des Messkopfes soll mit 2° dem Normbetrachter entsprechen. Um die Leuchtdichtemessung durchzuführen, werden fernsteuerbare Messgeräte mit einer Empfindlichkeit für das Lichtspektrum (380 nm ... 780 nm) eingesetzt.

Die einfachste Variante nach Järvenpää & Salmimaa (2008, S. 827) ist ein Fotometer, welches auf einer definierte Displayfläche mittels Fotodiode oder Fotowiderstand die Leuchtdichte misst. Eine professionellere Variante ist ein Spektroradiometer. Der Detektor besteht aus einem CCD-Array, auf dem das sichtbare Lichtspektrum aufgefächert nach der Wellenlänge projiziert wird. Eine weitere Möglichkeit bieten gonioskopische Lichtmessgeräte. Diese können ohne den Messkopf zu bewegen einen großen Betrachtungswinkel (z.B. $\pm 80^{\circ}$) messen. Mit einem CCD-Array wird in Echtzeit die Leuchtdichteverteilung eines Displays in einem polaren Diagramm wiedergeben.

In Anlehnung an aktuelle 2D-Displays (EIZO Nanao Corporation, 2010) ist ein Messbereich der Leuchtdichte von mindestens 0,1 bis 500 cd/m² notwendig. Die Messunsicherheit wird mit \pm 3% an andere Leuchtdichtenmessgeräte angelehnt (AUTRONIC-MELCHERS GmbH, 2009).

Für die messtechnische Erfassung der entsprechenden Fläche sind ca. 4000 Messwerte an verschiedenen Positionen vor dem Display notwendig. Dies ist bedingt durch die Leuchtdichtemessung von vier verschiedenen Testbildern⁴ an einer Position. So wird das Weiß vom linken und rechten Teilbild sowie Weiß und Schwarz von beiden Teilbildern vollflächig gemessen:



Abbildung 4.2 Testbildreihenfolge

Mit der Testbildreihenfolge aus Abbildung 4.2 sind alle 3D-Eigenschaften aus Kapitel 3.2 bestimmbar. Der Messplatz soll automatisch die Testbilder weiterschalten. Die Positionierung des Messkopfes und die Messwertaufnahme müssen schnell und automatisiert durchführbar sein. Ziel ist es, die Charakterisierung eines 3D-Displays innerhalb einer Stunde zu realisieren. Dafür ist die Messung eines Wertes in durchschnittlich 0,9 Sekunden notwendig.

4.3 Anforderungen an die Software

Um die Leuchtdichte automatisiert zu erfassen und die 3D-Eigenschaften auszuwerten sind umfangreiche Anforderungen an die Software erforderlich. Diese bestehen aus folgenden Teilen:

- Gerätekommunikation mit erweiterter Fehlerbehandlung
- Messung und Berechnung
- Bedienung und Ausgabe der Daten
- Speichern und Laden von Daten

4.3.1 Gerätekommunikation mit erweiterter Fehlerbehandlung

Die Software benötigt eine zuverlässige Kommunikation mit den externen Komponenten wie Leuchtdichtemessgerät oder Positionierungssystem. Die Software muss in der Lage sein Störungen zu erkennen und geeignete Maßnahmen einzuleiten. Eine erweiterte Fehlerbehandlung mit ausführlicher Benachrichtigung des Nutzers ist notwendig.

4.3.2 Messung und Berechnung

Die Messungen sind mit geringem Zeitaufwand durchzuführen. Für die Berechnungen der 3D-Eigenschaften sollen Gleitkommazahlen mit mindestens einfacher Genauigkeit verwendet werden. Für die grafische Darstellung ist eine Interpolation der Messwerte auf die Auflösung vom Display notwendig.

⁴ Eine Auflistung der verwendeten Testbilder befindet sich im Anhang

4.3.3 Bedienung und Ausgabe der Daten

Der Nutzer navigiert mittels Menüstruktur durch die Software. Dabei hat er die Möglichkeit, Parameter für die Messung flexibel einzustellen. Für die internationale Nutzung und Auswertung ist die Anwendungssprache Englisch. Während der Messung sind eine Restzeitanzeige und eine Abbruchmöglichkeit notwendig. Alle ermittelten 3D-Eigenschaften sollen übersichtlich im Hauptfenster dargestellt werden.

4.3.4 Speichern und Laden von Daten

Die gewonnenen Ergebnisse werden als XML-Datei abgespeichert. Somit wird eine Importmöglichkeit für andere Auswertungsprogramme wie Excel ermöglicht. Um die 3D-Eigenschaften in der Software vergleichen zu können, sollen diese aus einer XML-Datei aufrufbar sein.

4.4 Anforderungsprofil

Die Anforderungen an den 3D-Charakterisierungsmessplatz sind in folgender Tabelle zusammengefasst:

Anforderung	Wert	Einheit	
Mechanik			
Automatisierter Positionie-	X-Achse mindestens ± 36	cm	
rungsbereich Messkopf	Y-Achse = 0		
	Z-Achse mindestens 0 200		
Auflösung Positionierung	$1 \pm 0,2$ alle Achsen	mm	
Betrachtungswinkel	θ mindestens ± 48°		
Auflösung Betrachtungswinkel	$\Delta \theta \le 1,5'$		
	Optik		
Messbereich Leuchtdichte	L = 0,1 500	cd/m ²	
Messunsicherheit	±3%		
Lichtspektrum	$\lambda = 380 \dots 780$	nm	
Öffnungswinkel	2°		
	Umgebung		
Beleuchtungsstärke	E < 1	Lux	
Temperatur	20° ±5°	С	
Relative Luftfeuchtigkeit	25% 85%		
Luftdruck	860 1060	hPa	
Anzeigefehler Stromversorgung	< 1%		
Software			
Gerätekommunikation m	it erweiterter Fehlerbehandlung		
• Eine Messwerterfassung soll in durchschnittlich 0,9 s automatisiert durchführbar sein			
Gleitkommaberechnungen mit einfacher Genauigkeit			
Interpolation der grafischen Darstellungen			
Einfache Bedienung mittels Menüstruktur			
Restzeitanzeige mit Abbruchmöglichkeit			
Speichern und Laden der 3D-Eigenschaften mit XML-Dateien			

Tabelle 4.1 Anforderungsprofil des 3D-Charakterisierungsmessplatzes

5 Entwicklung des 3D-Charakterisierungsmessplatzes

In diesem Kapitel wird die Entwicklung, Programmierung und Konstruktion des 3D-Charakterisierungsmessplatzes beschrieben. Dieser wird speziell für den Fraunhofer IPMS Demonstrator entworfen, kann jedoch für andere autostereoskopische Displays modifiziert werden. Aus Budgetgründen werden vorhandene Geräte und Konstruktionsteile aus dem Institut verwendet.

5.1 Konstruktion des 3D-Charakterisierungsmessplatzes

Die automatische Positionierung des Messkopfes über einer Fläche von ca. 5000cm² ist technisch sehr aufwendig. Deswegen wird die geforderte X-Verschiebung durch die Drehung des Displays realisiert. Dies ist möglich, da vorausgesetzt wird, dass der Betrachter nicht planparallel auf das Display schaut, sondern ebenso mit dem Betrachtungswinkel den Kopf zum Display dreht (vgl. Abbildung 3.5). Aus den polaren Messkoordinaten werden die kartesischen Koordinaten der Betrachtungsbereiche mittels Kosinus- und Sinussatz berechnet.

Der Messplatz besitzt eine vorgegebene Schiene, wo ein Reiter mit dem Messkopf auf der Z-Achse manuell positionierbar ist. Weiterhin wird ein motorisierter Drehtisch genutzt, der eine spezielle Halterung für das autostereoskopische Display besitzt. Als Grundplatte wird ein vorhandener Optiktisch verwendet. Der gesamte Aufbau befindet sich in einer Blackbox. Sie reduziert die Reflexionen des Displays an Wänden und verhindert, dass Licht von außen die Messung beeinflusst.



Der Entwurf für die Konstruktion sieht wie folgt aus:

Abbildung 5.1 Entwurf 3D-Messplatz (Draufsicht)

In der Abbildung 5.1 ist zu erkennen, dass in der Blackbox nur die notwendigsten Geräte, wie z.B. Messkopf und Drehtisch vorhanden sind. Alle anderen Komponenten wie PC, Netzteile und Messgeräte sind aus thermischen Gründen nach außen verlagert worden.

Die Blackbox besteht aus 2,5 Zoll dicken Vierkantschienen, die mittels 3-Wegecken zu einem Quader verschraubt sind. Die Gesamthöhe der Blackbox beträgt 500 mm. Um Messfehler durch Reflexionen zu vermeiden wird ein Wandabstand von mindestens 340 mm eingehalten. Die Wände bestehen aus mattschwarzen Karton mit einer Stärke von 1,6 mm⁵. Aus Gründen der Verfügbarkeit von Messkopfschiene und Optiktisch ist die Positionierung in Z-Richtung auf 500 mm begrenzt. Die Verschiebung wird mittels Schienenreiter mit Messkopfhalterung realisiert. Die Schiene besitzt eine Zentimeterskala mit einer Auflösung von 1 mm. Für die Positionierung ist der Wert rechts neben der Feststellschraube maßgeblich. Die Werte der Skala erhöhen sich von links nach rechts. Somit entspricht die Messkopfposition von 50 cm einem Displayabstand von 30 cm.

⁵ Die komplette Materialliste und vollständige Konstruktionszeichnungen befinden sich im Anhang

5.2 Konstruktion und Konfiguration des Drehtellers

Für den Drehteller ist eine spezielle Konstruktion mit einer Halterung für das Display und deren Ansteuerelektronik notwendig. Die Halterung sollte einfach und flexibel gestaltet und von der hausinternen Werkstatt anschließend gefertigt werden. Weiterhin ist eine mattschwarze Eloxierung vorgesehen um Reflexionen vom Display zu vermeiden. Als Material wurde gewichtsparendes Aluminium verwendet.

Der Entwurf des Drehtellers sieht wie folgt aus:



Abbildung 5.2 Konstruktion Drehteller (Draufsicht)

Die Abbildung 5.2 zeigt in der Mitte einen großflächigen Winkel, an den das Display gelehnt wird. Dieser steht orthogonal zum Drehteller und ist auf der Z-Achse justierbar. Durch die große Auflagefläche werden die Drehmomente beim Anfahren und Abbremsen schonend und gleichmäßig auf das Display verteilt. Zwei lange Winkel dienen zur Fixierung des Displays, welche ebenfalls in der Z-Achse verschiebbar sind. Diese Justierung ermöglicht die Displayoberfläche genau im Mittelpunkt des Drehtellers zu positionieren.

