



Entwurf und wellenoptische Optimierung autostereoskopischer Anzeigen mit dynamischen Parallaxebarrieren

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTORs der NATURWISSENSCHAFTEN (Dr. rer. nat.)

dem Fachbereich Physik
der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster
vorgelegte

DISSERTATION

von

M.Sc. Christoph Ewen

geboren am 15.05.1984 in Wiesbaden

Dezember 2017

Dekan:	Prof. Dr. Michael Klasen
Erste Gutachterin:	Prof. Dr. Cornelia Denz
Zweiter Gutachter:	Prof. Dr. Tilmann Kuhn
Tag der mündlichen Prüfung:	8.06.2018

für meine Großmutter

Dorothea

Der beste Weg, die Zukunft vorauszusagen,
ist, sie zu gestalten.

Willy Brandt

Abstract

Die vorliegende Arbeit beschreibt die Entwicklung einer **autostereoskopischen Anzeige** für den Einsatz im Automobil. Bisherige Arbeiten in diesem Bereich beschäftigten sich mit dem Nachweis des Nutzens einer solchen Anzeige und der Frage welche Inhalte darauf dargestellt werden könnten. Diese Arbeit hat die physikalische Entwicklung einer Anzeige zum Ziel, welche alle optischen und funktionalen Anforderungen für den Einsatz im Automobil erfüllt. Ein Unterfangen welches zuvor noch nicht unternommen wurde.

Ausgehend von der Idee über die Definition der Anforderungen an eine solche Anzeige wird der Technologieansatz von **dynamischem Barriemasken** bis zur prototypischen Anzeige entwickelt.

Im Kern gilt es das inverse optische Problem zu lösen, die abbildenden Eigenschaften der Barriemaske zu bestimmen, um am Ort des Betrachters eine Leuchtdichtevertelung zu erzeugen, die auch bei dynamischen Bewegungen eine störungsfreie Wahrnehmung ermöglicht.

Hierbei hat es sich gezeigt, dass es eine geometrisch-optische Betrachtung auf Grund von Beugung nicht ausreichend ist. Es wurde daher ein **wellen-optisches Modell** entwickelt, welches es ermöglicht die Leuchtdichtevertelung mit hoher Genauigkeit zu berechnen. Es wird gezeigt, wie durch das Einbringen von Amplituden-verändernden und Phasen-verschiebenden Elementen die optischen Eigenschaften wellen-optisch optimiert werden können.

Des Weiteren werden neue Methoden vorgestellt, wie der begrenzte Bereich der stereoskopischen Wahrnehmung durch **diskrete Anpassung der Barriere auf variable Betrachtungsabstände** adaptiert werden kann.

Die entwickelten Methoden trugen maßgeblich zur erfolgreichen Umsetzung einer prototypischen Anzeige bei, welche die qualitativen Anforderungen für den Einsatz im Automobil erfüllt.

This thesis describes the development of an **autostereoscopic display** for the use in the automobile. Latest research in this field focused on the advantages and use-cases of such a display. This work's main topic is the development of a display in hardware, which fulfills all optical and functional requirements for the use in automotive. Such an endeavor has not been undertaken before.

Starting from the idea, along the definition of the requirements for such a display, the technical approach of **dynamic barrier masks** was developed into prototype displays.

The core challenge is to solve the inverse optical problem to determine the imaging properties of the barrier mask to realize a luminance distribution at the position of the viewer, which enables a perception free of distortion, especially during dynamic movement.

It became clear that a pure geometric-optical approach is not sufficient, due to the influence of diffraction. Therefore, a **wave optical model** was developed, which is used to calculate the luminance distribution with high accuracy. New methods are presented on how the optical performance is optimized by implementing amplitude-changing and phase-shifting elements.

Additionally, completely new concepts were developed for **discrete adaptation** of the zone of stereoscopic perception on **variable viewing distances**.

The developed methods significantly contributed to the successful realization of a sample display, which fulfills the quality requirements for the use in an automobile.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen der Arbeit des Autors in der Vorentwicklung der Daimler AG im Team Displays. Bedanken möchte ich mich bei der Firma Daimler AG, welche mir die finanziellen und materiellen Mittel zur Durchführung dieser Arbeit zur Verfügung gestellt hat.

Ein besonderer Dank geht an Dr. Bernhard Straub, Leiter des Teams Displays, der mich bis zuletzt insbesondere in einem wandelnden Umfeld immer unterstützt und ermutigt hat.

Ebenfalls will ich mich bei meiner Doktormutter Frau Prof. Dr. Cornelia Denz bedanken. Durch ihre herzliche Art half Sie mir, wenn nötig, den Fokus auf das Wesentliche zu lenken und gab mir zugleich die Freiheiten, die ich brauchte.

Meiner Familie und meinen Freunden will ich meinen tiefsten Dank aussprechen, ihr habt mir die Kraft gegeben, dorthin zu kommen, wo ich heute stehe.

Meinen größten Dank möchte ich Dr. Markus Kreuzer aussprechen, der meine Arbeit nicht nur inhaltlich betreut hat, sondern mir auch völlig neue Denkweisen und Perspektiven aufzeigte. Seine beeindruckende Gabe Dinge zu durchdenken, Wege aufzuzeigen, aber immer einem selbst die Wahl zu lassen diese zu beschreiten hat mich geprägt. Ich bin sehr dankbar ihn inzwischen auch einen guten Freund nennen zu dürfen.

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung und Einordnung der Arbeit	13
2 Bestimmung der optischen Zielfunktion	25
2.1 Anzeigen im Automobil	25
2.2 Zielvorgabe: Räumliche Anzeige im Kombiinstrument	26
2.3 Wahl des Technologie-Ansatzes	30
2.3.1 Räumliche Wahrnehmung	30
2.3.2 Erzeugung von Inhalten mit künstlicher Tiefe	34
2.3.3 Räumliche Anzeigetechnologien (3D-Displays)	37
2.3.3.1 Holografische Anzeigen	39
2.3.3.2 Volumetrische Anzeigen	40
2.3.3.3 Integral Imaging	42
2.3.3.4 Stereoskopische Anzeigen	44
2.3.3.5 Autostereoskopische Anzeigen (ASDs)	47
2.3.4 Konzept des Technologieansatzes	56
2.4 Optische Zielfunktion für ein 3D-Kombiinstrument	57
2.4.1 Charakterisierung Autostereoskopischer Anzeigen	58
2.4.1.1 Allgemeine Charakterisierung einer Anzeige	58
2.4.1.2 Abstrahlcharakteristik	59
2.4.1.3 Crosstalk	61
2.4.2 Definition der Optischen Zielfunktion für ein 3D-Kombiinstru- ment	64
2.5 Zusammenfassung Kapitel 2	69
3 Anzeigefunktion und Vorgehen zur Bestimmung der Abbildungs- funktion	71
3.1 Anzeigefunktion für ein 3D-Kombiinstrument	71
3.2 Vorgehen zur Bestimmung der Abbildungsfunktion	77

3.3	Zusammenfassung Kapitel 3	81
4	Geometrisch optische Bestimmung der Abbildungsfunktion	82
4.1	Allgemeiner Entwurf einer Parallaxebarriere	82
4.1.1	Definition der statischen Parameter einer Parallaxebarriere	83
4.2	Anzeigen- und statischen Barriereparameter für eine Anzeige im Automobil	91
4.2.1	Inverse geometrisch-optische Bestimmung der Anzeige- und Abbildungsfunktion	91
4.3	Dynamischen Parameter einer Parallaxebarriere	98
4.3.1	Festlegung der Barriereauflösung für eine Anzeige im Automobil	100
4.4	Untersuchung der stereoskopischen Qualität der Prototypischen Anzeige 1	101
4.4.1	Aufbau der Anzeige	101
4.4.2	Visuelle Untersuchung und Bewertung der Anzeige	106
4.4.3	Messung der statischen Anzeigeeigenschaften	108
4.4.4	Auswertung der statischen Anzeigeeigenschaften	114
4.4.5	Messung und Auswertung der dynamischen Anzeigeeigenschaften	126
4.4.6	Diskussion der Experimentellen Untersuchung	153
4.5	Probandenstudie im Fahrsimulator zur Evaluierung der Zielerreichung	156
4.5.1	Ziel des Versuchs	156
4.5.2	Versuchsplanung und Ablauf	158
4.5.3	Versuchsdurchführung	164
4.5.4	Auswertung	165
4.5.5	Diskussion des Probandenversuchs	173
4.6	Zusammenfassung Kapitel 4	174
5	Adaption von Parallaxebarrieren auf variable Betrachtungsabstände	177
5.1	Grundlagen der Adaption auf den Betrachtungsabstand	178
5.1.1	Größe der statischen 3D-Stereozone	178

5.1.2	Adaption auf variable Betrachtungsabstände	180
5.1.3	Parameter zur Beeinflussung des Betrachtungsabstandes von Parallaxebarrieren	181
5.1.4	Möglichkeiten der Abstandsadaption	182
5.2	Experimentelle Untersuchung der Diskreten Abstandsadaption- methode Voll-Pitch	189
5.2.1	Diskrete Adaptionmethode: Voll-Pitch	189
5.2.2	Aufbau: Vorversuch Adaptionmethode Voll-Pitch	195
5.2.3	Messung: Adaptionmethode Voll-Pitch	199
5.2.4	Auswertung: Adaptionmethode Voll-Pitch	200
5.2.5	Visuelle Bewertung: Adaptionmethode Voll-Pitch	212
5.2.6	Diskussion: Vorversuch Adaptionmethode Voll-Pitch	213
5.3	Experimentelle Untersuchung der Diskreten Abstandsadaption- methode Halb-Pitch	215
5.3.1	Diskrete Adaptionmethode: Halb-Pitch	216
5.3.2	Aufbau: Prototypische Anzeige 2 mit Halb-Pitch Methode	222
5.3.3	Messung und Auswertung: Adaptionmethode Halb-Pitch	229
5.3.4	Visuelle Bewertung: Adaptionmethode Halb-Pitch	238
5.3.5	Diskussion: Adaptionmethode Halb-Pitch	239
5.4	Numerische Simulation der Adaptionmethoden	242
5.4.1	Diskrete Adaptionmethode: Fixer Voll-Pitch	242
5.4.2	Simulationsgrundlage	245
5.4.3	Simulation der Abstandsadaption am Beispiel der Fixen Vol- l-Pitch Methode	246
5.4.4	Vergleich der Methoden zur Adaption auf den Betrachtungs- abstand	261
5.4.5	Diskussion: Vergleich der Methoden zur Adaption auf den Be- trachtungsabstand	270
5.5	Zusammenfassung Kapitel 5	275

6.1	Wellenoptische Simulation einer Anzeige mit Parallaxebarriere	278
6.1.1	Der historische Weg zu Beugungsintegral	278
6.1.2	Geometrie des Modells	280
6.1.3	Mathematische Beschreibung der Beugung einer Parallaxebarriere	281
6.1.4	Eindimensionale Numerische Simulation der Abstrahlcharakteristik	287
6.1.5	Vergleich und Diskussion der Simulation mit der Messung	297
6.2	Wellenoptische Optimierung von Parallaxebarrieren	300
6.2.1	Optimierungsproblem	300
6.2.2	Möglichkeiten der Optimierung	302
6.2.3	Optimierung einer Anzeige mit Parallaxebarriere	306
6.2.4	Herstellung der Phasen- und Amplitudenmasken	311
6.2.5	Vorversuch zur wellenoptischen Optimierung	314
6.2.6	Optimierung der Abstrahlcharakteristik der Prototypischen Anzeige 2	316
6.2.7	Messung der Abstrahlcharakteristik	317
6.2.8	Ergebnis der wellenoptischen Optimierung	318
6.2.9	Diskussion der wellenoptischen Optimierung	322
6.3	Zusammenfassung Kapitel 6	323
7	Zusammenfassung und Ausblick	327
8	Glossar	331
	Literaturverzeichnis	333
A	Anhang	359
A.1	Erstellte Inhalte für die Anzeige auf einem 3D-Kombiinstrument	359
A.2	Fahrsimulatorversuch: Fragebögen mit Anweisungen für Versuchsleiter	363
A.3	Matlab Simulationscode	372
A.3.1	Code: Abstandsadaption	372
A.3.2	Code: Wellen-Optische Simulation	388

1. Zielsetzung und Einordnung der Arbeit

„Wir verfügen nicht ohne Grund über die Fähigkeit in Stereo-3D zu sehen. Sie machte uns zu besseren Jägern, ließ uns Raubtiere früher erkennen und vor ihnen entkommen. Wieso sollten wir dieses Erbe aus Jäger- und Sammlerzeiten nicht auch heute bei der Arbeit, in der Freizeit und Unterhaltung einsetzen, kurzum überall da, wo wir die Welt visuell erleben?“

– James Cameron, *Regisseur*

Das Zitat des Regisseurs James Cameron, der mit seinem Film Avatar im Jahr 2009 einen Meilenstein der „3D“-Filmkunst schuf, rückt die Frage in den Mittelpunkt, warum sich bis heute keine (optischen) Anzeigen mit räumlicher Tiefe durchgesetzt haben, obwohl es für den Menschen natürlich ist, seine Umgebung räumlich wahrzunehmen!

Optische Anzeigen zur Darstellung eines Abbildes einer realen Szene oder künstlicher Inhalte haben sich ausgehend von der Projektion monochromer Standbilder über bewegte Aufnahmen bis zur heutigen Darstellung von hochauflösenden farbigen Animationen und Filmen immer mehr der natürlichen menschlichen Wahrnehmung angenähert. Die Weiterentwicklung zu Anzeigen mit einer räumlicher Darstellung erscheint somit als logischer Schritt auf dem Weg zu einer realistischen Reproduktion einer wahrgenommenen Szene.

Die Entwicklung von dreidimensionalen Anzeigentechniken ist dabei keine neuzeitige Erscheinung, schon vor 150 Jahren erkannte der Engländer Sir Charles Wheatstone das Prinzip der Stereoskopie. Dieses nutzt die physiologischen Eigenschaften der menschlichen Wahrnehmung aus, sodass ein Betrachter bei Darstellung zweier unterschiedlicher, zweidimensionaler Abbildungen für das linke und rechte Auge künstliche Tiefe erfahren kann, die physikalisch nicht vorhanden ist.

Die Entwicklung verlief seitdem in Wellenbewegungen mit Höhepunkten im 19. Jahrhundert mit der Stereo-Fotografie, einer kurzzeitigen Phase von Stereo-Kinofilmen

in den 1950er Jahren bis zum letzten Höhepunkt in den vergangenen Jahren, dessen Ausprägung hauptsächlich im Kino und Fernsbereich stattfand. Der Boom der vergangenen Jahre wurde dabei maßgeblich durch die Digitalisierung vorangetrieben, die eine präzise Kontrolle von Stereoparameter ermöglicht, wodurch auch längere Filme nicht mehr zu einer visuellen Überforderung der Betrachter führen. Während sich im Kinobereich 3D-Filme als eigene Kunstform neben klassischen, monoskopischen (2D) Filmen etabliert zu haben scheinen, ist die anfängliche Euphorie im Heimbereich, verbunden mit einem deutlichen Anstieg verkaufter 3D-TV-Geräte, einer Ernüchterung gewichen. Als größter Kritikpunkte wird die Notwendigkeit eines Hilfsmittels zur Trennung der linken und rechten Ansicht in Form einer Brille angeführt.

Die vorliegende Arbeit befasst sich daher mit der Weiterentwicklung brillenloser Anzeigetechnologien mit dem Ziel eines Einsatzes im Automobil.

Systematische Beschreibung einer autostereoskopischen Anzeige

Räumliche Anzeigen im Automobil sind ein bisher wenig erforschtes Thema. Bisherige Arbeiten beschäftigen sich hauptsächlich mit der Untersuchung des Nutzen [1] einer solchen Anzeige, der darzustellenden Inhalte und der physiologischen Wahrnehmung [2] dieser. Eine Beschreibung der physikalischen Anforderungen, einem technischen Ansatz, bis hin zu einer funktionierenden Anzeige für den Einsatz im Automobil wurde bisher nicht untersucht. Bis auf Ankündigungen verschiedener Automobilhersteller ist keine Umsetzung mit der Qualität einer Serienfertigung bekannt.

Die vorliegende Arbeit wird eingerahmt durch eine neu entwickelte Systematik zur Beschreibung einer brillenlosen, räumlichen Anzeige. Die Systematik wird verwendet, um für ein gegebenes Anforderungsprofil die geeignetste Ausgangstechnologie zu identifizieren, notwendige Entwicklungsschritte abzuleiten und den Erfolg der getroffenen Maßnahmen zu bewerten.

Die im Weiteren vorgestellte Systematik wurde mit dem Fokus auf autostereoskopische Anzeigen entwickelt, kann aber auf alle Arten der räumlichen Anzeigen angewendet werden. Autostereoskopische Anzeigen (englisch „autostereoscopic display“ [ASD]) sind eine Untergruppe der räumlichen Anzeigen. Sie stellen die meist ver-

breitete Technologie der brillenlosen Anzeigen dar. Die Anzeige strahlt hierbei die Ansichten für das linke und rechte Auge in unterschiedliche Raumbereiche ab. Befindet sich ein Betrachter mit beiden Augen in Bereichen unterschiedlicher Ansichten, kann er ein stereoskopisches Bild wahrnehmen.

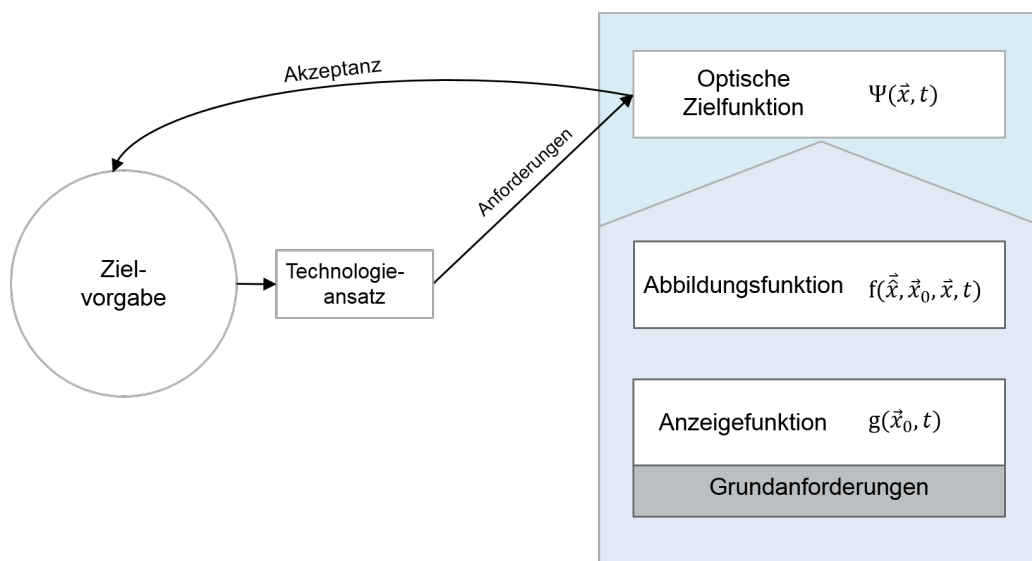


Abbildung 1.1: Systematische Darstellung einer autostereoskopischen Anzeige (rechts im Bild) und deren Entwicklungsprozess (links im Bild)

In Abbildung 1.1 ist die systematische Darstellung der Funktionsweise einer autostereoskopischen Anzeige und deren Entwicklungsprozess abgebildet. Auf der rechten Seite ist die Anzeige dargestellt. Diese wird beschrieben durch eine Anzeigefunktion, welche die geometrischen und optischen Eigenschaften des Bildgebers beschreibt. Einer Abbildungsfunktion, welche das vom Bildgeber abstrahlte Licht so abbildet, dass am Ort des Betrachters eine Helligkeitsverteilung entsteht, die idealerweise der optische Zielfunktion entspricht und dem Betrachter eine räumliche Wahrnehmung ermöglicht.

Auf der linken Seite des Schaubildes ist die Zielvorgabe dargestellt, welche den angestrebten Einsatzzweck beschreibt und den Startpunkt des Entwicklungsprozesses bildet. Aus dieser wird der technologische Ansatz abgeleitet, welcher die Art und das Aussehen der optischen Zielfunktion bestimmt.

Zielvorgabe

Die Zielvorgabe ist eine qualitative Beschreibung des Einsatzzweckes der Anzeige. Sie beinhaltet somit keine Vorgaben für quantitative Messgrößen, sondern beschreibt allgemein das zu erreichende Ziel.

Die folgenden Fragen sind exemplarische Punkte, die für eine Definition der Zielvorgabe geklärt werden müssen:

- Wie viele Betrachter müssen gleichzeitig ein stereoskopisches Bild wahrnehmen können?
- Können sich die Betrachter frei im Raum vor der Anzeige bewegen?
- Wie groß ist der Betrachtungsraum, in dem ein dreidimensionales Bild wahrgenommen werden soll?
- Welche Inhalte sollen auf der Anzeige dargestellt werden, z.B. Text oder Filme?
- In welcher Umgebung soll die Anzeige eingesetzt werden, z.B. Automobil oder medizintechnischer Einsatz?
- In welchem Zeitraum soll die Anzeige Marktreife erreichen?

In dieser Arbeit besteht die Zielvorgabe in der Entwicklung einer räumlichen Anzeige für das Automobil.

Die Entwicklung von Anzeigen im Automobilbereich ist geprägt durch eine kontinuierliche Zunahme der Anzeigenfläche, um die Visualisierung der ebenfalls stetig steigenden Datenmenge von Infotainment-, Telematik- und Assistenzsystemen zu ermöglichen. Als zunehmend bestimmendes Element des Fahrzeuginnenraums steigen die Anforderungen an die Integration und die Wertanmutung einer Anzeige. Eine räumliche Anzeige durchbricht die Strenge einer flachen Anzeigenebene und verbindet innovative Technologie mit neuen Designmöglichkeiten zu einer attraktiven, hochwertigen Anzeigelösung.

Die Fahrzeugumgebung stellt dabei Chance und Herausforderung zugleich dar. Sie hat auf der einen Seite den Vorteil, dass die Freiheitsgrade der Anzahl der Betrachter und der Positionen eines Betrachters vor einer Anzeige begrenzt sind, zugleich stellt der Einsatz als Informationsanzeige in einer Fahrzeugumgebung und die damit verbundenen Anforderungen an die Ablesbarkeit, Störungsfreiheit und Ausfallsicherheit eine große Herausforderung dar.

Bei der in dieser Arbeit untersuchten Anzeige handelt es sich um das sogenannte Kombiinstrument. Dieses ist Teil der Instrumententafel und befindet sich hinter dem Lenkrad. Es dient primär der Anzeige fahrrelevanter Informationen wie der Geschwindigkeit, Drehzahl und dem Tankfüllstand. In vielen Fahrzeugen besteht das Kombiinstrument bis heute aus mechanischen Komponenten, die oftmals durch eine kleine multifunktionale Anzeige erweitert wird. In hochpreisigen Fahrzeugmodellen wie der S-Klasse von Mercedes wird das klassische Kombiinstrument jedoch von einer vollflächigen Flüssigkristallanzeige ersetzt (vgl. Bild 1.2). Diese Anzeige soll durch eine räumliche Darstellung aufgewertet werden. Diese automobilspezifischen



Abbildung 1.2: Interieur einer Mercedes S-Klasse (BR222) mit Kombiinstrument (links) und Zentraldisplay (rechts)

Rahmenbedingungen stehen exemplarisch für Anforderungen an eine räumliche Anzeige, denen gegenüber eine Vielzahl von technologischen Ansätzen steht.

Auf Basis der Zielvorgabe wird aus der Vielfalt von 3D-Darstellungstechnologien der aussichtsreichste Technologieansatz gewählt.

Vom Standpunkt der Physik betrachtet besteht eine räumliche Szene aus einer Zusammenstellung von materiellen Objekten im Raum. Ein Betrachter nimmt Lichtstrahlen wahr, die bei selbstemittierenden Objekten von diesen erzeugt werden oder anderenfalls abhängig von den physikalischen Eigenschaften des Objekts an diesem

gestreut oder reflektiert werden. Das von einzelnen Objektpunkten ausgehende Licht, kann als elektromagnetische Welle mit Amplitude und Phase beschrieben werden. Die Überlagerung der elektromagnetischen Wellen aller Objektpunkte erzeugt ein Wellenfeld und entspricht der vollständigen optischen Beschreibung der Szene.

Eine **ideale** räumliche Anzeige müsste die physikalische Eigenschaft besitzen, das Wellenfeld einer darzustellenden Szene vollständig zu reproduzieren. Eine räumliche Darstellung solch einer Anzeige wäre nicht von einer real existierenden Szene zu unterscheiden. Ein Betrachter kann auf Objekte in unterschiedlichen Tiefen akkommodieren und erfährt bei Änderung seiner Position ein Perspektivwechsel.

Das bekannteste Verfahren zur Reproduktion von Wellenfeldern ist die Holografie, welche 1947 vom Physiker Dennis Gábor entdeckt wurde. Bei dieser wird unter Anwendung der Prinzipien der Interferenz und Kohärenz ein Wellenfeld in einem Hologramm gespeichert, welches dem Abbild der Fouriertransformierten der dargestellten Szene entspricht. Durch geeignete kohärente Beleuchtung des Hologramms kann das ursprüngliche Wellenfeld rekonstruiert werden. Bei holografischen Anzeigen, welche animierte Inhalte darstellen, wird das Hologramm durch einen räumlichen Lichtmodulator (*engl. spatial light modulator [SLM]*) ersetzt. Technische Limitationen der realisierbaren Auflösungen des SLM und der Verarbeitung der benötigten Datenmengen beschränken bisher jedoch deutlich die Darstellungsqualität. Trotz stetiger Weiterentwicklungen werden digitale holografische Anzeigen auf absehbare Zeit nicht die Qualität aktueller monoskopischer (2D) Anzeigen erreichen können.

Um eine Anzeige mit Tiefenwirkung zu realisieren, ist es jedoch nicht zwingend notwendig das Wellenfeld zu reproduzieren. Bei der visuellen Wahrnehmung wird eine Szene von der Linse des Auges auf die Retina abgebildet. Der Mensch nimmt somit nicht das Wellenfeld selbst, sondern nur die daraus resultierende Intensität wahr. Das vom linken und rechten Auge wahrgenommene Bild unterscheidet sich in der Perspektive, da die Augen räumlich getrennt angeordnet sind.

Wird der Ansatz der vollständigen Reproduktion des Wellenfeldes auf den Fall eines festen Ortes des Betrachters beschränkt, ist es möglich, die von den beiden Augen wahrgenommene Intensitätsverteilung direkt zu erzeugen. Hierzu werden zwei zweidimensionale Bilder mit perspektivischen Unterschieden künstlich erzeugt. Nimmt

ein Betrachter diese mit den linken und rechten Augen getrennt wahr, erfährt er eine künstliche Tiefe, die physikalisch nicht vorhanden ist. Dieses Prinzip wird Stereoskopie genannt. Im Gegensatz zum Wellenfeld ist es hierbei nicht möglich, auf unterschiedliche Objekte zu akkommodieren und bei einer Änderung der Betrachtungsposition bleibt die wahrgenommene Perspektive unverändert.

Stereoskopische Anzeigen, welche ohne dieses Hilfsmittel auskommen werden autostereoskopische Anzeigen genannt. Diese ermöglichen einem Betrachter eine räumliche Wahrnehmung, indem sie die linke und rechte Ansicht in unterschiedliche Richtungen abstrahlen. Vor der Anzeige entstehen begrenzte Raumzonen, sogenannte Sweetspots, in denen nur eine Ansicht wahrgenommen werden kann. Befindet sich der Betrachter zugleich mit beiden Augen in Sweetspots unterschiedlicher Ansicht kann er gleich dem Prinzip der Stereoskopie ein räumliches Bild wahrnehmen.

Die am weit verbreitetsten ASD-Technologien sind Barriere- und Linsenmasken, welche im Kapitel 2 detailliert vorgestellt werden. Es wird ebenfalls gezeigt, dass für die Zielsetzung einer räumlichen Anzeige für den Einsatz im Automobil dynamische Parallaxebarrieren den geeignetsten Technologieansatz darstellen. Bei dieser Technologie wird die Position des Betrachters im Raum durch ein Kopferfassungssystem (*engl. head tracking system [HTS]*) bestimmt und die Barriere nachgeführt.

Mit der Wahl des Technologieansatzes wird es möglich, die qualitative Beschreibung der Zielvorgabe in quantitative Anforderungen an die optische Zielfunktion umzusetzen.

Optische Zielfunktion

Die optische Zielfunktion $\psi(\vec{x}, t)$ stellt eine quantitative Zielgröße dar, welche die von einer Anzeige abgestrahlten Ansichten an einem Ort $\vec{x} = (x, y, z)$ im Raum vor der Anzeige beschreibt.

Bei Darstellung eines stereoskopischen Bildes strahlt ein ASD unterschiedliche Ansichten für das linke und rechte Auge in separierte Raumbereiche (Sweetspots) ab. Die horizontale Ausdehnung dieser Sweetspots kann sichtbar gemacht werden, indem auf der einen Ansicht ein vollflächig weißes Bild und auf der anderen Ansicht ein schwarzes Bild angezeigt wird. In einer Ebene parallel zur Anzeige entsteht eine charakteristische Lichtintensitätsverteilung bei der sich in horizontaler Richtung

quasi-periodisch Bereiche hoher und niedriger Lichtintensität wiederholen. Wird die Zuordnung der weißen und schwarzen Bilder zur linken und rechten Ansicht invertiert, wechseln ebenfalls die Bereiche hoher und niedriger Lichtintensität. Aus der Umkehrbarkeit des Strahlengangs ergibt sich, dass ein Betrachter, dessen Auge sich in einem Raumbereich mit hoher Lichtintensität befindet, mit diesem auf der Anzeige ein vollflächig weißes Bild wahrnimmt.

Die von einem Betrachter wahrgenommene Entsprechung der physikalischen Lichtintensität ist die lichttechnische Größe der Leuchtdichte, welche den Helligkeitseindruck beschreibt. Der Leuchtdichtverlauf, welcher sich ergibt, wenn ein horizontaler Schnitt durch die Ebene im Abstand z vor der Anzeige gelegt wird, beschreibt somit die Lage und die Übergänge zwischen den Raumbereichen der linken und rechten Ansicht. Die Breite eines Bereichs, der Verlauf der Helligkeit innerhalb dieses Bereiches und der Übergang zu benachbarten Bereichen bestimmen die Eigenschaften einer Anzeige.

Die optische Zielfunktion beschreibt, wie ein idealisierter Leuchtdichteverlauf der rechten und linken Ansicht $\psi(\vec{x}, t) = L(\vec{x}, t)$ aussehen muss, um die Zielvorgabe einer ungestörten Darstellung über einen definierten Bewegungsbereich erfüllen zu können. In Ergänzung zu statischen ASDs, die räumlich feste Sweetspots erzeugen, ist es bei dynamischen ASDs möglich, durch Erfassung der Kopfposition die Sweetspots nachzuführen. Die Nachführung erfolgt prinzipiell immer latenzbehaftet, wodurch sich eine zeitliche Abhängigkeit t der Helligkeitsverteilung im Raum ergibt.

Die optische Zielfunktion gilt somit als quantitative Umsetzung der qualitativen Zielvorgaben. Ziel der Anzeigenentwicklung ist es, durch Auslegen der Anzeige- und Abbildungsfunktion die abgestrahlte Helligkeitsverteilung am Ort des Betrachters der optischen Zielfunktion bestmöglich anzugleichen. Auf Grund technischer und physikalischer Limitationen ist dies nur in Näherung möglich. In welchem Maß eine resultierende Helligkeitsverteilung die qualitativen Eigenschaften der Zielvorgabe erfüllt, muss durch Probandenbefragungen im Rahmen einer Akzeptanzstudie geprüft werden.

Anzeigefunktion

Die Anzeigefunktion beschreibt die spezifischen Eigenschaften der bildgebenden Einheit. Aus der Zielvorgabe ergeben sich Grundanforderungen an die Anzeige. Soll beispielsweise Text dargestellt werden, muss die Auflösung hoch sein. Basierend auf diesen Anforderungen und dem technologischen Ansatz wird der Bildgeber festgelegt. Im Falle autostereoskopischer Anzeigen besteht die bildgebende Einheit in der Regel aus Flüssigkristallanzeigen (englisch „Liquid Crystal Display“ [LCD]) oder Anzeigen aus organischen Leuchtdioden (englisch „Organic Light Emitting Displays“ [OLED]). Beide sind über eine räumliche, periodische Anordnung von Pixeln definiert, die sich wiederum aus farblichen Subpixeln zusammensetzen. Das Pixellayout legt die Größe und Anordnung der Subpixel und der Schwarzbereiche zwischen diesen fest. Die Anzeigefunktion $g(\vec{x}_0, t) = g(x_0, y_0, z_0, t)$ beschreibt die aus dem Pixellayout resultierende zweidimensionale Helligkeitsverteilung auf dem Bildgeber am Ort z_0 . Die zeitliche Abhängigkeit der Anzeigefunktion begründet sich in der Möglichkeit, die Zuordnung der linken und rechten Ansicht zu einzelnen Pixeln zu variieren. Beispielsweise wird bei der „Directional Backlight“-Technologie zeitsequentiell Licht aus unterschiedlichen Richtungen in die Anzeige eingestrahlt und durch eine geeignete Optik in unterschiedliche Raumbereiche abgestrahlt. Hierbei wird auf dem Bildgeber im Wechsel nur die linke oder rechte Ansicht dargestellt. Bei ASDs ist die Anzeigefunktion in der Regel zeitlich konstant.

Abbildungsfunktion

Die Abbildungsfunktion $f(\vec{x}, \vec{x}_0, \vec{x}, t)$ beschreibt eine optische Funktion, die eine gegebene Anzeigefunktion idealerweise in der Form abbildet, dass sich am Ort des Betrachters die optische Zielfunktion ergibt. Sie ist somit sowohl abhängig von der Position des abbildenden Elements \vec{x} als auch von der Position des Bildgebers \vec{x}_0 und der optischen Zielfunktion \vec{x} . Bei ASDs ist die Abbildungsfunktion verantwortlich für die Trennung der linken und rechten Ansicht. Technische Umsetzungen einer Abbildungsfunktion sind beispielsweise eine Linsenmaske oder eine Parallaxebarriere. Bei den in dieser Arbeit verwendeten dynamischen Barrieremasken ist die Abbildungsfunktion zeitlich veränderbar, um die Sweetspots auf die Kopfposition des Betrachters anzupassen.

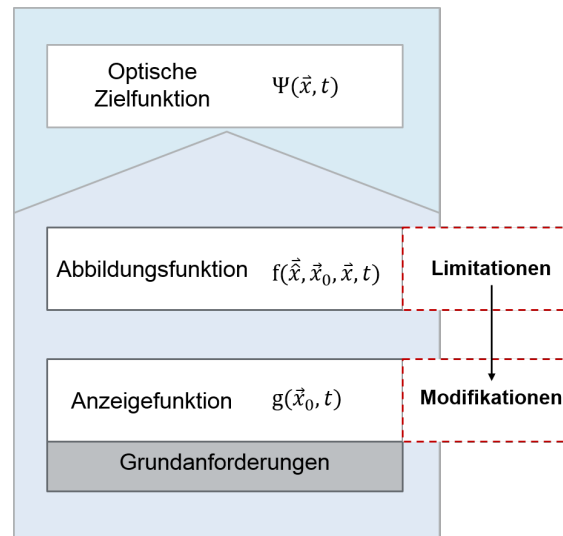


Abbildung 1.3: Technische Limitation bei der Realisierung der Abbildungsfunktion führen zu der Notwendigkeit die Anzeigefunktion und Abbildungsfunktion zu modifizieren

Die Bestimmung der Abbildungsfunktion für eine angestrebte optische Zielfunktion bei gegebenem Bildgeber stellt ein inverses optisches Problem dar. Eine mögliche Lösung unterliegt der Bedingung, dass diese auch herstellbar und technisch umsetzbar ist.

Typische Strukturen eines ASDs liegen im Mikrometerbereich, wodurch eine exakte Lösungsbestimmung rein durch geometrische Optik nicht ausreichend ist, sondern wellenoptisch erfolgen muss. Ein inverses, wellenoptisches Problem lässt sich für inkohärente Systeme, jedoch nur schwer eindeutig lösen. Eine allgemeine (mathematische) Lösung ist in der Regel nicht zielführend, da diese nur selten umsetzbar ist. In dieser Arbeit wird daher der Ansatz verfolgt eine Anzeigefunktion initial vorzugeben und für diese geometrisch-optisch eine Abbildungsfunktion zu bestimmen, die der optischen Zielfunktion möglichst nahe kommt.

Im Anschluss dienen diese Abbildungs- und Anzeigefunktionen als Ausgangspunkt für eine wellenoptische Optimierung der abgestrahlten Helligkeitsverteilung.

Unter der Berücksichtigung der technischer Limitationen bei der Herstellbarkeit werden die Abbildungs- und Anzeigefunktion im Verbund optimiert (vgl. Abb. 1.3).

Ausgangssituation der Arbeit

Autostereoskopische Anzeigen existieren bis auf einzelne wenige Anwendungen in der Unterhaltungselektronik [3], fast ausschließlich als Prototypen verschiedener Forschungseinrichtungen und Anzeigenhersteller. Im Mittelpunkt der Forschung an Anzeigen mit Barrieremasken standen bislang hauptsächlich statische Barrieremasken. Erst durch Fortschritte in der Anzeigentechnologie und der Steigerung der Qualität von Headtracking-Systemen rückten in den letzten Jahren auch dynamische Barrieremasken in den Fokus. Für diese deutlich komplexeren, zeitabhängigen Systeme existierten bisher keine Definitionen oder Messvorschriften, welche die wahrgenommene Stereoqualität während der Adaption auf eine veränderliche Betrachterposition beschreiben. Die vorliegende Arbeit liefert hierfür neue Ansätze.

ASDs für den Einsatz im Automobil sind ein bisher weitestgehend unerforschtes Gebiet. Serienproduktionsfähige Umsetzungen sind zum Zeitpunkt dieser Arbeit nicht bekannt. Ein während der Arbeit identifiziertes Problem ist die Notwendigkeit der Adaption auf den Betrachtungsabstand. Dynamische Barrieremasken bieten die Möglichkeit durch Anpassung der Barriere ihre Sweetspots lateral zu verschieben. Die longitudinale Ausdehnung der Sweetspots ist abhängig von der Breite der Anzeige. Aufgrund des festen Verbauortes der Anzeige, ihrer Breite und den variablen Betrachtungsabständen von Fahrern unterschiedlicher Körpergröße wird gezeigt, dass die longitudinale Ausdehnung eines Sweetspots nicht ausreicht den geforderten Betrachtungsabstandsbereich abzudecken. Es ergibt sich die Notwendigkeit, dass die Anzeige auch in longitudinaler Richtung die Lage der Sweetspots anpassen kann. Für ASDs mit Barrieremaske sind vor dieser Arbeit keine Lösungen bekannt. In der Arbeit werden simulative und experimentelle Untersuchungen vorgestellt mit dem Ziel, wie durch eine diskrete Anpassung des Barrierepitchs eine Adaption auf den Betrachtungsabstand erreicht werden kann.

Der angestrebte Einsatz als Informationsanzeige im Automobil stellt hohe Anforderungen an die Stereoqualität der Anzeige. Insbesondere bei der dynamischen Adaption auf laterale und longitudinale Positionsänderungen sollen keine sichtbaren Störungen auftreten. Bisherige Anzeigeentwicklungen beschränkten sich auf eine geometrisch-optische Auslegung der Anzeige und nahmen die resultierende Qualität

als gegeben hin. In Rahmen dieser Arbeit wurde ein wellenoptisches Modell eines ASDs entwickelt, das nicht nur ermöglicht, die abgestrahlte Leuchtdichteverteilung zu simulieren, sondern auch als Ausgangspunkt für eine wellenoptische Optimierung dieser dient. Es wird gezeigt, dass durch Einbringung amplitudenverändernder und phasenschiebender Elemente die Anzeige- und Abbildungsfunktion in der Form modifiziert werden kann, dass die Differenz der resultierenden Helligkeitsverteilung und der optischen Zielfunktion ihr Minimum annimmt.