Weil die Verbindungskabel des LC-Moduls und des Backlights kurz sind, ist es notwendig die Ansteuerelektronik unmittelbar hinter dem Display mit zwei kleinen Winkeln zu montieren. Das Gewicht des Drehtellers beträgt 456 Gramm. Für die spätere Anwendung ist die mögliche Drehwinkelauflösung und Belastung des Drehtisches zu prüfen. Aus dem Datenblatt vom Drehtisch DMT65 ist folgendes zu entnehmen:

Beschreibung	Wert	Einheit
Rotationswinkel	Unbegrenzt	
Wiederholfehler (bidirektional)	< 0,02	0
Geschwindigkeit	max. 65	°/s
Untersetzung	180:1	
Drehmoment	max. 0,5	Nm
Tragkraft	100	Ν
Motorspannung	max. 50	V
Motor-Haltespannung	2	V
Motorstrom	max. 1,8	А
Schritte pro Motorumdrehung	200	

Tabelle 5.1 Eigenschaften des Drehtellers (Owis GmbH, 2009):

Die Tabelle 5.1 zeigt, dass der Drehtisch ein Getriebe mit einer Untersetzung von 180:1 besitzt. Der Schrittmotor kann seine Umdrehung in 200 Schritte auflösen. Folglich entsprechen $360^\circ = 200.180 = 36000$ Schritte. Es ergibt sich eine theoretische Winkelgenauigkeit von 0,01 Grad oder 36 Bogensekunden. Dies erfüllt die Anforderung aus Kapitel 4.

Für die Prüfung der auftretenden Kräfte, ist es notwendig das Trägheitsmoment des Drehtellers zu berechnen. Dieses entspricht dem maximal aufzubringenden Drehmoment des Drehtisches. Für die Berechnung sind die Gewichte der Komponenten und der Abstand zum Mittelpunkt relevant. Für das Trägheitsmoment reicht eine Abschätzung und somit ist die Berechnung vereinfacht durchgeführt. Der Drehteller wird mit der Formel eines flachen Zylinders nach (Meschede, 2010, S. 80) berechnet:

$$J_{Zylinder} = \frac{1}{2}m * r^2 \tag{5.1}$$

J... Trägheitsmoment m... Masse r... Radius

Die Aufbauten werden vereinfacht als Quader in die Berechnung einbezogen. Dieses Trägheitsmoment berechnet sich wie folgt:

$$J_{Quader} = \frac{1}{12}m * (a^2 + b^2)$$
(5.2)

m ... Masse a,b ... Kanten quer zur Drehachse

Da die Rotationsachse nicht im Mittelpunkt ist, muss der Steinersche Satz angewendet werden (Meschede, 2010, S. 80):

$$J = J_{Ouader} + m * l^2 \tag{5.3}$$

m ... Masse l ... Abstand zum Rotationsmittelpunkt

Folgende Trägheitsmomente wurden berechnet:

Komponente	Masse m [gr]	Radius/Abstand r [cm]	Trägheitsmoment J [mNm]
Drehteller ohne Aufbau	346	10	1,73
Display (100x3mm)	60	0,3	0,051
Großer Winkel	45	2	0,098
(Boden: 35x40mm)			
Großer Winkel	65	0,45	0,064
(Haltefläche: 100x3mm)			
Schaltung (120x15mm)	100	3	0,212

Tabelle 5.2 Trägheitsmomente des Drehtellers

Die kleinen Winkel aus Abbildung 5.2 wurde aufgrund des geringen Gewichts vernachlässigt. Folglich ergibt sich ein Trägheitsmoment J_{Gesamt} von 2,16 mNm. Wie aus Tabelle 5.1 zu entnehmen, liegt dieser Wert bei 0,5% des maximalen Drehmoments vom Drehtisch.

Das Gewicht wird nach dem zweiten newtonschen Gesetz mit folgender Formel in die Tragkraft F umgewandelt:

$$F = m * a \tag{5.4}$$

Somit entspricht der Aufbau des Drehtisches von 562 Gramm einer Tragkraft von 5,51N und liegt unter dem Maximalwert des Herstellers.

5.3 Betrachtungen zum optischen Messgerät

Für den 3D-Messplatz steht beim Fraunhofer IPMS das Optical-Power-Meter 1930 der Firma Newport zur Verfügung. An diesem ist der Niederleistung-Detektor 918SL der gleichen Firma angeschlossen. Diese Kombination ist für Messung der Bestrahlungsstärke von Lasern bei einer bestimmten Wellenlänge vorgesehen. Diese radiometrische Betrachtungsweise ist für die Charakterisierung von Displays unüblich. Daher ist es notwendig, die gewonnen Messwerte in äquivalente, fotometrische Größen wie Leuchtdichte umzuwandeln. Die Umwandlung geschieht mittels photometrischen Strahlungsäquivalent und folgender Formel (DIN 5031 Teil 3, 1982, S. 1):

$$L_{eq} = K_{m,eq} \int L_{e\lambda} * V_{eq}(\lambda) * d\lambda$$
(5.5)

Dabei ist $L_{e\lambda}$ die spektrale, gemessene Strahldichte. $V_{eq}(\lambda)$ ist der spektrale Hellempfindlichkeitsgrad für das Tagesehen des Menschen (DIN 5031 Teil 2, 1982, S. 2f). Dieser gibt die relative Empfindlichkeit des Auges bei verschiedenen Wellenlängen des Lichtes an. Der Maximalwert des photometrischen Strahlungsäquivalents wird mit $K_{m,eq}$ angegeben. Er "ergibt sich aus der Festlegung der Lichstärkeeinheit und dem spektralen Hellempfindlichkeitsgrad V(λ) für Tagsehen für die Wellenlänge von 555 nm" (DIN 5031 Teil 3, 1982, S. 2). Dieser beträgt bei einem 2° Sichtfeld 683 lm/W.

Wie in Formel (5.5) zu erkennen, wird die Strahldichte über die Wellenlängen des sichtbaren Bereiches integriert. Das Messgerät kann nur für eine definierte Wellenlänge die Bestrahlungsstärke in Watt/cm² wiedergeben. Folglich ist dieser Wert sehr ungenau und zusätzlich abhängig von der Entfernung. Die Strahlungsstärke eines Lichtstrahls nimmt quadratisch ab. Diese Abnahme muss für die Leuchtdichte berücksichtigt werden. Dazu wird die Entfernungsregel angewandt (Heinen, 2004):

$$I_{neu} = \left(\frac{r_{alt}}{r_{neu}}\right)^2 * I_{alt}$$
(5.6)

 $I_{neu} \dots \text{ berechnete Strahlstärke} \qquad I_{alt} \dots \text{ gemessene Strahlstärke} \\ r_{neu} \dots \text{ neuer Abstand zum Display} \qquad r_{alt} \dots \text{ alter Abstand zum Display}$

Der entstandene Messfehler, wird im Weiteren mittels Vergleichsmessungen am 2D-Messplatz kalibriert und verbessert. Für die restlichen 3D-Eigenschaften liegen relative Intensitätsberechnungen zu Grunde. Dafür ist das genutzte Messgerät verwendbar.

Für eine richtige Charakterisierung des 3D-Displays ist weiterhin eine Optik notwendig. Die Aufgabe der Optik ist es, die Strahlungsenergie zu bündeln und nur noch die Energie von einem definierten Raumwinkel auf der Sensorfläche zu messen. Aus der Bestrahlungsstärke wird die Strahldichte. Diese lässt sich nach Formel (5.5) in die Leuchtdichte umwandeln. Die einfachste Möglichkeit für die Projektion auf dem Messkopf ist die Verwendung einer Lochblende.

Durch den kleinen Durchmesser und der großen Entfernung des Displays zum Loch treffen nur noch die Lichtstrahlen aus einem kleinen Winkel auf den Sensor:



Abbildung 5.3 Strahlengang Lochblende in Anlehnung an Schmidt-Ploch (2001)

Ein kleiner Bereich des Displays wird scharf auf dem Sensor abgebildet. Zum Vorteil einer Lochblende gehören die hohe Schärfentiefe und die geringen Abbildungsfehler. Das ist bei der Verschiebung des Messkopfes auf der Z-Achse vorteilhaft. Der Nachteil dieser Methode besteht aus der kleinen Lochöffnung. Die empfangene Bestrahlungsstärke ist sehr schwach. Durch die kleinstmögliche Auflösung von 1 pW/cm² des Messgerätes wird die Nutzung der Lochblende demnach ermöglicht (Newport Corporation, 2009). Der Durchmesser D wird nach Schmidt-Ploch (2001, S. 22) mit folgender Formel berechnet:

$$d = \left(1 + \frac{b}{g}\right) * D \tag{5.7}$$

Der Punktabbildungsdurchmesser d ist gleich zusetzen mit der Bildbreite B. Diese entspricht dem Durchmesser des Sensorkopfes von 1,13 cm. Nach Schmidt-Ploch (2001, S. 69) wird die Bildbreite B mit dem Strahlensatz wie folgt berechnet:

$$B = \frac{G}{g} * b \tag{5.8}$$

Nach dem Einsetzen der Formel (5.7) in Formel (5.8) lässt der Durchmesser D wie folgt berechnen:

$$D = \frac{b * G}{b + g} \tag{5.9}$$

Bei diesem Messplatz wird von einem Normbetrachter mit φ =2° Gesichtsfeldwinkel ausgegangen.



Abbildung 5.4 Schema des 2° Gesichtsfeldwinkels

Nach der Abbildung 5.4 und der Tangensfunktion wird die Gegenstandgröße G wie folgt berechnet:

$$G = 2g * \tan\left(\frac{\phi}{2}\right) \tag{5.10}$$

Bei der optimalen Gegenstandsweite g von 50 cm und einem Gesichtsfeldwinkel φ von 2° ergibt einen Gegenstandsdurchmesser G von 1,75cm. Das entspricht 5015 eingeschlossenen Pixeln, welche wie folgt berechnet werden (VESA Display Metrology Committee, 2001):

$$N = \frac{\pi}{4}d^2 * \frac{N_H^2 + N_V^2}{D^2}$$
d ... Messfelddurchmesser N_H... Anzahl horizontaler Pixel
D ... Diagonale des aktiven Displays N_V ... Anzahl vertikaler Pixel
(5.11)

Unter der Verwendung des Gegenstandsdurchmessers und dem Abstand b von 3cm zum Sensor ergibt sich nach Formel (5.9) ein Durchmesser D von 0,99 mm für die Lochblende. Für den Messplatz wurde eine 1 mm Lochblende verwendet

Die effektive Lichtstärke, die durch die kleine Blendenöffnung auf die Sensorfläche auftrifft, wird wie folgt berechnet (Schmidt-Ploch, 2001, S. 69):

$$L_{eff} = \frac{D}{b} \tag{5.12}$$

Bei diesem 3D-Messplatz beträgt die effektive Lichtstärke $L_{eff} = 0,033$. Entsprechend treffen nur 3,3% des Lichtes vom Display auf den Sensor. Dieser Verlust der Lichtstärke muss bei der korrekten Berechnung der Leuchtdichte berücksichtigt werden.

5.4 Programmierung der Bediensoftware mittels LabVIEW

Die Programmierung der Software wurde mit LabVIEW der Firma National Instruments umgesetzt. Folgende Vorteile bietet dieses Programm gegenüber anderen Entwicklungsumgebungen:

- Unterstützung von vielen Messgeräten und motorisierten Positionierungssystemen mittels vorgefertigter Bibliotheken
- Umfangreiche grafische Auswertungsblöcke wie XY-Graphen und Diagramme
- Einfaches Lesen und Schreiben von Dateien
- Einfache Umwandlung und Speicherung von Daten
- Einfache Kommunikation mit den vorhanden PC-Schnittstellen

LabVIEW wird grafisch programmiert. Dabei werden Verbindungslinien zwischen Symbolen gezogen. Symbole können Variablen, Funktionen oder Unterprogramme sein. Bedingungen, Schleifen und Sequenzen werden mittels Rahmen realisiert. Dies ist in vielen Fällen schneller und übersichtlicher als textgebundene Programmiermethoden.

Das Programm kommuniziert über folgende Schnittstellen:



Abbildung 5.5 Schnittstellen und Verkabelung

Die optischen Messwerte werden über die USB Schnittstelle ausgelesen und die Motoren über eine spezielle Schrittmotorsteuerkarte mit der Bezeichnung SM32 angesprochen. Für das Weiterschalten der Testbilder im Display wird die serielle Schnittstelle des Rechners genutzt. Für die Benutzereingabe wird Maus und Tastatur verwendet.

Für die Gerätekommunikation werden vorhandene Bibliotheken der Hersteller genutzt. Es existiert für den Drehtisch der Firma OWIS eine Sammlung aller wichtigen Funktionen. Auch für das optische Messgerät stellt die Firma NewPort eine LabVIEW Bibliothek zur Verfügung. Die serielle Schnittstelle wird mittels VIA Bibliothek von LabVIEW angesteuert.

5.4.1 **Bedienung der Software**



Das Programm wird mittels Menüstruktur bedient:

Abbildung 5.6 Menüstruktur als Programmierbeispiel

Es gibt folgende vier Hauptmenüpunkte:

File Menü

Dies beinhaltet die Möglichkeit, die aktuellen Messwerte als XML-Datei zu speichern und zu laden. Die Beendigung des Programmes ist unter diesem Menüpunkt möglich.

Measurement Menü

Hier befinden sich die eigentlichen Messfunktionen, wie die des 3D-Crosstalks oder der 3D-Purity. Während der 3D-Crosstalk nur für einen bestimmten Abstand zum Display gemessen wird, gibt es für die 3D-Purtiy mehrere Messabstände. Dementsprechend dauert die 3D-Purity Messung länger. Die Ergebnisse der 3D-Crosstalk Messung liefern die genaueren und berechneten 3D-Eigenschaften, während die 3D-Purity eine grafische Auswertung zur Folge hat. Falls es notwendig ist, werden unter "View Last Measure" die rohen Messdaten der Leuchtdichte für die vier Testbilder angezeigt.

Settings Menü

Dies dient zur Konfiguration und Einrichtung des Messplatzes. Mithilfe "Setup Display on Stage" wird der Drehtisch manuell gedreht und ist somit hilfreich beim Montieren des Displays auf dem Drehteller. Die OWIS Untermenüpunkte sind für die Konfiguration des Drehtischs gedacht. Es werden Eigenschaften wie maximale Geschwindigkeit, Beschleunigung und Übersetzungsverhältnis eingestellt. Änderungen sind in der Regel für die Bedienung nicht notwendig.

Mit "Adjust Test Pattern" wird das erste Testbild für die Testbildreihenfolge auf dem Display ausgewählt (siehe Abbildung 4.2).

In den "Basic Settings" wird der zu messende Betrachtungswinkel θ begrenzt und die Anzahl der Messpunkte festgelegt. Diese werden automatisch vom Programm über den Messbereich verteilt. Ebenfalls wird der Messbereich in Z-Richtung und die Anzahl der Messpunkte festgelegt. Für die meisten Berechnungen ist der Augenabstand wichtig. Dieser und die Optionen falls das Display auf dem Kopf steht, sowie die manuelle Weiterschaltung von Testbildern sind in diesem Untermenü einstellbar.

Im letzten Untermenüpunkt "Optical Settings" werden Einstellungen für das optische Messgerät vorgenommen. Dort werden der Kalibrierungsfaktor, die Empfindlichkeit, die Wellenlänge und der dazugehörige Wert der V(λ)-Kurve eingetragen.



Das Hauptfenster präsentiert die Messergebnisse:

Abbildung 5.7 Hauptfenster der Bediensoftware

In übersichtlichen Diagrammen werden 3D-Crosstalk und 3D-Purity farbig angezeigt. Dabei ändert sich dynamisch die Achsenbeschriftung je nach gewünschtem Messbereich. In der rechten unteren Ecke von Abbildung 5.7 werden die berechneten 3D-Eigenschaften aus Kapitel 3.2 dargestellt.

5.4.2 Messwertaufnahme

Bei der automatisierten Messwertaufnahme ist eine komplexe Steuerung aller Komponenten notwendig. Außerdem soll der Benutzer jederzeit die Möglichkeit haben, den Messvorgang abzubrechen und eine Information der restlichen Messzeit zu bekommen. Die 3D-Purity Messung ist ein vielfacher Aufruf der 3D-Crosstalk Messung. Nur die Position auf der Z-Achse wird verändert. Die Vorgehensweise der 3D-Crosstalkmessung zeigt folgendes Flussdiagramm:



Abbildung 5.8 Flussdiagramm Messwertaufnahme

5.4.3 Fehlerbehandlung

Bei der automatisierten Messung wird davon ausgegangen, dass der Nutzer nicht ständig die Messung am Messplatz überwacht. Es ist notwendig, Fehler die auftreten können automatisch zu erkennen und gegeben falls Maßnahmen einzuleiten. Die Fehlerbetrachtung wird auf zwei verschiedenen Arten durchgeführt. Wie in Abbildung 5.6 zu erkennen werden bestimmt Aktionen nur ausgeführt, wenn die vorherige Aktion erfolgreich ausgeführt worden ist.

Bei zeitkritischen Sachen, beispielsweise der Messvorgang wird eine andere Methode verwendet:



Abbildung 5.9 Abfrage des Messgerätes mit Fehlerbehandlung

Bei der Messwertabfrage wird ein Error-Kanal verwendet. Jede Funktion die an diesem Kanal angefügt ist, schreibt ihren Fehler in eine Error-Liste. Diese wird später ausführlich ausgewertet. In Abbildung 5.9 ist dieser Kanal mittels gelb-schwarzer Linie dargestellt. Weiterhin ist zu erkennen, dass das Programm mehrmals nach einem auswertbaren Messwert fragt bevor es eine Fehlermeldung in den Kanal hinzufügt. Eine ausführliche Liste aller möglichen Fehlermeldungen ist in der LabVIEW Hilfe dokumentiert.

Die Fehlerbehandlung wurde bei dem Programm so ausführlich programmiert, dass beim Abziehen oder Ausschalten des Messgerätes die Software dies automatisch erkennt und die Messreihe nach Aufforderung der Fehlerbeseitigung automatisch wiederholt.

5.4.4 Interpolation der Messwerte

Der schwierigste Teil der Software ist Interpolation und Aufbereitung der Messwerte für die grafische Darstellung des 3D-Betrachtungsbereichs (3D-Purity). Um Messwerte aus polaren Koordinaten zu interpolieren und in einem kartesischen XZ-Graph darzustellen, gibt es bei LabVIEW keine vorgefertigten Bibliotheken.

Es existieren verschiedene Arten von Interpolation. Bei einer Graph-Auflösung von 600x600 Pixeln müssen 4000 Messwerte auf 360.000 Bildpunkte umgerechnet werden. Um dies in einem vertretbaren Zeitaufwand durch zuführen, wurde die lineare Interpolation und damit die Einfachste und Schnellste ausgewählt. Um Zwischenwerte zu berechnen, wird eine Gerade zwischen Anfangs- und Endwert gelegt. Ecken in der Steigung der Geraden sind bei zu starkem Richtungswechsel der Nachteil dieser Methode. Die Arbeitsweise der Interpolationsfunktion ist wie folgt:



Abbildung 5.10 Flussdiagramm Messwertinterpolation

5.5 Kalibrierung und Justierung des 3D-Messplatzes

Für die erste Inbetriebnahme müssen mechanische und optische Größen justiert werden. Zu Beginn wird der Winkel des Drehtellers auf die genaue Nullposition justiert. Dies geschieht mit folgenden Schritten (vgl. Abbildung 5.2):

- 1. Den großen Winkel orthogonal so ausrichten, dass er vom Mittelpunkt 2 mm entfernt ist und die Kanten der beiden Senkkopfschrauben den gleichen Abstand haben
- 2. Einen Laserpointer parallel an den Winkel legen.
- 3. Den Abstand vom Laserstrahl am Drehteller und an der hinteren Wand zur rechten Wand messen
- 4. Am gelben Schwungrad des Schrittmotors drehen bis beide Abstände gleich sind.

Nachfolgend wird die Skala der Reiterschiene justiert. Dazu wird der Abstand zwischen äußeren Rand des Drehtellers und dem rechten Ende der Schiene gemessen. Dieser muss genau 20 cm betragen.

Weiterhin muss der optische Kalibrierungsfaktor und der V-Lambdafaktor für das optische Messgerät eingestellt werden. Dies wird in der Software unter dem Menüpunkt "Optical Settings" durchgeführt. Für die Messungen verschiedener Farben werden unterschiedliche V-Lambda-Faktoren genutzt. Annäherungsweise wird die unterschiedliche Empfindlichkeit des Auges gewichtet. Folgende Werte sind zu verwenden (DIN 5031 Teil 3):

Farbe	Wellenlänge λ [nm]	V(λ) für 2° Gesichtsfeld
Weiß	555	1,0000000
Rot	700	4,102000.10-3
Grün	546	0,9840924
Blau	436	1,800736.10-2

Tabelle 5.3 V(λ)-Werte für verschiedene Wellenlängen

Der optische Kalibrierungsfaktor K_f wird mit einer Vergleichsmessung ermittelt. Hierzu wird die Leuchtdichte L mit dem Autronic-Melcher DMS 401 mittig und orthogonal von einem vollständig beschalteten Backlight bei einem Strom von 200 mA gemessen. Anschließend wird eine Vergleichsmessung mit dem Optical Power Meter und den gleichen Parametern durchgeführt. Die Bestrahlungsstärke E wird mit der Positionierung des Messkopfes auf der Skala bei 50 cm ermittelt.