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Verbesserungen wurden in zwei prototypischen Anzeigen umgesetzt, welche in enger Kooperation mit japanischen Anzeigengerstellern aufgebaut wurden.

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in sechs Kapitel.

In Kapitel 2 werden die Zielvorgabe und die Anforderungen für eine autostereoskopische Anzeige im Automobil hergeleitet. Es werden aktuell verfügbare räumliche Anzeigetechnologien bewertet und die am besten geeignete als technologischer Ansatz gewählt. Das Kapitel schließt mit der Definition der optischen Zielfunktion.

In Kapitel 3 wird das Vorgehen zur Bestimmung der Abbildungsfunktion vorgestellt. Hieraus motivieren sich die Problemstellungen der Notwendigkeit einer Adaption auf den Betrachtungsabstand und der Steigerung der Stereoqualität durch wellenoptische Optimierung.

In Kapitel 4 wird auf Grundlage der optischen Zielfunktion die Barrieremaske geometrisch-optisch entworfen und eine Anzeige aufgebaut. Der Schwerpunkt liegt auf der Untersuchung der dynamischen Adaption der Barriere auf laterale Positionsänderungen. Die Qualität der Anzeige wird in einer Akzeptanzstudie im Fahrsimulator überprüft.

Im Kapitel 5 werden Möglichkeiten der Adaption einer Parallaxebarriere auf veränderliche Betrachtungsabstände simulativ und experimentell untersucht.

Im letzten Kapitel 6 wird die wellenoptische Optimierung einer dynamischen Parallaxebarriere vorgestellt. Es wird gezeigt, dass durch die Optimierung nicht nur die wahrgenommene Qualität der statischen Anzeige, sondern auch signifikant die Qualität der dynamischen Adaption auf eine veränderte Betrachterposition gesteigert werden kann.

2. Bestimmung der optischen Zielfunktion

In dem folgenden Kapitel wird das Vorgehen zur Bestimmung der optischen Zielfunktion anhand einer Anzeige für den Einsatz im Automobil exemplarisch vorgestellt. Es werden kurz die Grundlagen des räumlichen Sehens erläutert und der Stand der aktuellen Technik dargestellt. Es wird gezeigt, dass dynamische Parallaxebarrieren den geeignetsten Technologieansatz darstellen und verschiedene Konzepte dynamischer Barrieren mit und ohne Adaption auf die Kopfposition diskutiert. Es werden Messgrößen definiert, die es ermöglichen, die Anforderungen an die optische Zielfunktion quantitativ zu beschreiben. Das Kapitel schließt mit der Definition der optischen Zielfunktion, welche die Grundlage für die Bestimmung und Optimierung der Abbildungsfunktion in den folgenden Kapiteln darstellt.

2.1 Anzeigen im Automobil

Zielsetzung dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Anzeige für den Einsatz im Automobil. Anzeigen im Automobil haben in den letzten Jahren durch den vermehrten Informationsbedarfs komplexerer Assistenz- und Infotainment Systemen¹ deutlich an Wichtigkeit gewonnen. Damit einhergehend ist eine Zunahme der Größe der Anzeigenfläche und deren Einfluss auf das Erscheinungsbild des Fahrzeuginterieurs. Räumliche Anzeigen mit künstlicher Tiefe ermöglichen die flache Anzeigenfläche aufzulösen, ohne den benötigten Bauraum zu vergrößern.

Bei der Daimler AG besteht eine über die letzten 10 Jahre hinausgehende Forschung an räumlichen Anzeigen. Es wurde hierbei bereits gezeigt, dass 3D-Anzeigen die Wertanmutung steigern [1] und dass auch auf Anzeigeflächen, die deutlich kleiner als TV-Geräte sind, ein guter Tiefeneffekt erzeugt werden kann [4]. Im Rahmen des Forschungsfahrzeug F125! [5] wurde, unter Beteiligung des Autors, der Öffent-

¹Information und Entertainment

lichkeit ein erster Ausblick auf zukünftige Anzeigekonzepte gegeben, bei denen das Kombiinstrument aus einer autostereoskopischen Anzeige besteht.



Abbildung 2.1: Anzeigekonzept Forschungsfahrzeug F125! mit 3D-Kombiinstrument, Zentralsdisplay mit gekrümmter Oberfläche und Entertainment Anzeige

Beim Kombiinstrument handelt es sich um die Anzeige hinter dem Lenkrad, die dem Fahrer relevante Informationen für die Fahraufgabe zur Verfügung stellt. Klassischerweise bestand diese aus mechanischen Anzeigen zur Geschwindigkeitsanzeige (Tachometer) und der Drehzahl des Fahrzeuges. Diese wurde in den vergangenen Jahrzehnten durch multifunktionale Bildschirme angereichert, die es ermöglichen, Informationen, die über die Primäraufgabe des Führens des Fahrzeuges hinausgehen, anzuzeigen. Die Zunahme von Assistenzsystemen wie Spurhalte-, Abstandsregel- oder Parkassistenten haben die Anzeigefläche kontinuierlich ansteigen lassen. In heutigen Baureihen des Premium- und Luxussegmentes wie der Mercedes S-Klasse, besteht das Kombiinstrument aus einer vollflächigen Flüssigkristallanzeige. Im Rahmen dieser Arbeit soll untersucht werden, wie diese Anzeige durch eine 3D-Darstellung aufgewertet werden kann.

2.2 Zielvorgabe: Räumliche Anzeige im Kombiinstrument

Die in Kapitel 1 vorgestellte Systematik einer räumlichen Anzeige wird im Folgenden auf eine 3D-Anzeige für das Kombiinstrument angewendet. Die Zielvorgabe

beschreibt dabei qualitativ das zu erreichende Ziel und muss ausreichend viele Informationen enthalten, um einen Technologieansatz zu wählen. Die folgende Auflistung stellt die Zielvorgabe für ein 3D-Kombiinstrument dar.

Größe der Anzeigefläche:

Die Größe des 3D-Kombiinstrumentes sollte idealerweise die gleiche Größe des originalen Kombiinstrumentes mit einer Bilddiagonalen von 12,3" ($\approx 310\text{mm}$) besitzen. Bei einem für den Automobilbereich typischen Seitenverhältnis von 8:3 ergibt sich eine Breite von 292 mm und eine Höhe von 109 mm der aktiven Anzeigefläche (englisch Active Area). Der Fahrer schaut jedoch beim Fahren durch das Lenkrad auf die Anzeige, daher werden wichtige Inhalte eher zentral, als am Rand der Anzeige dargestellt.

Angezeigte Inhalte:

Die Anzeige soll die gleiche Funktionalität eines monoskopischen Kombiinstrumentes aufweisen. In der Baureihe der S-Klasse (BR222) werden die Assistenzsysteme des Spurhalteassistenten, des Abstandsregelautomaten und der Navigation bildhaft mit einem beschreibenden Text dargestellt. Hinzukommt die Funktionalität des Nachtsichtassistenten, der ein Videobild einer Nachtsichtkamera großflächig auf der Anzeige darstellt. Des Weiteren können Informationen über das Fahrzeug, die Telefonfunktion und die Entertainmentauswahl über textgeführte Menülisten ausgewählt werden. Die ursprünglichen Symbolleuchten des Blinkers, Motorkontrolle, etc. werden als Symbole dargestellt. Die Geschwindigkeitsanzeige und der Drehzahlmesser werden in der Regel als klassische Rundinstrumente ausgeführt.

Das Kombiinstrument ist eine sicherheitsrelevante Komponente im Fahrzeug. Im Rahmen der funktionalen Sicherheit muss sichergestellt werden, dass bestimmte Symbole garantiert angezeigt werden (ISO 26262 [6]) und auch bei allen Umgebungslichtbedingungen ablesbar sind (ISO 15008 [7] und SAE 1757 [8]).

Ein 3D-Kombiinstrument muss somit in der Lage sein, sowohl Text als auch räumliche Objekte in hoher Qualität darzustellen.

Die wahrgenommene Qualität misst sich dabei immer an der monoskopischen Anzeige. Eine deutliche Reduzierung der Auflösung oder eine unscharfe Darstellung nur für den Zweck einer räumlichen Darstellung sind nicht akzeptabel.

Anzahl der Betrachter:

Das Kombiinstrument stellt primär Informationen für den Fahrer dar. Durch den Verbauort hinter dem Lenkrad und bei einigen Baureihen sogar leicht vertieft gelagert, kann nur der Fahrer die Anzeige voll einsehen. Eine 3D-Ausführung muss daher nur diesem zur Verfügung gestellt werden. Es gilt jedoch zu beachten, dass auch ein Beifahrer die Anzeige teilweise einsehen kann. Nimmt dieser eine gestörte Anzeige wahr, kann dies zu einer Verunsicherung führen, die vermieden werden soll. Eine Ausführung, bei der für den Beifahrer kein Bild sichtbar ist, wird als akzeptabel angesehen.

Betrachtungsbereich:

Der Betrachtungsbereich beschreibt den Bereich im Raum vor der Anzeige, in dem sich der Fahrer während der Fahrt befinden kann.

Der Abstand des Fahrers zum Kombiinstrument ist abhängig von der Fahrzeuggeometrie und der Körpergröße des Betrachters. Die SAE (Society of Automotive Engineers) definiert in ihrem Standard SAE J941 [9] einen doppelten Augenellipsoid, in dem sich für 99% aller Fahrer einer standardisierten Verteilung der amerikanischen Bevölkerung die Augen während der Fahrt befinden. Daraus abgeleitet wird ein zyklischer Augenellipsoid, welcher die Position des Nasenwurzelpunktes zwischen den Augen im Raum beschreibt. Die Reduzierung auf eine zweidimensionale Darstellung ergibt eine Augellipse. Diese Ellipse wird aus Fahrzeuggeometriedaten berechnet und unterscheidet sich zwischen verschiedenen Baureihen. Die Augellipse beschreibt statische Kopfpositionen und berücksichtigt keine dynamische Änderungen derselben. Die Daimler AG hat daher die Augellipse zu einem rechteckigen Betrachtungsbereich erweitert, der sowohl die SAE Augellipse, dynamische Kopfbewegungen und eine stärkere Berücksichtigung sehr kleiner und sehr großer Fahrer beinhaltet (vgl. Abb. 2.2). Es ergibt sich ein rechteckiger Bereich von 347 mm auf 220 mm, in dem sich ein Betrachter während der Fahrt befinden kann. Die Lage dieses Bereichs im Bezug zum Kombiinstrument unterscheidet sich zwischen den Baureihen. In der Arbeit wird daher ein leicht größerer Betrachtungsbereich angenommen. Es ergibt sich ein Betrachtungsabstandsbereich von 650 – 1000 mm und ein lateraler Bewegungs-

bereich von ± 110 mm bezüglich des geometrischen Mittelpunktes der Anzeige, in dem ein Betrachter ein stereoskopisches Bild wahrnehmen soll.

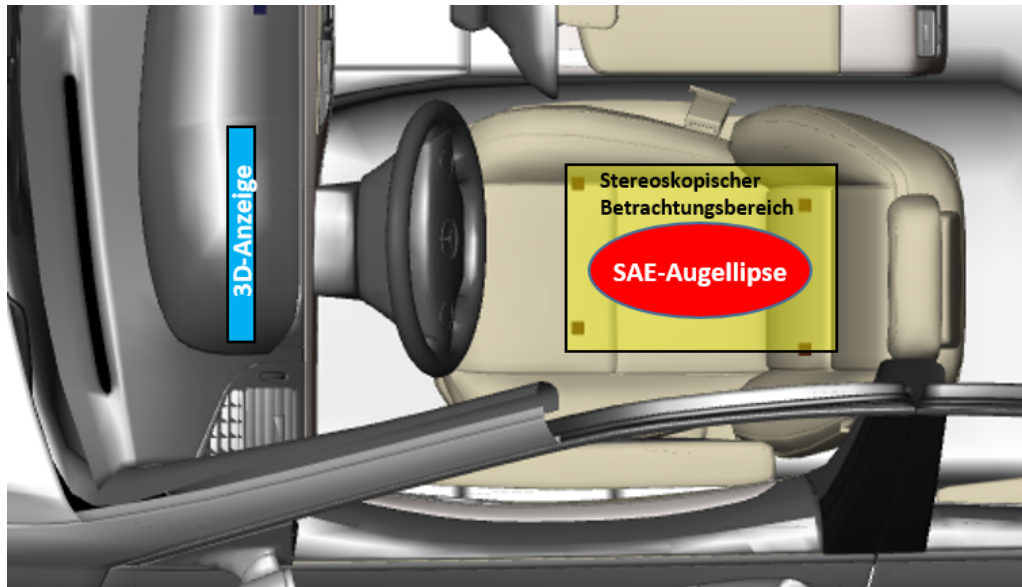


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung des stereoskopischer Betrachtungsbereich im Fahrzeug und der SAE Augellipse. Die Augellipse wurde auf den Augenmittelpunkt umgerechnet.

Funktionalität:

Untersuchungen von Geldner [4] und eigene Untersuchungen (vgl. 4.5.4) haben gezeigt, dass eine 3D-Darstellung im Fahrzeug vom überwiegenden Teil (70-75%) befragter Fahrer positiv bewertet wird. Ein kleiner Teil der Befragten lehnt diese jedoch ab.

Des Weiteren zeigen Studien, dass der Anteil der Menschen mit gestörter räumlicher Wahrnehmung in der Bevölkerung bei ungefähr 12% liegt [10].

Typische, wechselnde Beleuchtungsbedingungen im Fahrzeug können zusätzlich die Funktionalität von möglichen Kamerasystemen zur Fahrerbeobachtung einschränken, wodurch eine kontinuierliche Kopferfassung nicht garantiert werden kann.

Um Störungen zu verhindern und dem Fahrer die Wahlfreiheit zu ermöglichen, wird gefordert, dass eine 3D-Anzeige im Fahrzeug die Funktionalität besitzt unmerklich automatisch oder manuell auf eine monoskopische (2D) Darstellung zu wechseln.

Entwicklungszeitraum:

Die in dieser Arbeit entwickelte Anzeige soll die Grundlage einer Einführung ins Automobil und einer damit verbundenen Serienfertigung bilden. Die Verfügbarkeit und die Qualität der Darstellung muss innerhalb der nächsten Jahre realisiert werden können.

2.3 Wahl des Technologie-Ansatzes

Auf Grundlage der qualitativen Zielvorgaben wurde der beste technologische Ansatz gewählt. Hierzu wurden vom Autor verschiedene Technologien theoretisch oder bei Verfügbarkeit geeigneter Prototypen auch praktisch bewertet. Im Folgenden werden zunächst kurz die Grundlagen der räumlichen Wahrnehmung erläutert und im Anschluss der aktuelle Stand der Anzeigentechnologie dargelegt und sodann bezüglich der Zielvorgabe bewertet.

2.3.1 Räumliche Wahrnehmung

Das Sehen ist einer der fünf Sinne des Menschen mit dem er seine Umgebung wahrnimmt. Licht erzeugt einen physiologischen Reiz, der durch Fotorezeptoren in den Augen in biochemische Signale umgewandelt wird, die im visuellen Zentrum des Gehirns einen Seheindruck erzeugen [11]. Eine Eigenschaft des menschlichen Sehens ist die Fähigkeit räumliche Tiefe wahrzunehmen.

Die räumliche Wahrnehmung ist ein komplexes Zusammenspiel zwischen angelernten Fähigkeiten und physiologischen Gegebenheiten. Das Gehirn gleicht dabei kontinuierlich eine Vielzahl von Indikatoren ab, um eine wahrgenommene Szene zu interpretieren. Diese Indikatoren werden auch als Hinweisreize bezeichnet. Für das räumliche Sehen unterscheidet man *monokulare* und *binokulare Hinweisreize*.

Monokulare Hinweisreize sind angelernte Indikatoren, dessen Informationen nur von einem Auge stammen und die es auch einäugigen Menschen ermöglichen Tiefe einzuschätzen. Die wichtigsten Tiefenindikatoren sind die Okklusion, der Schattenwurf, die relative Größe, Perspektive, Texturgradient und die Atmosphärische Perspektive. Eine vollständige Liste und detaillierte Beschreibung findet sich in [12].

Monokulare Hinweisreize beschreiben oftmals vermeintliche Trivialitäten, wie die Tatsache, dass ein Objekt, das sich vor einem anderen befindet, dieses verdeckt (Ok-

klusion), sie beinhalten jedoch viele Informationen über die räumliche Anordnung der Szene. Bewusst wird dies, wenn bei der Gestaltung künstlicher Tiefe (siehe 2.3.2) durch Gestaltungsfehler einzelne Indikatoren im Widerspruch stehen. Die monokularen Hinweisreize ermöglichen die Einschätzung der Tiefe über alle Betrachtungsbereiche und sind für größere Betrachtungsabstände die einzigen Indikatoren um Tiefe wahrzunehmen.

Als eigene Kategorie der Bewegungsindikatoren wird die Bewegungsparallaxe ebenfalls den monokularen Hinweisreizen zugeordnet. Sie beschreibt die Hinweise die aus der Relativbewegung des Betrachters und Objekten zueinander gewonnen werden. Ihr Prinzip beruht darauf, dass sich entfernte Objekte scheinbar langsamer bewegen als nahe.

Die binokularen Hinweisreize beschreiben die Tiefenindikatoren, die durch das Betrachten einer Szene mit zwei räumlich getrennten Augen gewonnen werden können. Man unterscheidet zwischen okulomotorischen Indikatoren und der binokularen Disparität.

Die okulomotorischen Indikatoren beschreiben die Informationen, die aus den Muskelbewegungen bei der Konvergenz und der Akkommodation gewonnen werden können.

Der Mensch besitzt die Möglichkeit, durch sechs Augenmuskeln den Augapfel zu bewegen und aus einer Parallelstellung nach innen zu drehen. Die Sehachsen der einzelnen Augen verlaufen nicht mehr parallel, sondern schneiden sich in einem Punkt in endlicher Entfernung. Ein Betrachter kann dadurch auf beliebige Punkte fixieren. Dieser Vorgang wird Konvergenz genannt.

Beim normalen Sehen fokussiert der Betrachter zusätzlich auf den fixierten Punkt. Ein Muskelring im Auge ermöglicht es, die Form der Linse zu verändern und damit die Brennweite des Auges zu variieren. Dieser Vorgang wird Akkommodation genannt.

Die Konvergenz und die Akkommodation werden beim normalen Sehen im gegenseitigen Kontext ausgewertet und vom Gehirn im Zusammenspiel mit der Pupillenöffnung gesteuert. Der Vorgang wird mit dem Begriff des *Naheinstellungstrias* bezeichnet. Die größte Relevanz liegt bei Entfernungen in Greifnähe. Für größere

Betrachtungsabstände spielt die Koppelung eine zunehmend geringere Rolle. Bei der Erzeugung künstlicher Tiefe durch die Darstellung von stereoskopischen Bildern (vgl. 2.3.2) ist dieser Vorgang besonders relevant, da hierbei von der Koppelung abgewichen wird.

Die okulomotorischen Indikatoren aus den Muskelbewegungen der Augen bei Konvergenz und Akkommodation beinhalten im Vergleich zur binokularen Disparität nur sehr schwache Tiefeninformationen.

Im Nahbereich ist die binokulare Disparität die wichtigste Tiefeninformation und ermöglicht dem Menschen präzise Arbeiten mit seinen Händen durchzuführen. Für die Stereoskopie, also die Wahrnehmung künstlicher Tiefe durch geeignete technische Hilfsmittel, ist sie der maßgebliche Tiefenindikator. In Abbildung 2.3 sind die

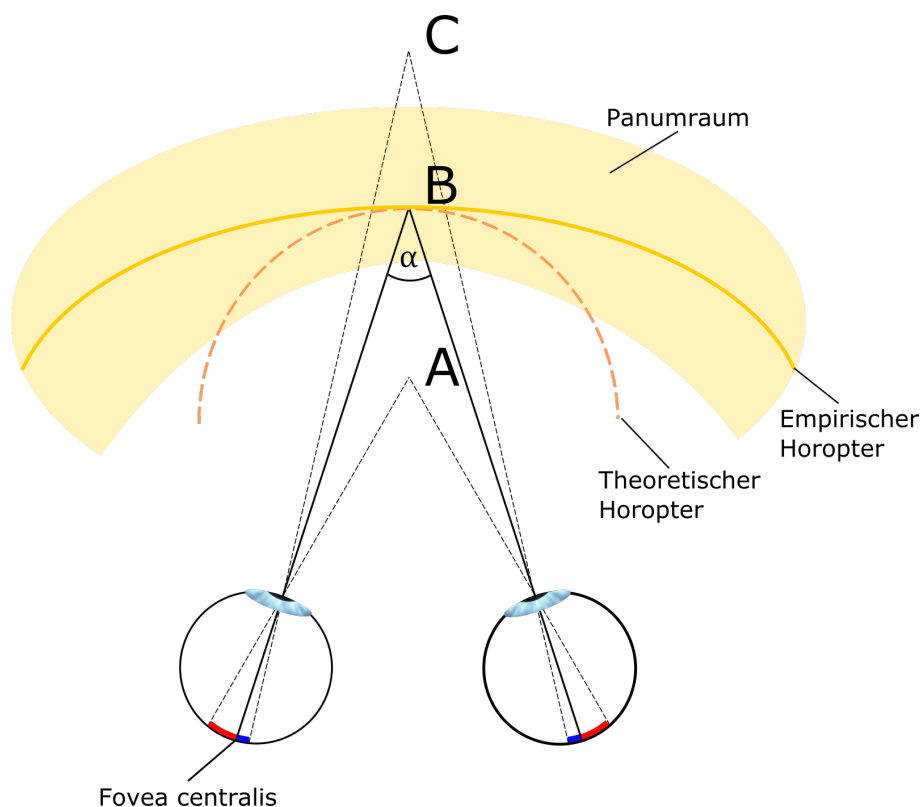


Abbildung 2.3: Prinzip der räumlichen Wahrnehmung

Augen eines Betrachters dargestellt, der den Punkt **B** fixiert. Die Augen konvergieren und schließen den Winkel α ein, der Konvergenzwinkel genannt wird. Das Bild des Punktes **B** wird in beiden Augen auf die gleiche Stelle der Netzhaut, die *fovea centralis* (Sehgrube) projiziert. Die Sehgrube ist eine Einbuchtung der Netzhaut, an

der auf Grund der Anordnung und Anzahl der Lichtrezeptoren (Zapfen) sich der Ort des schärfsten Sehens befindet [13].

Der *Horopter* bezeichnet alle Punkte im Raum, die im linken und rechten Auge auf identische Netzhautpunkte (korrespondierende Punkte) abgebildet werden. Der theoretische Horopter, nach seinem Entdecker auch Vieth-Müller-Horopterkreis genannt, bildet streng mathematisch betrachtet einen Kreis. Empirische Untersuchungen zeigen jedoch eine Abweichung der korrespondierenden Punkte vom Kreis, die abhängig vom Abstand des Fixationspunktes ist [14]. Für die in dieser Arbeit betrachteten Abstände im Nahbereich ergibt sich ein empirischer Horopter, der flacher verläuft (orange).

Punkte, die nicht auf dem Horopter liegen, werden auf der Netzhaut nicht an korrespondierenden Punkten abgebildet. In der Abbildung liegt der Punkt **A** vor und der Punkt **C** hinter dem Horopter. Der Punkt **A** wird im linken Auge links der Sehgrube und im rechten Auge rechts der Sehgrube abgebildet. Die Differenz der Orte der Projektion auf die linke und rechte Netzhaut wird retinale Querdisparation oder auch binokulare Disparität genannt. Für Punkt **A**, ergibt sich die Disparation als Summe der in Rot eingezeichneten Abstände auf der Netzhaut und wird gekreuzte Querdisparation genannt, da der Punkt **A** vor dem Horopter liegt. Für den Punkt **C** ergibt sich die Disparation als die Summe der Blau eingezeichneten Abstände auf der Netzhaut und wird als ungekreuzte Querdisparation bezeichnet.

Die auf die Netzhaut projizierten zweidimensionalen Bilder werden als monoskopische Halbbilder benannt und vom Gehirn verarbeitet. Die retinale Querdisparation wird in der Sehrinde durch spezielle Stereoneuronen ausgewertet und der Abstand zum Horopter bestimmt. Die Dichte der rezeptiven Felder der Stereoneuronen ist für Objekte nahe des Horopters am größten und nimmt mit größerer Entfernung ab. Die binokulare Disparität eignet sich damit sehr gut, um relative Tiefenunterschiede zwischen Objekten über einen großen Entfernungsbereich wahrzunehmen. Während im Nahbereich Tiefenunterschiede bis zu $25\ \mu\text{m}$ aufgelöst werden können, beträgt die Auflösung für Objekte in einer Entfernung von 100 m noch ungefähr 4 m [15]. Die absolute Entfernung von Objekten zum Betrachter lässt sich jedoch weniger genau bestimmen.

Der zweite wesentliche Schritt bei der Verarbeitung binokularer Informationen ist die *Fusion*. Das Gehirn erzeugt aus den zwei Halbbildern des rechten und linken Auges, ein fusioniertes, räumliches Gesamtbild, auch zyklisches Bild genannt. Punkte auf dem Horopter lassen sich einfach fusionieren, da sie keine Disparität besitzen und scharf auf der Netzhaut abgebildet werden. Mit zunehmender Entfernung vom Horopter steigt die Disparität und damit die Abweichung zwischen den Teilbildern. Hinzukommt, dass Objekte weiter entfernt vom Horopter auf den Randbereichen der Netzhaut abgebildet werden, wo die Schärfe und die Auflösung deutlich abnehmen. Überschreitet die Abweichung die Toleranzgrenze, kann das Gehirn die Teilbilder nicht mehr fusionieren. Um die Wahrnehmung von Doppelbildern zu vermeiden, werden problematische Bildstellen vom Gehirn durch die sogenannte Suppression unterdrückt und nur der Seheindruck eines Auges verarbeitet. Der Bereich um den Horopter, in dem Punkte problemlos fusioniert werden können, wird Panumraum genannt. Dieser wird im Bogenmaß gemessen und umfasst im Zentrum der Netzhaut Disparitäten bis zu 10 Winkelminuten und an den äußeren Stellen der Netzhaut bis zu 2 Winkelgrad.

2.3.2 Erzeugung von Inhalten mit künstlicher Tiefe

Stereoskopische und Autostereoskopische Anzeigen erzeugen eine räumliche Szene durch direktes Anzeigen von Halbbildern der linken und rechten Ansicht. Um ein Objekt räumlich vor oder hinter der Anzeigenoberfläche wahrnehmen zu können, muss dieses im Auge eine retinale Querdisparität aufweisen, die sich von der Disparität der Anzeigenoberfläche unterscheidet. Dies geschieht, indem korrespondierende Objektpunkt im linken und rechten Halbbild auf der Anzeige mit einem räumlichen Abstand abhängig von der Tiefe des Objekts angezeigt werden.

Der Abstand der Objektpunkte in der linken und rechten Ansicht wird in der Literatur ebenfalls als Disparität bezeichnet und muss von der retinalen Querdisparität unterschieden werden. Objektpunkte, die keine Disparität besitzen und somit in der linken und rechten Ansicht an der gleichen Stelle auf der Anzeige dargestellt werden, besitzen keine künstliche Tiefe und werden in der sogenannten Nullebene wahrgenommen, welche der Anzeigenoberfläche entspricht. In Abbildung 2.4 sind die Fälle,

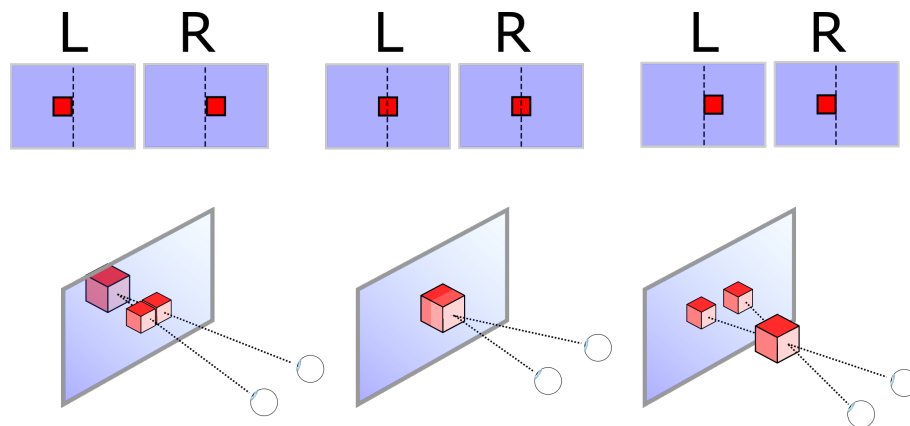


Abbildung 2.4: Erzeugung künstlicher Tiefe; (links) Halbbilder mit positiver Disparität; (mitte) Halbbilder ohne Disparität; (rechts) Halbbilder mit negativer Disparität

in denen ein Objekt aus der Anzeige hervortritt, hinter der Bildebene liegt und der monoskopische Fall dargestellt. Im oberen Teil der Abbildung sind jeweils die linken und rechten Halbbilder dargestellt.

Besitzt das Objekt eine positive Disparität [vgl. Abb. 2.4 (links)], liegt der wahrgenommene Raumpunkt hinter der Nullebene und somit innerhalb der Anzeige. Bei negativer Disparität (rechts) wird der Objektpunkt als vor der Anzeige schwebend wahrgenommen.

Eine räumliche Szene mit räumlich ausgedehnten Objekten zeigt dadurch eine Bandbreite von unterschiedlichen Disparitäten. In der Anaglyph-Darstellung in Abbildung 2.5 ist gut zu erkennen, wie mit zunehmender Tiefe die Disparität der Objekte zunimmt. Bei stereoskopischen 3D-Filmen wird die Disparität in Form der Unterschiede der Halbbilder im Filmmaterial festgelegt und kann im Nachhinein nicht mehr geändert werden. Die wahrgenommene Tiefe ist jedoch abhängig von der Größe der Anzeige, auf der die Szene dargestellt wird. Der Zusammenhang zwischen Anzeigengröße und wahrgenommener Größe ist nichtlinear, wodurch es zu Tiefenverzerrungen kommen kann. In der Arbeit von [4] wurde jedoch gezeigt, dass die Verzerrungen bei Darstellung auf Automobilanzeigen nicht als störend wahrgenommen werden und die 3D-Darstellung auch auf vergleichsweise kleinen Anzeigen wirkt.

Die in dieser Arbeit dargestellten Inhalte werden individuell in der 3D-Umgebung



Abbildung 2.5: Die Disparität im linken und rechten Halbbild mit nimmt kontinuierlich mit der Entfernung der dargestellten Objekte zu [16]

mit dem Namen *veo* der Firma Daimler-Protics² in Anlehnung vorhandener, monoskopischer Fahrzeugdesigns gestaltet. Die 3D-Umgebung ermöglicht dabei die Implementierung eigener Funktionen und garantiert die vollständige Kontrolle der dargestellten Szene. Es ist möglich, jedem Objekt einer Szene ein virtuelles Kamerapaar zuzuordnen und somit die Disparität und die Tiefenverzerrung individuell auf die Zielanzeige anzupassen.

Voraussetzung zur Wahrnehmung von Tiefe ist die erfolgreiche Fusion korrespondierender Objektpunkte. Dies muss bei der Erstellung von Inhalten berücksichtigt werden und unterscheidet sich von dem Entwurf monoskopischer Inhalte. So werden beispielsweise in monoskopischen Fahrzeugdesigns gerne Bereiche vollständig schwarz gehalten, wenn dort keine Information angezeigt wird. Vollfarbigen, strukturlosen Flächen kann bei einer stereoskopischen Anzeige jedoch keine Tiefe zugeordnet werden, da es keine klar identifizierbaren korrespondierenden Objektpunkte erkennbar sind. Es wird von daher in der Regel mit strukturierten Hintergründen gearbeitet. Von größter Bedeutung ist der verwendete Tiefenbereich. Als zielführend hat sich ergeben, Objekte maximal $1/3$ der Anzeigebreite aus der Anzeige hervor-

²Daimler Protics ist ein 100% Tochterunternehmen der Daimler AG; <http://www.daimler-protics.de/>

treten zu lassen und die Tiefe auf $2/3$ der Anzeigenbreite zu begrenzen. In der Regel werden diese Grenzen deutlich unterschritten. Die größte Tiefe erhalten Objekte in der Mitte der Anzeige, Objekte in der Nähe des Randes der Anzeige erhalten wenig Tiefe, um keine Verletzung des Panumbereichs zu provozieren.

Die Gestaltung der Inhalte für die Zielvorgabe eines 3D-Kombiinstrument orientiert sich generell daran, weniger kurzlebige 3D-Effekte durch überhöhte Tiefe darzustellen, wie sie oftmals in Kinofilmen zum Tragen kommen, sondern die Darstellung durch einen moderaten Einsatz von Tiefe dauerhaft aufzuwerten.

Auf Grundlage vorhandener monoskopischer Designs wurden zwei unterschiedliche Konzepte von stereoskopischen Inhalten umgesetzt. Das Konzept 1 (siehe 2.6 [links]) stellt hierbei einen modernen Ansatz mit einem einzelnen, zentral angeordneten Rundinstrument dar, welches durch Zusatzinformation auf teiltransparenten Ebenen ergänzt wird. Die gesamte Anzeige ist wie eine Bühne angelegt, bei welcher die Tiefe in der Mitte am stärksten ist und zum Rand abnimmt. Das Konzept 2 (siehe 2.6 [rechts]) folgt stärker dem klassischen Ansatz einer Kombiinstrumentdarstellung mit zwei Rundinstrumenten. Diese liegen Nahe der Nullebene und haben wenig Tiefe. Die größte Tiefe wird, wie im Konzept 1 in der Mitte der Anzeige dargestellt. Eine größere Ansicht und weitere Bilder finden sich im Anhang A.1. Mit diesen Inhalten wurden auch die Prototypischen Anzeigen beurteilt und Probandenversuche durchgeführt. Die dargestellten Bilder stellen nur eine monoskopische Ansicht der eigentlich stereoskopischen Szene dar.



Abbildung 2.6: Konzept 1 (links) und Konzept 2 (rechts) von erstellten Inhalten für ein 3D-Kombiinstrument

2.3.3 Räumliche Anzeigetechnologien (3D-Displays)

Die Prinzipien der menschlichen Wahrnehmung werden in räumlichen Anzeigetechnologien genutzt, um die Wahrnehmung von Tiefe zu ermöglichen. Umgangssprach-

lich werden diese Anzeigen mit dem Begriff der „3D-Displays“ beschrieben, welche oftmals auf Grund ihrer großen Verbreitung mit den sogenannten stereoskopischen Anzeigen gleichgesetzt werden. Es existiert jedoch eine deutlich größere Bandbreite technologischer Ansätze zur Realisierung künstlicher Szenen mit Tiefe.

Klassifikation

Eine „ideale“ 3D-Anzeige müsste die Eigenschaft besitzen, eine visuell nicht unterscheidbaren Kopie einer realen räumlichen Szene darstellen zu können. Sie würde dann alle monokularen und binokularen Tiefenindikatoren erfüllen. In der Praxis unterliegen jedoch fast alle Technologien prinzipiellen oder technischen Einschränkungen, die den Grad der Umsetzung der Tiefenindikatoren limitieren. Ein Fehlen einer oder mehrerer Tiefenindikatoren führt jedoch nicht zwangsweise zu einer störenden Wahrnehmung, da die verschiedenen Indikatoren unterschiedlich stark in unsere Wahrnehmung eingehen. Der stärkste Indikator für eine Tiefenwahrnehmung ist die binokulare Disparität, jeder weitere Tiefenindikator stellt einen Schritt zu mehr Natürlichkeit dar.

In der Literatur finden sich eine Vielzahl von Ansätzen, 3D-Darstellungstechnologien zu klassifizieren [17–19].

In Abbildung 2.7 ist eine Klassifikation des Autors dargestellt, die sich an Reichelt et al. [20] orientiert.

Die dargestellte Klassifikation beschränkt sich auf die drei, der Meinung des Autors nach, wichtigsten Tiefenindikatoren, der binokulare Disparität, der Bewegungspallaxe und der Akkommodation, wobei mit letzterer die Kopplung der Akkommodation und der Konvergenz durch den Naheinstellungstrias gemeint ist. Die Auflistung beginnt auf der linken Seite mit der Technologie der Holografischen Anzeigen und endet auf der rechten Seite bei stereoskopischen Anzeigetechnologien. Je weiter rechts eine Technologie eingeordnet ist, desto weniger Tiefenindikatoren erfüllt sie.

Im Weiteren werden die in der Klassifikation aufgelisteten Technologieansätze näher vorgestellt und bezüglich ihres Potenzials zur Erfüllung der Zielvorgabe bewertet.

3D-Darstellungstechnologien						
	Holografische Anzeigen	Volumetrische Anzeigen	Integral Imaging	Autostereoskopische Anzeigen		Stereoskopische Anzeigen
				Mehrfach Ansichten (Multi View)	Zweifach-Ansichten (Two-View)	
Tiefenindikatoren: (Anzahl)						
<i>Disparität</i>	✓	✓	✓	✓	✓	✓
<i>Bewegungsparallaxe</i>	✓	✓	(✓)	(✓)	✗	✗
<i>Akkommodation</i>	✓	✓	(✓)	✗	✗	✗

Abbildung 2.7: Klassifikation räumlicher Anzeigen

2.3.3.1 Holografische Anzeigen

Holografische Anzeigen sind innerhalb der Klassifikation die Technologie, welche die meisten Tiefenindikatoren umsetzt. Die Technologie unterscheidet sich elementar von den anderen, da sie als einzige das Wellenfeld rekonstruiert. Das physikalisch zugrundeliegende Prinzip ist die Beugung [21]. Eine Anzeige besteht aus einem räumlichen Lichtmodulator (englisch: *Spatial Light Modulator (SLM)*), [22], welcher die Eigenschaft besitzt, die Phase und/oder die Amplitude einer einfallenden, kohärenten Wellenfront zu modulieren. Auf dem SLM wird dazu ein Hologramm dargestellt, welches der Fouriertransformierten des darzustellenden 3D-Objekts entspricht. Die Festlegung der Amplitude und der Phase in der Ebene des SLMs ermöglicht nach dem Huygenschen Prinzip theoretisch eine vollständige Rekonstruktion der Wellenfront in einem beliebigen Punkt im Raum. Der Betrachter nimmt dabei nicht das auf dem SLM dargestellte Hologramm wahr, sondern die durch Interferenz auf der Netzhaut entstehende und für jeden Punkt im Raum individuelle Intensitätsverteilung. Voraussetzung für die Interferenz ist die räumliche und zeitliche Kohärenz des Wellenfeldes. Farbige Hologramme können daher auf holografischen Anzeigen nur durch zeitliches Multiplexing von Wellenfeldern unterschiedlicher Frequenz erzeugt werden. Für eine Darstellung von animierten Inhalten, muss das Hologramm auf dem SLM kontinuierlich verändert werden.

Holografische Anzeigen existieren aktuell nur als Prototypen in Laboren. Die großen

Herausforderungen sind die hohe notwendige Anzahl an Pixeln des SLM, um einen ausreichend großen Raumbereich abdecken zu können und die notwendige Berechnung und Übertragung der damit verbundenen Datenmengen. Aktuelle prototypische Anzeigen haben eine maximale Anzahl von 15 Millionen [23] bis 100 Millionen Pixel [24]. Für eine Anzeige mit 50cm Breite und einem Betrachtungswinkel von $+/- 30^\circ$ sind theoretisch jedoch 10^{12} Pixel notwendig, was heutzutage technisch nicht realisierbar ist. Es gibt zwar erste Ansätze zur Reduzierung der Datenmenge [25], in dem die Augenpositionen eines Betrachters detektiert wird und nur das Wellenfeld des aktuellen Sichtfeldes berechnet wird, jedoch reichen diese bisher nicht aus, um eine Anzeige mit einer vergleichbaren Darstellungsqualität monoskopischer Anzeigen zu realisieren.