Der Kalibrierungsfaktor Kf wird wie folgt berechnet:

$$K_f = \frac{L}{683 * E} \tag{5.13}$$

Der Maximalwert des photometrischen Strahlungsäquivalents entspricht 683 (DIN 5031 Teil 3, 1982). Für diesen Charakterisierungsmessplatz wurde ein K_f von 19041405,06123 verwendet. Mit dem berechneten Wert wird die 3D-Leuchtdichte annäherungsweise richtig dargestellt.

5.6 Fehlerbetrachtung des 3D-Charakterisierungsmessplatzes

Vor der Verwendung ist ein Nachweis zu bringen, dass der Messplatz die gleichen Messwerte in verschiedenen Durchgängen messen kann. Laut Definition nach FPDM2 (VESA Display Metrology Committee, 2001) wird zehnmal die Leuchtdichte gemessen und die Standardabweichung σ_L mit folgender Formel wiedergegeben:

$$\sigma_L = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (L_i - \mu_L)^2}$$
(5.14)

 μ_L ... Mittelwert aller Leuchtdichten L_i n ... Anzahl Messwerte

Der Mittewert wird wie folgt berechnet:

$$\mu_L = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^{n} L_i \tag{5.15}$$

Bei diesem Messplatz wird die Fehlerbetrachtung mit dem 3D-Crosstalk durchgeführt. Das ist sinnvoll, da in diesem Wert alle gemessenen Größen verrechnet sind. Es wurden folgende Werte ermittelt:



Abbildung 5.11 Messwerte für die Fehlerbestimmung

Daraus ergibt sich eine Standardabweichung σ_L von 0,051 bei einem Mittelwert von 13,534. Aus diesen Werten wird der allgemeine mittlere Fehler $\Delta \mu_L$ nach folgender Formel berechnet:

$$\Delta \mu_L = \frac{\sigma_L}{\sqrt{n}} \tag{5.16}$$

Dieser beträgt für den entwickelten 3D-Charakterisierungsmessplatz ±1,6% und erfüllt die Anforderungen.

5.7 Modifizieren der 3D Displaysoftware

Die vorhandene Displaysoftware wurde ausschließlich für die Steuerung mittels USB Tastatur vorgesehen. Bei der automatisierten Messung ist die Steuerung des Displays durch LabVIEW notwendig. Die serielle Schnittstelle der Steuerelektronik ermöglicht einen Fernzugang zur Linux-Eingabeaufforderung. Die Displaysoftware wurde so modifiziert, dass Befehle im Linux-Prompt ausgewertet werden.

Linux bietet die komfortable Möglichkeit in sogenannten Pipeline-Dateien permanent zu schreiben. Das Programm fragt diese Pipeline-Dateien immer wieder ab. Folgende Linuxbefehle wurde verwendet:

```
echo n > /tmp/3dcontrol// Befehl nächstes Testbildecho l > /tmp/3dcontrol// Befehl letztes Testbildecho 0 > /tmp/3dcontrol// automatisches Weiterschalten aus
```

5.8 Zusammenfassung

Der entwickelte Messplatz erreicht für die 3D-Charakterisierung von autostereoskopischen Displays weitestgehend die Anforderungen aus Kapitel 4. Aufgrund der Umwandlung von Bestrahlungsstärke in Leuchtdichte ist dieser Wert ungenau. Bei der Positionierung des Messkopfes wird nicht der geforderte Bereich abgedeckt. Die Software misst halbautomatisch die Messreihen. Sie berechnet 3D-Eigenschaften und stellt diese grafisch dar.

Nach dem die benötigten Komponenten angefertigt, geliefert und aufgebaut wurden sieht der Messplatz wie folgt aus:



Abbildung 5.12 Außen- und Innenansicht des 3D-Messplatzes

Der 3D-Messplatz ist in der Lage die 3D-Eigenschaften für die Charakterisierung des Fraunhofer IPMS Demonstrators im nächsten Kapitel zu ermitteln.

6 Charakterisierung des 3D-Displays

Für die Charakterisierung wurde das Backlight mit der Nummer V2729#9 ausgewählt. Dieses hat einen weißen Farbton und ist mittelmäßig degradiert. Das bedeutet, dass Dark Spots und eine leichte Vignette zu sehen sind. Das OLED-Backlight wurde zusätzlich charakterisiert, da im Lastenheft (Scholles, 2008) gesondert Eigenschaften angegeben sind.

6.1 Eigenschaften des Backlights

Die 2D-Charakterisierung wurde mit dem Autronic-Melcher DMS 401 Messplatz durchgeführt. Dieses Messgerät ist nach (AUTRONIC-MELCHERS GmbH, 2009) speziell für die Charakterisierung von OLED-Substraten vorgesehen:



Abbildung 6.1 2D-Messplatz Autronic-Melcher DMS 401

Die wichtigsten Eigenschaften sind in folgender Tabelle zusammengefasst:

Eigenschaft	Wert
Positionierung XY-Richtung	-50 bis +50 mm
Betrachtungswinkel	0° bis 80°
Fokussierungsabstand	112 mm
Durchmesser Messfeld	0,5mm; 1mm; 2mm; 3 mm; 5 mm; 7mm; 10mm
Spektroradiometer	1024 CCD-Array
Messunsicherheit Leuchtdichte	±3%
Messunsicherheit Farbkoordinate	$\Delta x < 0.003, \Delta y < 0.003$

Tabelle 6.1 Eigenschaften des 2D-Messplatzes DMS 401

Für die Erfassung der Leuchtdichte wird ein Messfeld von 7 mm Durchmesser verwendet. Das entspricht 802 erfasste Pixel nach Formel (5.11). Jede Messung wurde dreimal durchgeführt und daraus der Mittelwert gebildet. Bei dem Backlight ergab die mittige Messung des vollflächigen Weißes folgendes:

Eigenschaft	Formelzeichen	Wert	Einheit
Leuchtdichte bei I=200mA	L	163,2	cd/m ²
Farbtemperatur	T _{CCT}	5669	К
Farbkoordinate Weißpunkt	x ; y	0,32733;0,39779	
Leistungsaufnahme	Р	730	mW
Leuchteffizienz	ε	224	$cd/(m^2W)$

Tabelle 6.2 Messwerte vom Backlight

Die Leuchtdichte liegt weit unter dem Ziel des Forschungslastenheftes. Dort ist die typische Leuchtdichte mit 1000 cd/m² angegeben (Scholles, 2008). Die Farbtemperatur ist wärmer als beim D65 Standard und der Weißpunkt hat einen leichten Grünstich.

Die elektro-optische Übertragungsfunktion wurde in 12,5 mA Stromschritten bis 200mA gemessen und zeigt folgendes:



Abbildung 6.2 Elektro-optische Übertragungsfunktion des Backlights

Die Leuchtdichte ist proportional zum Strom, wenn die Schwellspannung der OLEDs überschritten ist. Die Blickwinkelabhängigkeit des Backlights ohne Linsenarray wurde in 5 Grad Schritten wie nach Kapitel 3.1.4 wie folgt gemessen:



Abbildung 6.3 Horizontale Betrachtungswinkelabhängigkeit

In Abbildung 6.3 ist zu erkennen, dass die Leuchtdichte bei dem Betrachtungswinkel θ_L und θ_R die relative Leuchtdichte von 50% erreicht. Dass die Leuchtdichte mit zunehmenden Betrachtungswinkel abnimmt, liegt an der Totalreflexion des Lichtes an verschieden Schichten. Der anzugebende Betrachtungswinkel des Backlights beträgt maximal ±52° bezogen auf die Leuchtdichteveränderung.

Nicht akzeptabel sind die betrachtungswinkelabhängigen Farbverfälschungen. Nach (VESA Display Metrology Committee, 2001) darf e in Display maximal ein $\Delta u'v'$ von 0,01 besitzen. Diese werden schon bei einem Betrachtungswinkel von ±20° erreicht. Die extreme Veränderung lässt sich mittels Farbtemperatur gut darstellen:



Abbildung 6.4 Farbtemperatur in Abhängigkeit vom Betrachtungswinkel



Die optische Überprüfung der Oberfläche auf Gleichmäßigkeit ergab folgendes:

Abbildung 6.5 Optische Fehler in der Leuchtdichte des Backlights

In den beiden oberen Quadranten treten vermehrt schwarze Punkte (engl. dark spots) auf. Über das ganze Display ist eine leichter weißer Kreis vorhanden.

Die messtechnische Erfassung der Gleichmäßigkeit an neun verschiedenen Punkten (vgl. Abbildung 3.2) ergibt eine Gleichmäßigkeit von 27,5% in der Leuchtdichte und 77,7% in der Farbtemperatur⁶. Letzteres entspricht einen Δu 'v' von 0,016 und liegt über dem empfohlenen Wert von 0,01 (VESA Display Metrology Committee, 2001). Diese extreme Schwankung kommt durch die in Abbildung 6.5 zu sehenden Fehler zustande.

6.2 Eigenschaften des autostereoskopischen Displays

Nach der Betrachtung der einzelnen Hintergrundbeleuchtung, wird folgend das 3D-Display als Gesamtsystem charakterisiert. Die 3D-Eigenschaften wurden mit dem entwickelten 3D-Charakterisierungsmessplatzes bestimmt.

⁶ Ausführliche Messwerte im Anhang

6.2.1 Optische 3D-Eigenschaften

Der 3D-Crosstalk wurde mittels 200 Messpositionen über 80 Grad mit weißen Testbildern gemessen:



Abbildung 6.6 3D-Übersprechen des Displays

Hierbei ist die blaue Kurve der 3D-Crosstalk für das linke Auge und die Rote für das rechte Auge. Die Abbildung 6.6 zeigt, dass neben der zentralen Viewing-Zones nach links und rechts jeweils zwei weitere Betrachtungsbereiche für die 3D-Wiedergabe sind. Diese fünf Betrachtungsbereiche entsprechen der Vorgabe von mindestens 4 und maximal 6 aus dem Lastenheft (Scholles, 2008). Die Abbildung 6.6 präsentiert einen starken Kanalunterschied für beide Augen. Für die genaue Charakterisierung werden die zentrale Viewing-Zones erneut mit 15 Grad und 40 Messpunkten ausgewertet.