Die Qualität leidet hierbei vorrangig unter sichtbaren Interferenzeffekten, den sogenannten Speckles, welche auf Grund der kohärenten Beleuchtung entstehen. Diese können durch die Erhöhung der spektralen Bandbreite und der zeitlichen Mittelung reduziert werden, was jedoch speziell für farbliche Hologramme zu bisher nicht erfüllbaren Anforderungen an das spektrale Multiplexing führt.

Durch die Rekonstruktion des Wellenfeldes ist in der Theorie eine holografische Darstellung nicht von einer realen Szene zu unterscheiden und beinhaltet inhärent alle Tiefenindikatoren.

Die Bedingungen der Zielvorgabe eines Einsatzes im Automobil wird theoretisch von der Anzeige erfüllt, da sie den geforderten stereoskopischen Betrachtungsbereich abdecken kann und es möglich ist, auf eine monoskopische Darstellung umzuschalten. Ein praktischer Einsatz der Technologie für eine Anzeige in der geforderten Größe scheitert zur Zeit jedoch an den nicht umsetzbaren Datenmengen und der mangelnden Darstellungsqualität. Da im angestrebten Entwicklungszeitraum keine grundlegende Verbesserung der Probleme zu erwarten sind, werden Holografische Anzeigen als technologischer Ansatz für die gegebene Zielvorgabe ausgeschlossen.

2.3.3.2 Volumetrische Anzeigen

Volumetrische Anzeigen erzeugen echte, physikalisch vorhandene, dreidimensionale Lichtpunkte im Raum. Von jedem Raumpunkt eines definierten Volumens, den sogenannten Voxel (in Analogie zum zweidimensionalen Pixel), wird Licht abgestrahlt,

das vom Betrachter wahrgenommen wird. Sie erfüllen daher inhärent die Tiefenindikatoren der binokularen Disparität und der Akkomodation auf Bildpunkte in unterschiedlichen Tiefen.

Es existiert eine große Bandbreite von Realisierungsansätzen. Durch fokussierte oder gekreuzte Laserstrahlen können Medien, wie Gas oder Plasma, durch Fluoreszenz oder Streuung zur örtlich begrenzten Abstrahlung von Licht angeregt werden [26]. Es entstehen frei schwebende Lichtpunkte im Raum, die bei geeigneter räumlicher Anordnung Objekte formen können.

Ein weiterer Ansatz ist die Projektion von räumlichen Szenen auf Projektionsflächen im Raum. Die Projektionsflächen können statisch sein und Formen von Kugeln oder Pyramiden annehmen [27, 28] oder sich dynamisch im Raum bewegen, wobei innerhalb einer zeitlichen Periode jeder Raumpunkt von der Projektionsfläche überstrichen wird [29]. Durch zeitlich synchronisierte Projektion dient jeder Raumpunkt durch Streuung als möglicher Lichtpunkt. Eine solche Darstellung einer Szene im Raum ermöglicht es einem Betrachter, sich um ein Objekt herum zu bewegen, was bedeutet, dass der Tiefenindikator der Bewegungsparallaxe erfüllt wird.

Eine weitere Ausprägung von volumetrischen Anzeigen sind die sogenannten Mehrschichten-Anzeigen (engl. „*Multi-Layer Displays*“). Hierbei handelt es sich um mehrere flache Anzeigeflächen, die in einem räumlichen Abstand parallel zueinander angeordnet sind. Sie gleichen damit eher klassischen Anzeigen und können auch nur aus einem eingeschränkten Blickwinkelbereich betrachtet werden. Die Anzeigeflächen können beispielsweise Flüssigkristallanzeigen sein, die nur mit wenigen Millimetern Abstand angeordnet werden. Die Anzeigeflächen werden dabei durch eine Lichtquelle hinterleuchtet. Einzelne Pixel der Anzeigeflächen können in der Transparenz gesteuert werden. Durch geschickte Ansteuerung lassen sich individuelle Intensitätsverteilungen auf den separierten Anzeigeebenen erzeugen, die in ihrer Gesamtheit eine räumliche Szene darstellen. Die darstellbare Tiefe dieser Art von Anzeigen ist jedoch begrenzt. Ein Einsatz von Multi-Layer Displays in einem Automobilumfeld wurden in den letzten Jahren vereinzelt auf Fachmessen demonstriert [30]. Eine Umsetzung in einem Serienfahrzeug erfolge bis zum Zeitpunkt dieser Arbeit jedoch noch nicht.

Für den Einsatz als Anzeige im Kombiinstrument sind Multi-Layer Displays die einzigen volumetrischen Anzeigen, die potentiell in Frage kommen. Prinzipbedingt stellen diese echte, physikalisch vorhandene Tiefe dar, wodurch der stereoskopische Betrachtungsbereich nur durch das Blickfeld auf die Anzeige beschränkt wird und auch mehrere Betrachter ein Bild mit Tiefe wahrnehmen können. Die Tiefenindikatoren der Akkomodation und der Bewegungsparallaxe werden erfüllt.

Die darstellbare Bildqualität entspricht in der Auflösung dem Niveau monoskopischer Anzeigen, jedoch kann es bei der Farbdarstellung und der Schärfe zu Einschränkungen kommen, da das Licht auf seinem Weg von der Hintergrundbeleuchtung zum Betrachter mehrere Farbfilter und Elemente zur Vermeidung von Moirée Effekten in unterschiedlichen Ebenen durchquert.

Die darstellbare Tiefe ist durch die Anzahl der Ebenen der Anzeige begrenzt. Jede zusätzliche Anzeigeebene führt zu einer Abnahme der Helligkeit der Anzeige, die durch eine stärkere Hintergrundbeleuchtung ausgeglichen werden muss. In einer Automobilumgebung führt dies zu einem Anstieg der benötigten Kühlleistung, was wiederum den Bauraum und das Gewicht der Komponente negativ beeinflusst.

Mehrebenen-Anzeigen können einen potentiellen Technologie-Ansatz für ein 3D-Kombiinstrument darstellen. Es muss jedoch ein Kompromiss zwischen der darstellbaren Tiefe und der notwendigen Helligkeit gefunden werden. Aufgrund der geringen darstellbaren Tiefe und der notwendigen Lichtleistung wird der Ansatz in dieser Arbeit nicht weiterverfolgt.

2.3.3.3 Integral Imaging

Das Integral Imaging wurde 1908 von G. Lippmann erfunden und wurde ursprünglich als „*Photographie Integral*“ bezeichnet [31]. Die Bezeichnung wurde erst in der Neuzeit geändert [32], um auch modernen Darstellungsmethoden besser gerecht zu werden.

Das Integral Imaging unterteilt sich in die Aufnahme und Wiedergabe einer räumlichen Szene. In der ursprünglichsten Form bestand die Apparatur zur Aufnahme einer räumlichen Szene nur aus einer zweidimensionalen Anordnung von Lochblenden (Lochgitter), hinter der im geringen Abstand ein photographischer Film angebracht wurde. Die Aperturgröße wurde sehr klein gewählt (Pinhole). Abhängig vom

Einfallswinkel eines Lichtstrahls wird eine andere Position auf dem Film belichtet. Dies ermöglicht, ähnlich einer plenoptischen Kamera, neben der Intensität auch die Richtung einfallender Lichtstrahlen zu detektieren. Unter jeder Apertur entsteht ein sogenanntes „Elementarbild“, das sich jeweils in Perspektive der aufgenommenen Szene unterscheidet. Durch die periodische Anordnung der Aperturen des Lochgitters kann die Bildaufnahme einer dreidimensionalen Szene als räumliche Filterung mit anschließender zweidimensionalen Speicherung auf dem Film aufgefasst werden. In der weiteren Entwicklung wurde in den 30er Jahren das Lochgitter durch ein Mikrolinsenregister ersetzt [33], was zu verbesserten Lichtintensitäten führt. Mit der Verfügbarkeit von CCDs und CMOS Sensoren wurde der fotografische Film in den 90er Jahren durch diese ersetzt.

Die Wiedergabe einer aufgenommenen Szene erfolgt in umgekehrter Reihenfolge der Aufnahme. Unter einem Linsenraster werden Elementarbilder dargestellt. Ein Betrachter, der sich an einer Position im Raum vor der Anzeige befindet, nimmt auf Grund unterschiedlicher Blickwinkel mit seinem linken und rechten Auge jeweils verschiedene, einzelne Punkte eines Elementarbildes unter einer Linse wahr. Die Anzeige ermöglicht somit die Wahrnehmung einer räumlichen Szene, die mit der Anzahl der Aperturen bzw. Linsen „gesampelt“ wurde. Bei ausreichend geringer Apertur der Linse und hoher Auflösung des Elementarbildes entspricht die Darstellung einer Reproduktion des Lichtfeldes der Szene. Für eine dynamische Bilddarstellung wird der Film in heutigen Anzeigen durch geeignete Darstellungstechniken wie Flüssigkristallanzeigen (englisch *Liquid Crystal Display*, [LCD]) oder organische Leuchtdioden (englisch *organic light emitting diode*, [OLED]) ersetzt. Die darzustellenden Inhalte werden entweder durch Aufnahme einer realen Szene nach dem Prinzip des Integral Imaging oder künstlich am Computer durch Berechnung verschiedener Perspektiven erzeugt.

Das ursprüngliche Prinzip des Integral Imaging beinhaltet inhärent die Tiefenindikatoren der binokularen Disparität und der Bewegungsparallaxe. Bei ausreichend geringen Linsendurchmesser erfüllt das entstehende Lichtfeld auf Objekte in unterschiedlichen Tiefen zu fokussieren, der Tiefenindikator der Akkomodation wird erfüllt.

In digitalen Anzeigen, basierend auf LCDs oder OLEDs, ist die Auflösung der Elementarbilder jedoch begrenzt und es muss ein Kompromiss zwischen dem Linsendurchmesser und der wahrgenommenen Leuchtdichte getroffen werden. In kommerziell verfügbaren Produkten [34] besteht beispielsweise ein Elementarbild nur aus 9 Pixel in quadratischer Anordnung, wodurch sich nur drei unterschiedliche Perspektiven bei einer horizontalen Bewegung ergeben. Dies hat zur Folge, dass die Akkomodation und die Bewegungsparallaxe nur bedingt erfüllt werden.

Auf Grund des, im Vergleich zu einem Pinhole, großen Linsendurchmessers und der geringen Auflösung eines Elementarbildes gleicht eine aktuell herstellbare Integral Imaging Anzeige eher einer autostereoskopischen MultiView Anzeige mit zusätzlicher vertikaler Parallaxe.

Für die Bewertung dieses Technologieansatzes sei daher auf die Diskussion der MultiView Anzeige im nächsten Abschnitt verwiesen.

2.3.3.4 Stereoskopische Anzeigen

Als Stereoskopie wird die Darstellung von zwei unterschiedlichen, monoskopischen(2D) Halbbildern für das linke und rechte Auge bezeichnet, die auf Grund der binokularen Disparität im Gehirn zu einem stereoskopischen Bild fusioniert werden.

Die erste stereoskopische Anzeige wurde 1838 von Sir Charles Wheatstone erfunden [35]. Das sogenannte Stereoskop bestand aus zwei Umlenkspiegeln, die es ermöglichten, mit den linken und rechten Augen getrennt perspektivische Zeichnungen, die Fotografie war damals noch nicht sehr fortgeschritten, wahrzunehmen. Das grundlegende Prinzip der getrennten Wahrnehmung von zwei Ansichten ist bis heute gültig. Als Hilfsmittel zur Trennung der Ansichten werden in der Regel Brillen verwendet. Es werden zeit-, raum- und farbsequentielle Methoden unterschieden.

Zeitsequentieller Ansatz

Die bekannteste zeitsequentielle Methode sind sogenannte „Shutterbrillen“ die hauptsächlich bei Fernsehern im Heimbereich aber auch bei Computermonitoren oder seltener in Kinos zu Anwendung kommen. Es handelt sich dabei um Brillen, die periodisch im Wechsel das linke und rechte Auge abdunkeln. Dies geschieht durch monochromatische Flüssigkristallanzeigen, dessen Transparenz aktiv variiert wird. Durch eine mit der Brille synchronisierte Anzeige oder Projektionsfläche, auf der im

zeitlichen Wechsel Bilder der linken und rechten Ansicht angezeigt werden, nimmt ein Betrachter bei ausreichend hoher Wiederholfrequenz getrennte Halbbilder wahr.

Polarisationssequentieller Ansatz

Zu den bekanntesten Vertretern der polarisationssequentiellen Methode zählen die „Polarisationsbrillen“. Es handelt sich dabei um passive Brillen, bestehend aus linearen oder zirkularen Polarisationsfiltern mit unterschiedlicher Polarisation für das linke und rechte Auge. Die auf der Anzeige oder Projektionsfläche dargestellten Ansichten werden in unterschiedlicher Polarisation abgestrahlt. Bei Monitoren im Computerbereich werden die Ansichten zeilenweise variiert („verkämmt“) und durch aufgebrachte Polarisationsfilter zeilenweise unterschiedlich polarisiert. Im Gegensatz zu zeitsequentiellen Methoden wird die räumliche Auflösung der wahrgenommenen Halbbilder halbiert. Im Kinobereich werden ebenfalls Polarisationsbrillen eingesetzt, bei denen jedoch die linke und rechte Ansicht durch zwei Projektoren mit unterschiedlicher Polarisation auf eine polarisationserhaltende Kinoleinwand projiziert werden und durch die Polarisationsbrille gefiltert werden. Das wahrgenommene Bild behält dadurch seine volle Auflösung.

Farbsequentieller Ansatz

Eine weitere Methode stereoskopischer Anzeigen ist die farbsequentielle Trennung der linken und rechten Ansicht. Am bekanntesten sind Anaglyphbrillen, bei denen durch einfache rot/grün oder rot/cyan Filter die Ansichten für das linke und rechte Auge gefiltert werden. Die Technik ist sehr beliebt, um räumliche Bilder in Büchern oder Zeitschriften darzustellen und ermöglicht eine einfache Wahrnehmung von Tiefe. Die Filter verfälschen jedoch deutlich die Farbwiedergabe und spielen bei Anzeigen keine größere Rolle.

Eine qualitativ deutlich verbesserte Weiterentwicklung des Prinzips durch die Firma Infitec GmbH [36] findet sich jedoch auch im Kino und im Bereich der virtuellen Realität. Es kommt zum Beispiel zur räumlichen Projektion von 3D-Modellen in sogenannten „Cave-Projektionssystemen“ zur Anwendung, die durch eine Rundumprojektion das vollständige Eintauchen in eine virtuelle Umgebung ermöglichen und im Bereich der Fahrzeugentwicklung zu einer Darstellung von Fahrzeugmodellen und der Konstruktion verwendet wird.

Die Technik wurde im Rahmen eines Forschungsprojekts der Daimler AG in Jahr 1999 entwickelt und wird heute unter dem Namen Dolby 3D vermarktet. Das Prinzip basiert auf dem Effekt, dass sich ein als gleich empfundener Farbeindruck aus unterschiedlichen Spektren zusammensetzen kann. Die Bilder der rechten und linken Ansicht werden in den eingesetzten Projektoren aus zwei unterschiedlichen Sätzen von Wellenlängen der Grundfarben Rot, Grün und Blau zusammengesetzt. Die Trennung der Ansichten erfolgt in der Brille durch schmalbandige Interferenzfilter. Eine projektorinterne Farbkorrektur sorgt dafür, dass sich keine farblichen Unterschiede zwischen den Halbbildern ergeben.

Stereoskopische Anzeigen stellen heutzutage die am meisten verbreitete Technologie zur Wahrnehmung von künstlicher Tiefe dar. Die Technik ist ausgereift und lässt sich oftmals sehr leicht in bestehende Konzepte wie Fernseher auf der Basis von Flüssigkristallanzeigen integrieren. Da die Trennung der Ansichten durch die Brille am Ort des Betrachters erfolgt, ermöglicht diese Technologie eine große Bewegungsfreiheit und unterstützt auch mehrere Betrachter.

Die Anzahl der dargestellten Ansichten wird auf das Minimum von zwei reduziert. Die ebenfalls um den Faktor zwei reduzierte Bildauflösung kann durch eine Erhöhung der Grundauffösung der Anzeige kompensiert werden, wodurch annähernd die gleiche Auflösung wie bei monoskopischen Anzeigen erreicht werden kann. Die 3D-Qualität hängt darüber hinaus maßgeblich davon ab, wie hoch die Güte der Kanaltrennung der Brille ist, sodass nur wenige Anteile der falschen Ansicht wahrgenommen werden. Stereoskopische Anzeigen zeigen hierbei sehr gute Werte.

Die Reduzierung der darstellbaren Ansichten auf das Minimum von zwei, hat die Konsequenz, dass eine natürliche Bewegungsparallaxe mit dieser Technologie nicht zu realisieren ist. Bei Bewegung des Betrachters im Raum bleibt die Perspektive auf das Objekt unverändert. Das menschliche Gehirn löst diesen Widerspruch zur Realität auf, in dem es eine der Bewegung des Kopfes entgegengesetzte Bewegung des Objekts annimmt. Diese Scheinbewegung wird übereinstimmend als nicht störend wahrgenommen.

Im Vergleich zu holografischen und volumetrischen Anzeigen werden bei stereoskopischen Anzeigen direkt die zweidimensionale Intensitätsverteilung auf der Anzeige

wahrgenommen und nur anhand der binokularen Disparität im Gehirn fusioniert. Zur scharfen Wahrnehmung der Szene muss der Betrachter auf die Anzeigefläche fokussieren, während die Augen abhängig von der dargestellten Disparität konvergieren. Die Koppelung der Akkommodation mit der Konvergenz (Naheinstellungstrias) wird gebrochen, was bei Szenen mit großer Tiefe zu gesteigerter Augenanstrengung führen kann. Der Einsatz im Automobil hat jedoch den Vorteil, dass die vollständige Kontrolle über die dargestellten Inhalte besteht. Einschränkungen der Technologie können durch geeignete Gestaltung der darzustellenden Inhalte kompensiert werden. Die Nichterfüllung des Tiefenindikators der Akkommodation wird daher als nicht kritisch eingestuft.

Der größte Nachteil ist die Notwendigkeit eines Hilfsmittels in Form einer Brille, welche die Möglichkeiten der Anwendung einschränkt und von vielen Menschen auf Grund des Komfortverlusts abgelehnt wird. Dies wurde auch in Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit bestätigt [4].

Für den Einsatz im Automobil erfüllen stereoskopische Anzeigen viele der gestellten Anforderungen. Die Darstellungsqualität ist gut, die Technologie funktioniert mit bestehenden LCD-Anzeigetechnologien und kann den geforderten Bewegungsbereich vollständig abdecken.

Das Ausschlusskriterium, warum sich in dieser Arbeit gegen diesen Ansatz entscheiden wurde, ist die Notwendigkeit einer Brille. Ist für die Anzeigen im Entertainment des Fondbereichs eine Brillenlösung unter Umständen noch denkbar, so ist diese für ein 3D-Kombiinstrument aus Sicht der funktionalen Sicherheit und Komfortanforderungen an eine Informationsanzeige nicht akzeptabel.

2.3.3.5 Autostereoskopische Anzeigen (ASDs)

Autostereoskopische Anzeigen (englisch *Autostereoscopic Displays*, [ASD]) ermöglichen die Darstellung und Wahrnehmung stereoskopischer Bilder ohne zusätzliche Hilfsmittel wie Brillen. Als Oberbegriff bezeichnen sie sowohl Anzeigen mit zwei und mit mehreren Ansichten (englisch *MultiView Displays*).

Während Anzeigen mit zwei Ansichten analog zu stereoskopischen Anzeigen nur die notwendigen Halbbilder für das linke und rechte Auge darstellen, erzeugen Multi-View Anzeigen mehrere Ansichten. Das Ziel ist wie bei den stereoskopischen An-

zeigen die Wahrnehmung unterschiedlicher Ansichten mit dem linken und rechten Auge. Im Gegensatz zu stereoskopischen Anzeigen können die Ansichten jedoch nicht am Ort des Betrachters durch Brillen für die Augen passend gefiltert werden. Die Anzeige muss durch geeignete Abstrahlung den Raumbereich vor sich in Zonen der linken und rechten Ansicht aufteilen. Zur Wahrnehmung eines stereoskopischen Bildes muss sich der Betrachter an bestimmten Stellen im Raum befinden. Die wichtigsten Technologien sind die *Parallaxebarrieren* und die *Linsenmasken*, die am Prinzip einer Anzeige mit zwei Ansichten in den folgenden Abschnitten vorgestellt werden.

Parallaxe-Barriere Ansatz

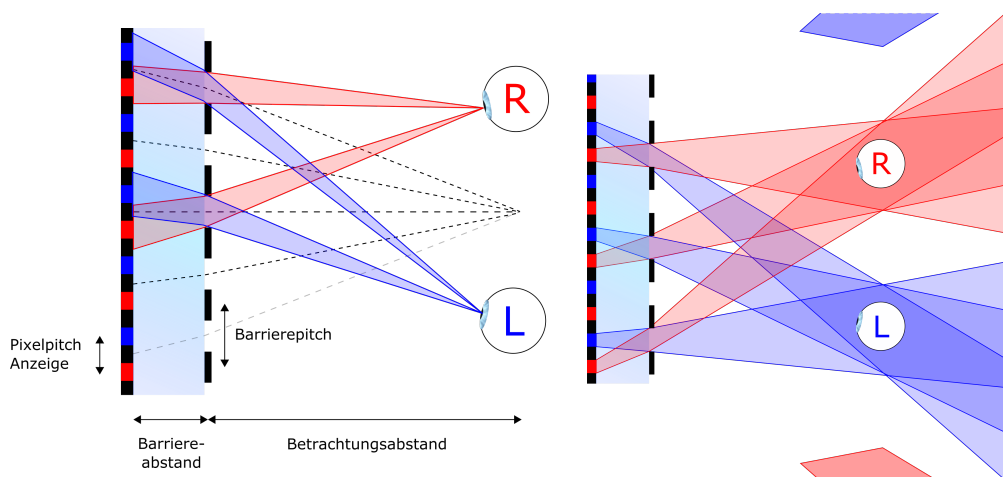


Abbildung 2.8: (links) Wahrnehmung einer Parallaxebarriere; (rechts) Abstrahlung einer Parallaxebarriere

Anzeigen mit Parallaxebarrieren, auch Barrieremasken genannt, zählen zu den raumsequentiellen Methoden. Eine erste experimentelle Umsetzung der Methode erfolgte von Frederick E. Ives im Jahr 1903 [37] und ist heute eine der wichtigsten Methoden der Autostereoskopie und die Grundlage von Anwendungen wie beispielsweise Spielkonsolen [3]. Hauptbestandteil der Methode ist eine Abschattungsmaske (Parallaxebarriere) die in einem geringen Abstand vor oder seltener hinter einem Bildgeber angebracht wird (vgl. Abb. 2.8,links). Bei den Bildgebern handelt es sich in der Regel um Flüssigkristallanzeigen (LCDs) oder seltener um OLEDs. Sie bestehen aus

einer periodischen Anordnung von Pixeln in horizontaler und vertikaler Richtung. Der Abstand zweier Pixel wird als Pixelpitch bezeichnet.

Die Maske besteht aus einer periodischen Anordnung von transparenten und nicht transparenten Elementen. Der Abstand zwischen zwei Öffnungen (Periodenlänge) wird als Barrierepitch bezeichnet. Der Barrierepitch wird etwas geringer als der doppelte Pixelpitch der Anzeige festgelegt, es liegen somit immer zwei Pixel (Pixelpaar) unter einer Barriereöffnung. Zeichnet man einen hypothetischen Mittelpunktstrahl für jedes Pixelpaar ein, der durch die Mitte der Barriereöffnung geht, konvergieren diese in einem Punkt. Der Abstand des Punktes zur Barriere wird idealer Betrachtungsabstand genannt.

Durch geeignete Wahl des Barriereabstandes, des Barrierepitchs und der Breite der Barriereöffnungen kann ein Betrachter mit festem Augenabstand in einem definierten Betrachtungsabstand zur Anzeige jeweils mit dem linken und rechten Auge nur jeden zweiten Pixel wahrnehmen (in Abbildung 2.8,links) vereinfacht für zwei Barriereöffnungen dargestellt). Die Pixel werden abwechselnd der linken oder rechten Ansicht zugeordnet (in Abb. Rot oder blau), wodurch die wahrgenommene Auflösung pro Auge halbiert wird. Zur Darstellung eines stereoskopischen Bildes wird das linke und rechte Halbbild spaltenweise verschachtelt auf der Anzeige dargestellt.

Durch die endliche Ausdehnung der Pixel der Anzeige und der Öffnungsbreite der Barriere ergeben sich räumlich begrenzte Bereiche vor der Anzeige, in denen das linke und rechte Halbbild störungsfrei wahrgenommen werden kann (vgl. Abb. 2.8,rechts). Diese Bereiche werden in der Literatur als „*Sweetspots*“ oder „*Viewing Zones*“ bezeichnet, in dieser Arbeit werden sie zur besseren Abgrenzung zu später eingeführten Begriffen als „*monokulare Stereozonen*“ benannt. Die laterale Ausdehnung der Zonen kann maximal den Augenabstand betragen, da sich anderenfalls nicht beide Augen gleichzeitig in monokularen Stereozonen der linken und rechten Ansicht befinden können. Der Betrachter besitzt somit einen eingeschränkten Bewegungsbereich, in dem er sich frei bewegen kann ohne, dass der Tiefeneindruck verloren geht.

Auf Grund der periodischen Anordnung der Pixel und Barriereöffnungen ergibt sich eine periodische Fortsetzung der monokularen Stereozonen im Raum (in Abbildung 2.8, rechts im oberen und unteren Bildrand angedeutet). Auf eine Ansicht des linken

Halbbildes folgt nach einem Übergangsbereich immer die Ansicht des rechten Halbbildes. In der Praxis ist darauf zu achten, dass die Augen nicht die jeweils falsche Ansicht wahrnehmen. Dieser Fall wird als „*Pseudoskopie*“ bezeichnet und hat den Effekt, dass sich die Tiefe im stereoskopischen Bild umkehrt. Objekte, die in der dargestellten Szene eigentlich vor anderen liegen, befinden sich nun ihrer Disparität nach hinter diesen. Weitere Tiefenindikatoren werden jedoch nicht geändert, sodass es zu Widersprüchen kommen kann, bei denen ein Objekt, das vermeintlich hinter einem anderen liegt, plötzlich dieses verdeckt. Abhängig von der dargestellten Szene ist ein pseudoskopisches Bild mehr oder weniger störend, muss aber auf jeden Fall vermieden werden.

Die Anordnung der Barriereöffnungen kann in unterschiedlichen Mustern erfolgen. Die meist verbreitetste Anordnung ist die Streifenmaske, dessen Barriereöffnung sich streifenförmig über die gesamte Höhe der Anzeige erstreckt. Es gibt jedoch auch weitere Möglichkeiten der Anordnung wie das Schachbrettmuster, bei dem die Barriereöffnungen zeilenweise versetzt sind.

In der bisherigen Beschreibung ist von einer statischen Barrieremaske ausgegangen worden. Diese bestehen aus einem Glas definierter Dicke, auf dem durch Spin-, Spray- oder Sputterverfahren lichtundurchlässige Dünnschichten aufgetragen werden. Der Vorteil statischer Barrieren besteht im hohen Grad der Lichtabsorption in den nichttransparenten Bereichen, was zu einer hohen Güte der Trennung der Ansichten führt. Nachteile sind, die fehlende Möglichkeit, die Barriere auszuschalten oder die Barriereparameter anzupassen.

Neben den statischen Barrieren unterscheidet man dynamische Parallaxebarrieren. Hierbei besteht die Barriere aus einer monochromen Flüssigkristallanzeige (ohne Hintergrundbeleuchtung). Die Transparenz einzelner Pixel kann lokal von transparent zu undurchlässig geändert werden. Es besteht somit die Möglichkeit, eine Barriere vollständig transparent zu schalten, wodurch das ASD wahlweise auch als monoskopische Anzeige genutzt werden kann.

Darüber hinaus existieren erste Anzeigen, bei denen sich eine Barriereöffnung über einem Pixelpaar aus einer Vielzahl von (Barriere)Pixeln zusammensetzt, von denen einige transparent und der Rest nicht transparent geschaltet sind. Es wird somit

möglich, die Barriereöffnung vor einem Pixelpaar in diskreten Schritten lateral zu verschieben. Als Konsequenz verschieben sich die bisher statischen Sweetspots ebenfalls in ihrer lateralen Lage. In Kombination mit einer Erfassung der Kopfposition des Betrachters kann durch Nachführung der monokularen Stereozonen der Betrachtungsbereich in lateraler Richtung deutlich erweitert werden.

Barrieremasken stellen in ihren Grundzügen eine sehr einfache Technologie dar, die gut in bestehende Herstellungsprozesse von Anzeigen integriert werden kann. In der Ausführung als Anzeige mit zwei Ansichten reduziert sich die Erstellung von Inhalten auf zwei Halbbilder für das linke und rechte Auge, eine Bewegungsparallaxe ist somit nicht möglich. Die binokulare Disparität stellt den wichtigsten Tiefenindikator dar. Nachteile sind die Reduzierung der wahrgenommenen Helligkeit, da nur die Hälfte der Pixel pro Auge wahrnehmbar ist und die damit einhergehende Halbierung der wahrgenommenen Auflösung bei Darstellung eines stereoskopischen Bildes. Diese Nachteile können jedoch durch eine stärkere Hintergrundbeleuchtung und durch eine Steigerung der Auflösung der zugrundeliegenden Anzeige reduziert werden. Dynamische Barrieren haben zusätzlich den Vorteil, dass durch die Möglichkeit des Abschaltens der Barriere immer die Rückfalllösung einer monoskopischen Anzeige in voller Auflösung existiert.

Linsenmasken

Anzeigen mit Linsenmasken stellen den zweiten weit verbreiteten Ansatz zur Realisierung einer autostereoskopischen Anzeige dar. Der Aufbau ist vergleichbar mit dem einer Anzeige mit Barrieremaske, die Parallaxebarriere wird hierbei jedoch durch ein Register von plankonvexen Zylinderlinsen (Lentikular) auf einer Glasscheibe variabler Dicke ersetzt (vgl. Abb.2.9, links). Der Bildgeber ist erneut ein LCD oder OLED. Der Abstand der Linsen wird etwas kleiner als der doppelte Pixelpitch der Anzeige gewählt, wodurch sich unter jeder Linse pro Zeile jeweils ein Pixelpaar befindet. Die wahrgenommene Auflösung bei der Darstellung eines stereoskopischen Bildes wird auch hier halbiert. Die Mittelpunktstrahlen eines Pixelpaares konvergieren in einem Punkt im Betrachtungsabstand. Die Linsenmaske wird in einem Abstand vor den Bildgeber angebracht, welcher der Brennweite der Linsen entspricht. Die von einem Punkt auf dem Bildgeber in unterschiedliche Richtungen abgestrahlten Lichtstrah-

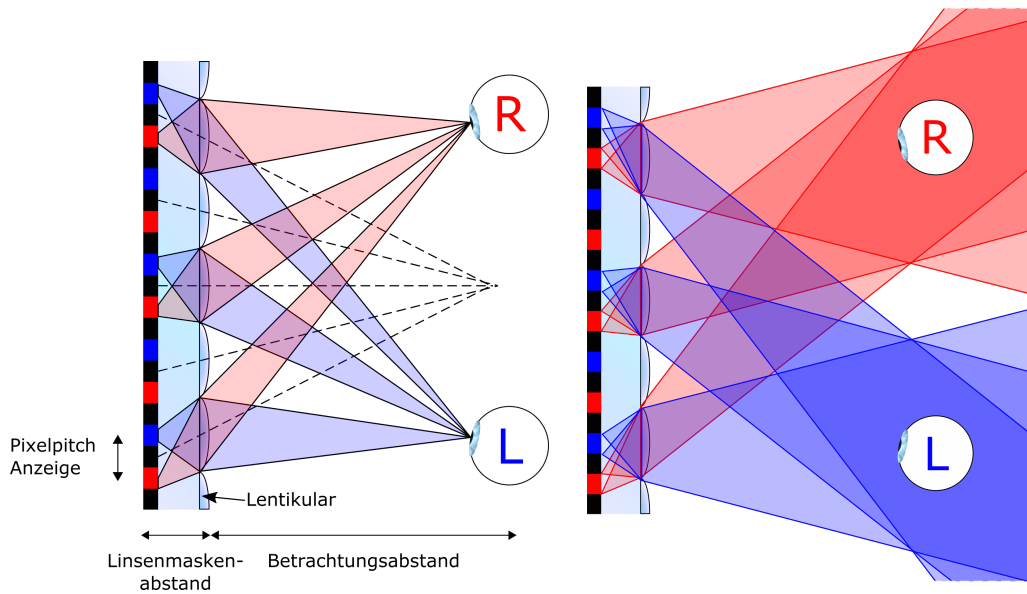


Abbildung 2.9: (links) Wahrnehmung einer Linsenmaske; (rechts) Abstrahlung einer Linsenmaske

len werden durch die Linsen ins Unendliche abgebildet und parallel unter einem Winkel abgestrahlt. Durch die räumliche Ausdehnung der Pixel auf dem Bildgeber strahlt die Anzeige in begrenzte Winkelbereiche ab. Bei geeigneter Wahl des Linsenmaskenabstandes, des Pitches der Linsenmaske und der Brennweite ergeben sich in einem festen Betrachtungsabstand monokulare Stereozonen, die sich wie bei der Parallaxebarriere periodisch fortsetzen (siehe Abb. 2.9, rechts).

Die Herstellung solcher statischer Linsenmasken mit individuellen sphärischen und asphärischen Profilen ist heutzutage mit einer sehr großen Genauigkeit möglich. Sie haben jedoch den großen Nachteil, dass sie sich nicht ausschalten lassen. Es wird daher intensiv an dynamischen Linsenmasken aus Flüssigkristallen geforscht, die aus zwei Brechungsindices bestehen, welche durch Anlegen einer Spannung variiert werden können. Dies ermöglicht es, die brechende Wirkung ein- und auszuschalten werden [38, 39]. Schaltbare Lentikulare existieren bisher nur als Prototypen. Es bestehen noch Probleme bei der Genauigkeit des Linsenprofils und der Blickwinkelstabilität der Linse im ausgeschalteten Zustand, sodass sich diese nicht vollständig ausschalten lassen.

Anzeigen auf der Basis von Linsenmasken haben gegenüber Barrieremasken den

Vorteil, dass auf Grund der optischen Abbildung keine Helligkeit verloren geht. Des Weiteren sind die monokularen Stereozonen schärfer begrenzt und das Übersprechen von falschen Ansichten geringer als bei Parallaxebarrieren. Die monokularen Stereozonen sind daher größer als bei Parallaxebarrieren, jedoch gilt auch hier, dass die maximale laterale Ausdehnung nicht größer als der Augenabstand werden kann.

Ein Nachteil von Linsenmasken ist, dass eine dynamische Nachführung der Sweet-spots zur Zeit immer mit qualitativen Einschränkungen verbunden ist. Eine mechanisch verschiebbare Linsenmaske führt zu zusätzlichen Grenzflächen, welche optische Störungen erzeugen und ist für einen Einsatz im Fahrzeug nicht tauglich. Flüssigkristalllinsen mit verschiebbarer optischer Achse zeigen noch nicht die Qualität statischer Linsen.

Zeitsequentielle Anzeigen mit gerichteter Hintergrundbeleuchtung

Autostereoskopische Anzeigen mit zeitsequentieller Ansteuerung der Hintergrundbeleuchtung (engl. *Directional Backlight*) erzeugen stereoskopische Bereiche im Raum indem die Hintergrundbeleuchtung eines LCDs gerichtet abgestrahlt wird. [40, 41] Dies geschieht durch Anpassung der Lichtleiter der Hintergrundbeleuchtung, indem beispielsweise eine spezielle Folie in die Hintergrundbeleuchtung eingebracht wird [41]. Abhängig von welchem Rand der Hintergrundbeleuchtung Licht in den Lichtleiter eingekoppelt wird, ändert sich die Abstrahlungsrichtung. Erfolgt dies im zeitsquenteiligen Wechsel mit ausreichend hoher Frequenz und wird synchron auf der hinterleuchteten Anzeige linke und rechte Halbbilder angezeigt, nimmt ein Betrachter ein stereoskopisches Bild wahr, wenn er sich mit beiden Augen in unterschiedlichen Stereozonen befindet.

Eine solche Anzeige hat den Vorteil, dass die Halbbilder in voller Auflösung dargestellt werden und der Abstrahlwinkel sehr groß gewählt werden kann. Die Anzeige hat somit die Eigenschaft, dass beim Verlassen des stereoskopischen Bereichs ein Übergang in ein monoskopischen Bereich erfolgt und keine Pseudoskopie auftritt.

Der Nachteil dieses Ansatz besteht darin, dass schnelle LCDs (mind. 120Hz) notwendig sind, die aber nicht in allen Einsatzbereichen (z.B. im Automobil) garantiert werden können. Zudem ist die Lage des stereoskopischen Betrachtungsbereiches festgelegt und kann nicht angepasst werden, da dies eine dynamische Anpassung des

3D-Films notwendig machen würde. Ebenfalls kann die Anzeige nur bedingt auf eine monoskopische Darstellung umgeschaltet werden, was zu einer inhomogenen Lichtverteilung führt.

Multi-View Anzeigen

Autostereoskopische Anzeigen mit mehr als zwei Ansichten werden als MultiView Anzeigen bezeichnet. Technologisch basieren sie auf den Konzepten der Linsen- oder Barrieremasken, jedoch liegen nun nicht ein Pixelpaar, sondern mehrere Pixel unter einer Linse oder einer Barriereöffnung. Die Anzahl der Ansichten liegt typischerweise im Bereich von 7-20 Ansichten [42], jedoch wurden auch schon Anzeigen mit bis zu 256 Ansichten realisiert [43].

Abhängig von der Art der Übergänge benachbarter Ansichten werden Anzeigen mit diskreten und kontinuierlichen Ansichten unterschieden [44]. Die Festlegung, welches Verhalten eine Multi-View Anzeige darstellt, wird durch die Definition der Barriere oder Linsenparameter bestimmt. Ähnlich den Zwei-Ansichten-Anzeigen ist hier bei diskreten Übergängen ein deutlicher Sprung wahrnehmbar, wenn sich ein Betrachter aus dem Raumbereich einer Ansicht in die angrenzende Ansicht bewegt. Diese Anzeigen werden vorrangig eingesetzt, wenn es mehreren Betrachtern gleichzeitig möglich sein soll, ein Bild auf einer Anzeige wahrzunehmen. Anzeigen mit kontinuierlichen Übergängen haben das Ziel, dass der Wechsel von einer Ansicht in die nächste möglichst unmerklich verläuft. Hierzu werden die benachbarten Ansichten überlappend gestaltet, was zu einem fließenden Übergang führt. Durch den Wechsel der Ansicht bei Kopfbewegungen kann somit eine diskrete Form der Bewegungsparallaxe realisiert werden. Ein Nachteil dieser Methode ist, dass je weiter ein Objekt von Nullebene entfernt ist, desto unschärfer wird es dargestellt. Als Konsequenz kann mit diesem Prinzip nur eine geringe Tiefe dargestellt werden.