Abbildung 6.7 3D-Übersprechen für die zentralen Viewing-Zones

Der maximale 3D-Crosstalk von 20% wird nach Lastenheft (Scholles, 2008) erreicht. Die Minima der zentralen Viewing-Zones liegen bei -2,5° und 3,27°. Somit ist der optimale Betrachtungswinkel leicht nach rechts versetzt.

Weiterhin wurde der 3D-Crosstalk mit den gleichen Einstellungen für die Farben Rot, Grün und Blau untersucht:



Abbildung 6.8 3D-Crosstalk für die Farben Rot, Grün und Blau

Die Abbildung 6.8 zeigt eine unterschiedliche Ausbildung der jeweiligen Viewing-Zone für die Farben Rot, Grün und Blau.

Mit den Messwerten des 3D-Crosstalks wurden folgende 3D-Eigenschaften berechnet:

Eigenschaft	Formelzeichen	Wert	Einheit
3D-Übersprechen	X _{3D}	16,0%	-
3D-Leuchtdichte	Y_{3DW}	10,0	cd/m ²
3D-Kontrast	CR _{3D}	28:1	-
Kanalunterschied	ΔY_{C3D}	13,5%	-
3D-Bewegungsfreiheit	W _{3D}	2,41	cm
3D-Gleichmäßigkeit	ΔY_{3D}	71,5%	-
Optimaler Betrachtungsabstand	OVD	59,5	cm
Optimaler Betrachtungswinkel	OVA	0,77°	-

Tabelle 6.3 3D-Eigenschaften vom Display

Der optimale Betrachtungsabstand liegt leicht über der Vorgabe von 50 cm aus dem Lastenheft (Scholles, 2008). Wie der Betrachtungswinkel zeigt bilden sich die Viewing-Zones nicht optimal mittig aus. Die 3D-Bewegungsfreiheit ist gegenüber der Vorgabe von 4 cm eingeschränkt. Die 3D-Gleichmäßigkeit in der Viewing-Zone erreicht den Sollwert von 50%. Die 3D-Leuchtdichte ist kleiner als die Vorgabe von 50 – 150 cd/m². Der 3D-Kontrast ist im Vergleich zu dem Mög-lichkeiten des LC-Moduls zu gering.

Der 3D-Betrachtungsbereich wurde mit 10 Messreihen zwischen 75 cm und 30 cm Betrachtungsabstand und 200 Messpunkte für einen Betrachtungswinkel in einem Bereich von 80 Grad gemessen. Die folgende Abbildung 6.9 zeigt mit dem roten Bereich eine gute 3D-Wiedergabe. Blau kennzeichnet den pseudoskopischen Bereich. Dort sind die Bildinformationen für das linke und rechte Auge vertauscht. Im schwarzen und blauen Bereich entsteht kein 3D-Eindruck. Je roter die Farbe desto besser die 3D-Wahrnehmung.


Abbildung 6.9 3D-Betrachtungsbereich des autostereoskopischen Displays

Die Abbildung 6.9 zeigt deutlich, dass der zentrale Betrachtungsbereich nicht mittig liegt. Sie ist leicht nach rechts versetzt. Links und rechts schließen sich jeweils zwei weitere Viewing-Zones an. Diese sind durch den pseudoskopischen Bereich getrennt. Ab einen Displayabstand von ca. 60 cm verringert sich die Breite der Betrachtungsbereiche und die Stärke des 3D-Eindrucks nimmt ab. Die optimale 3D-Wahrnehmung beginnt bei ca. 45 cm.

6.2.2 Optische 2D-Eigenschaften

Die nun folgenden Messungen wurden mittels Autronic-Melcher DMS 401 Messpletz durchgeführt. Dazu wurde der aus der 3D-Messung ermittelt optimale Betrachtungswinkel eingestellt. Der Farbraum und der Weißpunkt wurden wie folgt gemessen:



Abbildung 6.10 Farbraum und Weißpunkt des 3D-Displays

Das Weiß des Displays ist kälter als das Normweiß D65. Außerdem liegt der Weißpunkt nicht auf der Farbtemperaturlinie. Das bedeutet, das Weiß hat einen schwachen, türkisen Farbstich. Der komplette sRGB Farbraum wird nicht abgedeckt. Die Farbsättigung für die Farben Magenta und Grün ist unzureichend. Somit wird die Abdeckung des sRGB-Farbraums nicht erreicht. Die Ursache dafür ist die Mischung des Weißes mittels gelben und blauen OLED-Stapel. Die 16 Graustufen für die Elektro-optische Übertragungsfunktion wurden wie folgt ausgewertet⁷:



Abbildung 6.11 Elektro-optische Übertragungsfunktion (Gamma)

Der Anstieg der Geraden entspricht dem Gamma-Wert von 2,18. Dieser Wert ist etwas zu niedrig um das sRGB Gamma von 2,2 zu erfüllen. Weiterhin zeigt Abbildung 6.11, dass die Messpunkte von der Gerade abweichen. Das hat eine nicht lineare Graustufenverteilung zu folge. Die erwarteten Grautöne sind im oberen Bereich zu dunkel und im mittleren Bereich zu hell.

6.2.3 Zeitliche Eigenschaften

Die Messung geschieht mit dem Tektronix TPS 2024 Oszilloskop und dem Fototransistor TEPT 5700 von Vishay. Der Vorteil des verwendet Fototransistor ist der große Öffnungswinkel von \pm 50° und die hohe Empfindlichkeit im sichtbaren Lichtspektrum. Folgende Schaltung wurde verwendet:



Abbildung 6.12 Schaltung Timing-Messung

⁷ Vollständige Messreihe befindet sich im Anhang

Der Fototransistor wurde mittig so platziert, dass der Öffnungswinkel das Licht von dem gesamten Display aufnehmen kann. Der IPMS Demonstrator fügt im 3D-Modus ein Schwarzbild bei jedem zweiten Frame ein. Deswegen wird für die Charakterisierung nur der schwarzweiß Wechsel gemessen. Folgende Timings wurden separat für das jeweilige Teilbild gemessen:



Abbildung 6.13 Timing des linken Teilbildes



Abbildung 6.14 Timing des rechten Teilbildes

In Abbildung 6.14 ist zu erkennen, dass es Spannungs- und damit Helligkeitssprünge gibt. Die Ursache ist das falsche Zu- und Abschalten der Hintergrundbeleuchtung in der unteren Hälfte vom Display (vgl. Abbildung 2.13). Während das Zuschalten beim linken Bild funktioniert, stimmt das Timing beim rechten Teilbild nicht. Ebenfalls tritt dieses Verhalten beim Abschalten von beiden Bildern auf. Die obere und untere Hälfte wird abgeschaltet bevor das LC-Modul die Pixel auf Schwarz umgeschaltet hat.

Beide Teilbilder unterscheiden sich in der Leuchtdichte und der Anschaltzeit. Die Bildaufbauzeit ist mit den Kurvensprüngen ungenau zu bestimmen. Sie ist für das linke und rechte Bild unterschiedlich. Unter Berücksichtigung der 10%-90% Regel wurde eine durchschnittliche Bildaufbauzeit von 7,7 ms aus folgender Tabelle ermittelt:

Linkes Teilbild		Rechtes Teilbild			
t _{on}	3,3 ms	t _{on}	3,6 ms		
t _{off}	3,4 ms	t _{off}	5,2 ms		
t _{wb}	6,7 ms	t _{wb}	8,8 ms		

Tabelle 6.4 Bildaufbauzeiten für das linke und rechte Teilbild

Mit der vorherigen Messung ist es schwierig, Aussagen über die Eigenschaften der LC-Ebene zu treffen. Deswegen wurde eine weitere Messung für das linke Teilbild mit permanenter Hintergrundbeleuchtung durchgeführt:



Abbildung 6.15 Bildaufbauzeit des LC-Moduls mit permanenter Hintergrundbeleuchtung

In dieser Abbildung markiert die untere gestrichelte Linie den Schwarzwert des Displays und die obere horizontale Linie den Weißwert des Displays. Deutlich ist zu erkennen, dass die LC-Ebene zu früh schaltet und zu stark übertaktet ist. Eine komplette Ausrichtung der Pixel ist in der kurzen Zeit nicht möglich ist. Von dem maximalen Weißwert werden nur 50% erreicht. Generell ist zu beobachten, dass die LC-Ebene für den Wechsel auf Schwarz länger braucht als auf den Wechsel zu Weiß. Um die Auswirklung des Übertaktens auf den Bildaufbau genauer zu untersuchen wurde die Messung eines Teilbildes mit dem vertikalen Synchronimpuls für den Bildstart betrachtet:



Abbildung 6.16 Bildaufbauzeit mit vertikalen Synchronimpuls

Der vertikale Synchronimpuls wird bei dieser Messung mit einem Zeitintervall von 9ms durchgeführt. Die LC-Ebene braucht ca. 8ms um darauf zu reagieren. Nachdem der zweite Synchronimpuls ein Schwarzbild schreibt, wird nach dem dritten Synchronimpuls theoretisch das Teilbild für das rechte Auge in das LC-Modul eingeschoben. Unter der Beachtung der Verzögerungszeit des dritten Impulses ist nachvollziehbar, dass sich beide Teilbilder überschneiden. Das Display wird nicht komplett Schwarz. Es entsteht ein Timing-Crosstalk. In diesem Bereich ist es notwendig das Backlight auszuschalten. Zur messtechnischen Erfassung des Flimmerns wurde eine Fast-Fourier-Transformation mit den gemessenen Werten im Oszilloskop durchgeführt. Diese wurde mit Faktoren für die Empfindlichkeit des Auges gewichtet:



Abbildung 6.17 Gewichtete Flimmermessung vom Display

Das Display flimmert sichtbar mit 28,24 Hz und einem Flimmerpegel von -28dB. Weitere Flimmerfrequenzen sind gering und fallen unter den Schwellwert von -60dB.

6.2.4 Elektrische Eigenschaften

Das komplette Display wird mit einer Spannung 4,5 V betrieben. Dieser Wert wurde im Lastenheft (Scholles, 2008) mit 12 V angegeben. Dabei fließt ein durchschnittlicher Strom von 380mA für das gesamte System. Dieser Wert schwankt wegen dem Trizepsmodul zwischen 220 mA im Idle Mode und 480 mA im Running Mode (Keith & Koep GmbH, 2008). Die durchschnittliche Leistungsaufnahme P vom Display beträgt 1,71 Watt. Der Strom seperat für das Backlight beträgt 200 mA.