Anzeigen mit kontinuierlichen Übergängen ermöglichen einen großen lateralen Bewegungsbereich ohne größere Störungen. Wird die Anzahl der Ansichten und der Abstrahlwinkel groß gewählt, kann eine laterale Bewegungsfreiheit bis zu einigen Metern möglich werden. Die endliche Anzahl der Ansichten führt jedoch auch bei diesen Anzeigen zu einem periodisches Wiederholen der Ansichten, wodurch der Betrachtungsbereich beschränkt wird. Eine größere Bewegungsfreiheit hat immer eine

Reduzierung der Auflösung zur Folge.

Es ist jedoch möglich, die Kopfposition des Betrachters zu detektieren und die Zuordnung der Ansichten zu den Pixeln unter der Linse oder Barrieremaske anzupassen, sodass ein Betrachter nie ein pseudoskopisches Bild wahrnimmt [45]. Die dynamische Adaption auf die Veränderung der Betrachterposition erfolgt somit bei diesen Anzeigen nicht durch die Anpassung der Abbildungsfunktion, sondern durch diskrete Änderung der Anzeigefunktion.

Multi-View Anzeigen haben den Vorteil, dass sie im Vergleich zu Zwei-Ansichten-Anzeigen es mehreren Betrachtern gleichzeitig ermöglichen können, ein stereoskopisches Bild wahrzunehmen oder den Bewegungsbereich deutlich zu erweitern. Dies geschieht jedoch auf Kosten der wahrgenommenen Auflösung. Im gleichen Maße wie die Anzahl der darstellbaren Ansichten steigt, sinkt die Auflösung, was zu einer wahrnehmbaren Verringerung der Darstellungsqualität führt und die Möglichkeiten der darzustellenden Inhalte einschränkt. Eine hohe Anzahl an Ansichten führt zu einer wahrgenommenen Bewegungsparallaxe, da sich mit der Kopfbewegung die Perspektive ändert.

Ein Problem stellt jedoch die Erzeugung, Speicherung und Übertragung mehrerer Ansichten einer räumlichen Szene unter Echtzeitbedingungen dar, was bei künstlich erzeugten Inhalten zu hohen Anforderungen an die Grafikleistung des bilderzeugenden Systems führt.

Für einen Einsatz im Automobil erfüllen autostereoskopische Anzeigen gleich stereoskopischer Anzeigen eine Vielzahl der gestellten Anforderungen. Die nicht erfüllten Tiefenindikatoren der Akkomodation und der Bewegungsparallaxe führen bei geeigneter Gestaltung der Inhalte nicht zu Einschränkungen.

Im Vergleich zu stereoskopischen Anzeigen werden bei autostereoskopische Anzeigen keine zusätzlichen Hilfsmittel wie Brillen benötigt. Dieser Vorteil wird jedoch mit einer Einschränkung der Bewegungsfreiheit erkauft, da sich ortsfeste Sweetspots ergeben. Mit den Konzepten von Multi-View Anzeigen oder dynamischen Parallaxebarrieren existieren jedoch Konzepte diese Nachteile zu überkommen.

2.3.4 Konzept des Technologieansatzes

Technologieentscheidung: Dynamische Barrieremasken

Im Vergleich der Technologien Holografischer-, Volumetrischer- und (auto)stereoskopischer Anzeigen wurden **dynamischer Barrieremasken** aus der Kategorie der **autostereoskopischen Anzeigen** als die Technologie mit dem größten Potenzial für eine erfolgreiche Umsetzung der Zielvorgabe eines 3D-Kombiinstrument bewertet.

Die Entscheidung für Barrieremasken begründet sich durch die potentiell hohe Darstellungsqualität und Bildauflösung, welche für eine Textdarstellung notwendig ist und die Möglichkeit, die Barriere vollständig transparent zu schalten. Es ist somit jederzeit möglich auf eine uneingeschränkte, monoskopische Darstellung umzuschalten.

Die Nichterfüllung der Tiefenindikatoren der Akkomodation und der Bewegungsparallaxe werden nicht als kritisch angesehen, da diese bei entsprechender Auslegung der darzustellenden Inhalte zu keinen Störungen führen.

Der geforderte Betrachtungsbereich stellt jedoch eine Herausforderung dar. Dieser kann von statischen Barrieremasken mit Sweetspots, deren laterale und longitudinale Ausdehnung begrenzt ist, nicht abgedeckt werden. Es wurde daher die Entscheidung getroffen dynamische Barrieremasken zu verwenden.

Dies macht jedoch zusätzlich ein Kopferfassungssystem (HTS) notwendig, welches die Kopfposition des Betrachters schnell und präzise erfasst. Eine stetige Nachführung der Sweetspots bedarf zudem einer ständigen Erfassung der Kopfposition, welche in einer Fahrzeugumgebung nicht immer garantiert werden kann. In Abwägung alternativer Konzepte, bei denen auf ein Verlassen des Sweetspots ein Übergang auf eine monoskopische Darstellung erfolgt, wurde sich dennoch für das Konzept einer kontinuierlichen Nachführung entschieden, da ansonsten die Bewegungsfreiheit des Fahrers zu sehr eingeschränkt wird. Weitere Untersuchungen im Verlauf der Arbeit bestätigten diese Entscheidung, da mit der Entwicklung einer Methode zur unmerklichen Umschaltung auf eine monoskopische Darstellung eine gute Rückfalllösung für ein Aussetzen der Kopferfassung geschaffen wurde.

Der Stand der Technik für dynamische Barrieremasken zum Ausgangszeitpunkt die-

ser Arbeit war definiert durch einzelne prototypische Anzeigen verschiedener Hersteller, die eine laterale Verschiebung der Sweetspots ermöglichen. Diese Anzeigen zeigten eine ausreichende Qualität bei einem Betrachter in Ruhe. Bei Bewegung waren jedoch Störungen in Form von Helligkeitsschwankungen und Bildübersprechen sichtbar, die erst bei erneuter Ruhe verschwanden. Für einen Einsatz im Automobil sind diese Einschränkungen nicht akzeptabel.

Die erste Problematik, die es im Rahmen dieser Arbeit zu lösen galt, war daher eine Untersuchung und Optimierung des dynamischen Verhaltens einer Barrieremaske bei lateraler Adaption auf eine Änderung der Betrachtungsposition.

Auf Grund der angestrebten Breite der Anzeige, kann der longitudinale Betrachtungsbereich nicht vollständig von einem Sweetspot abgedeckt werden. Zum Ausgangspunkt dieser Arbeit existierten keine bekannten Ansätze wie eine Adaption auf den Betrachtungsabstand bei dynamischen Barrieremasken erfolgen kann. Diese zweite Problematik stellt einen weiteren Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit dar, welche es für den ausgewählten Technologieansatz zu lösen galt.

Überdies war das Ziel, die stereoskopische Darstellungsqualität zu steigern, um auch Szenen mit größerer Tiefe ohne Störungen darstellen zu können.

2.4 Optische Zielfunktion für ein 3D-Kombiinstrument

Nachdem aus der Beschreibung der qualitativen Anforderungen an ein 3D-Kombiinstrument der passende Technologieansatz abgeleitet wurde, wird für diesen die optische Zielfunktion aufgestellt. Die optische Zielfunktion ist eine quantitative Beschreibung der optischen Eigenschaften einer 3D-Anzeige. Für autostereoskopische Anzeigen auf der Basis von Barrieremasken beschreibt die optische Zielfunktion die Abstrahlcharakteristik der Anzeige. Es gilt die Hypothese, dass für den Fall, dass die Anzeige die Charakteristika der optischen Zielfunktion besitzt, sie auch die nicht messbaren qualitativen Anforderungen erfüllt.

In den folgenden Abschnitten, werden zunächst einige Grundlagen zur quantitativen Charakterisierung einer Anzeige zusammengefasst und aus diesen im Anschluss die optische Zielfunktion abgeleitet.

2.4.1 Charakterisierung Autostereoskopischer Anzeigen

Ziel der Charakterisierung ist die messtechnische Bestimmung charakteristischer Größen, aus denen auf die visuell wahrgenommene Qualität der Anzeige zu schließen ist. Die Standardisierung allgemein anerkannter Parameter und Messtechniken von ASDs hat zwar in den letzten Jahren deutliche Fortschritte gemacht, befindet sich jedoch immer noch am Anfang. In diesem Abschnitt werden die bereits standardisierten Messgrößen und Messverfahren vorgestellt. Darüber hinaus wurden vom Autor einige neue Größen und Messverfahren zur Charakterisierung einer Anzeige entwickelt, die im Kapitel 4 eingeführt werden.

Die Parameter zur Charakterisierung einer räumlicher Anzeige sind abhängig von der eingesetzten Technologie. Die in diesem Abschnitt vorgestellte Charakterisierung bezieht sich auf autostereoskopische Anzeigen mit zwei Ansichten.

2.4.1.1 Allgemeine Charakterisierung einer Anzeige

Autostereoskopische Anzeigen müssen die gleichen Anforderungen monoskopischer Anzeigen erfüllen. Dazu gehört eine dem Einsatzzweck entsprechende Gesamthelligkeit, ein ausreichend großer Farbraum, ein hoher (2D)-Kontrast, gute Farb- und Helligkeitshomogenität über den gesamten Anzeigenbereich und ein ausreichend großer Betrachtungswinkel. Des Weiteren sollen keine zeitlichen Störungen wie Flackern oder Bewegungsunschärfe auftreten. Entsprechende Messvorschriften und Spezifikationsanforderungen finden sich in Messstandards (ISO [7], ICDM [46]) oder werden im Automobilbereich von den Fahrzeugherstellern als eigene Spezifikationen vorgegeben.

Darüber hinaus ergeben sich aus dem stereoskopischen Prinzip neue Eigenschaften, die in diesem Abschnitt thematisiert werden.

Eine Autostereoskopische Anzeige wird hauptsächlich über die folgenden Parameter charakterisiert:

- Abstrahlcharakteristik der Anzeige
- Qualität der Kanaltrennung
- Größe und Lage des stereoskopischen Betrachtungsbereichs

Für die ersten zwei Punkte existieren bereits für den Fall einer statischen Anzeige standardisierte Messgrößen und Verfahren zur Messung, die im Folgenden vorgestellt werden. Für den letzten Punkt und die Erweiterung der genannten Punkte auf den dynamischen Fall wurden eigene Methoden entwickelt, die in Kapitel 4 vorgestellt werden.

2.4.1.2 Abstrahlcharakteristik

Der wichtigste Eigenschaft einer autostereoskopischen Anzeige ist die winkelabhängige Abstrahlcharakteristik einer einzelnen Barriereöffnung. Diese besagt welche Leuchtdichte, welche die photometrische Entsprechung der Strahldichte und damit ein Maß der physiologisch wahrgenommenen Helligkeit ist, von einem Betrachter unter einem bestimmten Blickwinkel an der Barriereöffnung wahrgenommen wird. Entscheidend ist hierbei nur der horizontale Abstrahlwinkel, da auf Grund der horizontal getrennten Anordnung der Augen nur in dieser Richtung eine Trennung der Ansichten erfolgen muss. Prinzipbedingt strahlt eine Anzeige in getrennte Winkelbereiche die Ansichten für das linke und rechte Auge ab.

Gemessen werden kann die Abstrahlcharakteristik mit einem goniometrischen Aufbau, bei dem ein Leuchtdichtemessgerät an einem Messarm radial um den Messpunkt geführt wird oder einer Leuchtdichtemesskamera mit einem hyperzentrischen Objektiv (Konoskopobjektiv). Eine detaillierte Beschreibung der in dieser Arbeit verwendeten Messtechnik findet sich im Kapitel 4. In Abbildung 2.10 ist eine Leuchtdichtemessung aufgenommen mit einem Goniometer dargestellt. Der charakteristische Verlauf für L_{WB} ergibt sich, wenn auf der Ansicht für das linke Auge ein vollflächig weißes und zugleich auf der Ansicht für der rechte Auge ein vollflächig schwarzes Bild angezeigt wird. Im Fall L_{BW} ist die Zuordnung der Ansichten gerade invertiert. Ein Betrachter mit einem typischen Augenabstand von 62 mm, der sich in einem Betrachtungsabstand von ungefähr 750 mm zentral vor der gemessenen Barriereöffnung befindet, würde mit seinen Augen jeweils unter $\pm 2,4^\circ$, bezüglich der Normalen der Anzeige auf die Barriereöffnung blicken und die zwei Ansichten getrennt wahrnehmen. Bewegt sich der Betrachter laterale vor der Anzeige um wenige Grad nimmt er eine Veränderung der Helligkeit wahr. Der Verlauf und die Abnahme der Helligkeit ist charakteristisch für die Anzeige. Würde sich der Betrachter, ohne

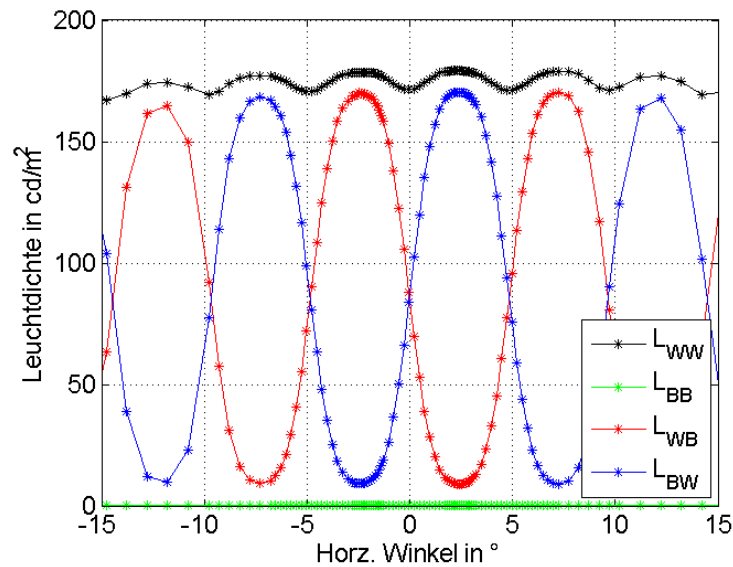


Abbildung 2.10: Goniometermessung der Leuchtdichteverteilung über den Winkel; mit L_{WW} = Leuchtdichteverlauf bei Anzeige von vollflächig Weiß auf der rechten und linken Ansicht, L_{WB} und L_{BW} jeweils eine Ansicht Schwarz und Weiß und L_{BB} beide Ansichten Schwarz

Adaption der Anzeige, soweit bewegen, dass sich seine Winkelposition um ungefähr $4,8^\circ$ verändert, würde er mit seinen Augen eine pseudoskopische (tiefeninvertierte) Darstellung wahrnehmen. Dies gilt es durch Anpassung der Abstrahlcharakteristik auf eine Änderung der Betrachterposition zu vermeiden. Aus der Darstellung ist zu erkennen, dass die Leuchtdichteverläufe ein periodisches Verhalten zeigen. In den weiteren Betrachtungen wird sich daher auf den Leuchtdichteverlauf innerhalb einer Periode (im dargestellten Fall $\pm 4,8^\circ$) konzentriert.

Neben den Messungen der Leuchtdichteverläufe bei Darstellung unterschiedlicher Inhalte für die zwei Ansichten, werden auch die Verläufe bei Anzeige von entweder vollflächig weiß L_{WW} oder vollflächig schwarz L_{BB} auf beiden Ansichten gemessen. Die Darstellung L_{WW} gibt dabei Auskunft, welche Helligkeitsschwankungen auf einer Anzeige wahrgenommen werden würden, wenn auf beiden Ansichten das gleiche Bild (monoskopische Darstellung) dargestellt wird und die Anzeige nicht adaptiert. Zugleich kann daraus abgeleitet werden, wie stark ein Beifahrer ein Streifenmuster mit unterschiedlichen Helligkeiten auf der Anzeige wahrnimmt.

Die Helligkeitsverteilung L_{BB} stellt ein Maß für den Schwarzwert der Anzeige dar,

welcher auf Grund einer endlichen Resttransmission der Flüssigkristallanzeige generell auftritt.

2.4.1.3 Crosstalk

Mit dem englischen Begriff Crosstalk wird das Übersprechen von Informationen des linken Kanals (Ansicht) in die Ansicht des rechten Auges und umgekehrt bezeichnet [47]. Die Terminologie stammt dabei aus dem Bereich der Signalübertragung. Bei stereoskopischen Anzeigen mit hohem Crosstalk nimmt ein Betrachter mit einem Auge nicht nur das Bild der gewollten Ansicht wahr, sondern zeitgleich auch Anteile des Bildes der ungewollten, komplementären Ansicht.

Es gilt zu unterscheiden zwischen dem ursächlichen Übersprechen (Crosstalk) und den sichtbaren Störungen, welche sich in Form von wahrnehmbaren Geisterbildern äußern können und daher *engl. Ghosting* genannt werden.

Die Gründe für einen gesteigerten Crosstalk sind vielfältig und abhängig von der eingesetzten Technologie. Mögliche Gründe für ein gesteigertes Übersprechen bei Parallaxebarrieren und Linsenmasken sind: die optische Qualität der Linse, die endliche Extinktion der Parallaxebarriere, mangelnde Genauigkeit der Ausrichtung des Bildgebers bezüglich der Barriere/Linse, Reflektionen zw. Grenzschichten und Beugung[48]. Hinzu kommt, dass die Höhe des Crosstalks abhängig von der Position des Betrachters im Raum und der Position der betrachteten Stelle auf der Anzeige ist.

Definition Crosstalk

In der Literatur finden sich verschiedene mathematische Definitionen des Crosstalks [49–53]. In dieser Arbeit wird die folgende Definition verwendet, welche auch in der Messvorschrift der ICDM [46] empfohlen wird und sich in den letzten Jahren zunehmend als Standard durchsetzt.

$$\begin{aligned} XT_L(\varphi) &= \frac{L_{BW}(\varphi) - L_{BB}(\varphi)}{L_{WB}(\varphi) - L_{BB}(\varphi)} \\ XT_R(\varphi) &= \frac{L_{WB}(\varphi) - L_{BB}(\varphi)}{L_{BW}(\varphi) - L_{BB}(\varphi)} \end{aligned} \tag{2.1}$$

Hierbei ist XT_L der Crosstalk der linken Ansicht, XT_R der Crosstalk der rechten Ansicht und der Winkel φ der horizontale Abstrahlwinkel. Die Helligkeitsverteilungen L_{WB}, L_{BW} und L_{BB} entsprechen den in Abb. 2.10 dargestellten Kurven. Das

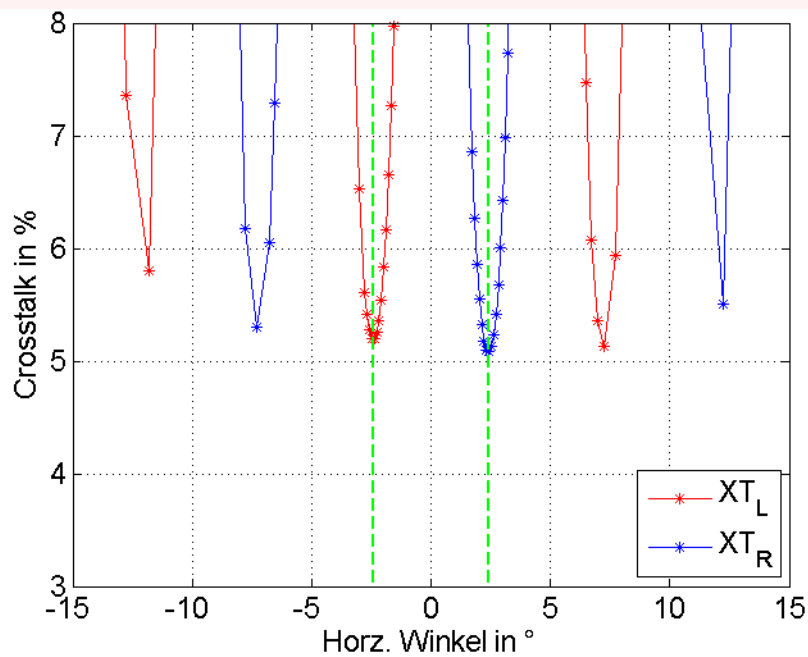
resultierende Verhältnis wird als Prozentwert ausgedrückt.

Der Crosstalk ist somit definiert als das Verhältnis der Kontraste der beiden Ansichten bei Darstellung von jeweils schwarz und weiß auf einer Ansicht.

Die Darstellung von Schwarz auf der einen und Weiß auf der anderen Ansicht stellt den maximalen Leuchtdichteunterschied zwischen den Ansichten dar. Der gemessene Crosstalk ist somit eine maximale Abschätzung.

Je geringer der Crosstalk desto besser ist eine Anzeige. Der minimal gemessene Werte des Crosstalks stellt daher einen wichtigen Parameter zur Beurteilung der Qualität einer autostereoskopischen Anzeige dar.

Beispiel: Crosstalk



In der Abbildung ist der Crosstalkverlauf für die linke und rechte Ansicht der in Abbildung 2.10 dargestellten Goniometermessung abgebildet.

Ein Betrachter mit Augenabstand 62 mm, der sich zentral, in einem Abstand von 750 mm vor der Anzeige befindet, schaut mit seinem Augen unter $\pm 2,4^\circ$ auf den Messpunkt mittig auf der Anzeige. Er nimmt mit dem linken Auge den Crosstalk von $XT_L(2,4^\circ) \approx 5\%$ und mit dem rechten Augen einen Crosstalk $XT_R(-2,4^\circ) \approx 5\%$ wahr.

Wahrnehmung von Crosstalk

Hoher Crosstalk führt zu einer schlechteren Wahrnehmung der stereoskopischer Anzeigen [54–57]. Die Auswirkungen reichen von wahrgenommener Unschärfe, Abnahme des Kontrasts, Geisterbildern, gesteigerter Auganstrengung bis zum Versagen der binokularen Fusion und der Wahrnehmung monoskopischer Halbbilder.

Die Sichtbarkeit von Störungen ist dabei abhängig von den dargestellten Inhalten und nimmt mit steigenden Kontrasten und größeren binokularen Disparitäten zu.

In der Literatur finden sich eine Bandbreite von deutlich abweichenden Schwellwerten von **0,2%-5,8%** [58–60], über denen negative Effekte beobachtet wurden. Eine Schwierigkeit stellt hierbei dar, dass oftmals nicht exakt beschrieben wurde, nach welcher Konvention und mit welchen Inhalten gemessen wurde.

Einen Grenzwert für den in dieser Arbeit angestrebten Einsatz als Kombiinstrument ist maßgeblich abhängig vom Design (Kontrast und Tiefe) der darzustellenden Inhalte. Eigene während der Arbeit gesammelte Erfahrungen bestätigen, dass ein optimaler Wert für den Crosstalk, welcher die volle Frei-

heit anzuzeigender Kontraste zulässt, im Bereich unter **0,2%** liegt. Die technische Realisierung solcher Werte ist jedoch nicht ohne weitere Einschränkungen, wie eine deutliche Absenkung der Gesamthelligkeit möglich.

Crosstalkwerte für ein realisierbares und nutzbares System liegen höher und bedingen somit möglichst angepasste Darstellungsinhalte, bei denen darauf geachtet wird, dass keine lokalen Kontraste in Kombination mit Objekten großer Tiefe auftritt. Das Konzept dieser wechselseitigen Optimierung von Technik und Inhalten wird vom Autor als „kooperativer Inhalt“ bezeichnet.

Unter diesen Rahmenbedingungen wurde zum Beginn der Arbeit ein Wert des maximalen Crosstalks von kleiner als **3,5%** angestrebt. Durch neue Erkenntnisse und unter Berücksichtigung neuer Designvorgaben wird für eine finale Anzeige ein Wert unter **2%** als Zielwert angestrebt.

Dieser Wert begründet sich auch in der Tatsache, dass durch die Verwendung von Bildverarbeitungsmethoden der sogenannten *Crosstalk-Cancellation* das wahr-

Werte Crosstalk

Max. Crosstalk	3,5 %
Ziel Crosstalk	< 2 %

genommene Ghosting reduziert werden kann [61, 62]. Hierzu wird ein Modell aufgestellt, aus dem hervorgeht, wie hoch die Leuchtdichte des ungewollten Übersprechens auf die wahrgenommene Ansicht ist. Dieser Anteil wird von dem Bild der gewollten Ansicht durch Modifikation der Grauwerte abgezogen. In der Summe der Leuchtdichten des gewollten und ungewollten Bildes ergibt sich ein ungestörtes Bild. Es wird somit nicht das physikalische Übersprechen reduziert, sondern nur die sichtbaren Auswirkungen minimiert.

Die Methode ist in ihrer Anwendung jedoch begrenzt, da beispielsweise bei einem schwarzen Bild der gewollten Ansicht keine Möglichkeit besteht eine Leuchtdichte zu subtrahieren. In diesem Fall muss der Schwarzwert des dargestellten Inhaltes angehoben werden, wodurch der realisierbare Kontrast und damit die Qualität der Anzeige reduziert wird. Die Methode funktioniert daher umso besser je tiefer der „physikalisch“ erreichbare Crosstalk ist [48].

2.4.2 Definition der Optischen Zielfunktion für ein 3D-Kombiinstrument

Nachdem aus der Beschreibung der qualitativen Anforderungen an ein 3D-Kombiinstrument der passende Technologieansatz abgeleitet wurde, wird für diesen die optische Zielfunktion $\Psi(\vec{x}, t)$ aufgestellt. Die optische Zielfunktion ist eine quantitative Beschreibung der optischen Eigenschaften einer 3D-Anzeige. Die von einer Anzeige abgestrahlte Lichtmenge der linken und rechten Ansicht, wird von einem Betrachter durch seine Augen als ein Helligkeitsempfinden wahrgenommen. Die Optische Zielfunktion wird somit über örtliche und zeitliche Helligkeitsverläufe für jeweils das linke und rechte Auge beschrieben.

Für dynamische Barrieremasken mit dem Prinzip der kontinuierlichen Adaption auf die Betrachterposition muss eine Anzeige die Eigenschaft besitzen, nicht nur im statischen Fall $\Psi(\vec{x}, t_0)$ eines Betrachters in Ruhe, sondern auch im dynamischen Fall eines bewegten Betrachters eine gute Stereoqualität zu garantieren. Die Stereoqualität ist definiert über den Crosstalk und sichtbare Helligkeitsschwankungen. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird zusätzlich eine dem Crosstalk verwandte Größe des Stereokontrastes eingeführt.

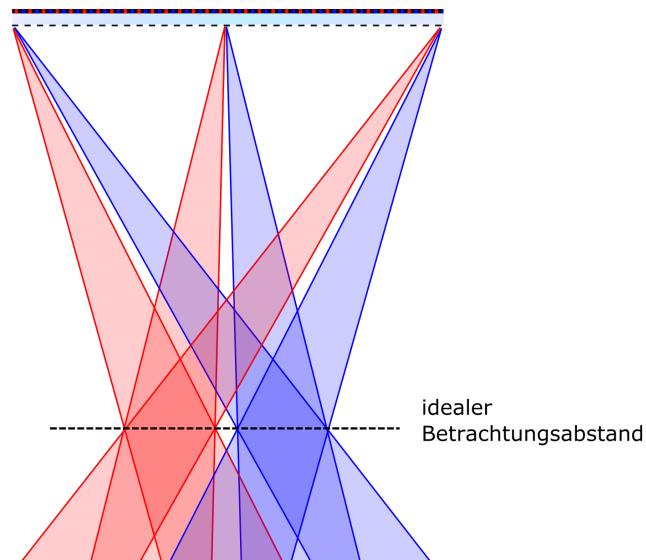


Abbildung 2.11: Entstehung der monokularen Stereozonen: Für drei Barriereöffnungen ist die Abstrahlcharakteristik der linken (rot) und rechten (blau) Ansicht dargestellt.

In Abbildung 2.11 ist eine vereinfachte Darstellung der Entstehung der monokularen Stereozonen dargestellt. Die breiteste Ausdehnung haben diese im idealen Betrachtungsabstand z_i . In der Ebene parallel zur Anzeige im idealen Betrachtungsabstand würde sich bei Darstellung von L_{WB} und L_{BW} , was jeweils dem maximal darstellbaren Kontrast zwischen den Ansichten entspricht, die in Abbildung 2.12 gestrichelt abgebildeten horizontalen Helligkeitsverteilungen ergeben. Diese stellen auf Grund des vereinfachten geometrisch-optischen Modells der Abstrahlcharakteristik eine idealisierte Helligkeitsverteilung dar. Auf Grund von zusätzlichen wellenoptischen Effekten, wie Beugung und Streuung, zeigt der Helligkeitsverlauf in der Realität kein flaches Plateau auf, sondern Verläufe, wie sie in Abbildung 2.12 als durchgezogene Linien dargestellt sind.

Bewegt sich der Betrachter parallel zur Anzeige, ändert sich die Helligkeit und der Crosstalk. Um die geforderten Anforderungen zu erreichen, müssen wahrgenommene Variationen der Helligkeit und des Crosstalks nicht störend sein. Es ergeben sich die folgenden Anforderungen:

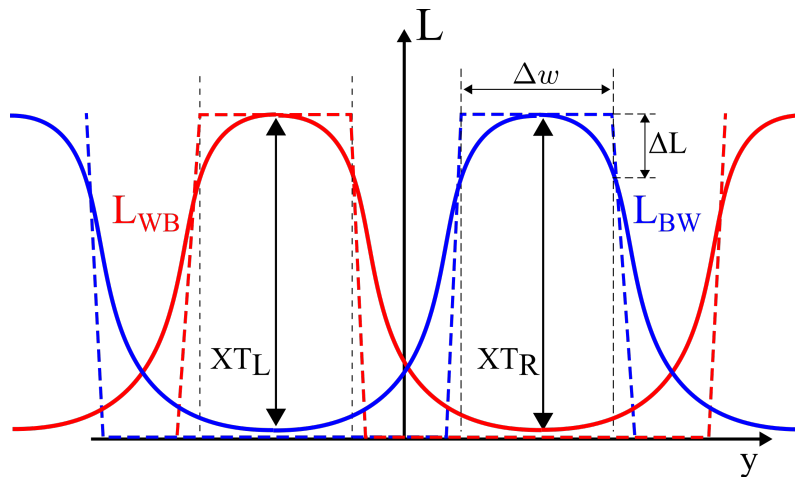


Abbildung 2.12: Horizontaler Helligkeitsverlauf im idealen Betrachtungsabstand bei Anzeige von L_{WB} und L_{BW} ; gestrichelt dargestellt sind die geometrisch-optischen Helligkeitsverläufe; ungebrochen dargestellt sind die in der Realität auftretenden wellenoptischen Verläufe

- **Stereoqualität**

Die Stereoqualität wird über den bereits definierten Crosstalk und der neuen Größe des **monokularen Stereokontrasts** beschrieben, welcher im übernächsten Kapiteln eingeführt wird.

Um eine gute stereoskopische Wiedergabe zu garantieren, muss der maximal wahrgenommene Crosstalk XT_L und XT_R geringer als **3,5%** sein. Der monokulare Stereokontrast (C_L und C_R), welcher den Kontrast zwischen L_{WB} und L_{BW} beschreibt, muss größer als **10:1** sein. Der Bereich, in dem dies gewährleistet ist, wird statische monokulare Stereozonen genannt. Wird der Bereich nicht dynamisch nachgeführt, kann eine Betrachter nur innerhalb dieses Bereichs ein stereoskopisches Bild wahrnehmen. In Abbildung 2.12 ist dies jeweils der Bereich zwischen den schwarz gestrichelten vertikalen Linien.

- **Statische Größe der monokularen Stereozone**

Die laterale Größe der Stereozone Δw muss ausreichend groß sein, sodass Betrachter mit unterschiedlichen Augenabständen zugleich mit beiden Augen linke und rechte Ansicht wahrnehmen können. Der interokularen Augenabstand variiert mit der Körpergröße und dem Geschlecht. Studien zeigen, dass über

größere Bevölkerungsgruppen der Augenabstand normalverteilt ist [63], wodurch 95% aller Augenabstände innerhalb der $\pm 2\sigma$ Umgebung liegen. Für Erwachsene ergibt sich für das 5%-Perzentil $d_{A,5\%}$ der Wert **55 mm** und für das 95%-Perzentil $d_{A,95\%}$ der Wert von **70 mm** [63]. Der mittlere Augenabstand wird mit $d_A = 62$ mm gewählt.

Bei dem gewählten Ansatz der dynamischen Barrieremasken müssen überdies die dynamischen Eigenschaften eines Betrachters in Bewegung berücksichtigt werden, um die notwendige Breite der statischen monokularen Stereozone festzulegen.

Bei der Adaption werden die monokularen Stereozonen lateral verschoben. Die Adaption erfolgt hierbei diskret mit einer Schrittweite, die abhängig von der Barrieretechnologie ist. Eine genaue Beschreibung wird in den nächsten Kapiteln gegeben. Auf Grund von technischen Grenzen bei der Herstellung und Ansteuerung der Barriere kann die Schrittweite nicht beliebig verringert werden. Zum Beginn der Arbeit wurde eine Strecke von $\Delta b = 10$ mm abgeschätzt, die sich ein Betrachter im idealen Betrachtungsabstand von ungefähr 750 mm lateral bewegen muss, bevor eine Barrieremaske auf seine Positionsänderung reagieren kann. Im Laufe der Arbeit konnte dieser Wert bestätigt werden. Dies bedeutet, dass der Abstand der Augen des Betrachters zum Rand der monokularen Stereozone zu jedem Zeitpunkt größer als ± 10 mm betragen muss, um auf Bewegungsänderungen zu reagieren, ohne die Stereozone zu verlassen. Überdies müssen die Latenzzeiten in dem Regelsystem, bestehend aus der Kamera, der Bildauswertung, der Barrieremaske und der Übertragung berücksichtigt werden, da prinzipbedingt immer eine verzögerte Reaktion auf eine Bewegung stattfinden kann. Die Gesamtlatenz des Systems, wurde nach ersten Vorversuchen mit mindestens $t_l = 40$ ms abgeschätzt. In typischen Fahrsituationen können Kopfgeschwindigkeiten v_{max} von über 150 mm/s auftreten. Die notwendige Breite Δw der statischen monokularen Stereozone ergibt sich aus der Summe der Effekte:

$$\begin{aligned}\Delta w &= |d_{A,95\%} - d_{A,5\%}| + 2v_{max} \cdot t_l + 2\Delta b \\ \Delta w &= (70 \text{ mm} - 55 \text{ mm}) + 2 \cdot 6 \text{ mm} + 2 \cdot 10 \text{ mm} = 47 \text{ mm}\end{aligned}\tag{2.2}$$

- **Helligkeitsplateau**

Die ideale Helligkeitsverteilung muss ein möglichst breites Helligkeitsplateau aufweisen, sodass ein Betrachter bei lateraler Bewegung keine Helligkeitsvariationen wahrnimmt. Experimentelle Vorversuche und Angaben in der Literatur [64] zeigen, dass bei einer kontinuierlichen Helligkeitsänderung erst ab einer Abweichung von mehr als **5%** der wahrgenommenen Leuchtdichte ein Unterschied festgestellt wird. Eine Anforderung an die optische Zielfunktion in Form der Helligkeitsverläufe L_{WB} und L_{BW} ist, dass der Helligkeitsabfall ΔL innerhalb der monokularen Stereozone kleiner als **5%** sein muss.

Die optische Zielfunktion ist somit zu einem festen Zeitpunkt t_0 in horizontaler Richtung y definiert über die Helligkeitsverteilung $\Psi_L(y, t_0) = L_{WB}(y)$ für das linke Auge und $\Psi_R(y, t_0) = L_{BW}(y)$ für das rechte Auge. Die Helligkeitsverteilungen L_{WB} und L_{BW} müssen die zuvor definierten Anforderungen erfüllen, die im folgenden mathematisch dargelegt sind. Der Betrachter befindet sich zum Zeitpunkt t_0 am Ort y_0 , welche den Nasenwurzelpunkt zwischen den Augen beschreibt.

Die Intervalle I_L und I_R definieren die Stereozone für das linke und rechte Auge:

$$\begin{aligned} I_L &= \left[y_0 - \frac{d_A - \Delta w}{2}, y_0 - \frac{d_A + \Delta w}{2} \right] = [y_0 - 54,5 \text{ mm}, y_0 - 7,5 \text{ mm}] \\ I_R &= \left[y_0 + \frac{d_A + \Delta w}{2}, y_0 + \frac{d_A - \Delta w}{2} \right] = [y_0 + 7,5 \text{ mm}, y_0 + 54,5 \text{ mm}] \end{aligned} \quad (2.3)$$

Innerhalb dieser Intervalle gilt:

$$\begin{aligned} XT_L(I_L) &< 3,5\% \quad \text{und} \quad C_L(I_L) > 10 \\ XT_R(I_R) &< 3,5\% \quad \text{und} \quad C_R(I_R) > 10 \\ \Delta L_{WB}(I_L) &= |\max(L_{WB}(I_L)) - L_{WB}(I_L)| < 5\% \\ \Delta L_{BW}(I_R) &= |\max(L_{BW}(I_R)) - L_{BW}(I_R)| < 5\% \end{aligned} \quad (2.4)$$

- **Verhalten bei dynamischer Adaption**

Da die laterale Ausdehnung der Stereozone begrenzt ist, muss bei größeren Bewegungen des Betrachters diese nachgeführt werden. Sobald der Betrachter erneut in Ruhe ist, müssen die gleichen Bedingungen für die verschobene Helligkeitsfunktion gelten: $\Psi(y + y_0, t) \stackrel{!}{=} \Psi(y_0, t_0)$. Während der Adaption auf

laterale Positionsänderungen dürfen keine sichtbaren Störungen, in Form von Helligkeitsschwankungen und Crosstalksprüngen auftreten. Die Untersuchung und Sicherstellung der Qualität des Verhaltens bei dynamischer, lateraler Adaption stellt eine Problemstellung dieser Arbeit dar.

Der beschriebene Helligkeitsverlauf mit einer Mindestbreite der monokularen Stereozone ist notwendig für die Sicherstellung der lateralen Adaption. Aus Abbildung 2.11 geht jedoch bereits hervor, dass die Breite der monokularen Stereozone außerhalb des idealen Betrachtungsabstandes abnimmt. Um den gesamten geforderten Betrachtungsbereich abdecken zu können, muss daher der ideale Betrachtungsabstand angepasst werden können. Die Optische Zielfunktion wird somit auf beliebigen Betrachtungsabstände z_0 erweitert $\Psi(y + y_0, z_0, t) = \Psi(y + y_0, t_0)$. Die Adaption auf veränderliche Betrachtungsabstände stellt eine weitere zu lösende Problemstellung dieser Arbeit dar.

2.5 Zusammenfassung Kapitel 2

Dem Modell aus Kapitel 1 folgend wurde die **Zielvorgabe** erarbeitet, die beinhaltet, welche Anforderungen eine Anzeige in einem Automobil überhaupt erfüllen muss. Es wurde gezeigt, dass die wesentlichen Punkte, die eine solche Anzeige von Anderen, bereits aus der Unterhaltungselektronik bekannten, unterscheidet, folgende sind: die Größe der Anzeige, der stationäre Verbau, die darzustellenden Inhalte und deren damit einhergehenden hohen Qualitätsanforderungen, der abzudeckende Betrachtungsbereich und die Möglichkeit, die Anzeige auf eine monoskopische Darstellung umzuschalten.

Diese Kriterien bildeten den Maßstab zur Untersuchung und Bewertung möglicher Anzeigetechnologien. Hierzu wurden aktuelle stereoskopische, autostereoskopische und holografische Anzeigetechnologien, falls verfügbar, in Form von Prototypen experimentell oder ggf. quantitativ durch ihre Beschreibung in der Literatur auf ihre Tauglichkeit für den Einsatz im Automobil bewertet. Es zeigte sich, dass es keine Anzeigetechnologie gibt, die bereits alle Anforderungen erfüllen kann. Als **Technologie mit dem größten Potenzial** wurden **dynamische, schaltbare Parallaxebarrieren** identifiziert.