Mithilfe der ermittelten Leuchtdichte und der Leistungsaufnahme wird eine Effizienz ϵ von 5,85 cd/(m²W) für das Display berechnet.

6.3 Zusammenfassung der Charakterisierung

Die Systemcharakterisierung des Displays V2729#9 in Anlehnung an das Lastenheft (Scholles, 2008) ist in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

Parameter	Formelzeichen	Soll-Wert	Ist-Wert	Einheit
3D-Übersprechen	X _{3D}	Max. 20%	16%	-
3D-Leuchtdichte	Y_{3DW}	50	10	cd/m ²
3D-Kontrast	CR _{3D}	-	28:1	-
Kanalunterschied	ΔY_{C3D}	-	13,5%	-
3D-Bewegungsfreiheit	W _{3D}	4	2,41	cm
Optimaler Betrachtungsabstand	OVD	50	59,5	cm
Optimaler Betrachtungswinkel	OVA	0°	0,77°	-
Gleichmäßigkeit der Viewing-Zone	ΔY_{3D}	50%	71,5%	-
Bildaufbauzeit	T _f	-	7,7	ms
Backlight Leuchtdichte	L	1000	163,2	cd/m ²
Gleichmäßigkeit des Backlights	Uniformity	50%	27,4%	-
Gamma	γ	-	2,18	-
Farbtemperatur	T _{CCT}	-	7827	К
Leistungsaufnahme	Р	10	1,71	W
Effizienz	E	-	5,85	$cd/(m^2W)$

Tabelle 6.5 Übersicht der Displaycharakterisierung

Mithilfe der ermittelten Parameter des autostereoskopischen IPMS-Demonstrators werden im nächsten Kapitel Optimierungsvorschläge gezeigt und die Performance des 3D-Displays ausgewertet.

7 Auswertung, Zusammenfassung und Ausblick

Diese Arbeit zeigte die Entwicklung eines 3D-Charakterisierungsmessplatzes mit der anschließenden Charakterisierung eines autostereoskopischen Displays. Nachdem im Kapitel 2 die Funktionsweise flacher autostereoskopischer 3D-Displays vorgestellt wurde, erklärt Kapitel 3 relevante Parameter für die 2D- und 3D-Displaycharakterisierung. Auf dessen Grundlage wurden die Anforderungen für ein Two-View 3D-Charakterisierungsmessplatzes festgelegt. Mithilfe des neu entwickelten Messplatzes und vorhandener Charakterisierungssysteme wurde der von Fraunhofer IPMS entwickelte autostereoskopische 3D-Demonstrator charakterisiert. Mit den gewonnenen Erkenntnissen wurden die folgenden Optimierungsvorschläge ermittelt.

7.1 Optimierungsvorschläge für das 3D-Display

Mithilfe der Charakterisierung ist es möglich die Defizite des IPMS-Demonstrators zu erkennen und Gegenmaßnahmen zu treffen.

Eine Schwachstelle des Displays liegt in der Ansteuerung. Die Anforderung der sequentiellen Wiedergabe von zwei Teilbildern erfüllt das LC-Modul nicht. Das extreme Übertakten von 8 MHz auf 26 MHz reduziert die Ausrichtungsdynamik der LC-Pixel, wie es in Abbildung 6.15 zu sehen ist. Der ermittelte Kanalunterschied und die unterschiedlichen Spannungsverläufe des Fototransistors in Abbildung 6.13 und Abbildung 6.14 zeigen eine unterschiedliche lange Leuchtzeit der Backlightstreifen. Das konnte mit der Auszählung der Anschaltzeiten einzelner Hintergrundsegmente aus dem VHDL-Quellcode nachgewiesen werden:



Abbildung 7.1 Timing der Anschaltzeiten der Backlightsegmente

In Abbildung 7.1 werden pro Zeilennummer immer zwei horizontale Zeilen an das LC-Modul übertragen. Im alten Timing wurde vernachlässigt, dass das Übertragen des Schwarzbildes an das LC-Modul eine Verzögerung hat. Das Backlight wird zu früh abgeschaltet, obwohl keine neuen Bildinformationen dargestellt werden. Aus der Abbildung 6.16 lässt sich der korrekte Zeitpunkt für das Abschalten nachvollziehen. Aus den gewonnen Kenntnissen wurde das neue Timing (unteren Teil der Abbildung 7.1) synthetisiert und mit dem Display getestet. Bei gleich bleibenden 3D-Crosstalk wurde der Kanalunterschied von 13,5% auf 0,18% reduziert. Die 3D-Leuchtdichte wurde verdoppelt. Der Kontrast verringerte sich leicht von 28:1 auf 25:1, da pro Teilbild das Backlight unter dem LC-Modul länger leuchtet.

Auffällig in der Abbildung 7.1 sind die großen Bereiche zwischen den sichtbaren LC-Daten. Diese Lücken werden auch Blanking-Zeilen genannt und enthalten keine sichtbaren Pixeldaten. Durch das Übertakten wird diese inaktive Zeit für das bessere Ausrichten der einzelnen Pixel genutzt. Es wird empfohlen die Blanking-Zeilen auf die typischen Vorgaben aus der Spezifikation (TPO Displays Corporation, 2006) zu reduzieren. Anstatt den 360 Blankingzeilen werden typischer Weise nur 24 angegeben. Das reduziert die Pixelfrequenz auf 11,5 MHz bei gleichbleibender Bildwiederholrate von 28,24 Hz. Dies sollte in weiterführenden Arbeiten an der Displaysoftware praktisch belegt werden.

Generell sollte eine flimmerfreie Teilbildwiedergabe von mindestens 60Hz nach (DIN 9241 Teil 305, 2009, S. 69) angestrebt werden.

Wie in Abbildung 6.8 zu sehen, gibt es Unterschiede im 3D-Crosstalk für die einzelnen Subpixel Rot, Grün und Blau. Als optischer Eindruck ist eine Farbverschiebung bzw. einen farbiges Moiré an den Rändern der Viewing-Zones die Folge. Auch die Farbtemperaturveränderung zwischen Backlight und Gesamtsystem belegt die suboptimale Anordnung der Subpixel über den Linsenstreifen. Das Hauptproblem stellt sich wie folgt dar:



Abbildung 7.2 Subpixelanordnung des Displays

Die zentralen Lichtstrahlen, welche die größte Lichtstärke besitzen, laufen je nach horizontaler Pixelposition durch ein anderes Subpixel. Daher zeigt Abbildung 7.2, dass der obere Pixel die größte Lichtstärke im blauen Subpixel und der untere Pixel im roten Subpixel besitzt. Dementsprechend gibt es Farbverfälschungen und unterschiedlichen 3D-Crosstalk für die einzelnen Grundfarben. Für zukünftige Systementwicklung wird empfohlen, dass LC-Modul um 90° zu drehen und die Subpixelanordnung entlang der Zylinderlinse zu wählen.

Eine große Schwachstelle ist die Justage der einzelnen Displayebenen zueinander. Der Montageplatz erfüllt die Anforderungen in Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Justage nicht. So zeigt die Abbildung 6.7 und Abbildung 6.9, dass das Linsen-Array nicht optimal mittig auf dem Backlight sitzt. Das hat Auswirkungen auf alle Streifengruppen und erhöht den 3D-Crosstalk.

Es wird empfohlen die optische Überprüfung der Justierung mit einem USB-Mikroskop durchzuführen. Der Vorteil liegt darin, dass das Mikroskop mittig über dem Display positioniert wird und somit blickwinkelabhängige Verfälschungen vermieden werden:



Abbildung 7.3 Verfälschungen der Justierung durch den Blickwinkel

Die Abbildung 7.3 zeigt die versetzte Positionierung der Pixelebene über der Linsenebene bei schräger Betrachtungsweise.

Der 3D-Crosstalk ist mit 16% für die 3D-Wiedergabe generell zu hoch. Für einen optimalen 3D-Eindruck wird von Seuntiens, Meesters, & Ijsselsteijn (2005) kleiner 2% angegeben. Nach deren Studie nahmen die Probanden den 3D-Crosstalk ab 5% wahr. Ab 15% ist die Betrachtung für die Probanden sehr anstrengend. Durch die Verschmelzung beider Teilbilder geht der 3D-Eindruck verloren. Leider kann nicht nachvollzogen werden, für welchen 3D-Crosstalk das Linsen-Array berechnet wurde, da die optischen Berechnungen für diese Arbeit nicht vorliegen.

Für zukünftige Projekte wird empfohlen, in der Wiedergabesoftware oder besser in der Hardware Look-Up-Tables einzuführen. Sie dienen dazu Abweichungen wie z.B. vom Gamma (siehe Abbildung 6.11) zu korrigieren. In solchen Tabellen wird nachgeschaut, wie der Wert für Rot, Grün oder Blau multipliziert werden muss, damit dieser auf dem Display korrekt dargestellt wird. Das Resultat ist eine qualitativ bessere Bildwiedergabe.

7.2 Validierung des 3D-Charakterisierungsmessplatzes

Der entwickelte 3D-Charakterisierungsmessplatz ist der bestmögliche Kompromiss zwischen Anforderungen und den zeitlichen Möglichkeiten sowie den materiellen Ressourcen.

Somit konnte eine Automatisierung der Positionierung vom Messkopf auf der Z-Achse aus budgetgründen nicht realisiert werden. Der Messkopfabstand zum Display ist auf 30 ... 75 cm eingeschränkt. Die Abbildung 6.9 zeigt, dass eine Erweiterung auf die Anforderung von 0 bis 200 cm empfehlenswert ist. Durch den Drehtisch mit 360° Drehwinkel werden die Anforderungen an die Positionierung des Messkopfes in X-Achse bzw. den Betrachtungswinkel θ erfüllt.

Durch die große Dynamik des verwendeten optischen Messgerätes ist die Messung der Leuchtdichte von 0,1 bis 100.000 cd/m² möglich. Trotzdem ist das Messgerät suboptimal und sollte gegen ein Fotometer oder Spektroradiometer ausgetauscht werden. Damit werden fotometrische Größen gemessen und das gesamte sichtbare Lichtspektrum mit einbezogen. Die Bestimmung der Leuchtdichte liefert somit genauere Messwerte. Für spätere Messreihen wird das Array-Spektrometer CAS 140CT von Instrument Systems Optische Messtechnik GmbH (2011) empfohlen.

Die Richtlinien für die Umgebung werden mittels klimatisierten Laborbedingungen und der vorhandenen Blackbox erfüllt.