Mit dem konkreten Technologieansatz wurde eine **technisch-spezifische optische Zielfunktion** entwickelt, welche die qualitativen Anforderungen in quantitative übersetzt. Die bereits in der Literatur beschriebene Messgröße des Crosstalks, welche die Güte der Kanaltrennung beschreibt, wird durch die neu definierte Größe des Stereokontrastes erweitert, die den wahrgenommenen Kontrast und somit direkt die Qualität der Anzeige misst. Diese wird im übernächsten Kapitel detailliert vorgestellt. Daneben wurde nachgewiesen, dass die Größe und Lage der Stereozone maßgeblich durch die horizontalen Verläufe der Helligkeitsverteilungen, wahrgenommen mit dem linken und rechten Auge am Ort des Betrachters, bestimmt werden. Für den Technologieansatz dynamischer Barrieremasken wurde somit hergeleitet, dass die optische Zielfunktion durch diese wahrgenommenen Helligkeitsverläufe definiert wird. Für die gestellte Zielsetzung müssen diese die Eigenschaften eines Helligkeitsplateaus mit einer Breite von 47 mm besitzen, innerhalb dessen die Helligkeit nicht um mehr als 5% abfällt und der Stereokontrast mindestens einen Wert von 10:1 annimmt.

3. Anzeigefunktion und Vorgehen zur Bestimmung der Abbildungsfunktion

In diesem Kapitel werden zunächst die Eigenschaften eines Bildgebers für die Zielsetzung eines 3D-Kombiinstrumentes beschrieben. Insbesondere werden zwei Pixellayouts vorgestellt, welche speziell für eine stereoskopische Anzeige entwickelt wurden. Die Anzeigefunktion wird anschließend mathematisch definiert. Im Anschluss folgt eine Beschreibung welche Probleme zu lösen sind, um die Abbildungsfunktion zu bestimmen, welche das Pixellayout des Bildgebers in der Form abbildet, dass am Ort dies Betrachters die Optische Zielfunktion jederzeit erfüllt wird.

3.1 Anzeigefunktion für ein 3D-Kombiinstrument

Als Anzeigefunktion wird eine Funktion bezeichnet, welche die spezifischen Eigenschaften der bildgebenden Einheit beschreibt. Für den gewählten Technologieansatz dynamischer Barrieremasken kann der Bildgeber aus organischen Leuchtdioden (OLEDs) oder Flüssigkristallanzeigen (LCDs) bestehen. In dieser Arbeit werden als bildgebende Einheit Flüssigkristallanzeigen (LCDs) verwendet. Diese stellen eine etablierte Anzeigentechnologie dar, die bereits in großem Umfang im Fahrzeug eingesetzt wird.

Eine Flüssigkristallanzeige besteht im wesentlichen aus einer Hintergrundbeleuchtung (engl. Backlight) und der Flüssigkristallzelle. Das Backlight besteht heutzutage in der Regel aus mehreren weißen LEDs, die durch verschiedene Lichtleiter und Diffusor eine homogene Beleuchtung der Flüssigkristallzelle durch weißes, unpolarisiertes Licht realisieren. Der Aufbau der Flüssigkristallanzeige ist schematisch in Abbildung 3.1 dargestellt. Diese besteht im Falle einer sogenannten TN-Zelle (TN = twisted nematic) aus zwei gekreuzten Polarisatoren, zwischen denen sich eine dünne Schicht Flüssigkristalle zwischen zwei Gläsern befindet. Orientierungsschichten richten die Flüssigkristalle hierbei in der Form aus, dass sich eine Helixstruktur bildet. Einfal-

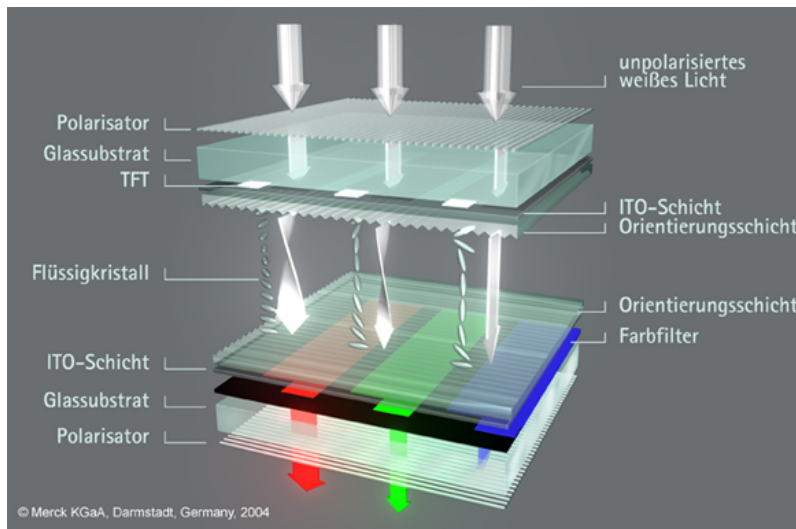


Abbildung 3.1: Aufbau einer Flüssigkristallanzeige (TN-Zelle), Quelle:[65]

lendes Licht wird durch den obersten Polarisator linear polarisiert und durch den Flüssigkristall in seiner Polarisationsrichtung um 90° gedreht, wodurch es die Zelle durch den unteren Polarisator verlassen kann (in der Abb. links dargestellt). Der Pixel leuchtet. Wird zwischen den auf die Glassubstraten aufgebrachtten ITO-Schichten (Indiumzinnoxid [engl. Indium Tin Oxide (ITO)]) eine Spannung angelegt, richten sich die Flüssigkristalle in der Form aus, dass die Polarisationsrichtung des einfallenden Lichtes nicht mehr gedreht wird und der untere Polarisator das einfallende Licht blockiert (in der Abb. rechts dargestellt). Der Pixel leuchtet nicht. Durch Variation der angelegten Spannung kann der Grad der Polarisationsdrehung und damit der Anteil der austretenden Lichtmenge geregelt werden. Eine Flüssigkristallzelle wird daher oft als „Lichtventil“ bezeichnet.

Als Pixel einer Flüssigkristallanzeige wird eine Anordnung von in der Regel drei Subpixeln der Grundfarben Rot, Grün und Blau bezeichnet. Die spektralen Eigenschaften werden durch Farbfiler realisiert, welche auf das Glassubstrat aufgebracht sind. Die Pixel einer Anzeige sind in Matrixform angeordnet. Jedem Subpixel ist ein einzeln-adressierbarer Dünnschichttransistor (engl. Thin-Film-Transistor [TFT]) zugeordnet, welcher bei Adressierung durch Spalten und Zeilentreiber einen Kondensator lädt und somit eine Spannung an den Pixel anlegt. Um zu vermeiden, dass diese ansteuernden Elemente wahrgenommen werden, sind diese hinter einer Schwarzmaste (engl. black mask) verdeckt, welche die Größe der leuchtenden Pixelfläche

beschränkt. Durch zeitliche Änderung der Adressierung kann jeder Subpixel individuell zum leuchten gebracht werden und Bewegtbilder dargestellt werden.

Der Bildgeber definiert die grundlegenden Eigenschaften der Anzeige, wie sie auch im Falle einer monoskopischen Anzeige festzulegen sind. Diese sind die Gesamthelligkeit, der abzudeckende Farbraum, die Bildauflösung und das sogenannte Pixellayout. Letzteres beschreibt die Anordnung und Größe der Subpixel. Ein monoskopisches Pixellayout hat das Ziel möglichst eine Gleichverteilung der Subpixel der Grundfarben zu erreichen, um eine homogen leuchtende Fläche bei Anzeige von Weiß (alle Subpixel an) und den jeweiligen Grundfarben (jeweils nur eine Art der Subpixel eingeschaltet) zu erreichen. Es existieren eine Reihe von verschiedenen Pixellayouts, welche abhängig vom Einsatzzweck, wie zum Beispiel die Darstellung von schwarzen Text auf weißem Untergrund, optimiert werden. In Abbildung 3.2 (links, oben) ist ein klassisches monoskopisches Pixellayout dargestellt, wie es bei Anzeigen im Fahrzeug zur Anwendung kommt. Die Subpixel der Grundfarben sind hierbei horizontal nebeneinander angeordnet. Das Aspektverhältnis der Subpixel ist so gewählt, dass die drei Pixel in ihrer Anordnungen einen rechteckigen Pixel (violett hervorgehoben) bilden.

Bei einer autostereoskopischen Anzeige wird im Falle einer stereoskopischen Darstellung die Anzahl der Pixel/Subpixel auf die Ansicht für das linke oder rechte Auge aufgeteilt. Hieraus ergeben sich verschärfte Implikationen für die Gesamthelligkeit, die Bildauflösung und das Pixellayout, welche im folgenden beschrieben werden.

Helligkeit der Anzeige

Im Vergleich zur monoskopischen Anzeige, wird im stereoskopischen Anzeigefall vom Betrachter mit den Augen jeweils nur die Hälfte der Subpixel wahrgenommen. Die wahrgenommene Gesamthelligkeit der Anzeige wird dadurch halbiert. Ein solcher Helligkeitsverlust kann durch eine stärkere Hintergrundbeleuchtung kompensiert werden, welche jedoch immer mit einem höheren Stromverbrauch und entstehender Verlustleistung in Form von Wärme einhergeht, was wiederum Auswirkungen auf den Bauraum haben kann. Einer solchen Lösung ist daher immer eine Effizienzsteigerung der abgestrahlten Lichtmenge zu bevorzugen. Bei LCDs ist die limitierende Aperturöffnung der Farbfilter. Eine größere Lichtmenge kann durch eine größere

Öffnung oder durch einen Verzicht auf den Farbfilter erreicht werden, wie sie im nächsten Abschnitt beschrieben wird. Eine Vergrößerung der Transmissionsbandbreite der Farbfilter würde ebenfalls eine Steigerung ermöglichen, den darstellbaren Farbraum jedoch verkleinern, weshalb hierauf verzichtet wird.

Bildauflösung

Der Begriff der Bildauflösung wird oftmals mehrdeutig verwendet, entweder als Anzahl der Pixel in horizontaler und vertikaler Richtung oder als physikalisch korrekter Begriff einer Pixeldichte. Die Dichte wird in der Regel in dem Maß **dpi** = „dots per inch“ angegeben, was der Pixelanzahl pro Zoll entspricht. Wie in der Zielvorgabe im vorherigen Kapitel beschrieben, soll auf der 3D-Anzeige Text angezeigt werden. Die Auflösung muss dementsprechend hoch sein. Aktuelle Fahrzeuganzeigen haben eine Pixeldichte im Bereich von 130 dpi, zukünftig werden Auflösungen von über **200 dpi** angestrebt.

Aus dem Funktionsprinzip autostereoskopischer Anzeigen folgt, dass im stereoskopischen Betrachtungsmodus die mit einem Auge wahrgenommene horizontale Auflösung halbiert wird. Die Aufteilung in Bereiche der linken und rechten Ansicht kann entweder auf Pixel- oder auf Subpixelebene erfolgen. Bei einer Aufteilung auf Pixelebene (siehe Abb. 3.2 rechts, oben) werden alle Subpixel eines Pixels einer Ansicht zugeordnet, wodurch der horizontale Abstand zwischen Pixeln bei eingeschalteter Barriere wahrnehmbar werden kann. In dieser Arbeit erfolgt die Aufteilung daher auf Subpixelebene, in dem einzelne Subpixel einer Ansicht zugeordnet werden.

Pixellayout

Das Pixellayout bestimmt die Anordnung und Größe der Subpixel auf der Anzeige. Die Zielsetzung des 3D-Kombiinstrumentes gibt vor, dass die Barrieremaske ausgeschaltet werden muss. Ein Pixellayout muss daher für den stereoskopischen und monoskopischen Anzeigefall ausgelegt werden, was immer ein Kompromiss darstellt. In Abbildung 3.2 sind zwei Pixellayouts dargestellt, wie sie in dieser Arbeit entwickelt und umgesetzt wurden.

Beim stereoskopischen Pixellayout 1 wurde die Anzahl der Subpixel verdoppelt, um einen Auflösungsverlust im 3D-Fall entgegen zu wirken. Bei ausgeschalteter Barriere

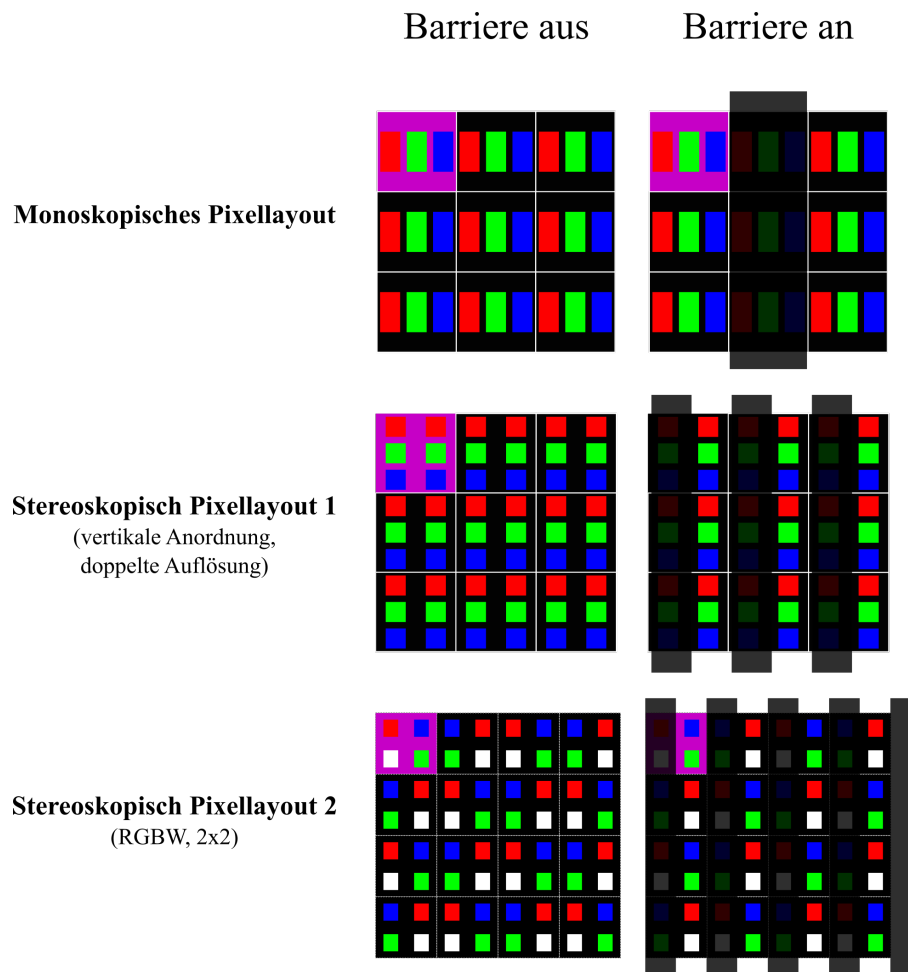


Abbildung 3.2: Darstellung verschiedener Pixellayouts für monoskopische und stereoskopische Anzeigen, wie die Anzeige mit einem Auge wahrgenommen wird bei ausgeschalteter Barriere (links) und eingeschalteter Barriere (rechts)

wird jeweils auf den zwei Subpixeln gleicher Farbe die gleiche Information dargestellt. Die Anordnung der farblichen Subpixel eines Pixels erfolgt vertikal. Dadurch wird vermieden, dass bei schnellen lateralen Bewegungen die Barriere einen einzelnen Subpixel verdeckt und es somit zu Farbverfälschungen kommt. Bei eingeschalteter Barriere vergrößert sich der jeweils von einem Auge wahrgenommene horizontale Abstand der Subpixel, die Pixeldichte bleibt jedoch auf Grund der Verdoppelung der Subpixelanzahl konstant. Die Verteilungen der farblichen Pixel auf der Anzeige ist im stereoskopischen und monoskopischen Fall gleich.

Der Nachteil des Pixellayouts 1 liegt in der Verdoppelung der Anzahl der anzusteuern Subpixelanzahl, gegenüber des monoskopischen Pixellayouts. Insbesondere

die Verdreifachung der Zeilenanzahl stellt erhöhte Anforderungen an die Ansteuerung der Anzeige. Das Pixellayout 1 wurde in der im späteren vorgestellten „Prototypischen Anzeige 1“ umgesetzt.

Beim stereoskopischen Pixellayout 2 besteht ein Pixel aus vier Subpixeln. Die Grundfarben Rot, Grün und Blau werden zusätzlich um einen weißen Subpixel erweitert (RGBW-Layout). Bei dem Weißpixel wird auf einen absorbierenden Farbfilter verzichtet, wodurch die Effizienz der abgestrahlten Lichtmenge steigt. Die Anordnung der Subpixel erfolgt in einer 2x2 Anordnung, sodass ein Pixel zwei horizontale und zwei vertikale Subpixel besitzt. Die Anzahl der anzusteuernenden Zeilen steigt hierbei nur um den Faktor zwei. Im stereoskopischen Fall wird von einem Auge nur zwei der vier Subpixel eines Pixels wahrgenommen. Dadurch wird die wahrgenommene Farbauflösung, nicht jedoch die Bildauflösung reduziert. Die Verteilung der farblichen Subpixel wurde für den 3D-Fall optimiert und zeigt eine homogene Verteilung dieser. Innerhalb eines Pixels sind immer die Subpixelpaare Rot-Weiß und Blau-Grün vertikal angeordnet, da diese Paare bei Darstellung von Weiß auf der Anzeige annähernd den gleichen Helligkeitseindruck erzeugen, welcher ansonsten als schachbrettartige Anordnung von Helligkeitsunterschieden wahrgenommen werden würde. Das Pixellayout 2 wurde in der „Prototypischen Anzeige 2“ praktisch umgesetzt.

Aus dem Pixellayout der Anzeige kann direkt auf die Anzeigefunktion geschlossen werden. Die Anzeigefunktion einer stereoskopischen Anzeige beschreibt die Helligkeitsverteilung der Pixeln der linken und rechten Ansicht auf dem Bildgeber.

Die Formel (3.1) stellt die mathematische Beschreibung der Anzeigefunktion für die linke $g_L(\vec{x}, t)$ und rechte Ansicht $g_R(\vec{x}, t)$ auf dem Bildgeber am Ort z_0 dar. Hierbei wird jeweils jeder zweite Subpixel mit einer horizontalen Aperturöffnung w_D (D =Display=Anzeige) einer Ansicht zugeordnet (siehe Abb. 4.2, nächstes Kapitel). Zwischen zwei Subpixeln eines Pixels befindet sich ein Schwarzbereich der Blackmask mit der Breite w_S . Die Subpixel der gleichen Ansicht wiederholen sich periodisch mit dem horizontalen Pixelpitch der Anzeige (Abstand zwischen zwei Pixeln) p_D über die gesamte Anzeige mit der Anzahl horizontaler Pixel N_D .

Im gewählten Technologieansatz ist die Anzeige zeitlich konstant. Auf Grund der horizontalen Anordnung der menschlichen Augen ist auch nur die die horizontale

Parallaxe (Sichtbarkeit von zwei unterschiedlichen Bildern) von Interesse, wodurch sich in der weiteren Beschreibung auf die y -Richtung beschränkt wird.

$$g_L(y, z_0, t_0) = \begin{cases} L_0, & \text{falls } [k \cdot p_D - (w_D + w_S) < y < k \cdot p_D - w_D] \\ & \text{mit } k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm \frac{N_D}{2} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

$$g_R(y, z_0, t_0) = \begin{cases} L_0, & \text{falls } [k \cdot p_D + w_D < y < k \cdot p_D + (w_D + w_S)] \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (3.1)$$

$p_D := \text{Pixelpitch der Anzeige}$

$w_D := \text{Breite eines Subpixels der Anzeige}$

$w_S := \text{Breite des Schwarzbereichs zwischen zwei Subpixeln eines Pixels}$

$N_D := \text{Gesamtanzahl der horz. Pixel der Anzeige}$

Die Aperturbreite der Subpixel wird maßgeblich über die Bildauflösung, die notwendige Größe der Schwarzmaske zum Abdecken der benötigten Leiterbahnen und die angestrebten stereoskopischen Eigenschaften der Anzeige festgelegt. Während bei monoskopischen Anzeigen die Aperturöffnung der Subpixel möglichst groß gewählt wird, kann dies bei stereoskopischen Anzeigen zu einem Anstieg des Crosstalks führen. Eine genauere Diskussion findet im nächsten Kapitel statt.

3.2 Vorgehen zur Bestimmung der Abbildungsfunktion



In der Systematik einer autostereoskopischen Anzeige, wie sie dieser Arbeit zu Grunde liegt, wurde bisher bereits ein Technologieansatz gewählt, die optische Zielfunktion als Beschreibung der Helligkeitsverteilung am Ort des Betrachters aufgestellt und im vorangegangenen Abschnitt die Anzeigefunktion als Beschreibung der Helligkeitsverteilung am Ort des Bildgebers definiert. Der ausstehende und wichtigste Teil stellt die Bestimmung der Abbildungsfunktion dar, welche die Anzeigefunktion

in der Form abbildet, dass idealerweise die optische Zielfunktion am Ort des Betrachters entsteht.

Die Bestimmung der Abbildungsfunktion für eine bekannte Anzeigefunktion mit dem Ziel eine Helligkeitsverteilung der Zielfunktion zu erreichen, stellt ein inverses optisches Problem dar. Die Lösung eines solchen Problems ist analytisch nur sehr schwer zu bestimmen. Die bildgebende Flüssigkristallanzeige mit Barrieremaske ist eine ausgedehnte inkohärente, polychromatische Leuchtquelle mit mikrostrukturierten Aperturöffnungen der Barriere und der Farbfilter. Typische Aperturgrößen liegen im zweistelligen Mikrometerbereich, der Abstand zwischen der Barriereöffnungen und dem Farbfilter beträgt ungefähr 1 mm. Würde diese Anordnung von Aperturen mit kohärentem, kollimiertem Licht beleuchtet werden, wären deutliche Intensitätsmodulationen wie bei Mehrfachspalten zu erkennen. Im gegebenen Fall der polychromatischen, inkohärenten Beleuchtung tritt ebenfalls Beugung auf, welche sich jedoch nicht in einer deutlich wahrnehmbaren Intensitätsmodulation äußert, sondern die Abstrahlungscharakteristik einer Barriereöffnung und somit die resultierende Helligkeitsverteilung in der Ebene des Betrachters beeinflusst. Die Bestimmung der Abbildungsfunktion stellt somit ein wellenoptisches, inverses Problem dar, dessen Nebenbedingung die Umsetzbarkeit beziehungsweise die Produzierbarkeit innerhalb eines Herstellungsprozess von Anzeigen ist. Eine exakte Lösung ist analytisch mit realistischem Mitteleinsatz nicht möglich.

In dieser Arbeit wird daher der Ansatz gewählt, das Problem zunächst in der Näherung der geometrischen Optik zu lösen. Die resultierende Abbildungsfunktion bildet im zweiten Schritt den Ausgangspunkt einer wellenoptischen Optimierung, die unter der Rahmenbedingung der Umsetzung in einem Anzeigenherstellungsprozess das Ziel hat, die finale Helligkeitsverteilung der optischen Zielfunktion anzunähern.

Aus den Anforderungen an die optische Zielfunktion und dem beschriebenen Vorgehen ergeben sich die folgenden Problemstellungen, dessen Lösungen die Grundlage der nächsten Kapitel der Arbeit bilden.

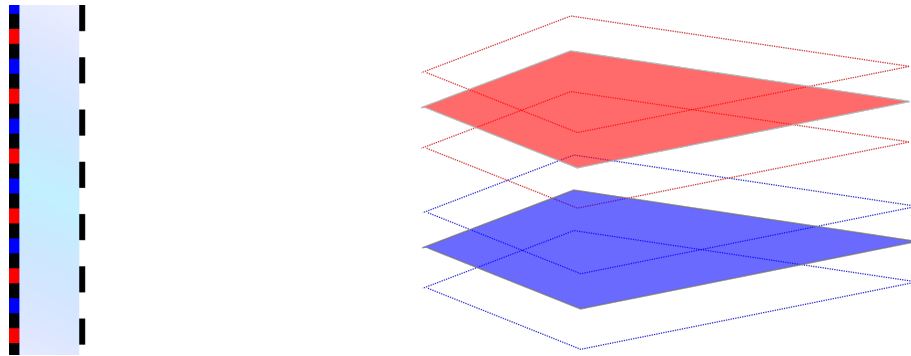


Abbildung 3.3: Prinzip der Adaption auf laterale Kopfbewegungen; in rot und blau sind schematisch die monokularen Stereozonen der linken und rechten Ansicht dargestellt, nur in denen ein ungestörtes Bild wahrgenommen werden kann.

Auslegung der Barrieremaske und dynamische Adaption auf die laterale Kopfbewegungen

Für den Technologieansatz der dynamischen Barrieremasken wurde im vorherigen Kapitel die optische Zielfunktion definiert. Es wurden Eigenschaften der Helligkeitsverteilungen am Ort des Betrachters für den statischen Fall festgelegt. Im ersten Schritt gilt es daher das Barrieredesign zu bestimmen, sodass im Falle eines Betrachters in Ruhe ($t = c$) und in einem festen Abstand ($z = c$) möglichst die statische Zielfunktion am Ort des Betrachters erfüllt wird. Mathematisch bildet die Abbildungsfunktion f den Bildergeber g in den Raum des Betrachters (Optische Zielfunktion Psi) ab.

$$\begin{aligned} f_L(\hat{y}, \hat{z}, \hat{t} = c) &: g_L(y_0, z_0, t_0 = c) \mapsto \Psi_L(y, z = c, t = c) \\ f_R(\hat{y}, \hat{z}, \hat{t} = c) &: g_R(y_0, z_0, t_0 = c) \mapsto \Psi_R(y, z = c, t = c) \end{aligned} \quad (3.2)$$

Der Technologieansatz bedingt, dass die monokularen Stereozonen bei lateraler Bewegung des Betrachters nachgeführt werden. In Abbildung 3.3 sind schematisch die monokularen Stereozonen für die linke und rechte Ansicht und deren laterale Verschiebung dargestellt. Nur im Falle, dass sich die Augen des Betrachters innerhalb dieser Zonen befindet kann er ein ungestörtes Bild wahrnehmen.

Im zweiten Schritt muss daher die Abbildungsfunktion dynamisch ausgelegt werden

und sichergestellt werden, dass während der Adaption keine sichtbaren Störungen auftreten.

$$\begin{aligned} f_L(\hat{y}, \hat{z}, \hat{t}) : g_L(y_0, z_0, t_0) &\mapsto \Psi_L(y, z = c, t) \\ f_R(\hat{y}, \hat{z}, \hat{t}) : g_R(y_0, z_0, t_0) &\mapsto \Psi_R(y, z = c, t) \end{aligned} \quad (3.3)$$

In der Literatur finden sich bisher keine Beschreibungen der Untersuchung und Auslegung der dynamischen Eigenschaften einer Barrieremaske. Inhalt des Kapitels 4 ist daher der Entwurf eines Gesamtsystems bestehend aus einem Kopferfassungssystem und einer Anzeige mit Barriere, dessen optische und zeitlichen Eigenschaften eine qualitative Darstellung für typische Kopfgeschwindigkeiten ermöglicht.

Adaption auf den Betrachtungsabstand

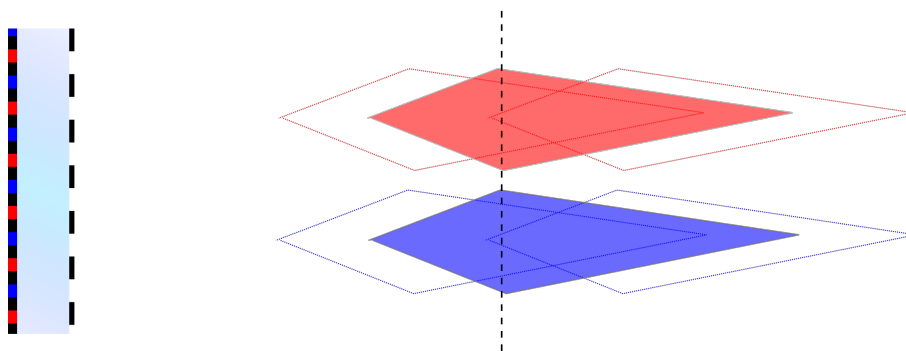


Abbildung 3.4: Prinzip der Adaption auf unterschiedliche Betrachtungsabstände durch Verschiebung der monokularen Stereozonen

Die monokularen Stereozonen zeigen eine Rautenform im Raum (vgl. Abb. 3.4). Die breiteste Ausdehnung der Raute hat diese im idealen Betrachtungsabstand. Befindet sich ein Betrachter außerhalb von diesem nimmt die laterale Ausdehnung ab. Dadurch wird die laterale Bewegungsfreiheit eingeschränkt. Fällt die Breite unter die Anforderungen der statischen optischen Zielfunktion treten bei der lateralen Adaption vermehrt sichtbare Störungen auf. Ab einem bestimmten Betrachtungsabstand kann sogar überhaupt kein stereoskopisches Bild mehr wahrgenommen werden. Um den geforderten Betrachtungsbereich von 650-1000 mm abdecken zu können, müssen die Rauten in longitudinaler Richtung verschoben werden können. Die zweite Problemstellung ist die Entwicklung und Umsetzung einer Methode zur dynamischen Adaption der Stereozonen auf veränderliche Betrachtungsabstände und bildet den

Inhalt des Kapitels 5. Die Abbildungsfunktion muss somit die optische Zielfunktion auch für unterschiedliche Betrachtungsabstände verändern können.

$$\begin{aligned} f_L(\hat{y}, \hat{z}, \hat{t}) : g_L(y_0, z_0, t_0) &\mapsto \Psi_L(y, z, t) \\ f_R(\hat{y}, \hat{z}, \hat{t}) : g_R(y_0, z_0, t_0) &\mapsto \Psi_R(y, z, t) \end{aligned} \quad (3.4)$$

Wellenoptische Optimierung der Abstrahlcharakteristik

Die dritte Herausforderung bildet das bereits beschriebene Vorgehen zum Erreichen der optischen Zielfunktion. Zur wellenoptischen Optimierung einer vorhandenen Abbildungsfunktion bedarf es zunächst eines Modells, das die Abstrahlcharakteristik einer Parallaxebarriere wellenoptisch beschreibt. Dieses bildet den Ausgangspunkt einer wellenoptischen Optimierung der Abstrahlcharakteristik. Die Optimierung erfolgt hierbei im Verbund mit der Anzeigefunktion, da diese im Gegensatz zur Abbildungsfunktion zeitlich und räumlich unveränderlich ist und unter der Nebenbedingung, dass eine Lösung produktionstechnisch umsetzbar sein muss. Das wellenoptische Modell und die Optimierung bilden den Inhalt des Kapitels 6.

3.3 Zusammenfassung Kapitel 3

Neben den stereoskopischen Eigenschaften, welche durch die Zielfunktion definiert werden, wurden in diesem Kapitel aus den qualitativen Anforderungen die **grundlegenden Eigenschaften des Bildgebers** wie Auflösung, Pixellayout und Pixelgröße, bzw. Helligkeit der Anzeige abgeleitet. Daraus ergibt sich das inverse optische Problem, wie eine Abbildungsfunktion aussehen muss, um den Bildgeber in der Form abzubilden, dass sich am Ort des Betrachters die Helligkeitsverteilung der optischen Zielfunktion ergibt.

4. Geometrisch optische Bestimmung der Abbildungsfunktion

In diesem Kapitel wird das Vorgehen beschrieben, wie die Abbildungsfunktion in der Vereinfachung der geometrischen Optik bestimmt werden kann. Im ersten Schritt wird das Aussehen der Parallaxebarriere festgelegt, um die statischen Eigenschaften der optischen Zielfunktion zu erfüllen. Im zweiten Schritt werden die dynamischen Eigenschaften der Barriere definiert, um eine Adaption auf laterale Bewegungen zu ermöglichen. Die gefundenen Parameter wurden in einer prototypischen Anzeige umgesetzt, dessen Eigenschaften experimentell untersucht und mit der optischen Zielfunktion verglichen werden. Den letzten Teil des Kapitels bildet ein Probandenversuch im Fahrsimulator, bei dem die getroffenen Maßnahmen subjektiv überprüft werden.

4.1 Allgemeiner Entwurf einer Parallaxebarriere

Anzeigen mit Barrieremasken sind außerhalb von Forschungslaboren bisher selten anzutreffen. Eine bekanntere Anwendung ist der, unter dem Namen „Dual- oder Splitview“ bekannte, Einsatz im Automobilbereich [66], bei dem Fahrer und Beifahrer unterschiedliche Inhalte auf der gleichen Anzeige wahrnehmen können. Es handelt sich hierbei um keine stereoskopische Anzeige, das grundlegende Prinzip ist jedoch gleich. Bei autostereoskopischen Anzeigen nehmen nicht zwei Betrachter mit beiden Augen jeweils ein unterschiedliches Bild wahr, sondern ein Betrachter mit seinen Augen jeweils ein Bild mit unterschiedlicher Perspektive. Die Barrieremaske wird in diesem Fall daher als Parallaxebarriere bezeichnet. Eine der bekanntesten Umsetzungen ist die tragbare Spielkonsole Nintendo 3DS [3]. Im Forschungsbereich finden sich verschiedene prototypische Anzeigen. Bei der Mehrzahl der Anzeigen handelte es sich bisher um statische Barrieremasken, welche nicht dynamisch auf einen Betrachter in Bewegung adaptieren können. Bei diesen wird die Barriere mit dem Ziel ausgelegt, eine hohe stereoskopische Qualität an einem idealen Punkt im

Raum zu erreichen. Der in dieser Arbeit gewählte Ansatz der dynamischen Adaption auf den Betrachter erfordert von einer Barriere, dass sie nicht nur für einen Punkt, sondern über einen vergrößerten Bereich von einigen Millimetern eine gute stereoskopische Qualität ermöglicht. Ein Betrachter muss sich ohne sichtbare Störungen einige Millimeter bewegen können, bevor die Barriere mit einer prinzipbedingten Latenz auf die Bewegungsänderung adaptiert. In der Auslegung der Barriere galt es, dies von Beginn an zu berücksichtigen.

4.1.1 Definition der statischen Parameter einer Parallaxebarriere

Als statische Parameter einer Parallaxebarriere werden alle Größen bezeichnet, welche die Größe und Lage der Stereozonen im Raum vor der Anzeige definieren, wenn sich der Betrachter nicht bewegt. In Abbildung 4.1 ist die vereinfachte Lichtabstrah-

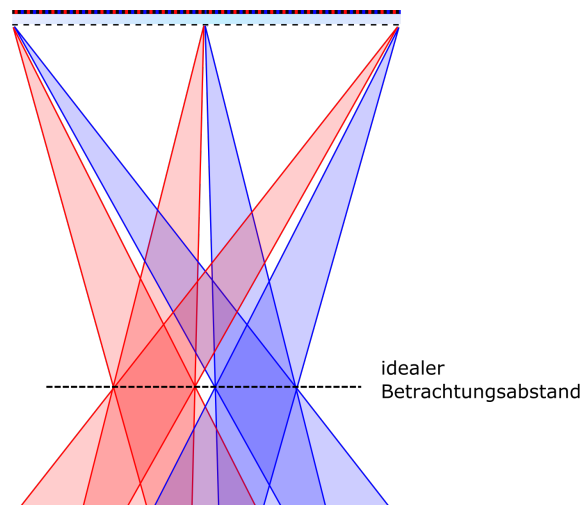


Abbildung 4.1: Der ideale Betrachtungsabstand ist definiert über die Ebene in der sich die Strahlengänge aller Barriereöffnungen schneiden (in der Abbildung vereinfacht nur drei Strahlengänge dargestellt)

lung für drei Barriereöffnungen einer Anzeige mit Parallaxebarriere eingezeichnet, wie sie sich in Näherung der geometrischen Optik ergibt. Jede Barriereöffnung hat die gleiche Abstrahlcharakteristik in der Art wie sie Licht der linken und rechten Ansicht in unterschiedliche Raumbereiche abstrahlt. Der Winkelbereich, in welchen

die Barriereöffnung abstrahlt, ändert sich jedoch mit der Position auf der Anzeige. Die abgestrahlten Helligkeitsverteilungen der Barriereöffnungen am Rand der Anzeige sind nach innen gedreht und konvergieren im idealen Betrachtungsabstand (gestrichelte Linie in Abb. 4.1).

Die rautenförmige Helligkeitsverteilung im Raum vor der Anzeige hat im idealen Betrachtungsabstand ihre größte laterale Ausdehnung.

Die zu wählenden statischen Parameter einer Barriere, welche die Abbildungsfunktion definieren sind:

- **Barriereöffnung**

Die Barriereöffnung ist definiert als die Aperturgröße einer Barriereperiode. Sie bestimmt zusammen mit dem Pixellayout des LCDs maßgeblich das Aussehen des Helligkeitsverlaufes der abgestrahlten Leuchtdichte, welcher angibt, wieviel Licht unter einem bestimmten Winkel von einer Barriereöffnung abgestrahlt wird.

- **Abstand Barriere-Bildgeber**

Der Abstand, in dem die Barriere vor oder hinter die bildgebende Flüssigkristallanzeige (LCD) platziert wird, bestimmt die Größe des Winkelbereichs, in den eine Ansicht abgestrahlt wird und in welchem Betrachtungsabstand ein Beobachter mit seinen Augen zugleich mittig in den Stereoraute sitzt.

- **Barrierepitch**

Der Barrierepitch ist definiert über den Abstand benachbarter Barriereöffnungen und legt den idealen Betrachtungsabstand fest.

Barriereöffnung

Die Geometrie einer Anzeige mit Parallaxebarriere lässt sich eindimensional vereinfacht wie in Abbildung 4.2 darstellen. Exemplarisch sind drei Barriereöffnungen dargestellt. Der Ursprung des Koordinatensystems liegt hierbei immer zentral, mittig auf der Anzeige am Kreuzungspunkt der Bildschirmdiagonalen. Oben ist die Barrierenmaske mit sich periodisch wiederholenden Öffnungen dargestellt. Die Barriereöffnungen haben eine Breite von w_B ($B = \text{Barriere}$) und wiederholen sich periodisch mit dem Barrierepitch p_B . Die Barriere ist in einem Abstand von d_B vor oder

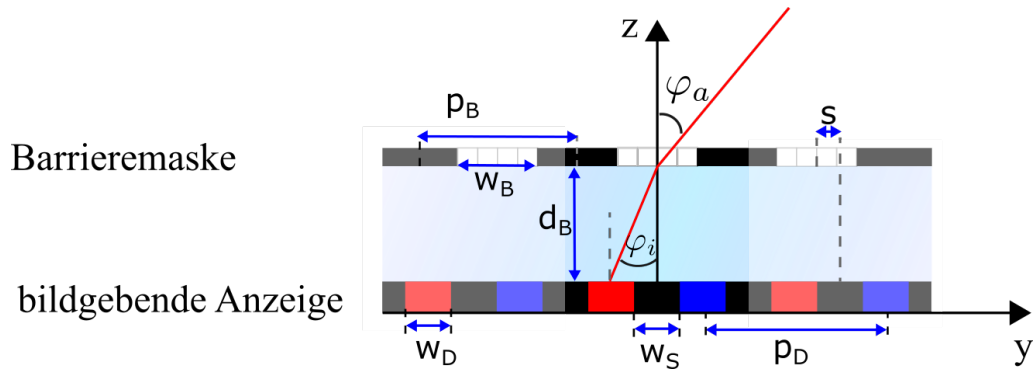


Abbildung 4.2

seltener hinter der bildgebenden Anzeige angebracht. Diese ist in der Abbildung unten dargestellt und auf die wesentlichen Aperturöffnungen der leuchtenden Subpixel reduziert. Farblich wird nur zwischen Subpixeln der linken Ansicht (blau) und der rechten Ansicht (rot) unterschieden.

Die Anzeigefunktion $g(y_0)$ des Bildgebers wurde bereits im vorherigen Kapitel definiert (3.1).

Beim gewählten Technologieansatz einer Barrieremaske handelt es sich bei der Abbildungsfunktion um eine örtliche Transmissionsfunktion. Im Gegensatz zur Anzeigefunktion, die eine Leuchtdichteverteilung auf dem Bildgeber beschreibt, wird bei der Abbildungsfunktion nur Lage und Größe der Barriereöffnungen beschrieben, da die Barriere kein eigenes Licht erzeugt. Auch wird hierbei nicht zwischen einer linken und rechten Funktion unterschieden, da alle Pixel der Anzeige gleich abgebildet werden. Die statischen Eigenschaften der Abbildungsfunktion sind über die folgende Transmissionsfunktion definiert:

$$f(\hat{y}, t = c) = \begin{cases} 1, & \text{falls } \frac{i \cdot p_B - w_B}{2} < \hat{y} < i \cdot p_B + \frac{w_B}{2} \\ & \text{mit } i = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm \frac{N_B}{2} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (4.1)$$

$p_B :=$ Barrierepitch

$w_B :=$ Breite der Barriereöffnung

$N_B :=$ Gesamtanzahl der horiz. Barriereöffnungen der Anzeige

Die Position \hat{y} beschreibt die laterale Position in der Ebene der Barriere. Mit der Anzeigen- und Abbildungsfunktion kann die winkelabhängige Abstrahlcharakteristik

für die linke $L_L(\varphi_a)$ und rechte Ansicht $L_R(\varphi_a)$ einer Barriereöffnung bestimmt werden. Durch die passende Wahl des Laufparameters i der Formel 4.1 wird die Abbildungsfunktion auf eine einzelne Öffnung reduziert $f_i(\hat{y})$. Im Anschluss wird die Anzeigefunktion für die linke und rechte Ansicht mit der Abbildungsfunktion gefaltet:

$$\begin{aligned} L_L(\hat{y}) &= g_L(\hat{y}) * f_i(\hat{y}) \\ L_R(\hat{y}) &= g_R(\hat{y}) * f_i(\hat{y}) \end{aligned} \quad (4.2)$$

Das Ergebnis beschreibt zwei ortsabhängige Leuchtdichtevertellungen. Der Winkelbereich, in welche die Barriereöffnung abstrahlt, ist definiert durch die Dicke d_B und den Brechungsindex n des Glas zwischen der Barriere und Anzeige. In der Ebene der Barriere gelten dies Zusammenhänge:

$$\begin{aligned} \tan(\varphi_i) &= \frac{\hat{y}}{d_B} \\ \text{und } \sin(\varphi_a) &= n \cdot \sin(\varphi_i) \end{aligned} \quad (4.3)$$

woraus folgt $\hat{y} = d_B \cdot \tan\left(\arcsin\left[\frac{\sin(\alpha_a)}{n}\right]\right)$

Die winkelabhängigen Abstrahlcharakteristika der Barriereöffnung für die linke und rechte Ansicht ergeben sich somit zu:

$$\begin{aligned} L_L(\varphi_a) &= L_L\left(d_B \cdot \tan\left(\arcsin\left[\frac{\sin(\alpha_a)}{n}\right]\right)\right) \\ L_R(\varphi_a) &= L_R\left(d_B \cdot \tan\left(\arcsin\left[\frac{\sin(\alpha_a)}{n}\right]\right)\right) \end{aligned} \quad (4.4)$$

Für den geometrisch-optisch bestimmten charakteristischen Verlauf der Abstrahlcharakteristik können, wie in Abbildung 4.3 dargestellt, die drei Fälle unterschieden werden, dass die Barriereöffnung w_B kleiner, gleich oder größer der Subpixelbreite w_D ist. Im folgenden Beispiel wurde der Abstand der Barriere zur Anzeige konstant gesetzt und der Schwarzbereich zwischen den Subpixeln gleich der Pixelgröße gewählt! Variiert wird nur die Größe der Barriereöffnung. In der unteren Hälfte der Abbildung 4.3 sind die durch die Faltung simulierten Helligkeitsverteilungen $L_L(\varphi_a)$ und $L_R(\varphi_a)$ dargestellt. Die Leuchtdichte wurde hierfür auf die maximale Leuchtdichte eines Pixels normiert.

Es ist zu erkennen, dass für den Fall einer Barriereöffnung von der Hälfte der Pixelgröße nicht die maximale Leuchtdichte angenommen wird, da der Pixel immer

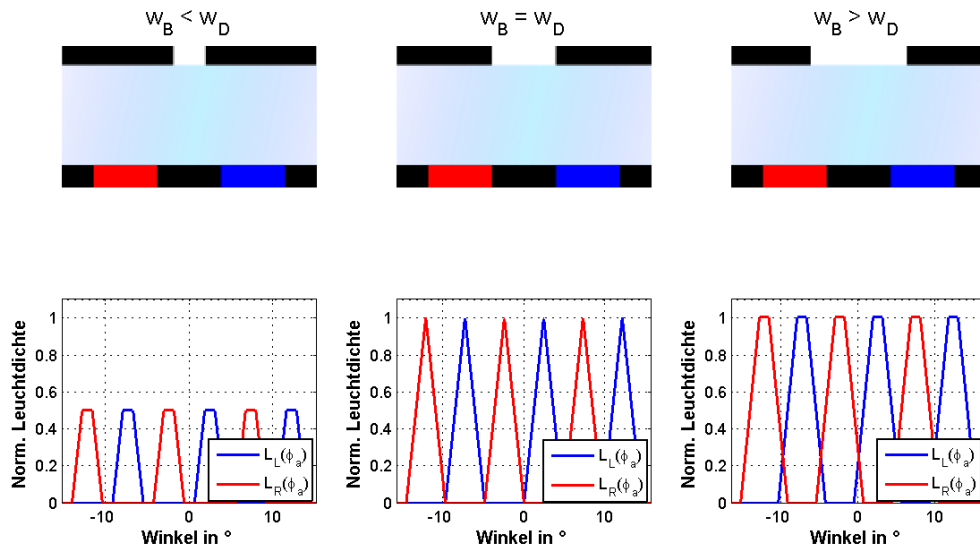


Abbildung 4.3: Simulierte Abstrahlcharakteristika $L_L(\varphi_a)$ und $L_R(\varphi_a)$ für drei verschiedene Breiten der Barriereöffnung

teilverdeckt wird. Die Leuchtdichten der rechten und linken Ansicht überlappen sich nicht. Der Helligkeitsverlauf zeigt ein Plateau, auf dem die Leuchtdichte konstant ist.

Die maximale Helligkeit wird angenommen, wenn die Barriereöffnung gleich der Pixelgröße ist. Der Helligkeitsverlauf zeigt jedoch kein Plateau, sondern fällt sofort nach dem Maximum wieder ab. Die linke und rechte Ansicht überlappen sich nicht.

Ist die Barriereöffnung größer als der Pixel, wie auf der rechten Seite der Abbildung für den Faktor 1.5 dargestellt, ist zu erkennen, dass sich erneut ein Helligkeitsplateau, diesmal bei der maximalen Leuchtdichte bildet. Die Leuchtdichten der linken und rechten Ansicht überlappen sich teilweise, was somit zu Crosstalk führt.

Aus dieser einfachen Betrachtung ist zu erkennen, dass die Wahl der Barriereöffnung immer eine Abwägung zwischen der maximalen Leuchtdichte und dem Übersprechen der Ansichten ist. Um ein verstärktes Übersprechen zu vermeiden, kann die Barriereöffnung verkleinert werden, wodurch umgekehrt jedoch die maximal wahrnehmbare Leuchtdichte deutlich reduziert wird. Umgekehrt macht es auch keinen Sinn die Barriereöffnung zu groß zu wählen, da dies zwar den Winkelbereich mit maximaler Helligkeit vergrößert, jedoch auch das Übersprechen zunimmt.

Abstand Barriere-Bildgeber

Eine Änderung des Abstands d_B zwischen Barrieremaske und Bildgeber führt bei konstanter Barriereöffnung und konstanter Pixelgröße zu einer Veränderung der Größe des Winkelbereichs, in den die Anzeige abstrahlt.

Um im idealen Betrachtungsabstand z_i die größte laterale Bewegungsfreiheit des Betrachters zu erreichen, wird der Barriereabstand gerade so gewählt, dass die Augen des Betrachter (mit einem mittleren Augenabstand d_A von 62 mm) jeweils mittig der monokularen Stereozonen liegen (vgl. Abb. 4.4). Unter Anwendung der Kleinwinkel-

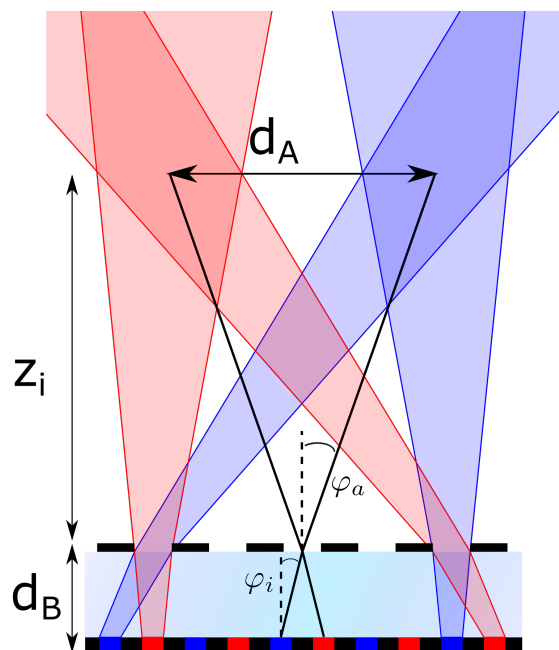


Abbildung 4.4: Änderung des Abstandes Barriere-Bildgeber d_B beeinflussen die Größe des abgestrahlten Winkelbereichs der linken (blau) und rechten (rot) Ansicht. Im idealen Betrachtungsabstand konvergieren die Lichtstrahlen mehrerer Barriereöffnungen und bilden dort die breiteste Ausdehnung der monokularen Stereozonen

näherung $n \cot \tan(\varphi_i) \approx n \cdot \sin(\varphi_i) = \sin(\varphi_a) \approx \tan(\varphi_a)$ kann aus der Abbildung der folgende Zusammenhang für den Barriereabstand und den idealen Betrachtungs-

abstand hergeleitet werden. Hierbei bezeichnet $p_{D,sub}$ den Abstand zwischen zwei Subpixeln der Anzeige (Subpixelpitch).

$$d_B = \frac{n \cdot p_{D,sub} \cdot z_i}{d_A}$$

$$n := \text{Brechungsindex}$$

$$p_{D,sub} := \text{Subpixelpitch der Anzeige} \quad (4.5)$$

$$z_i := \text{idealer Betrachtungsabstand}$$

$$d_A := \text{mittlerer Augenabstand [62mm]}$$

Die Kleinwinkelnäherung kann angewendet werden, da für typische Betrachtungsabstände von ≈ 750 mm der Winkel $\varphi_a \approx 2.4^\circ$ beträgt und somit die Abweichung sehr gering sind.

Barrierepitch

Der Barrierepitch p_B beschreibt die Periode der Barriereöffnungen und legt den Betrachtungsabstand fest, an dem die von mehreren Barriereöffnungen abgestrahlten Lichtstrahlen konvergieren. Dies definiert den idealen Betrachtungsabstand.

Damit die von den Barriereöffnungen ausgehenden Strahlen konvergieren können, muss der Pitch der Barriere kleiner als der doppelte Subpixelpitch der Anzeige sein. Die Differenz wird als Verschiebung s (engl. shift) bezeichnet (vgl. Abb. 4.2). Aus der Abbildung wurde unter Berücksichtigung der Kleinwinkelnäherung für die Verschiebung die folgenden Zusammenhänge abgeleitet:

$$s = 2 \cdot p_{D,sub} - p_B$$

$$s = \frac{d_B}{n \cdot z_i} \cdot p_B \quad (4.6)$$

Hieraus ergibt sich der Barrierepitch zu:

$$p_B = \frac{2 \cdot p_{D,sub}}{\frac{d_B}{n \cdot z_i} + 1}$$

$$n := \text{Brechungsindex}$$

$$p_{D,sub} := \text{Subpixelpitch der Anzeige} \quad (4.7)$$

$$z_i := \text{idealer Betrachtungsabstand}$$

$$d_B := \text{Abstand Barriere-LCD}$$

Eine Änderung des Barrierepitchs hat eine Verschiebung des idealen Betrachtungsabstandes zur Folge. In Abbildung 4.5 sind die Stereoraute für drei verschiedene Barrierepitchs dargestellt.

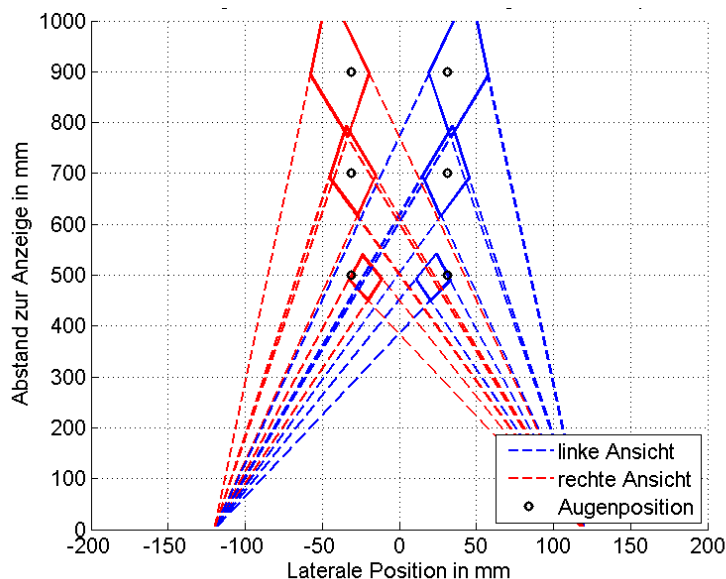


Abbildung 4.5: Verschiebung der monokularen Stereozonen durch Änderung des Barrierepitchs

Es ist zu erkennen, dass eine Änderung des Barrierepitchs die monokularen Stereozonen verschiebt. Die breiteste Ausdehnung der Stereozonen liegt jeweils in unterschiedlichen Betrachtungsabständen vor der Anzeige. Der Abstand der Stereozonen der linken (blau) und rechten (rot) Ansicht ändert sich jedoch ebenfalls, wodurch ein Betrachter mit einem Augenabstand von 62 mm nur im Abstand 700 mm mit seinen Augen mittig der Stereozone sitzen würde, da diese Lage durch den Abstand Barriere-Bildgeber festgelegt wird und bei einer Barrierepitchänderung unverändert bleibt. Der hergeleitete Zusammenhang einer Barrierepitchänderung mit der Verschiebung des idealen Betrachtungsabstandes stellt den Ausgangspunkt der Methodik zur Adaption auf variable Betrachtungsabstände des Kapitels 5 dar.

4.2 Anzeigen- und statischen Barriereparameter für eine Anzeige im Automobil

Nach der Definition und Herleitung der allgemeinen funktionalen Zusammenhänge der statischen Parameter einer Parallaxebarriere, werden nun die Parameter der Anzeigen- und Abbildungsfunktion festgelegt, um die optische Zielfunktion aus Kapitel 2 zu erreichen. In der Näherung der geometrischen Optik ist es möglich, das inverse optische Problem zu lösen und von der optischen Zielfunktion bei bekannter Anzeigefunktion auf die Abbildungsfunktion zurück zu rechnen.

Die gefunden Parameter der Anzeigen- und Abbildungsfunktion wurden im Anschluss in der „Prototypischen Anzeige 1“ prototypisch umgesetzt und bewertet.

4.2.1 Inverse geometrisch-optische Bestimmung der Anzeige- und Abbildungsfunktion

Die optische Zielfunktion beschreibt die Anforderungen an die horizontalen Helligkeitsverläufe der rechten und linken Ansicht in der Ebene des Betrachters. Ohne Adaption auf den Betrachtungsabstand muss die optische Zielfunktion mindestens im idealen Betrachtungsabstand erfüllt sein.

Die Helligkeitsverteilung in einer Ebene vor der Anzeige setzt sich aus der Lichtabstrahlung aller Barriereöffnungen der Anzeige zusammen. Im idealen Betrachtungsabstand konvergieren die Lichtstrahlen mehrerer Barriereöffnungen (vgl. 4.4), wodurch in diesem Abstand die breiteste Ausdehnung der monokularen Stereozonen entsteht. Das Aussehen des horizontalen Helligkeitsverlaufs im idealen Betrachtungsabstand unterscheidet sich nur in seiner Intensität, für den Fall, dass eine oder mehrere Barriereöffnungen betrachtet werden. Im idealen Betrachtungsabstand ist es daher möglich, den Helligkeitsverlauf in der Ebene des Betrachters direkt auf die Abstrahlcharakteristik einer Barriereöffnung zurückzuführen.

Die in der Gleichung 4.4 hergeleiteten Abstrahlcharakteristiken einer Barriereöffnung lassen sich durch den trigonometrischen Zusammenhang $\tan(\varphi_a) = \frac{y}{z_i}$ auf eine örtliche Darstellung in der Ebene des Betrachters umrechnen. Umgekehrt ist es möglich aus den Anforderungen der optischen Zielfunktion auf die Anzeigen- und Abbildungsfunktion zu schließen.

Der Zusammenhang zwischen der Anzeigefunktion, der Abbildungsfunktion und der optischen Zielfunktion für eine Parallaxebarriere ist in Abbildung 4.6 dargestellt. Unter Anwendung der Kleinwinkelnäherung ergeben sich die vier Gleichungen für

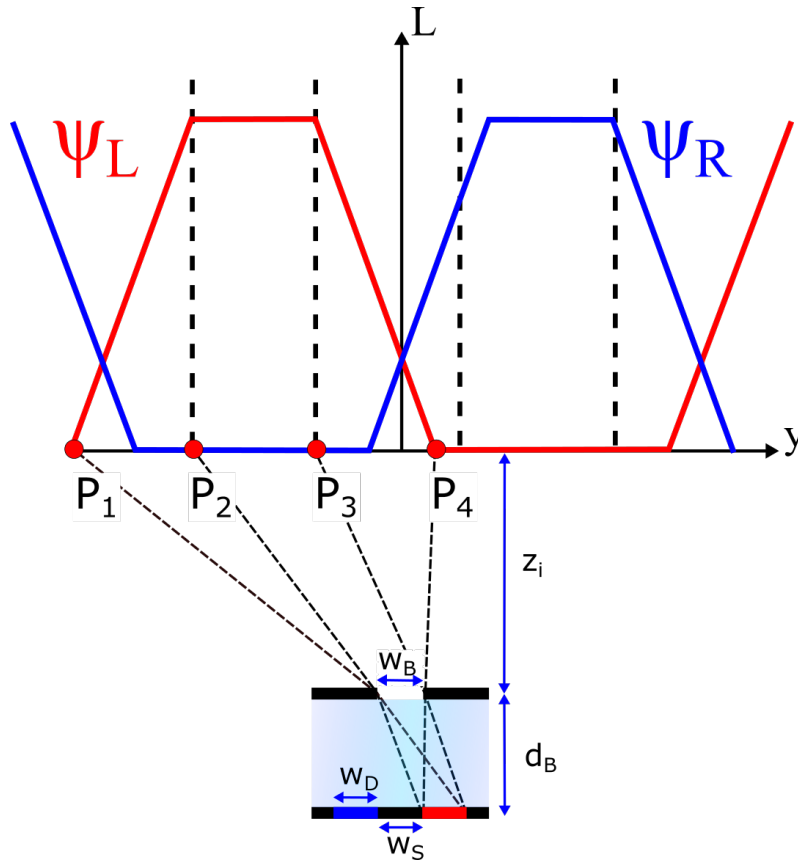


Abbildung 4.6: Strahlengang ausgewählter Strahlen vom Bildgeber, durch die Barriere bis zum Ort des Betrachters im idealen Betrachtungsabstand z_i ; Oben dargestellt: der schematische horz. Helligkeitsverlauf der optischen Zielfunktion

die laterale Lage der Punkte $P_1 - P_4$ im idealen Betrachtungsabstand.

$$\begin{aligned}
 \frac{P_1}{z_i} &= -n \cdot \left(\frac{w_D + \frac{w_S}{2} + \frac{w_B}{2}}{d_B} \right) \\
 \frac{P_2}{z_i} &= -n \cdot \left(\frac{\frac{w_S}{2} + \frac{w_B}{2}}{d_B} \right) \\
 \frac{P_3}{z_i} &= -n \cdot \left(\frac{w_D + \frac{w_S}{2} - \frac{w_B}{2}}{d_B} \right) \\
 \frac{P_4}{z_i} &= -n \cdot \left(\frac{\frac{w_S}{2} - \frac{w_B}{2}}{d_B} \right)
 \end{aligned} \tag{4.8}$$

Die optische Zielfunktion besagt, dass die statische Helligkeitsverteilung ein Helligkeitsplateau mit einer Breite von 47 mm aufweisen soll, in dem es zu keinem Übersprechen kommt (vgl. Gl. (2.2)). Aus der Abbildung erkennt man, dass dies der Differenz $|P_3 - P_2|$ entspricht. Aus den Formel für die Punkte P_3 und P_2 ergibt sich die Gleichung (4.10), welche die Breite des Plateaus beschreibt.

$$w_{plateau} = |P_3 - P_2| = \frac{n \cdot z_i}{d_B} (w_B - w_D) \quad (4.9)$$

Mit Gleichung (4.5) und $p_{D,sub} = w_D + w_S$ ergibt sich der Ausdruck

$$\frac{w_{plateau}}{d_A} = \frac{w_B - w_D}{w_D + w_S} \quad (4.10)$$

Die Breite der Flanke ergibt sich zu:

$$\begin{aligned} w_{flanke} &= \frac{n \cdot z_i}{d_B} w_D \\ \frac{w_{flanke}}{d_A} &= \frac{w_D}{w_D + w_S} \end{aligned} \quad (4.11)$$

Aus den zwei Gleichungen (4.10), (4.11) ist zu erkennen, dass für den Falls, dass nur die angestrebte Plateaubreite vorgegeben wird, es keine eindeutige Lösung gibt. Es sind mehrere Parameterkombinationen möglich. In Abbildung 4.7 wurde beispielsweise für die Breite eines Subpixels w_D und den Schwarzbereich dazwischen w_S eine Breite von einem Viertel des Anzeigenpitches angenommen. Für die geforderte Breite des Plateaus von 47 mm würde sich eine Barriereöffnung mit der Breite von 118 μm ergeben, was einem Öffnungsverhältnis bezogen auf den Barrierepitch von 63 % entsprechen würde. Die Flanke hätte eine Breite von $w_{flanke} = 31$ mm. In Kombination mit der Plateaubreite ergibt sich eine Helligkeitsverteilung dergestalt, dass sich dessen linke und rechte Ansicht, wie in Abbildung 4.7 dargestellt, sich deutlich überlappen. In rot ist die horizontale Helligkeitsverteilung der rechten Ansicht $L_R(y) = L_{WB}(y)$ im idealen Betrachtungsabstand dargestellt, welche sich ergibt, wenn alle Pixel der rechten Ansicht ein und der Rest ausgeschaltet sind (L_{WB}). In blau die entsprechende linke Ansicht $L_L(y) = L_{BW}(y)$. Der crosstalkfreie Bereich ist sehr gering und praktisch nicht nutzbar. Hinzu kommt die in Schwarz dargestellte Helligkeitsverteilung L_{WW} , welche von einem Betrachter wahrgenommen wird, wenn auf beiden Ansichten alle Pixel eingeschaltet sind (weißes Bild). Hierbei würden bei

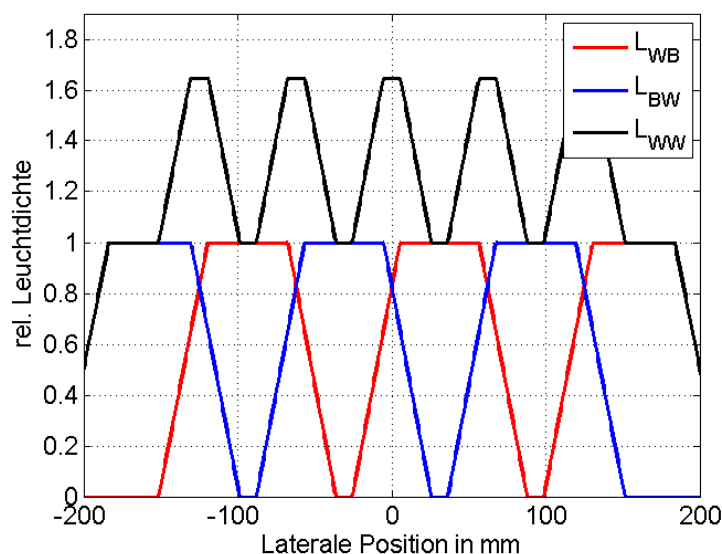


Abbildung 4.7: Helligkeitsverteilung im idealen Betrachtungsabstand mit einem Helligkeitsplateau der Breite der optischen Zielfunktion.

lateralen Bewegungen deutliche Helligkeitsunterschiede wahrgenommen werden.

Durch Modifikation der Anzeigefunktion in Form einer Verringerung der Pixelbreite des LCDs könnte die Breite der Flanke reduziert und die Breite des Plateaus vergrößert werden. Um die Werte der optischen Zielfunktion zu erhalten, müsste die Pixelgröße jedoch ungefähr auf $10\ \mu\text{m}$ reduziert werden, wodurch die Displayhelligkeit auf fast ein Fünftel fallen würde. Dies könnte nicht durch eine stärkere Hintergrundbeleuchtung ausgeglichen werden.

Für die Prototypische Anzeige 1 wurde daher ein Kompromiss zwischen dem Übersprechen, einer homogenen Helligkeitsverteilung und der Größe des Helligkeitsplateaus getroffen.

Die Breite des Subpixels und des Schwarzbereichs wurden wie im Beispiel mit einem Viertel des Pixelpitchs angenommen. Dies führt zu einem gleichmäßigen horizontalen Abstand der Subpixel auf der Anzeige, was die Darstellungsqualität im monoskopischen Fall verbessert.

Für die Barriereöffnung der Prototypischen Anzeige 1 wurde ein Öffnungsverhältnis von 50% gewählt, womit die Öffnung ungefähr doppelt so breit wie ein Subpixel ist. Die resultierende Helligkeitsverteilung im idealen Betrachtungsabstand ist in Abbildung 4.8 dargestellt. Es ergibt sich somit eine Helligkeitsverteilung L_{WW} , die

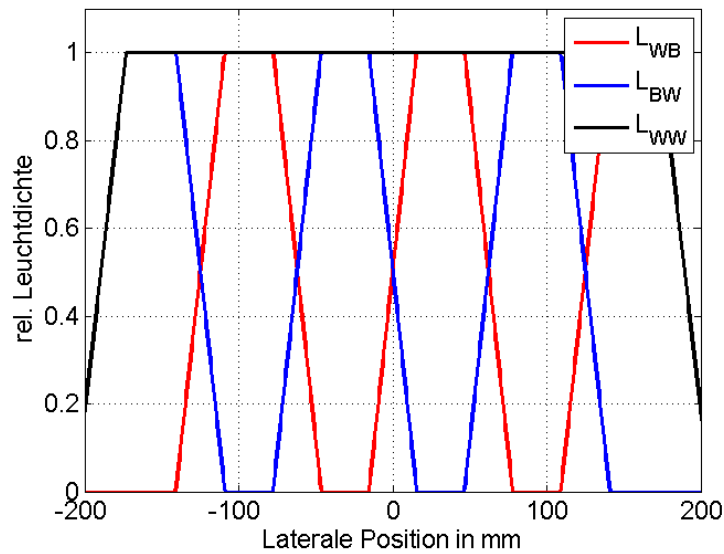


Abbildung 4.8: Die Geometrisch Optische Helligkeitsverteilung der Prototypischen Anzeige 1 ergibt aus einem Kompromiss aus einem kleinerem Helligkeitsplateaus und einem größerem Bereich des Übersprechens

konstant über dem Abstrahlbereich ist. Das crosstalkfreie Helligkeitsplateau der Verteilungen L_{WB} und L_{BW} hat ebenso wie die Flanke eine Breite von 31 mm, wodurch sich ein Betrachter mit Augenabstand 62 mm mittig der Helligkeitsverteilung befindet. Die vollständigen geometrischen Werte der Prototypischen Anzeige 1 sind in Tabelle 4.1 aufgelistet.

Festlegung des Barrierepitchs

Die Festlegung des Barrierepitchs erfolgt unabhängig von der optischen Zielfunktion und wird nur durch den idealen Betrachtungsabstand bestimmt. Der geforderte stereoskopische Betrachtungsbereich hat laut Zielvorgabe einen longitudinale Ausdehnung von 650-1000 mm. Wie im späteren Verlauf der Arbeit gezeigt wird, ist es nicht möglich, für eine Anzeige mit der geforderten Breite von ungefähr 300 mm den gesamten Betrachtungsbereich durch eine monokulare Stereozone abzudecken. Es sind daher Maßnahmen zur Adaption auf den Betrachtungsabstand notwendig, welche im nächsten Kapitel vorgestellt werden. In der Prototypischen Anzeige 1 wurden diese noch nicht umgesetzt und der ideale Betrachtungsabstand auf **730 mm** festgelegt. Hierbei wurde sich dafür entschieden kleinere Betrachtungsabstände zu

Prototypische Anzeige 1		
	horizontal	vertikal
Anzeige:		
Anzeigendiagonale:	10,26"	
Anzeigenbreite:	240 mm	
Aspektverhältnis:	$\approx 7 : 3$	
Pixelanordnung:	RGB vertikal	
Auflösung:	2560 px	542 px
Pixelpitch p_D :	93,8 μm	187,5 μm
Subpixelpitch $p_{D,sub}$:	93,8 μm	62,5 μm
Aperturöffnung Subpixel w_D :	46,9 μm	46,9 μm
Größe horz. Schwarzbereich w_S :	46,9 μm	-
Anzahl der Subpixel pro Pixel:	1	3
Barriere:		
Barriereanordnung:	Streifenanordnung	
Abstand Barriere-LCD:	1,68 mm	
Initialer Betrachtungsabstand:	730 mm	
Barrierepitch:	187,31 μm	-
Öffnungsverhältnis Barriere:	0,5	
Anzahl der Subpixel pro Barrierepitch:	12	1
Subbarrierepitch:	15,63 μm	-
Brechungsindex Material zw. Barriere-LCD	1,52	

Tabelle 4.1: Parameter der Prototypischen Anzeige 1

priorisieren, da größere Betrachtungsabstände hauptsächlich bei Fahrern mit großer Körpergröße eine Rolle spielen, welche statistisch seltener auftreten.

Aus Formel (4.7) ergibt sich mit den Angaben der Anzeigefunktion aus Tabelle 4.1 und einem Abstand des LCDs zur Barriere von 1,68 mm (siehe nächster Abschnitt) ein Barrierepitch von **0,18731 mm**. Der Barrierepitch p_B ist somit nur $\approx 0,3 \mu\text{m}$ kleiner als der doppelte Subpixelpitch der Anzeige.

Festlegung des Abstandes Barriere-Bildgeber

Für den idealen Betrachtungsabstand von 730 mm beträgt bei einem mittleren Augenabstand von $d_A = 62 \text{ mm}$ nach Gleichung (4.5) der Abstand zwischen Barriere und LCD **1,68 mm**.

Aus der Gleichung geht jedoch nicht hervor, ob die Barriere vor oder hinter der Anzeige liegt. Die geometrische Abstrahlcharakteristik ändert sich nicht, wenn die Reihenfolge vertauscht wird, da die Faltung in Gleichung (4.2) kommutativ ist. Eigene experimentelle Untersuchungen haben jedoch gezeigt, dass eine Platzierung der Barriere hinter dem LCD zwar zu einer geringen Verschlechterung des Crosstalks führt, jedoch Helligkeitsvariationen bei lateralen Bewegungen verbessert, die, wie im kommenden Abschnitt gezeigt wird, einen großen Einfluss auf die wahrgenommene Qualität haben. Der Unterschied zwischen der Vorhersage der geometrischen Optik und der Praxis bestehen in der idealisierten Beschreibung der Barriere und des Bildgebers. In der Realität tritt sowohl im Flüssigkristall der Anzeige und der Barriere, als auch im Farbfilter der Anzeige Lichtstreuung auf, welche den Crosstalk ansteigen lässt. Im Vergleich der Aperturöffnungen der Barriere und des Farbfilters zeigt die Schwarzmaske der Anzeige eine deutlich höhere Extinktion als die Flüssigkristallbarriere, welche einen Restanteil von Licht transmittieren lässt. Zudem wird in den geometrisch-optischen Modellen die Wellennatur des Lichtes vernachlässigt, welche zu zusätzlichen Beugungseffekten an den Mikrostrukturen der Aperturen führt. Für die Prototypische Anzeige 1 wurde die Barriere daher unter dem LCD, genauer zwischen dem LCD und der Hintergrundbeleuchtung, platziert.

4.3 Dynamischen Parameter einer Parallaxebarriere

Adaption auf laterale Positionsänderungen

Nachdem die statischen Parameter der Anzeigen- und Abbildungsfunktion festgelegt wurden, gilt es in diesem Abschnitt die dynamischen Eigenschaften zu definieren.

Die Bewegungsfreiheit eines oder mehrerer Betrachter zu vergrößern indem die Anzeigen- oder Abbildungsfunktion auf den Betrachter adaptiert, ist Gegenstand aktueller Forschung. Einen Schwerpunkt bilden hierbei *Multi-View-Anzeigen*, da es bei diesen recht einfach ist per Software die Zuordnung der Ansichten zu den Subpixeln zu ändern. Das abbildende Element (Barrieren- oder Linsenmaske) bleibt dabei konstant.

Bei autostereoskopischen Anzeigen mit zwei Ansichten ist eine Anpassung der Anzeigefunktion durch Änderung der Zuordnung der Pixel zu den Ansichten theoretisch auch möglich, jedoch deutlich ungenauer. In den letzten Jahren gab es Entwicklungen, die Abbildungsfunktion in Form der Barriere als dynamisches Element einzusetzen und die Anzeigefunktion konstant zu halten. Von verschiedenen Displayherstellern wurde einzelne Prototypen mit dynamischen Barrieremasken vorgestellt. Diese ermöglichen es, die monokulare Stereozone zu verschieben, sodass ein Betrachter welcher die Position ändert wieder ein stereoskopisches Bild in guter Qualität sieht, sobald er erneut in Ruhe ist. Während der Bewegung treten jedoch häufig sichtbare Störungen auf. Die Auslegung der Barrierenmaske in dieser Arbeit zielt von Anfang an darauf ab, diese Störungen während der Bewegung zu vermeiden. Die Untersuchung der Störungen wird im nächsten Abschnitt vorgestellt.

Bei dem in dieser Arbeit gewählten Ansatz der dynamischen Barrieremasken ist die Abbildungsfunktion $f(y, t)$ in ihrer Form zeitlich und örtlich veränderlich.

Wird eine Barriereöffnung ohne Änderung des Abstandes zum Bildgeber lateral verschoben, verschieben sich ebenfalls die monokularen Stereozonen am Ort des Betrachters. Es wird dadurch möglich auf laterale Bewegungsänderungen zu adaptieren. Um auf den Betrachter adaptieren zu können ist eine dynamische Barriere, ein Kopfpositionserfassungssystem (engl. headtracking-system [HTS]) und eine entspre-

chende Ansteuerungslogik notwendig.

Bei einer dynamischen Barrieremaske besteht die Barriere aus einer Flüssigkristallanzeige, deren Subpixel transparent und lichtundurchlässig geschaltet werden können. In der Regel handelt es sich dabei um eine TN(Twisted-Nematic)-Flüssigkristallzelle in Streifenanordnung, da nur eine horizontale Parallaxe notwendig ist. In horizontaler Richtung beträgt die Barriereauflösung (Abstand zweier schaltbarer Streifen) ein Vielfaches des Subpixelpitchs der Anzeige.

Die Breite eines Streifens einer Barriere, welcher als Subpixelpitch der Barriere $p_{B,sub}$ interpretiert werden kann, und der Abstand der Barriere zur Anzeige d_B bestimmen, wie fein eine Barriere auf Bewegungsänderungen reagieren kann. In Abbildung 4.9 ist das Prinzip dargestellt. Soll die monokulare Stereozone nach rechts verschoben werden, muss bei allen Barriereöffnungen am linken Rand ein zuvor transparenter Subpixel (dunkelgrün dargestellt) auf absorbierend und am rechten Rand ein zuvor absorbierender Subpixel (hellgrün) auf transparent geschaltet werden. Die Barriereöffnung verschiebt sich und mit ihr die monokulare Stereozone. In Kleinwinkelnähe-

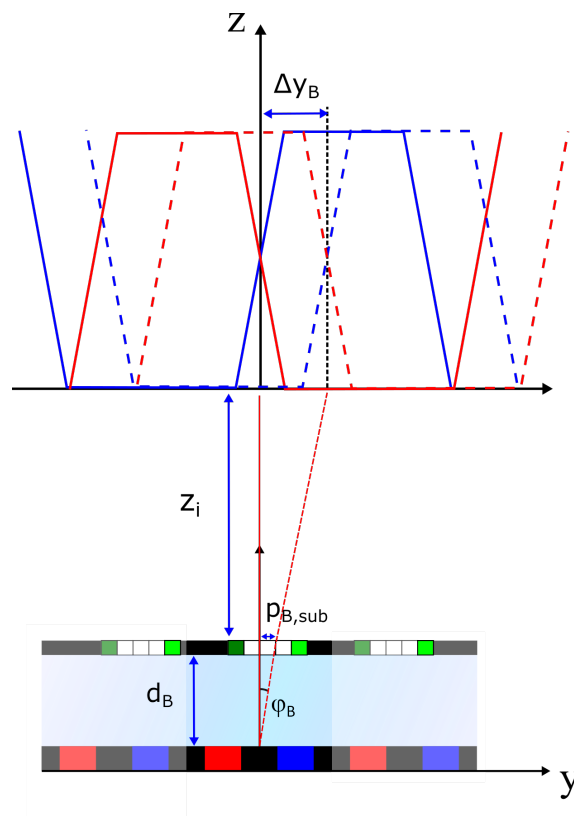


Abbildung 4.9: Prinzip der lateralen Adaption

ung ergibt sich der folgende Zusammenhang:

$$\frac{\Delta y_B}{z_i} = \tan(\varphi_B) = n \cdot \frac{p_{B,sub}}{d_B} \quad (4.12)$$

Im Betrachtungsabstand z_i kann sich ein Beobachter somit um die Strecke Δy_B bewegen, bevor die Barriere auf die laterale Bewegung adaptiert.

Vom Headtrackingsystem wird kontinuierlich der Winkel bestimmt, unter dem sich der Betrachter vor der Anzeige befindet. Ändert sich dieser um einen Wert größer als $\varphi_{B,sub}$, adaptiert die Barriere.

Subpixelpitch der Barriere

Allgemein gilt: Je höher die Barriereauflösung desto feiner kann auf eine laterale Positionsänderung des Betrachters reagiert werden.

Ein Vielfaches der Subpixelauflösung muss sowohl den Barrierepitch als auch die Barriereöffnung ergeben (siehe Abb. 4.2).

$$\begin{aligned} p_{B,sub} &= \frac{p_B}{N} \quad \text{mit } N \in \mathbb{N} \\ p_{B,sub} &= \frac{w_B}{M} \quad \text{mit } M \in \mathbb{N} \end{aligned} \quad (4.13)$$

Es existieren jedoch technische Limitierungen, welche die maximal erreichbare Subpixelauflösung begrenzen. Die kleinsten herstellbaren Subpixel sind zur Zeit in der Größenordnung von $\approx 7 \mu\text{m}$. Dadurch kann es notwendig werden, dass die Parameter des Pixelpitchs oder Barriereöffnung leicht angepasst werden müssen, um die obige Bedingung zu erfüllen.