Die Anzahl der benötigten Messungen und das langsame optische Messgerät verlängern die Dauer einer 3D-Crosstalk Messung auf ca. zwölf Minuten und die einer 3D-Purity Messung auf ca. zwei Stunden. Da diese Dauer noch über der Anforderung liegt, sollten sie durch Optimierungsmaßnahmen weiter verkürzt werden.

Die Gerätekommunikation erfolgt weitestgehend störungsfrei. In seltenen Fällen stürzt die USB-Verbindung zum Messgerät ab. Dies wird von der Software registriert und nach manuellem Neustart des Messgerätes wird die aktuelle Messreihe wiederholt. Die Ansteuerung des Displays und des Drehtischs erfolgt fehlerfrei.

Beim Laden von XML-Dateien tritt es teilweise auf, dass die Skalen der Grafen nicht aktualisiert werden. Das Problem kann durch wiederholtem Laden umgangen werden.

Die restlichen Anforderungen wie Interpolation, Gleitkommaberechnung, Menüstruktur und Restzeitanzeige mit Abbruchmöglichkeit wurden umgesetzt.

Für die Zukunft ist eine Weiterentwicklung des Messplatzes wünschenswert. Die aus Zeitgründen ausgelagerte Messung des Timings und der 2D-Eigenschaften sollten in den 3D-Messplatz integriert werden. Auch das Überprüfen der Randbedingung wie Temperatur und Luftfeuchtigkeit sollte automatisch geschehen. Im Rahmen einer größeren Arbeit ist die Erweiterung der Software für die Charakterisierung von Multi-View Displays empfehlenswert.

7.3 Fazit und Ausblick

Mithilfe des neu entwickelten 3D-Charakterisierungsmessplatzes ist das Fraunhofer IPMS in der Lage die 3D-Eigenschaften neuentwickelter, autostereoskopischer 3D-Displays zu ermitteln und zu vergleichen. Die Charakterisierung des IPMS Demonstrators, zeigte einige suboptimale Entwicklungen des autostereoskopischen 3D-Displays. Diese Bachelor-Thesis bietet dem Institut Lösungsansätze und informiert über Displayeigenschaften, welche bei zukünftigen Entwicklungen berücksichtigt werden können.

Durch das komplexe Thema und der dafür knapp angesetzten Arbeitszeit von 438 Stunden (Hochschule Bonn-Rhein-Sieg, 2010), konnten bestimmte Kapitel in der Arbeit nur kurz vorgestellt werden. Eine ausführlichere Aufbereitung der Grundlagen für beispielsweise ein Fachbuch ist wünschenswert.

Die Charakterisierung von autostereoskopischen 3D-Displays bleibt auch in der Zukunft interessant. Je mehr autostereoskopische Produkte auf den Massenmarkt kommen, desto wichtiger ist die Vergleichbarkeit untereinander. Es ist notwendig internationale Normen festzulegen. Der komplexe Bereich der 3D-Charakterisierung steht am Anfang seiner Entwicklung. So können aufbauend auf dieser Arbeit Master- oder Doktorarbeiten entstehen, die sich ausführlich mit dem Thema 3D-Charakterisierung oder Entwicklung von autostereoskopischen 3D-Displays beschäftigen.

Ist der Zeitschrift Information Display (Brennesholtz & Chinnock, 2010) zu glauben, werden autostereoskopische Displays ab 2011 auf den Konsumermarkt erscheinen und ab 2013 bis 2015 von einer großen Masse an Anwendern akzeptiert sein. Die objektive und vergleichbare 3D-Charakterisierung wird spätestens dann notwendig sein.

Literaturverzeichnis

- DIN 5031 Teil 2, Strahlungsbwertung durch Emfpänger (Deutsches Institut für Normung e.V. März 1982).
- DIN 5031 Teil 3, Größen, Formelzeichen und Einheiten der Lichttechnik (Deutsches Institut für Normung e.V. März 1982).
- DIN 5033 Teil 2, Farbmessung: Normvalenz Systeme (Deutsches Institut für Normung e.V. Mai 1992).
- DIN 9241 Teil 305, Optische Laborprüfverfahren für elektronische optische Anzeigen (Deutsches Institut für Normung e.V. Juni 2009).
- AUTRONIC-MELCHERS GmbH. (3. August 2009). DMS 401 technical specifications. Abgerufen am 24. Januar 2011 von AUTRONIC-MELCHERS: http://www.autronicmelchers.com/en/dms401
- Brennesholtz, M., & Chinnock, C. (November/ Dezember 2010). 3-D TV from the Consumer Perspective. *SID: Information Display*, S. 32-35.
- Dodgson, N. A. (2004). Variation and extrema of human interpupillary distance. *SPIE Vol. 5291* (S. 36-46). San Jose: SPIE and IS&T.
- Dodgson, N. A. (2005). Autostereoscopic 3D Displays. *Computer Volume: 38 Issue: 8* (S. 31-36). Los Alamitos: IEEE Computer Society.
- EIZO Nanao Corporation. (2010). *Spezifikationen S2433W*. Abgerufen am 1. Februar 2011 von Eizo: high-end-monitors: http://www.eizo.de/pool/spec/de_S2433W.pdf
- Harris, M. (Dezember 2010). *3-D Without Four Eyes*. Abgerufen am 20. Januar 2011 von IEEE Spectrum: http://spectrum.ieee.org/consumer-electronics/audiovideo/3d-without-foureyes/
- Heinen, G. (2004). Skript Lichtechnik. *Vorlesung Medientechnik I*. Sankt Augustin: Hochschule Bonn-Rhein-Sieg.
- Henker, S. (1. August 2005). Dissertation: Entwurf und Modellierung von Multikanal-CMOS-Farbsensoren. *Modellierung des Farbsehens*, S. 25-48.
- Hochschule Bonn-Rhein-Sieg. (2010). *Modulhandbuch für den Studiengang Elektrotechnik* (*B.Eng*). Sankt Augustin.
- Holliman, N. (2. Februar 2005). *3D Display Systems*. Abgerufen am 20. Januar 2011 von Durham University: http://www.dur.ac.uk/n.s.holliman/Presentations/3dv3-0.pdf
- Horikoshi, T., Uehara, S.-i., Kato, C., Taira, K., Hamagishi, G., Koike, T., et al. (2010). Characterization of 3D Image Quality on Autostereoscopic Displays - Proposal of Interocular 3D Purity -. SID10 Digest, S. 331-334.

- Instrument Systems Optische Messtechnik GmbH. (2011). *DTS 140 Spektralradiometer*. Abgerufen am 25. Januar 2011 von Instrument Systems: http://www.instrumentsystems.de/produkte/systeme-fuer-displaymessung/dts-140spektralradiometer/
- Järvenpää, T., & Salmimaa, M. (2008). Objective Evaluation of Multi-View Autostereoscopic 3D Displays. *SID DIGEST*, S. 267-270.
- Järvenpää, T., & Salmimaa, M. (16. 8. 2008). Optical characterization of autostereoscopic 3-D displays. *Journal of the SID*, S. 825-833. DOI Link: 10.1117/12.781438
- Javidi, B., & Okano, F. (2002). *Three-Dimensional Television, Video, and Display Technologies.* Berlin Heidelberg New York: Springer- Verlag.
- Keith & Koep GmbH. (2008). *Technischer Service Trizeps IV*. Abgerufen am 10. 01 2011 von www.keith-koep.com/service/doku.php/service/hardware/module/trizeps4
- Kroker, L. (2007). Systembetrachtung für ein gesteuertes OLED-Backlight für autostereoskopische 3D-Displays. *Diplomarbeit*. Fachhochschule Lübeck.
- Kroker, L. (2008). Transmissionsmessung des LC-Modulators. Dresden: Fraunhofer IPMS.
- Kroker, L. (9. September 2010). Themenbeschreibung Aufbau eines Charakterisierungsmessplatzes für ein 3D-Display. Dresden: Fraunhofer IPMS.
- Meschede, D. (2010). Mechanik des starren Körpers. In *Gerthsen Physik* (S. 69-98). Springer Berlin Heidelberg. DOI Link: 10.1007/978-3-642-12894-3_3
- Newport Corporation. (2009). Niederleistungs-Detektoren. Newport Ressource Catalog, S. 1176.
- Nintendo. (15. Juni 2010). *Introducing the Nintendo 3DS system*. Abgerufen am 19. Januar 2011 von http://e3.nintendo.com/3ds/
- Owis GmbH. (14. 12. 2009). *Datenblatt Drehtisch DMT* 65. Abgerufen am 12. 10. 2010 von http://www.owis-staufen.de/php/web8/pdf/pi_dmt_65.pdf
- Potel, M. (2005). Forget the Funny Glasses. *IEEE Computer Graphics and Applications* (S. 14-19). Washington, DC: IEEE Computer Society.
- Poynton, C. (16. Dezember 2002). *Gamma FAQ Frequently Asked Questions about Gamma*. Abgerufen am 24. Januar 2011 von http://www.poynton.com/notes/colour_and_gamma/GammaFAQ.html

- Schmidt-Ploch, U. C. (2001). *Die Lochkamera Abbildungsoptimierung Physikalische Hintergründe*. Freiburg i. Br.: SP-Verlag.
- Scholles, M. (21. Juli 2008). Entwicklung 3D-Display. *Forschungslastenheft*. Dresden: Fraunhofer IPMS.
- Seuntiens, P., Meesters, L., & Ijsselsteijn, W. (2005). Perceptual attributes of crosstalk in 3D images. *Displays 26* (S. 177–183). Eindhoven: Science Direct.
- Toshiba Mobile Display Co. Ltd. (27. April 2010). *Toshiba Mobile Display Develops 21-inch Autostereoscopic High-definition Display*. Abgerufen am 19. Januar 2011 von http://www.tmdisplay.com/tm_dsp/press/2010/10-04-27_e.html
- TPO Displays Corporation. (2006). TFT LCD Specification TD035TTEA3. Hamburg.
- Trost, R. (2008). Adaptives Backlight für ein OLED-basiertes autostereoskopisches Display. *Masterarbeit.* HTW Dresden.
- VESA Display Metrology Committee. (Juni 2001). Flat Panel Display Measurements Standard Version 2. Newark.
- Zantke, K. (18. November 2010). *Sharp Lynx 3D: Smartphone mit 3D Display und 3D Software*. Abgerufen am 9. Dezember 2010 von http://neuerdings.com/2010/11/18/sharp-lynx-3d-smartphone-mit-3d-display-und-3d-software/

Eidesstattliche Erklärung

"Ich versichere an Eides statt, die von mir vorgelegte Arbeit selbstständig verfasst zu haben. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder nicht veröffentlichten Arbeiten anderer entnommen sind, habe ich als entnommen kenntlich gemacht. Sämtliche Quellen und Hilfsmittel, die ich für die Arbeit benutzt habe, sind angegeben. Die Arbeit hat mit gleichem Inhalt bzw. in wesentlichen Teilen noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen."