4.3.1 Festlegung der Barriereauflösung für eine Anzeige im Automobil

Durch die Wahl des Öffnungsverhältnis von 50% der Barriereöffnung im Verhältnis des Barrierepitchs stellt die Erfüllung der Bedingungen aus Gleichung (4.13) kein größeres Problem dar. Die Barriereauflösung muss mindestens ein Viertel des Barrierepitchs betragen und die Anzahl der Subpixel pro Barrierepitch muss ein Vielfaches von zwei sein.

Für die Prototypische Anzeige 1 wurde sich für **12 Subpixel** pro Barrierepitch entschieden, was einen Subpixelpitch von $15,63 \mu\text{m}$ entspricht. Die Anzahl der Subpixel

der Barriere liegt somit in einem Bereich, in dem sie herstellbar sind und auch der Aufwand der Ansteuerung zu beherrschen ist.

Mit dem angegebenen Abstand der Barriere zum LCD folgt aus Gleichung (4.12), dass sich ein Betrachter im idealen Betrachtungsabstand 730 mm um ≈ 10 mm lateral frei bewegen kann bevor die Barriere auf seine Bewegung adaptiert.

4.4 Untersuchung der stereoskopischen Qualität der Prototypischen Anzeige 1

Ziel der Untersuchung der Prototypischen Anzeige 1 ist die messtechnische Erfassung und Bewertung der stereoskopischen Qualität der Anzeige. Es gilt zum einen zu prüfen, wie die geometrisch-optisch vorhergesagten Eigenschaften in der Praxis abweichen und zum anderen zu untersuchen, ob die gegenüber der optischen Zielfunktion gemachten Einschränkungen akzeptabel sind und trotzdem zu einem nutzbaren Anwendungsfall führen.

4.4.1 Aufbau der Anzeige

Auf Grundlage der im vorherigen Abschnitt gefundenen Parametern wurde die Prototypische Anzeige 1 aufgebaut, welche als Gesamtsystem aus der Anzeige mit einem FPGA-Board zur Ansteuerung, einer Ansteuerungselektronik der Barrierenmaske, einem Headtracking-System zur Kopferfassung und einem Steuerrechner, auf dem sowohl die Bilderzeugung, als auch die Kopferfassungsauswertung läuft, besteht.

Der systematische Aufbau ist in Abbildung 4.10 dargestellt.

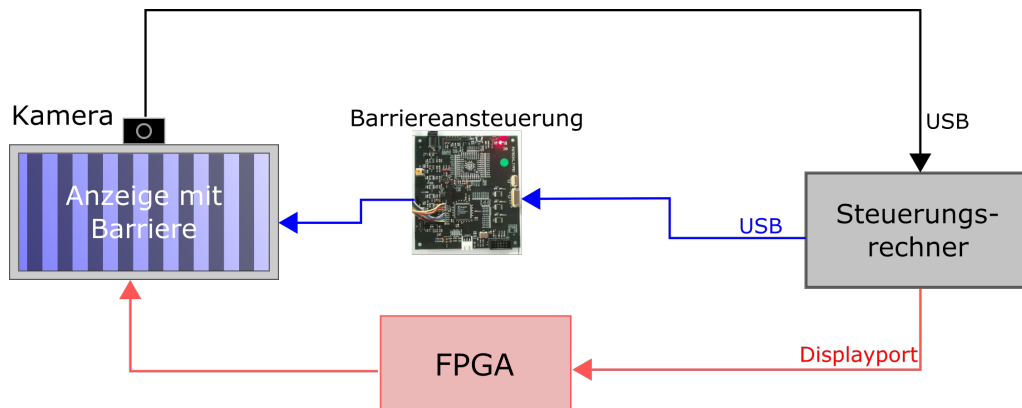


Abbildung 4.10: Aufbau des Gesamtsystems Prototypische Anzeige 1

Aufbau und Ansteuerung der Anzeige

Die Anzeige besteht aus einer 10,26"-Flüssigkristallanzeige, bei welcher es sich um eine IPS-Zelle (emphIn-Plane-Switching) handelt, und einer rückseitigen Flüssigkristallbarriere, welche aus einer TN-Zelle aufgebaut ist.

Es wurde das *Stereoskopische Pixellayout 1* umgesetzt, wodurch die Anzahl der Subpixel verdoppelt wurde. Die Aperturöffnungen der Barriere und der Farbfilter wurden gemäß des vorherigen Abschnitts gewählt und sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst.

Der Aufbau der Anzeige ist vereinfacht im Querschnitt in Abbildung 4.11 dargestellt. Im unteren Teil der Abbildung ist die Hintergrundbeleuchtung (engl. Backlight) dar-

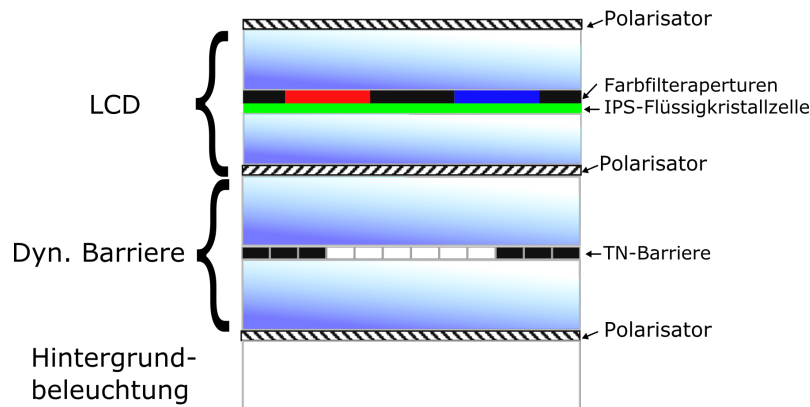


Abbildung 4.11: Querschnitt durch die Prototypische Anzeige 1

gestellt. Das Licht wird hierbei von weißen Leuchtdioden (LEDs) erzeugt und vom Rand der Anzeige eingestrahlt. In der Abbildung wurde auf die Darstellung des inneren Aufbaus des Backlights verzichtet, welcher letztendlich zu einer Abstrahlung von unpolarisiertem, inkohärentem, weißem Licht führt.

Dies wird durch einen Polarisator linear polarisiert und trifft auf die Flüssigkristallbarriere in Streifenanordnung. Zusammen mit dem zweiten Polarisator zwischen Barrieremaske und LCD, wird das Licht gemäß dem Funktionsprinzip einer Flüssigkristallanzeige außerhalb der Barriereöffnungen absorbiert und somit nicht transmittiert.

Nach dem Durchgang durch den zweiten Polarisator trifft das linear polarisierte Licht auf den Flüssigkristall der eigentlichen Anzeige (LCD), welcher sich im Abstand d_B zur Barriere befindet. Auch hier gilt erneut unter Berücksichtigung des dritten Po-

larisators das Funktionsprinzip des Flüssigkristalls, wodurch jeder Subpixel in seiner Transmission eingestellt werden kann. Im Gegensatz zur Flüssigkristallbarriere die nur binär (transparent oder absorbierend) geschaltet werden kann, kann beim LCD die Transmission in 255 Stufen (8bit) verändert werden. Die Farbfilter geben den einzelnen Subpixeln gemäß dem Subpixellayout ihre spektrale Charakteristik. Schlussendlich verlässt das Licht die Anzeige und wird vom Betrachter wahrgenommen.

Die Ansteuerung der prototypischen Anzeige erfolgt durch ein FPGA-Board (engl. Field Programmable Gate Array) und dem Steuerrechner. Auf dem Rechner wird gemäß dem im Abschnitt 2.3.2 beschriebenen Prinzip in der 3D-Umgebung „veo“ typische Inhalte eines Kombiinstruments mit künstlicher Tiefe erzeugt. Die zwei Teilbilder der rechten und linken Ansicht werden auf Subpixelebene miteinander verkämmt und per Displayboard an das FPGA-Board übertragen. Dort werden die ankommenden Signale synchronisiert, serialisiert und die über Flachbandkabel angebundene Pixelmatrix der Anzeige mit passendem Timing angesteuert.

Headtracking und Barriereansteuerung

Zur Nachführung der stereoskopischen Raumbereiche (Sweetspots) bei Änderung der Kopfposition des Betrachters werden Kopferfassungssysteme verwendet. Ziel ist, die Bestimmung der Kopfposition im Raum vor der Anzeige und die möglichst latenzfreie Detektion der Änderung derselben.

Prämisse bei der Auswahl eines Kopferfassungssystems war der Verzicht auf zusätzliche Hilfsmittel, sogenannte „Tracer“ die vom Betrachter am Körper getragen werden müssen. Die meist verbreitete Technologie hierfür sind kameragestützte Kopferfassungssysteme, die ihrer englischen Bezeichnung nach als „Headtracking Systeme“ (HTS) bezeichnet werden. In den letzten Jahren wurden auch vermehrt Systeme mit Tiefensensoren kommerzialisiert, die auf dem Prinzipien der „Strukturierten Beleuchtung“ oder „Time-of-Flight“ basieren und eine genaue Tiefenbestimmung der erfassten Objekte ermöglichen. Zur Identifikation eines Gesichts oder Kopfs werden jedoch auch in diesen Systemen zusätzlich normale Kameras mit klassischen HTS eingesetzt.

Bei den eingesetzten Kameras werden Stereo- und Monokamerasysteme unterschied-

den. Stereokamerasysteme bestehen aus zwei Monokameras die in einer bekannten festen Zuordnung zu einander angeordnet sind. Sie ermöglichen durch Anwendung des Prinzips der Triangulation eine genauere Abstandsbestimmung als Monokamerasysteme. In dieser Arbeit wurden Monokamerasysteme eingesetzt, da mit der Prämisse gestartet wurde, die Hardwareanforderungen an ein Kamerasystem für einen möglichen späteren Einsatz im Automobil gering zu halten.

Zur Kopfbestimmung wird die Softwarelösung „FaceApi“ der Firma SeeingMachines¹ eingesetzt. Die Software bietet Schnittstellen zur Anbindung verschiedener Kameras und gibt als finales Produkt die Kopfposition in kartesischen Koordinaten aus. Der Ursprung liegt dabei im Ort der Kamera und muss gegebenenfalls auf den Bezugspunkt der Anzeige umgerechnet werden.

Bei der Kopfpositionsbestimmung wird von einer Kamera eine Szene mit einem Betrachter aufgenommen und im Anschluss durch Bildverarbeitungsalgorithmen interpretiert. Die Algorithmen gliedern sich dabei in ein zweistufiges Verfahren: die Kopferkennung und die Verfolgung (Tracking). Im ersten Schritt wird das gesamte Bild nach einem Kopf untersucht, wobei skalierungsinvariante Formerkennungsalgorithmen zum Einsatz kommen [67–70], die bei Erkennung eines Gesichts charakteristische Punkte extrahieren. Abhängig vom eingesetzten Algorithmus können dies Kopfpunkte, Augenpunkte oder sogar Reflektionen auf der Pupille zur Blickrichtungserkennung sein. In der hier vorgestellten Anwendung für eine stereoskopische Anzeige wird nur der Nasenwurzelpunkt als relevante Position verarbeitet. Der Vorgang der Gesichtserkennung ist sehr rechenintensiv und führt zu großen Latenzen. Im zweiten Schritt, dem Tracking, wird daher nur die Veränderung der charakteristischen Punkte in der zeitlichen Abfolge einzelner Kameraframes ausgewertet.

Aus den detektierten zweidimensionalen Pixelkoordinaten der Kopfposition im Kamerabild, wird die Kopfposition des Betrachters im Raum bestimmt. In einer vereinfachten Darstellung kann die Kameraoptik als Lochblende dargestellt werden. Wenn der Abstand der Blende, respektive die Brennweite der eingesetzten Linse, bekannt ist, kann der Winkel unter dem sich der Betrachter vor der Kamera befindet durch einfachen Strahlensatz bestimmt werden. Zur Bestimmung der Entfernung

¹www.seeingmachines.com/

des Betrachters von der Kamera werden jedoch weitere Angaben benötigt. Klassischerweise wird dabei die Annahme getroffen, dass der interpupillare Augenabstand einen festen Wert besitzt. Mit dieser Angabe ist es möglich den Betrachtungsabstand zu schätzen und die Position in kartesischen Koordinaten auszugeben. Statistische Untersuchungen zeigen, dass der interpupillare Augenabstand über die gesamte Bevölkerungsgruppe einer Normalverteilung mit Mittelwert **63,36 mm** und Standardabweichung **3,832 mm** folgt [63]. Der Augenabstand schwankt daher erheblich, was sich auf die Genauigkeit der Positionsbestimmung in kartesischen Koordinaten negativ auswirkt. Für typische Betrachtungsabstände von 650-1100 mm kann die Abstandsbestimmung bis zu 100 mm Abweichung aufzeigen. In dieser Arbeit wird ein mittlere Augenabstand von **62 mm** verwendet.

Für eine autostereoskopische Anzeige ohne Adaption auf den Betrachtungsabstand, wie sie in der Prototypischen Anzeige 1 umgesetzt wurde, ist für die Adaption der Barriere auf laterale Positionswechsel nur der Winkel relevant unter dem ein Betrachter vor der Anzeige sitzt. Aus den kartesischen Koordinaten des Headtrackingsystems lässt sich wieder auf den Winkel zurückrechnen, Fehler aus der Abstandsbestimmung kürzen sich raus. Voraussetzung hierfür ist jedoch, dass sich das Kamerasystem in der Ebene der Anzeige befindet. Für die Untersuchungen im Kapitel 5 in denen der Abstand exakt bestimmt werden muss, wird das eingesetzte HTS bei jedem Einsatz individuell auf den Betrachter kalibriert, sodass auch hier eine exakte Positionsbestimmung möglich ist.

Als Kamerasystem wurde eine *FireflyMV* der Firma PointGrey ² eingesetzt, welche über USB an den Steuerrechner angebunden ist. Die wesentlichen Parameter sind in Tabelle 4.2 dargestellt.

Für das eingesetzte Headtrackingsystem ergaben experimentelle Untersuchungen Genauigkeiten von kleiner $0,5^\circ$ für die Bestimmung des Winkels ϕ unter dem ein Betrachter vor der Kamera sitzt und eine Reproduziergenauigkeit des Abstandes z eines kalibrierten Kamerasystems von kleiner 10 mm. Ein weiterer wichtiger Parameter bei der Erfassung einer Kopfpositionsänderung ist die Latenz des Systems. Der Hersteller Seeing Machines gibt eine Latenz seiner Software mit kleiner als 11

²www.ptgrey.com

Kamera:	FireflyMV (PointGrey)
Typ:	monochrom
Chipsatz:	CMOS Aptina MT9V022
Max. Auflösung:	752 x 480 px
Bildwiederholffrequenz:	60Hz
Horizontaler Öffnungswinkel:	32°

Tabelle 4.2: Eingesetztes Headtracking-System

ms [71] für die Bildverarbeitung ohne Aufnahme des Bildes an. Ein Verfahren zur Bestimmung der Latenz des Anzeige-HT-Gesamtsystems im nächsten Kapitel vorgestellt.

Bei der Prototypischen Anzeige 1 ist die Kamera mittig oberhalb der Anzeige angebracht. Die Kamera wurde auf die Anzeige kalibriert, sodass die HTS-Position bezüglich der Anzeigenmitte ausgegeben wird. Diese Kopfposition wird an die speziell entwickelte Barriereansteuerungssoftware des Anzeigenherstellers übergeben und dort in binäre Ansteuerungsmuster umgewandelt, die im Anschluss per USB zur einer Ansteuerungselektronik übertragen werden und von dort die Spaltentreiber der Barriere ansteuern.

4.4.2 Visuelle Untersuchung und Bewertung der Anzeige

Die aufgebaute Anzeige wird subjektiv und objektiv untersucht. Bei der subjektiven Untersuchung wird die Qualität und die Leistungsfähigkeit vom Autor und weiteren teaminternen Personen visuell in Augenschein genommen.

Während der Begutachtung war das HTS eingeschaltet, die Barriere adaptierte auf laterale Positionsänderungen.

Es wurden drei verschiedene Testinhalte dargestellt. Zunächst wurde ein WB-Bild (linke Ansicht Weiß, rechte Ansicht schwarz) angezeigt. Hierbei fiel auf, dass das mit dem rechten Auge wahrgenommene Schwarz eher grau wirkte. Bei lateraler Bewegung verstärkte sich dies, bis zu dem Punkt, an dem die Barriere adaptierte. Mit

dem linken Auge, welches Vollweiß wahrgenommen hat, konnte kaum eine Helligkeitsabnahme bei lateraler Bewegung bis zum Punkt der Adaption wahrgenommen werden. Bewegte sich der Betrachter langsam vor der Anzeige konnte bei der Adaption nur in seltenen Fällen eine sprunghafte Helligkeitsänderung wahrgenommen werden. Bei schnelleren Kopfbewegungen traten diese jedoch deutlich sichtbar als ein wahrgenommenes Flackern der Anzeige auf.

Als zweites Bild wurde ein Rot-Grün Bild (RG) angezeigt, bei dem der Betrachter mit dem linken Auge vollflächig rot und mit dem rechten Auge vollflächig grün wahrnimmt. Dieses Bild dient dazu das Übersprechen zu bewerten. Wird jeweils ein Auge geschlossen gilt, je mehr Licht von einer Ansicht zu anderen überspricht, desto gelber erscheint das Bild. Hierbei wurde festgestellt, dass bereits im Falle eines statischen Betrachters eine Gelbfärbung wahrzunehmen ist. Bei lateraler Bewegung verstärkte sich das Übersprechen und fiel nach der Adaption der Barriere wieder ab.

Als drittes Testmaterial wurden speziell für ein 3D-Kombiinstrument hergestellte Inhalte auf diesem angezeigt, wie sie im Abschnitt 2.3.2 vorgestellt wurden. Diese Inhalte stellen nach den Extrembeispielen des Leuchtdichte- und Farbkontrasts, wie sie die Bilder WB und RG darstellen, die realistischen Inhalte einer späteren Nutzung dar. Das zuvor beobachtete Übersprechen war bei diesen Inhalten nur an einigen Stellen auf der Anzeige mit hohen lokalen Kontrasten sichtbar. Bei der Bewegung verstärkten sich diese und nahmen nach der Adaption erneut ab. Diese Störungen waren nur sichtbar, wenn speziell auf die kritischen Stellen geblickt wurde, die Tiefenwahrnehmung der Gesamtszene war zu jeder Zeit und auch während der Adaption uneingeschränkt möglich.

Die beobachteten Helligkeitssprünge bei der Adaption auf eine laterale Positionsänderung waren jedoch auch bei diesen Testinhalten bei moderaten bis schnellen Kopfbewegungen deutlich wahrnehmbar. Sie äußerten sich durch eine sprunghafte Änderung der gesamten Anzeigehelligkeit, was bei einer kontinuierlichen Bewegung zu einem gefühltem Flackern der Anzeige führt.

Bei Änderung des Betrachtungsabstandes auf unter 600 mm nahm das Übersprechen schnell bis zum Zusammenbrechen der Fusion zu. Für ansteigende Betrachtungsabstände nahm ab ungefähr 950 mm das Übersprechen erneut zu, jedoch langsamer als

bei kleinen Abständen. Auch hier führte eine weitere Vergrößerung des Abstandes zu einem Zusammenbrechen der Fusion und einer Wahrnehmung von Doppelbildern. Insgesamt zeigt die Prototypische Anzeige 1 bereits eine gute Qualität der 3D-Darstellung. Die laterale Adaption erweitert effektiv den Bewegungsbereich, wodurch es möglich ist, über einen weiten lateralen Bewegungsbereich ein Tiefenbild wahrzunehmen. Bei genauerer Betrachtung sind an Orten mit hohen lokalen Kontrasten und Tiefe Geisterbilder zu erkennen. Die Inhalte wurden schon in ihren Kontrasten speziell für die Anzeige angepasst und dennoch waren Störungen sichtbar. Daraus folgt, dass das Übersprechen der Anzeige zu hoch ist.

Die größten wahrnehmbaren Störungen stellen jedoch die Helligkeitssprünge bei lateraler Adaption dar, da diese als vollflächiges Flackern der Anzeige wahrgenommen werden und sich mit zunehmender Kopfgeschwindigkeit verstärken.

4.4.3 Messung der statischen Anzeigeeigenschaften

Die subjektiv gemachten Beobachtungen soll nun objektiv untersucht werden. Es wird hierbei zwischen der Auswertung der statischen und der dynamischen Anzeigeeigenschaften unterschieden.

Als statische Eigenschaften werden die Anzeigenparameter bezeichnet, die auch bei einer Anzeige mit statischer Barriere gemessen werden könnten. Als Erweiterung dieser werden im nächsten Abschnitt die dynamischen Anzeigeparameter gemessen.

Messung

Zur Messung der optischen Eigenschaften einer Anzeige kommen in dieser Arbeit zwei Messaufbauten zur Anwendung: ein sogenannter Goniometer- und Konoskop-aufbau. Bei dem Goniometeraufbau wird ein Messkopf auf einer Kreisbahn in einer Ebene um einen Messpunkt bewegt, während beim Konoskopaufbau durch eine geeignete Optik die Abstrahlung in unterschiedliche Winkel in einer einzelnen Messung erfasst wird. Die Konoskopmessung ist dadurch deutlich schneller und somit auch die bevorzugte Messmethode, wenn eine höhere Anzahl an Messungen durchgeführt werden soll. Das verwendete Konoskop hat jedoch eine geringere Winkelgenauigkeit, weshalb in dieser Arbeit zusätzlich der Goniometeraufbau verwendet wird.

Zur Bestimmung der Lage der monokularen Stereozonen im Raum sind mindestens

drei Messungen auf der Anzeige notwendig, da die Barriereöffnungen am Rand der Anzeige anders abstrahlen als zentral auf der Anzeige. In Abbildung 4.12 ist die Lage der drei Messpunkte auf der Anzeige dargestellt.

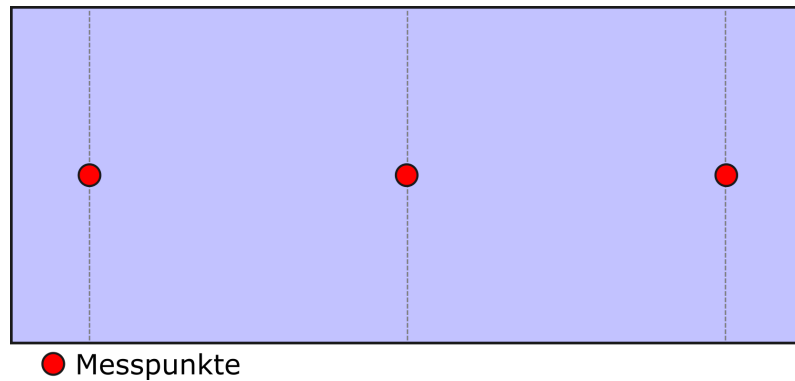


Abbildung 4.12: Messpunkte auf der Prototypischen Anzeige 1

Die Messpunkte befinden sich hierbei vertikal mittig auf der Anzeige und horizontal jeweils am Rand und in der Mitte der Anzeige. Da es messtechnisch nicht möglich war, exakt am Rand der Anzeige zu messen, liegen die äußeren Messpunkte jeweils bei 10 % und 90 % der maximalen Anzeigebreite. Die Auswirkungen auf die in der Auswertung gezeigten Messergebnisse sind gering.

An allen dieser drei Messpunkte wird die Abstrahlcharakteristik mit dem Konoskopaufbau gemessen. Am zentralen mittleren Messpunkt wird zusätzlich die Abstrahlcharakteristik mit dem Goniometeraufbau gemessen.

Goniometer-Messung der Abstrahlcharakteristik am zentralen Punkt der Anzeige

Bei der Messung mit einem goniometrischen Messaufbau, befindet sich die Anzeige im Drehpunkt des Messarms. Ein am Ende des Messarms angebrachter Leuchtdichtesensor wird durch einen Schrittmotor um den Messpunkt auf der Anzeige bewegt.

Bei dem in dieser Arbeit verwendeten Leuchtdichtesensor handelt es sich um das Gitter-Spektrometer *CAS 140 B* mit Messkopf *TOP100* der Firma *Instruments System*. An den Messkopf ist ein Nikon 60 mm Objektiv angebracht, in Kombination mit zusätzlichen Aperturen des Messkopfes ergibt sich ein Messspot auf der Anzeige mit einem Durchmesser von ungefähr 8 mm, wodurch eine Messung immer die Superposition der Abstrahlcharakteristik mehrerer Barriereöffnungen innerhalb

des Messspots ist. Das Spektrometer wird auch für spektrale Messungen (Farbeorte, Graustufen, etc.) eingesetzt, für diese Arbeit ist jedoch nur die Funktion als Leuchtdichtemessgerät von Relevanz. Durch Messung der spektralen Abstrahlung, kann die Leuchtdichte rechnerisch bestimmt werden, ohne zusätzliche Filter verwenden zu müssen.

Im Gegensatz zu einer Messung mit einem Konoskop kann mit dem Goniometeraufbau nur in einer Winkelebene zur Anzeige gemessen werden. Für autostereoskopische Anzeigen ist die wahrgenommene Helligkeitsverteilung in der horizontalen Ebene bei Bewegungen lateral und longitudinal vor der Anzeige von Relevanz.

Die Abstrahlcharakteristik wird zentral, mittig auf der Anzeige gemessen. Hierzu werden die Bilder WB, BW, WW und BB auf der Anzeige angezeigt. Hierbei entsprechen \mathbf{L}_{WB} und \mathbf{L}_{BW} den gemessenen Leuchtdichten, wenn jeweils auf einer Ansicht die maximale Helligkeit (weiß) und auf der anderen Ansicht die minimale Helligkeit (schwarz) dargestellt wird. Der Helligkeitsverlauf \mathbf{L}_{WW} entspricht der Anzeige eines vollflächig weißen Bildes für die linke und rechte Ansicht und stellt somit die Summe der Verteilungen \mathbf{L}_{WB} und \mathbf{L}_{BW} dar. \mathbf{L}_{BB} wird gemessen, wenn auf beiden Ansichten ein schwarzes Bild angezeigt wird.

In Abbildung 4.13 ist die horizontal abgestrahlte Helligkeitsverteilung dargestellt. Auf der x-Achse ist der horizontale Winkel dargestellt. Der Winkelbereich wurde auf eine Periode beschränkt, die dargestellten Verläufe würden sich praktisch jedoch wiederholen. Zusätzlich wurde in der Darstellung die geometrisch-optisch zu erwarteten Verläufe eingezeichnet ($\mathbf{L}_{WB,geo}$ und $\mathbf{L}_{BW,geo}$), welche im nächsten Abschnitt erläutert werden. Der Messverfahren mit dem Goniometer hat den Vorteil, die Schrittweite des Messarm frei einzustellen und somit die Winkelauflösung während der Messung zu variieren. Dadurch können charakteristische Bereiche genauer abgetastet werden. Eine einzelne Messung an einem Messpunkt benötigt jedoch deutlich mehr Zeit als bei einer Konoskopmessung.

Messgenauigkeit Goniometer-Aufbau

Der Goniometeraufbau wird in regelmäßigen Abständen vom Hersteller *Instruments Systems* kalibriert. Die spektralen Eigenschaften werden durch Bestrahlung mit Lasersystemen mit bekannten Laserlinien kalibriert. Im Anschluss wird die Leuchtdich-

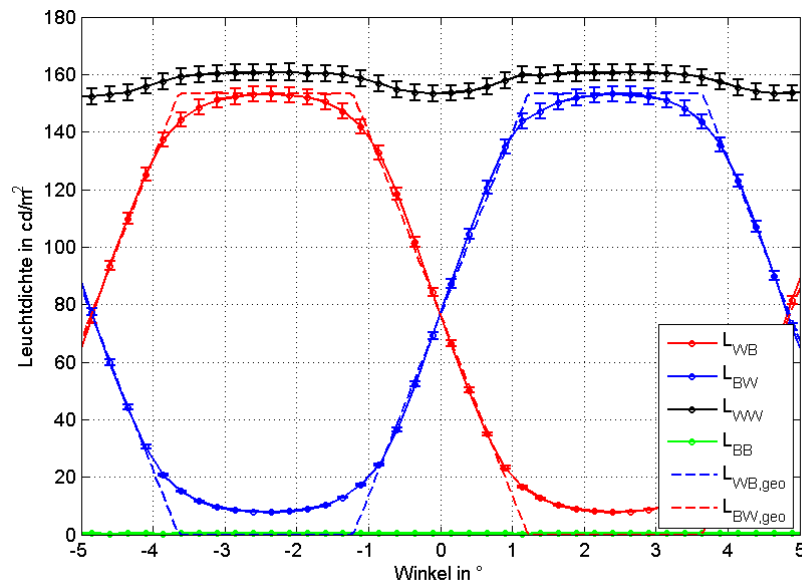


Abbildung 4.13: Abstrahlcharakteristik der Prototypischen Anzeige 1

te über ein kalibriertes Leuchtdichtenormal³ überprüft.

Die erweiterte relative Messunsicherheit der Leuchtdichte wurde mit $100 \pm 3,5\%$ bestimmt.

Messung der Abstrahlcharakteristik mit dem Konoskop-Aufbau an mehreren Messpunkten

Zur Bestimmung der Lage der monokularen Stereozonen wurde die Abstrahlcharakteristik an drei Punkten auf der Anzeige mit dem Konoskopaufbau gemessen.

Bei dem in dieser Arbeit eingesetztem Konoskop handelt es sich um die Leuchtdichtekamera *LMK 98-4 color* der Firma *Techno Team*. Diese besteht aus einer Kamera mit CCD-Chip und einem hyperzentrischen Objektiv. Die Anzeige befindet sich hierbei im Brennpunkt des Objektivs, welcher ungefähr 2 mm vor Objektivende liegt. Der unter verschiedenen Winkeln von einem Messspot mit einem Durchmesser von ungefähr 1 mm abgestrahlte Lichtstrom wird von dem hyperzentrischen Objektiv auf einen CCD Sensor abgebildet.

Der CCD-Sensor wandelt die radiometrische Größe der Bestrahlungsstärke in einen Photostrom um, welcher durch einen AD-Wandler in ein digitales Bild transformiert wird. Es entsteht eine zweidimensionale Intensitätsverteilung der Abstrahlung in

³LN3 S/N:03B202; Externes Kalibrierzeichen 40059 PTB 12

verschiedene Winkel. Da die Optik und die Sensorgröße bekannt ist, kann auf die Strahldichte der zu vermessenden Anzeige geschlossen werden. Die photometrische Entsprechung der Strahldichte ist die Leuchtdichte, welche die physiologische Wahrnehmung des Helligkeitseindrucks beschreibt. Um die spektrale Empfindlichkeitskurve des menschlichen Auges $V(\lambda)$ nachzubilden wird ein speziell angepasster Filter in der Kamera eingesetzt, welcher aus einer normalen CCD-Kamera eine Leuchtdichtekamera macht. Die wichtigsten Parameter sind in Tabelle 4.3 dargestellt.

In Abbildung 4.14 ist das Resultat einer Konoskopmessung an der Prototypischen

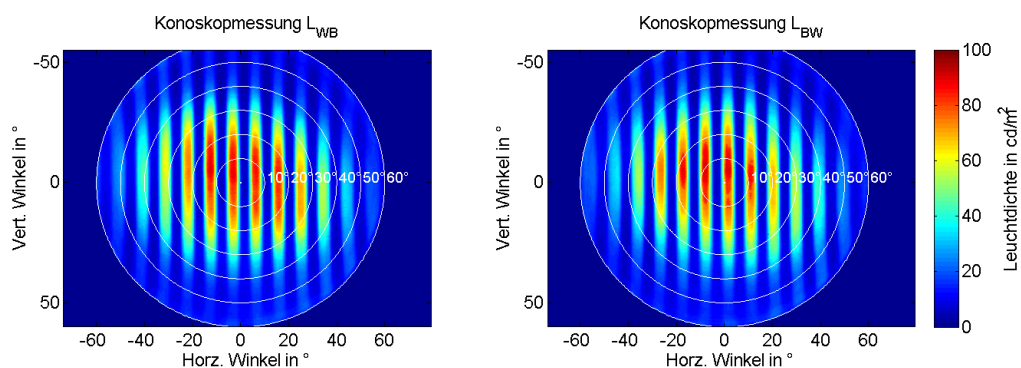


Abbildung 4.14: Konoskopmessung der Abstrahlcharakteristik der Prototypischen Anzeige bei Darstellung von WB (links) und BW (rechts)

Anzeige 1 mit Streifenbarriere dargestellt. Links für den Fall der Anzeige von WB und rechts bei Anzeige von BW.

Da nur der horizontale Verlauf der Leuchtdichte von Interesse ist, kann eine gleiche Darstellung wie bei der Goniometermessung (vgl. Abb. 4.13) erreicht werden, wenn bei der Konoskopmessung ein horizontaler Schnitt beim vertikalen Winkel null gelegt wird.

Messgenauigkeit Konoskop

Die Leuchtdichtekamera LMK-98 color wird zusammen mit dem Konoskopobjektiv in regelmäßige Abständen vom Hersteller kalibriert. Die Kalibrierung erfolgt nach DIN5032-6 unter Verwendung eines Leuchtdichtenormales⁴, welches wiederum von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt auf ein nationales Normal zurückge-

⁴Luminance Calibration Source LRS-455-5, Fa. Optronix Lab. S/N:99101028

Kamera:	LMK 98-4 Color
Sensor:	CCD Sony ICX 285 AL
Auflösung:	1390(H) x 1040 (V) px
Filter:	$V(\lambda)$; f'_1 typisch $< 3.5\%$
Leuchtdichtebereich:	0,6 – 1800 cd/m ²
Objektiv:	TTC-28
Öffnungswinkel:	$\pm 60^\circ$
Objektfelddurchmesser:	≈ 1 mm
Arbeitsabstand:	≈ 2 mm
rad. Winkelauflösung	$\approx 0,1$ °/px

Tabelle 4.3: Parameter des Konoskop-Messaufbaus

führt wurde⁵.

Die Erweiterte Messunsicherheit des verwendeten Aufbaus wird von der *Fa. Techno-Team* mit $100 \pm 4,7\%$ angegeben. Diese setzt sich zusammen aus Messunsicherheiten des Leuchtdichtemessers und des Kalibrierverfahrens. Der Wert besagt, dass in 95% der Fälle der wahre Messwert in einer Umgebung von $\pm 4,7\%$ um diesen liegt.

Streulichtkompensation bei Konoskopmessungen

Das eingesetzte Konoskop besitzt auf Grund seiner Bauweise ein erhöhtes Auftreten von Streulicht. Bei Flächenaufnahmen fällt dadurch die Messgenauigkeit, was bereits im in der erhöhten Messunsicherheit im Vergleich zu dem Goniometeraufbau berücksichtigt wird. Bei Strukturen, die zu starken Leuchtdichtegradienten führen, wie sie Parallaxebarrieren darstellen, führt ein erhöhter Streulichtanteil jedoch zusätzlich zu einer Verfälschung der Kontraste und der Crosstalks, da hierbei die Differenz zwischen dem Maximum und dem Minimum des Kurvenverlaufs gemessen wird und auf Grund der Streuung nun mehr Lichtanteile in alle Winkelbereiche verteilt werden.

⁵Kalibrierzeichen 4391 PTB 02/April 2008

Durch Vergleich mit einer goniometrischen Referenzmessung lässt sich der Effekt jedoch zu großen Teilen kompensieren. Die angewandte Kompensation stellt eine sehr einfache Form dar, ohne auf die Art der Streuung näher einzugehen. Hierzu wird der minimal gemessene Crosstalk am Winkel φ_{min} der linken oder rechten Ansicht der Goniometermessung mit der Konoskopmessung verglichen und ein Korrekturfaktor bestimmt. Mit diesem kann der Streulichtanteil bestimmt werden und von der Verteilung abgezogen werden.

$$K_{streu} = \frac{XT_{L/R,gonio}(\varphi_{min}) - XT_{L/R,kono}(\varphi_{min})}{XT_{L/R,gonio}(\varphi_{min}) - 1}$$

$$L_{WB,corr}(\varphi) = L_{WB}(\varphi) - K_{streu} \cdot \max(L_{WB}(\varphi))$$

$$L_{BW,corr}(\varphi) = L_{BW}(\varphi) - K_{streu} \cdot \max(L_{BW}(\varphi))$$
(4.14)

Der Vergleich mit der goniometrischen Messung bestätigt die Kompensationsmethode. Diese wird bei allen in dieser Arbeit gezeigten Konoskopmessungen angewendet.

4.4.4 Auswertung der statischen Anzeigeeigenschaften

Aus den gemessenen Abstrahlcharakteristiken an verschiedenen Orten der Anzeige können die folgenden charakteristischen Eigenschaften der Anzeige bestimmt werden:

- Verlauf der Abstrahlcharakteristik
- Qualität der stereoskopischen Darstellung
- Lage der Stereozone im Raum vor der Anzeige

Es werden zunächst die charakteristischen Eigenschaften im idealen Betrachtungsabstand ausgewertet, da, wie gezeigt, die optische Zielfunktion mindestens in diesem Betrachtungsabstand erfüllt sein muss.

Für die Auswertungen im idealen Betrachtungsabstand wird die Einzelmessung am goniometrischen Messaufbau verwendet.

Abstrahlcharakteristik

In Abbildung 4.13 ist die mit dem Goniometer gemessene Abstrahlcharakteristik der Prototypischen Anzeige 1 dargestellt.

Zusätzlich wurde die geometrisch optisch zu erwartende Abstrahlcharakteristik normiert auf die maximale Leuchtdichte der Gemessenen eingezeichnet.

Ein Betrachter mit mittlerem Augenabstand, der sich zentral vor der Anzeige befindet, würde mit seinen Augen die Leuchtdichte bei ± 31 mm wahrnehmen.

Im Vergleich des geometrisch-optisch vorhergesagten Kurvenverlaufs mit der Messung ist zu erkennen, dass der Kurvenverlauf in den Flanken gut übereinstimmt. Abweichung treten jedoch an den Plateaus auf. Hier weicht die Helligkeitsverteilung von der geometrisch optisch vorhergesagten ab, indem die Leuchtdichte weicher in die Flanke übergeht und dadurch früher zu steigen bzw. zu fallen beginnt. Der geometrisch optische Kurvenverlauf stellt somit wie erwartet eine Näherung des realen Verlaufs dar.

Ein weiterer deutlicher Unterschied ist, dass in der geometrisch optischen Simulation zum einen von einem idealen Schwarzwert von 0 cd/m^2 ausgegangen wird und zum anderen kein Übersprechen außerhalb der Flanken auftritt.

Die Messung zeigt, dass der Schwarzwert bei Anzeige von BB (grüne Kurve) $0,5 \text{ cd/m}^2$ beträgt und der minimale Wert der Kurven L_{WB} und L_{BW} bei $\approx 8 \text{ cd/m}^2$ liegt. Es ist ein deutliches Übersprechen festzustellen, welches die minimalen Werte der Verteilungen L_{WB} und L_{BW} deutlich anhebt.

In Schwarz ist die abgestrahlte Leuchtdichte bei Darstellung von vollflächig Weiß auf beiden Ansichten abgebildet. Es fällt auf, dass die abgestrahlte Leuchtdichte über den Winkel nicht konstant ist, sondern leicht variiert. Ein Betrachter würde bei lateraler Bewegung wandernde Streifen auf der Anzeige wahrnehmen. Mit 7 cd/m^2 bei einer Gesamthelligkeit von 160 cd/m^2 ist die Variation jedoch sehr schwach ausgeprägt.

Crosstalk

Der Crosstalk wurde bereits in den Grundlagen als eine der wichtigsten Messgrößen einer stereoskopischen Anzeige vorgestellt. Mit ihm wird der Anteil des Übersprechens der ungewollten Ansicht in Bereiche der gewollten Ansicht quantifiziert.