Ort, Datum

Unterschrift

Anhang

- Ganntplan
- Vorgaben aus dem Lastenheft des IPMS-Demonstrator
- Materialliste 3D-Charakterisierungsmessplatz
- Konstruktionszeichnungen für den 3D-Charakterisierungsmessplatz
- Konstruktionszeichnungen für den Drehteller
- Testbilder
- Rohmesswerte 2D
- Rohmesswerte 3D
- CD mit PDF-Datei dieser Arbeit





Auszüge aus Lastenheft (Scholles, 2008)

Folgende relevante Eigenschaften wurden für den IPMS-Demosntrator angegeben.

Parameter	Formelzeichen	Min	Tvn	Max	Finheit
1 drameter	Tomezetenen	Hintorgrundhold	1 yp.	IviaA.	Linnen
C					
Screendlagonale	D		3,5		
Breite	B _{BL}		100		mm
Weite	H _{BL}		100		mm
Seitenverhältnis			4:3		
Leuchtdichte	L _{dis}	700	1000	1900	cd/m ²
Bildwiederholrate	f_{dis}	0		100	Hz
OLED Spannung	V _{OLED}	0	6	12	V
OLED Strom			150		mA
Gleichmäßigkeit	uniformity	25	50		%
	•	3D-Parame	eter	•	
Anzahl Viewing-	N _{VZ}	4		6	
Zones					
Augenabstand	IPD		60		mm
Optimaler Betrach-	OVD		500		mm
tungsabstand					
3D Bewegungsfrei-	W _{3D}		±20		mm
heit					
3D Leuchtdichte	Y _{3DW}	50	50	150	cd/m ²
Gleichmäßigkeit der	ΔY_{3D}		50		
Viewing-Zones					
3D-Crosstalk				20	%
		Elektrische Par	ameter	•	
Spannung	U	11	12	13	V
Leistungsaufnahme	Р		10		W
		Sonstige Para	meter		
Response Time	(TR+TF)		20		ms
Kontrast			300:1		
Farbtiefe			6		bit
Anzahl der Punkte			320x240xRGB		Dot
Aktive Fläche			70,08 x 52,56		mm
Pixelabmaße			0,219x0,073		mm

Systemspezifikation für den 3D-Demonstrator (Scholles, 2008)

Anzahl	Material					
Mechanik						
4	2,5" Vierkantschiene 450 mm					
4	2,5" Vierkantschiene 900 mm					
5	2,5" Vierkantschiene 700 mm					
8	3-Wege-Ecken					
2	Schwarzer Karton 20" x 30", Dicke 1/16", 5 Bögen					
1	Schwarzes Maskierungsband (25 mm x 55 m) Rolle					
2	2,5" Befestigungsklemmen					
1	Schwarze Schraubenbox M6 - 10 (100 Stück)					
1	1x optisches Breadboard 1000x750 mm					
1	Drehteller mit Spezialaufbau					
1	Lochblende 1mm mit 2,5" Tube					
1	Linos Schienesystem 500mm					
1	C-Mount für Messkopf					
1	Linos Flachschienenreiter					
2	Stativstifte 75 mm inkl. Halterung und Muttern					
1	Schwarze Schraubenbox 1/4"-20 (25 Stück)					
1	Abstandsplatte 85x50x10 mm					
Geräte						
1	Windows - PC mit serieller Schnittstelle und USB					
1	Newport Optical Power Meter 1930 mit Niederleistungsdetektor 918SL					
1	Owis Drehtisch DMT 65					
1	Schrittmotorensteuerkarte Owis SM32					
1	Hameg Labornetzgerät HM8142					
1	21" TFT Display					
1	230V 3er Verteilsteckdose					
1	Tastatur und Maus					
	Software					
1	National Instruments Labview ab Version 7					
1	Labview Bibliothek Optical Power Meter 1930					
1	Labview Bibliothek Schrittmotorensteuerkarte SM32					
1	Labview Bibliothek VIA					
	Kabel					
1	Sub-D 9 Pol Kabel mit Adapter auf UART Schnittstelle 2 m					
1	Sub-D 15Pol Kabel 2 m					
1	USB-A auf USB-B Kabel 2 m					
3	Netzkabel Schuko 2 m					
2	Laborstromkabel mit Krokodilsklemmen 2 m					

Materialliste 3D-Charakterisierungsmessplatz



Konstruktion 3D-Charakterisierungsmessplatz (Draufsicht)



Konstruktion 3D-Charakterisierungsmessplatz (Seitenansicht)



Konstruktion Drehteller



Testbilder

Folgende Sequenzen wurden für die Messung der Eigenschaften genutzt:



Weiß (255,255,255) Rot (255,0,0) Grün (0,255,0) Blau (0,0,255) Schwarz (0,0,0)

Die Gamma-Messung verwendete für beide Teilbilder ein vollflächiges Grau mit folgender Abstufung (RGB=V):

16 Grauabstufungen für die Gammamessung

Level a	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Wert V	0	17	34	51	68	85	102	119	136	153	170	187	204	221	238	255

Rohmesswerte 2D

Mit dem Autronic-Melcher DMS-401 Messplatz wurde das Backlight V2723#9 gemessen.

Backlight - Gamm	a
Strom I /A	Rel. Leuchtdichte L / %
0	0,027691
0,0125	0,027611
0,025	13,194
0,0375	19,699
0,05	26,136
0,0625	32,471
0,075	38,757
0,0875	45,03
0,1	51,245
0,1125	57,307
0,125	63,514
0,1375	69,687
0,15	75,782
0,1625	81,833
0,175	87,883
0,1875	93,956
0,2	100

Backlight - Gleichmäßigkeit der Farbe

X/mm	Y/mm	x	у	n	T _{CCT}
-32,32	-25,65	0,31696	0,3925	0,072762458	6033
0	-25,65	0,3219	0,3962	0,048003802	5853
32,32	-25,65	0,33227	0,40974	-0,00120568	5509
-32,32	0	0,34647	0,41873	-0,062121667	5106
0	0	0,33156	0,40318	0,002024105	5531
32,32	0	0,36066	0,4325	-0,11617349	4771
-32,32	25,65	0,3244	0,39887	0,035669029	5765
0	25,65	0,32378	0,39696	0,038927827	5788
32,32	25,65	0,36463	0,43641	-0,130202306	4688

Backlight - Gleichmäßigkeit der relativen Leuchtdichte L in Prozent:

X /mm zu Y /mm	-25,65	0	25,65
-32,32	27	40	100
0	92	65	94
32,32	51	31	91

Linker Winkel θ /°	rel. Leuchtdichte L /%	rechter Winkel θ /°	rel. Leuchtdichte L /%
0	100	0	100
5	99	5	99
10	97	10	98
15	95	15	96
20	92	20	93
25	87	25	88
30	82	30	83
35	75	35	77
40	68	40	69
45	60	45	61
50	53	50	53
55	44	55	44

Backlight - Winkelabhängigkeit der relativen Leuchtdichte L in Prozent:

Backlight - Winkelabhängigkeit der Farbe

Winkel links /°	0	-5	-10	-15	-20	-25	-30	-35	-40	-45
X	0,331	0,330	0,327	0,320	0,311	0,300	0,286	0,271	0,255	0,239
у	0,402	0,401	0,400	0,397	0,393	0,386	0,376	0,363	0,346	0,325
u'	0,185	0,185	0,183	0,180	0,176	0,171	0,165	0,159	0,153	0,149
V'	0,505	0,505	0,504	0,502	0,499	0,494	0,488	0,479	0,469	0,456
$\Delta u'v'$	0,000	0,000	0,002	0,006	0,011	0,018	0,026	0,036	0,048	0,061
n	0,006	0,009	0,026	0,055	0,100	0,159	0,241	0,346	0,480	0,664
T _{CCT} /K	5555	5577	5695	5907	6240	6694	7381	8332	9676	11769
Winkel rechts /°	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
X	0,330	0,330	0,326	0,320	0,311	0,300	0,286	0,271	0,255	0,239
У	0,401	0,401	0,399	0,397	0,392	0,386	0,376	0,363	0,346	0,325
u'	0,185	0,184	0,183	0,180	0,176	0,171	0,165	0,159	0,153	0,149
v'	0,505	0,505	0,503	0,501	0,498	0,494	0,488	0,479	0,469	0,456
$\Delta u'v'$	0,000	0,000	0,002	0,006	0,011	0,018	0,026	0,036	0,048	0,061
n	0,008	0,011	0,027	0,057	0,102	0,160	0,243	0,347	0,481	0,666
T _{CCT} /K	5571	5592	5706	5920	6253	6706	7392	8343	9690	11790

Leuchtdichte L / cd/m ²	log. Leuchtdichte L	Level a	Wert v	log. Wert v	Gammakurve
0,03061	0	0	0	0	#ZAHL!
0,05103	-1,689944262	1	17	1,230448921	-1,373437152
0,1393	-0,963810411	2	34	1,531478917	-0,525951282
0,2889	-0,587892408	3	51	1,707570176	-0,269096312
0,5976	-0,246424601	4	68	1,832508913	-0,101218988
0,9698	-0,02724654	5	85	1,929418926	-0,010366251
1,275	0,094956512	6	102	2,008600172	0,034074267
1,595	0,194345031	7	119	2,075546961	0,066541819
2,185	0,333324325	8	136	2,133538908	0,109767883
2,598	0,409491845	9	153	2,184691431	0,130455707
3,064	0,481928251	10	170	2,230448921	0,149183059
3,892	0,586743668	11	187	2,271841607	0,177090908
4,935	0,690584998	12	204	2,309630167	0,203783839
6,078	0,781567977	13	221	2,344392274	0,22599541
7,502	0,873401407	14	238	2,376576957	0,247934871
10,2019	1,007376037	15	255	2,40654018	0,281183274

Gammamessung des Gesamtsystems

Farbkoordinaten vom Gesamtsystem

Farbe	x-Koordinate	y -Koordinate
Weiß	0,2795	0,3504
Rot	0,5494	0,3937
Grün	0,3124	0,5314
Blau	0,1362	0,1376

Rohmesswerte 3D

Mit dem entwickelten 3D-Charakterisierungsmessplatz wurde der IPMS-Demonstrator mit Backlight V2723#9 als Gesamtsystem gemessen. Es wurden 200 Messpunkte bei 50cm Abstand aufgenommen.