In Abbildung 4.15 ist der Crosstalk der linken XT_L und der rechten Ansicht XT_R dargestellt, der aus der zuvor ermittelten Abstrahlcharakteristik mit Gleichung (2.1) berechnet wird. Der Winkelbereich wurde trigonometrisch auf den Ort im idealen

Betrachtungsabstand 730 mm umgerechnet. Der minimal gemessene Crosstalk liegt

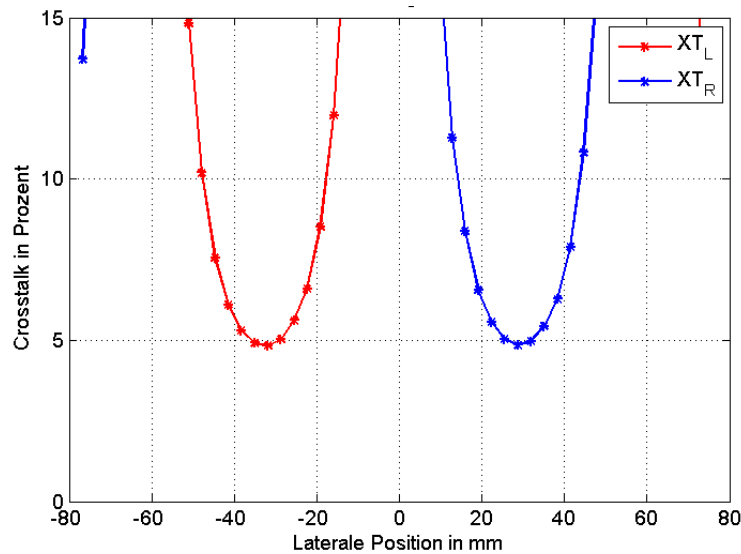


Abbildung 4.15: Gemessener, horizontaler Crosstalkverlauf im idealen Betrachtungsabstand der Prototypischen Anzeige 1; In rot ist der Crosstalk der linken Ansicht (XT_L) und in blau der Crosstalk der rechten Ansicht (XT_R) dargestellt.

bei ungefähr 4,8 % und somit über dem ursprünglich gesetzten Zielwert von 3,5 % und steigt zudem schnell an. Bewegt sich ein Betrachter $\pm 12\text{mm}$ aus der idealen Augposition bei $\pm 31\text{mm}$ steigt der Crosstalk auf über 10 % an. Es ist somit ein deutliches Übersprechen zu messen.

Monokularer Stereokontrast

Während der Crosstalk ein gutes Maß für die Qualität der Kanaltrennung und für die Abschätzung sichtbarer Störungen darstellt, ist daraus jedoch keine Aussage über die Gesamtqualität der stereoskopischen Anzeige abzuleiten. Es wird daher vom Autor die neue Größe des *Monokularen Stereokontrasts* eingeführt. Dieser ist definiert als:

$$C_L(\phi) = \frac{L_{WB}(\phi)}{L_{BW}(\phi)} \quad (4.15)$$

$$C_R(\phi) = \frac{L_{BW}(\phi)}{L_{WB}(\phi)}$$

Die Definition entspricht dem inversen Crosstalk ohne den Abzug des Schwarzwertes L_{BB} . Er setzt die maximale Leuchtdichte der ungestörten Ansicht ins Verhältnis zur maximal übersprechenden Leuchtdichte der ungewollten Ansicht. Die Definition

erfolgt erneut für die Ansicht des linken und rechten Auges, worauf sich auch die Wortwahl „monokular“ bezieht.

Während der Crosstalk durch Anhebung des Schwarzwertes um den Preis eines schlechteren Kontrasts der Anzeige vermeintlich verbessert werden kann, verschlechtert sich der monokulare Stereokontrast bei Schwarzwertanhebung.

Umgekehrt kann bei niedrigen Stereokontrasten keine Aussage getroffen werden, ob diese auf Grund von hohem Crosstalk oder einem schlechtem Schwarzwert der Anzeige stammen. In Kombination ermöglichen der monokulare Stereokontrast und der Crosstalk je-

Werte Stereokontrast	
Min. Stereokontrast	10:1
Idealer Stereokontrast	<25:1

doch eine eindeutige Aussage über die Qualität einer stereoskopischen Anzeige. Angewendet auf die Prototypische Anzeige 1 ergibt sich der monokulare Stereokontrast in der Ebene des idealen Betrachtungsabstand wie in Abbildung 4.16 dargestellt. Es wurden die mit dem Goniometer gemessenen Helligkeitsverläufe verwendet. Der Winkelbereich wurde erneut auf eine laterale Position umgerechnet. Im Verlauf der

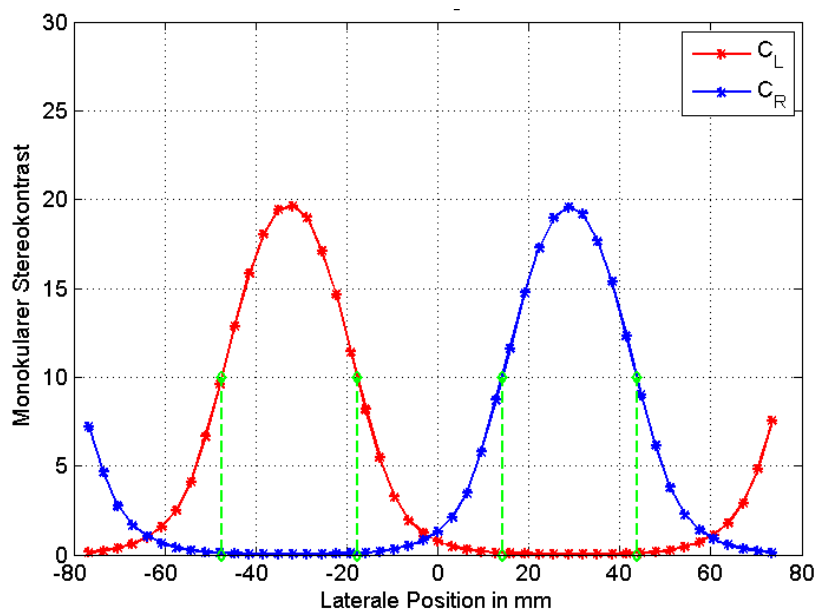


Abbildung 4.16: Im idealen Betrachtungsabstand gemessener Monokularer Stereokontrast der Prototypischen Anzeige 1

Arbeit hat sich eine Wert von **10:1** für den minimalen Stereokontrast als praktika-

bler Wert für eine gute stereoskopische Darstellung typischer Inhalte herausgestellt. Unter diesem Wert ist die Wahrscheinlichkeit sehr hoch, dass ein Betrachter Störungen wahrnimmt. Angestrebt werden Stereokontraste von größer als 25:1 um eine sehr gute stereoskopische Qualität zu gewährleisten. In den weiteren Untersuchungen wird der minimale Wert von 10:1 als Schwellwert des nutzbaren stereoskopischen Bereichs angenommen.

Die Messung der Prototypischen Anzeige 1 zeigt, dass der monokulare Stereokontrast im Maximum nur einen Wert von 20:1 annimmt. In Kombination mit dem gemessenen Crosstalk von 5% ist festzustellen, dass die stereoskopische Qualität in erster Linie durch ein erhöhtes Übersprechen negativ beeinflusst wird.

In Abbildung 4.16 sind die Grenzen, ab denen der Stereokontrast über 10:1 liegt, mit grünen Balken markiert. Es ergeben sich für das linke und rechte Auge Zonen mit einer Breite von 29,5 mm, in denen sich ein Betrachter im idealen Betrachtungsabstand lateral bewegen kann und jeweils mit dem linken und rechten Auge einen Stereokontrast über dem Schwellwert wahrnimmt. Dies stellt den nutzbaren Bewegungsbereich dar. Bevor der Betrachter bei einer lateralen Bewegung den Bereich verlässt, muss die Anzeige adaptieren.

Mit ungefähr 30 mm ist er deutlich kleiner, als der in der optischen Zielfunktion geforderte Bereich von 47 mm.

Dieser Bereich entspricht der Breite der gemessenen *monokularen Stereozone*.

Helligkeitsverlauf innerhalb des Bereichs der optischen Zielfunktion

Neben der stereoskopischen Qualität ist der wahrgenommene Helligkeitsverlauf innerhalb des Bereichs der optischen Zielfunktion ein wichtiger Parameter. Im Abschnitt 2.4.2 wurde für den Bereich, in dem die Bedingungen der optischen Zielfunktion erfüllt sein müssen, eine Breite von jeweils $\pm 23,5 = 47$ mm für das linke und rechte Auge angegeben. Innerhalb dieses Bereiches kann sich ein Betrachter bewegen, bevor eine Anzeige adaptiert, weshalb innerhalb diesen eine hohe Stereoqualität und kein Auftreten von Helligkeitsschwankungen sichergestellt werden muss. Im Idealfall sollte der Betrachter zu jeder Zeit eine konstante Leuchtdichte wahrnehmen.

In Abbildung 4.17 sind die normierten Leuchtdichteverläufe L_{WB} und L_{BW} im idealen Betrachtungsabstand dargestellt.

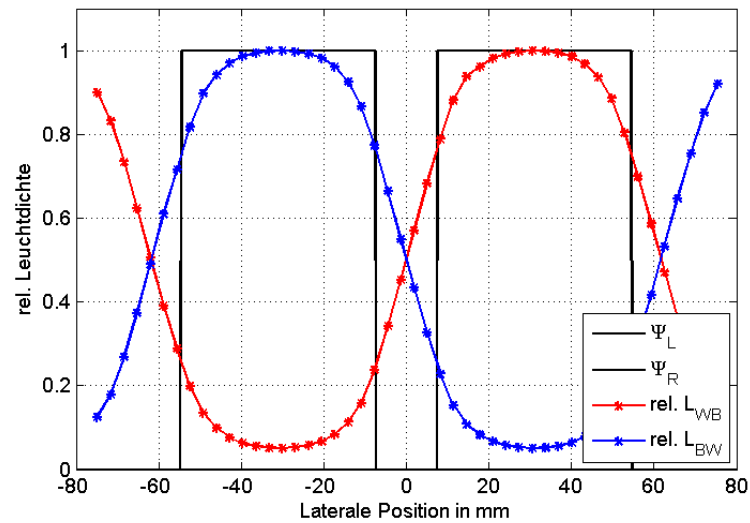


Abbildung 4.17: Helligkeitsverlauf L_{WB} (rot) und L_{BW} (blau) innerhalb des Bereichs der optischen Zielfunktion (schwarz), gemessen im idealen Betrachtungsabstand

Die schwarz umrandeten Bereiche markieren die linke und rechte Bereiche der optischen Zielfunktion.

Es zeigt sich, dass die Leuchtdichten innerhalb der Stereozonen kontinuierlich zu deren Rand um $\approx 23\%$ abfallen.

Das menschliche Auge besitzt die Fähigkeit auf unterschiedliche Lichtsituationen zu adaptieren und somit einen Dynamikbereich von der Dämmerung

bis zu großen Helligkeiten bei Tag abzudecken. Das *Webersche Gesetz* [72] beschreibt den Effekt, dass es sich bei der Wahrnehmung von Helligkeitsunterschieden um eine differentielle Wahrnehmbarkeitsschwelle handelt. Es gibt somit keinen absoluten Wert, ab welchem ein Helligkeitsunterschied erkannt werden kann, sondern einen prozentualen Wert abhängig von einem dominanten Ausgangsreiz. Bei der visuellen Wahrnehmung liegt dieser Wert bei 1-2%. Ab diesem Wert werden zwei Reize, die entweder räumlich nebeneinander oder zeitlich kurz hintereinander dargestellt werden, als Unterschied wahrgenommen.

Bei dem Helligkeitsverlauf innerhalb des Bereichs der optischen Zielfunktion nimmt ein Betrachter bei einer lateralen Bewegung jedoch eine kontinuierliche Abnahme der

Helligkeitsschwankungen	
Max.	5%
Helligkeitsabfall	

Helligkeit wahr. Das Webersche Gesetz kann daher nicht direkt angewendet werden. In der Literatur findet sich ein Schwellwert von 5% [64], ab denen eine kontinuierliche Helligkeitsabnahme vom Betrachter wahrnehmbar wird. Im folgenden Abschnitt der dynamischen Anzeigeeigenschaften wird zudem das Verhalten bei lateraler Adaption untersucht. Es wird gezeigt, dass ein flacher Verlauf in einer Umgebung um die Maxima der Leuchtdichteverteilungen L_{WB} und L_{BW} notwendige Voraussetzung für eine störungsfreie Adaption ist. Auch vor diesem Hintergrund stellt der Helligkeitsabfall innerhalb der Stereozone ein kritischen Parameter dar. Der Wert von 5% wird daher in dieser Arbeit als maximal zulässiger Helligkeitsabfall definiert, sodass festzustellen gilt, dass die Prototypische Anzeige 1 hierbei deutlich über dem Schwellwert liegt.

Monokulare Stereozone im Raum

Bisher wurden nur charakteristische Eigenschaften im idealen Betrachtungsabstand ausgewertet und hierzu die Einzelmessung des goniometrischen Aufbaus verwendet. Im Folgenden wird die Auswertung für den gesamten Betrachtungsabstandsbereich erweitert. Hierfür wird die Konoskopmessung an den drei Messpunkten auf der Anzeige verwendet, da es nur auf Grund der Konvergenz der abgestrahlten Helligkeitsverteilungen aller Barriereöffnungen im idealen Betrachtungsabstand möglich ist, die Auswertung an einer Einzelmessung durchzuführen.

Es wurde bereits gezeigt, dass ASDs monokulare Stereozonen im Raum ausbilden, in denen sich der Betrachter frei bewegen kann und ein ungestörtes Halbbild wahrnimmt. In der einfachen geometrischen Darstellung ergaben sich klar begrenzte, rauteförmige Bereiche. In der Praxis können die Bereiche durch Beugung und Crosstalk in ihrer Form von der Raute abweichen.

Das im Folgenden vorgestellte Vorgehen zur Bestimmung der monokularen Stereozonen orientiert sich an der Arbeit von Boher et al. [73], als Messgröße wird jedoch die vom Autor dieser Arbeit eingeführte Messgröße des monokularen Stereokontrasts verwendet.

Zur Bestimmung der *monokularen Stereozone* wird der Stereokontrast durch Messung der Abstrahlcharakteristik an drei Punkten, am linken und rechten Rand und zentral, jeweils mittig auf der Anzeige bestimmt. An jedem der Messpunkte wird

der monokulare Stereokontrast für die linke und die rechte Ansicht über dem Winkel anhand der Gleichung (4.15) berechnet.

Zur Bestimmung der monokularen Stereokontrastverteilung im Raum vor der Anzeige wird der zu untersuchende Betrachtungsbereich vor der Anzeige diskretisiert. Es wird ein erweiterter Betrachtungsabstandsbereich (z-Achse) gewählt, welcher 600 – 1000 mm beträgt; der laterale Bewegungsbereich (y-Achse) wird, wenn nicht anders angegeben mit ± 100 mm symmetrisch um die Displaymitte angenommen. Die Diskretisierungsaufösung wird lateral mit 0.5 mm und longitudinal mit 1 mm gewählt. Der Raum wird somit in 400 x 400 Punkte unterteilt.

Von jedem dieser Raumpunkte wird der Winkel $\varphi_i(y, z)$ zu den drei Messpunkten (bezeichnet mit Index i) bestimmt. Der Winkel wird in die gemessene Stereokontrastverteilung der linken und der rechten Ansicht 4.16 des jeweiligen Messpunktes eingesetzt.

$$C_L^i(y, z) = \frac{L_{WB}^i(\varphi_i(y, z))}{L_{BW}^i(\varphi_i(y, z))}$$

$$C_R^i(y, z) = \frac{L_{BW}^i(\varphi_i(y, z))}{L_{WB}^i(\varphi_i(y, z))}$$
(4.16)

Es ergibt sich ein skalarer Wert für den monokularen Stereokontrast, den ein Betrachter an diesem Raumpunkt bei Blick auf den Messpunkt wahrnehmen würde. Für jeden Raumpunkt ergeben sich drei (N=3) monokulare Stereokontraste. Der geringste wahrgenommene Stereokontrast definiert den monokularen Stereokontrast am Raumpunkt (y,z).

$$C_L(y, z) = \min [C_L^1(y, z), \dots, C_L^N(y, z)]$$

$$C_R(y, z) = \min [C_R^1(y, z), \dots, C_R^N(y, z)]$$
(4.17)

Angewendet auf die Prototypische Anzeige 1 ergeben sich die in in Abbildung 4.18 dargestellten monokularen Stereozonen für die linke und die rechte Ansicht im Raum vor der Anzeige. Es ist zu erkennen, dass sich rautenförmige Stereozonen ergeben, deren breiteste Ausdehnungen in der Entfernung des idealen Betrachtungsabstandes liegen. Im Maximum werden Kontraste von 18:1 gemessen, die zum Rand der Stereozone kontinuierlich abnehmen. Im Vergleich mit dem Monokularen Stereokontrastverlauf im idealen Betrachtungsabstand, welcher aus der Goniometermessung

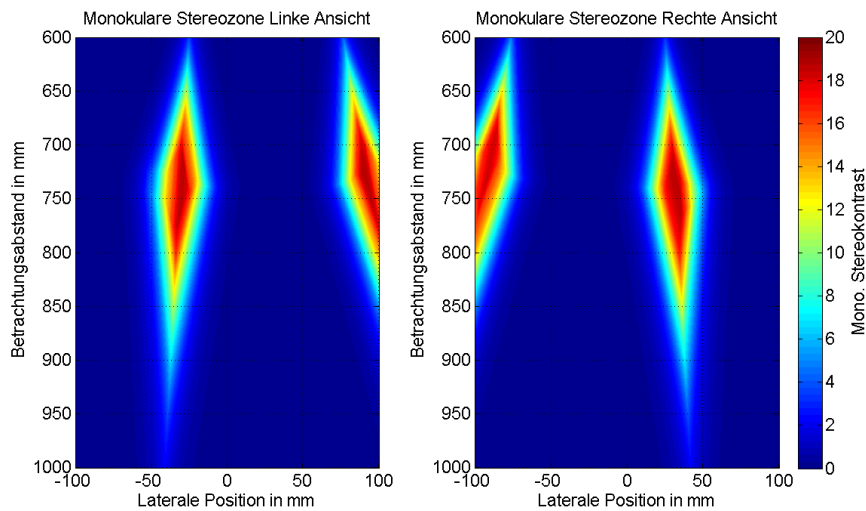


Abbildung 4.18: Monokularen Stereozonen der linken und rechten Ansicht der Prototypischen Anzeige 1

bestimmt wurde (vgl. Abb. 4.16), liegt der maximal gemessene Stereokontrast etwas niedriger. Der Grund hierfür sind Messunsicherheiten und eine allgemeine Kontrastabnahme für größere Blickwinkel, wie sie bei den Messpunkten am Rand auftreten. Wird erneut der Schwellwert von 10:1 als Grenze des Bereichs mit ausreichendem Stereokontrast gewählt, ergeben sich die in Abbildung 4.19 dargestellten Rauten der linken und rechten Ansicht, die zur Vereinfachung gemeinsam in einen Plot dargestellt werden (blau). Die monokulare Stereozone erstreckt sich über den Bereich von 650-850 mm und hat an der breitesten Stelle eine Ausdehnung von 26 mm. Die Stereozone ist somit etwas schmaler, jedoch in longitudinaler Richtung größer als die geometrisch optisch erwarteten Stereorauten (rot). Bei den gemachten Ausführungen wird immer davon ausgegangen, dass auf der gesamten Anzeigenbreite ein stereoskopisches Bild wahrgenommen werden soll. Würde der Bereich auf der Anzeige eingeschränkt, vergrößerten sich auch die monokularen Stereozonen.

Stereoskopischer Betrachtungsbereich (3D-Stereozone)

Die monokularen Stereozonen definieren die Bereiche, in denen ein Betrachter mit einem Auge ein ungestörtes Bild einer Ansicht sieht. Zur Wahrnehmung eines stereoskopischen Bildes muss er sich jedoch mit beiden Augen im Bereich unterschiedlicher Ansichten befinden. Es wird daher der 3D-Stereokontrast eingeführt. Dieser ist de-

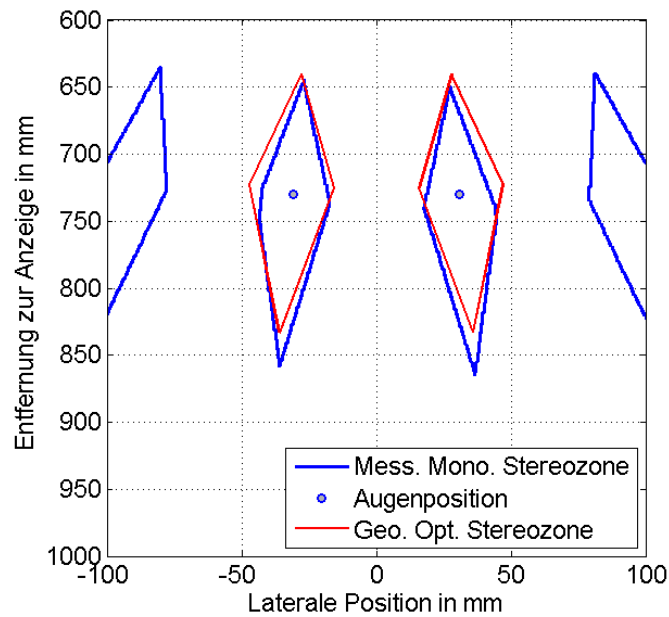


Abbildung 4.19: Monokularen Stereozonen der linken und rechten Ansicht mit Stereokontrast $> 10:1$

finiert als das Minimum der monokularen Stereokontraste der linken und rechten Ansicht aus Gl. 4.17, die von einem Betrachter mit Augenabstand d_{Auge} gleichzeitig wahrgenommen werden. Die Definition orientiert sich an Boher et al. [73], anstatt des geometrischen Mittels wird jedoch die strengere Formulierung des Minimums gewählt.

$$C_{3D, \text{stereo}}(y', z') = \min [C_L(y_L, z), C_R(y_R, z)] \quad (4.18)$$

mit

$$\begin{aligned} y_L &= y' - \frac{d_{\text{Auge}}}{2} \\ y_R &= y' + \frac{d_{\text{Auge}}}{2} \\ z' &= z \end{aligned} \quad (4.19)$$

Als Augenabstand wird in der Regel, wenn nicht anders angegeben, der mittlere Wert von 62 mm angenommen. Die Koordinaten (z, y') beziehen sich nun auf den Nasenwurzelpunkt, wodurch sich bei $y' = 0$ der Kopf zentral mittig vor der Anzeige befindet und das linke und rechte Auge sich jeweils bei $\pm 31\text{mm}$ befindet. Für Betrachter mit größer oder kleinerem Augenabstand fällt die Raute schmäler aus.

Für die Prototypische Anzeige 1 ergibt sich ein 3D-Stereokonstrastverlauf wie in Abbildung 4.20 dargestellt.

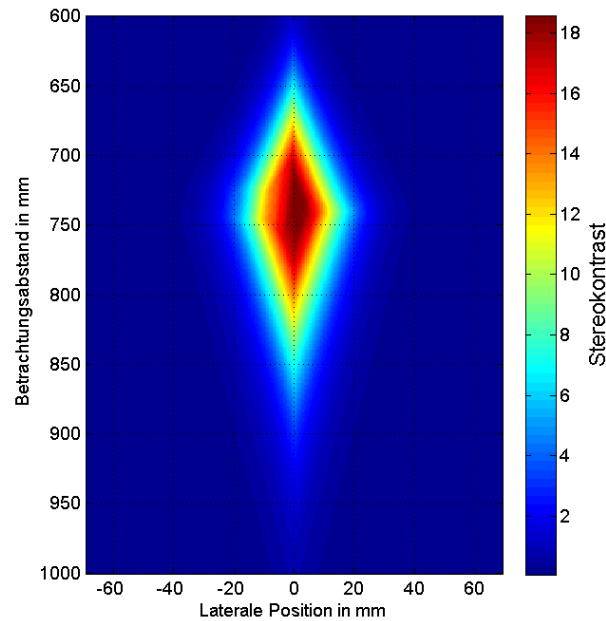


Abbildung 4.20: 3D-Stereokonstrast der Prototypischen Anzeige 1 für einen Betrachter mit Augenabstand 62 mm

Der Schwellwert des 3D-Stereokonstrasts für eine ausreichende Stereoqualität liegt identisch zum monokularen Stereokonstrast bei 10:1. Es ergibt sich die in Abbildung 4.21 dargestellte 3D-Stereozone (rot). Innerhalb der 3D-Stereozone kann sich ein Betrachter frei bewegen und sieht zu jederzeit ein stereoskopisches Bild. Die 3D-Stereozone mit Stereokonstrast größer 10:1 erstreckt sich für einen Betrachter mit Augenabstand 62 mm über den Bereich von 667-826 mm und hat an der breitesten Stelle im Betrachtungsabstand ≈ 740 mm eine Ausdehnung von 25,5 mm. Die 3D-Stereozone ist somit in ihrer longitudinalen Ausdehnung leicht kleiner, als die monokularen Stereozone.

Auf Grund der Periodizität der monokularen Stereozone kann es bei statischen Barrieremasken vorkommen, dass ein Betrachter sich mit seinen Augen in monokularen Stereozone der komplementären Ansicht befindet und dadurch eine pseudoskopisches (tiefeninvertiertes) Bild wahrnimmt.

Ist eine monokulare Stereozone in ihrer lateralen Ausdehnung ausreichend groß, besteht zudem die Möglichkeit, dass sich beide Augen zugleich in einer Zone der glei-

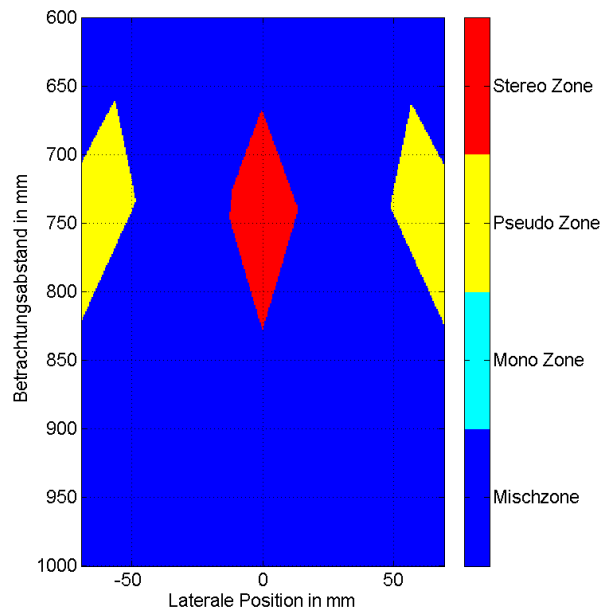


Abbildung 4.21: 3D-Stereo- und Pseudostereozone der Prototypischen Anzeige 1

chen Ansicht befinden. Das wahrgenommene Bild entspricht der monoskopischen linken oder rechten Ansicht. Die Lage dieser Zonen kann mathematisch analog zu der Stereozone bestimmt werden. Die Definition der Stereozone wurde daher vom Autor auf pseudoskopische und monoskopische Bereiche erweitert.

$$\begin{aligned}
 C_{3D,pseudo}(y', z') &= \min [C_R(y_L, z), C_L(y_R, z)] \\
 C_{3D,monoL}(y', z') &= \min [C_L(y_L, z), C_L(y_R, z)] \\
 C_{3D,monoR}(y', z') &= \min [C_R(y_L, z), C_R(y_R, z)]
 \end{aligned} \tag{4.20}$$

In Abbildung 4.21 sind die auftretenden Zonen für die Prototypische Anzeige 1 dargestellt, dessen (Pseudo-, Mono-) Stereokonstrast über 10:1 liegt. Neben der 3D-Stereozone treten nur Pseudoskopische Zonen auf (gelb). Monokulare Zonen sind nicht vorhanden, da die laterale Ausdehnung der monokularen Stereozone zu gering ist. Die Darstellung gibt einen guten Einblick, was bei Anzeigen mit statischen Barriermasken beim Verlassen der Stereozone passieren würde. Bei der hier dargestellten Anzeige würde bei einer lateralen Bewegung aus der Stereozone ein Übergang in einen Mischbereich folgen, in dem beide Ansichten gleichzeitig von jeweils beiden Augen wahrgenommen würden. Nach ungefähr 35 mm folgt ein pseudoskopischer Bereich, in dem der Betrachter ein klar getrenntes Bild mit geringen Übersprechen wahrnehmen würde, dass jedoch tiefeninvertiert ist.

Diese Art der Darstellung ist für Konzepte wie das vorgestellte „Mono-Stereo-Mono“ sehr wichtig, spielt für dynamische Barrieremasken jedoch eine geringere Rolle, da hierbei die Stereozone kontinuierlich mit verschoben wird.

4.4.5 Messung und Auswertung der dynamischen Anzeigeeigenschaften

Die Untersuchung der dynamischen Anzeigeeigenschaften hat das Ziel, die Qualität und mögliche Störungen bei der lateralen Adaption auf die Betrachterposition zu erfassen. Dies ist die Grundlage der quantitativen Bewertung des umgesetzten Ansatzes der dynamischen Barrieremasken. Bisher finden sich in der Literatur keine beschriebenen Verfahren, wie die dynamischen Eigenschaften einer Barrieremaske gemessen werden kann.

Die Herausforderung bei der Bestimmung der dynamischen Eigenschaften ist die erhöhte Komplexität des Gesamtsystems. Während bei den statischen Eigenschaften nur eine Messung an der Anzeige mit statischer Barriere durchgeführt werden kann, muss im dynamischen Fall das gesamte System aus HeadTracking-System, Bildverarbeitung, Ansteuerung und dynamischer Barriere betrachtet werden.

Ein Betrachter kann sich hierbei mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten vor der Anzeige bewegen, welche aus prinzipiellen und technischen Gründen nur mit einer Latenz und in diskreten Schritten auf diese Bewegung adaptieren kann. Dies wurde bereits in der Auslegung der optischen Zielfunktion versucht zu berücksichtigen und gilt es nun zu überprüfen. Allgemein gilt, je schneller ein System mit hoher Genauigkeit auf eine Änderung reagieren kann, desto geringer sind die Anforderungen an die Größe der monokularen Stereozone, da sich der Betrachter nur wenige Millimeter bewegen kann bevor die Anzeige adaptiert. Umgekehrt gilt, je geringer der Bewegungsbereich ist, in dem sich ein Betrachter bewegen kann, ohne Störungen zu sehen, desto schneller muss ein System auf Änderungen adaptieren können.

Gemessen wurde die Latenz des Gesamtsystems und die wahrgenommene Qualität während der Bewegung. Als Bewertungsgrößen werden der wahrgenommene Stereokontrast und Helligkeitsvariationen während der Bewegung angesetzt.

Messung der Latenz des Gesamtsystems

Die Latenz des Gesamtsystems stellt eine der wichtigsten Größen in dem dynamischen System dar. Der Hersteller *Seeing Machines* gibt für seine Software ohne die Bilderfassung eine maximale Verarbeitungszeit eines Kameraframes mit 11 ms an, die jedoch bei Einsatz eines rechenstarken Computers, wie es in dieser Arbeit der Fall war, geringer ausfallen kann. Die HTS-Kamera wird mit 60 Hz betrieben, woraus sich eine Periodendauer von 16 ms ergibt. Die Barriere wird mit 100 Hz angesteuert, was einer Periode von 10 ms entspricht. Die zu erwartende Latenz liegt somit mindestens bei 37 ms.

Die Messung der Latenz erfolgt über einen selbstentwickelten bildverarbeiterischen Ansatz, bei dem ein sogenanntes Target von einem Roboter im Betrachtungsabstand vor der Anzeige bewegt wird und die Barriere auf dieses Target adaptiert. Wenn auf der Anzeige auf einer Ansicht weiß und auf der anderen Ansicht schwarz (WB) angezeigt wird, entsteht auf dem Target in horizontaler Richtung der charakteristische Helligkeitsverlauf, wie er zuvor in den statischen Eigenschaften gemessen wurde. Dieser Verlauf folgt der Bewegung des Target mit der zu messenden Latenz. Durch eine periodische links-rechts Bewegung des Targets kann am Wendepunkt der Bewegung die Latenz gemessen werden.

In Abbildung 4.22 ist der Messaufbau dargestellt.

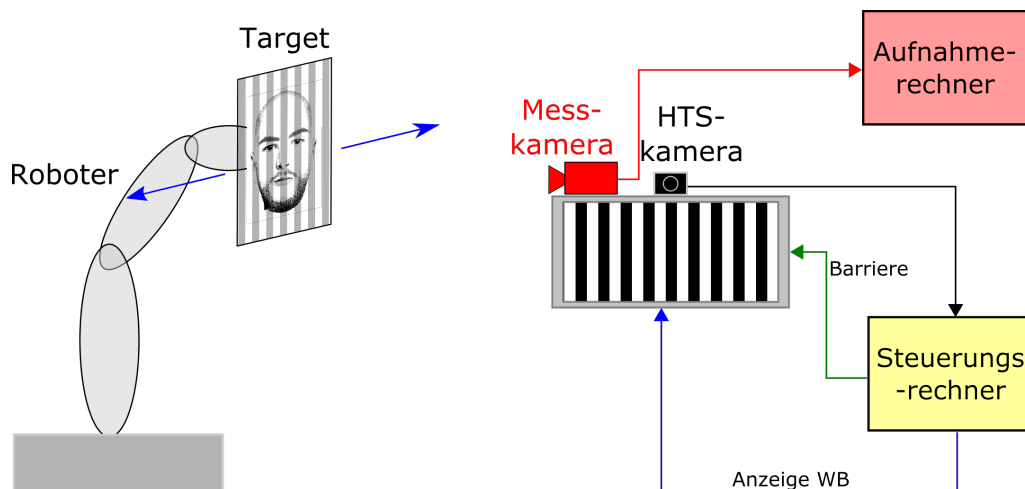


Abbildung 4.22: Aufbau zur Messung der Latenzzeit des Gesamtsystems

Als Roboter wird ein UR-10 der Firma *Universal Robots* verwendet. Der Roboter besitzt eine Kollisionsdetektion, die es ermöglicht, diesen ohne einen sonst notwendigen Käfig in einer Laborumgebung einzusetzen. Durch Vorgabe von Wegpunkten können Strecken definiert werden, die der Roboter in vorgegebenen Geschwindigkeiten linear abfahren kann. Zur Messung der Latenz wird der Roboter in einem Abstand von ungefähr 750 mm (der genaue Wert ist nicht relevant) vor der Anzeige platziert.

Auf dem Roboterarm wird das sogenannte „Target“ montiert, welches ein stilisiertes Schwarz-Bildes eines menschlichen Kopfes mit Augenabstand 62 mm zeigt (vgl. Abb. 4.23). Dieses Target wird vom Headtrackingsystem erkannt, das auf der Anzeige montiert ist.

Der Roboter wird anschließend so programmiert, dass er lateral vor der Anzeige um ungefähr $\pm 150\text{mm}$ mit einer Geschwindigkeit von 50mm/s linear verfährt (die genaue Geschwindigkeit ist hierbei nicht relevant). An der Wendestelle wird der Roboter bis zum Stillstand abgebremst und die Bewegungsrichtung invertiert. Dies geschieht mit einer Beschleunigung von 1200mm/s^2 , wodurch annähernd die gesamte Strecke die Zielgeschwindigkeit gilt.

Auf der Anzeige wird das Bild WB angezeigt. Auf dem Target entsteht daher eine Helligkeitsverteilung wie in Abbildung 4.23 dargestellt, bei der ein Auge Schwarz und das andere Weiß wahrnehmen würde. Die Bewegung des Targets und der darauf projizierten Helligkeitsverteilung wird nun durch eine Messkamera gefilmt, die fest an die Anzeige montiert wurde. Bei der Kamera handelt es sich um die GigE-Kamera acA2000-50gm des Herstellers Basler, deren Bildausschnitt (*engl. Region of Interest [ROI]*) so gewählt wurde, dass die Kamera die Wendestelle des Targets erfasst und eine Bildwiederholfrequenz von 150 Hz erreicht.

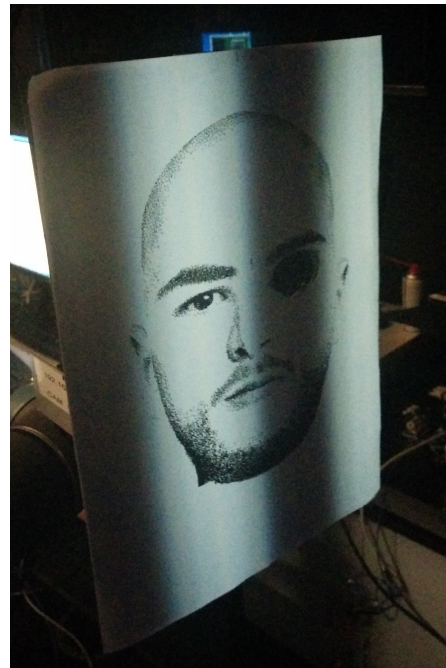


Abbildung 4.23: Target zur Latenzmessung bei Anzeige von WB

Das Target wird nun einige Male lateral verfahren. Hierbei wird es vom Headtrackingsystem erfasst und die Barriere dementsprechend adaptiert. Während des Target kontinuierlich verfährt, wird die Helligkeitsverteilung auf Grund der diskreten Barrierauflösung in Schritten nachgeführt. Auf Grund der Latenz läuft die Helligkeitsverteilung der Target immer etwas nach. An der Wendestelle ändert sich die Bewegungsrichtung. Während das Target sich bereits in die entgegenkommende Richtung bewegt, läuft die Helligkeitsverteilung auf der Anzeige noch eine zeitlang in die andere Richtung und ändert erst nach der Latenzzeit ihre Bewegungsrichtung. Die Zeit bis zum Ändern der Bewegungsrichtung kann bildverarbeitungstechnisch ausgewertet werden.

Auswertung der Latenz des Gesamtsystems

Die Messkamera filmt die Wendestelle, an der das Target die Richtung ändert. Da nur der horizontale Helligkeitsverlauf von Interesse ist und die Kamera eine hohe Framerate erreichen soll, wurde der vertikale Bildausschnitt auf wenige Pixel beschränkt. Durch Mittlung über 5 Zeilen wird aus jedem Kameraframe der horizontale Helligkeitsverlauf berechnet. Es ergibt sich ein Verlauf, wie in Abbildung 4.24 dargestellte. Das Target beginnt bei ungefähr 500px und endet bei 1800 px. Der os-

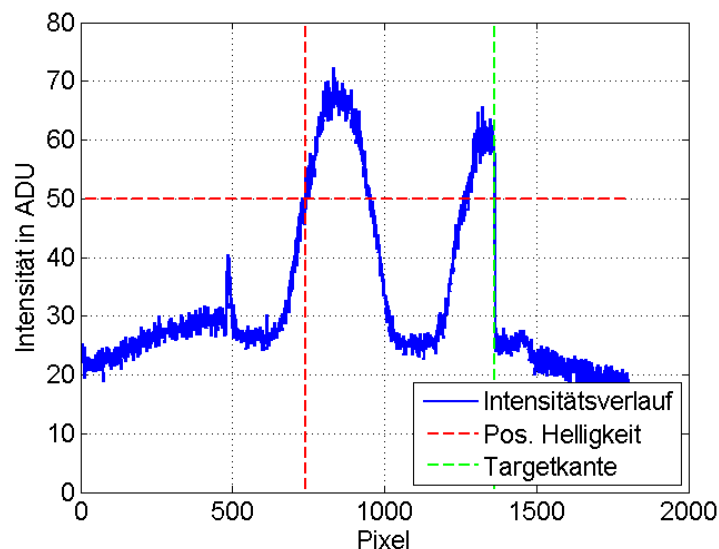


Abbildung 4.24: Horizontaler Helligkeitsverlauf aus einem Kameraframe der Messkamera; in grün ist die durch Bildverarbeitung erkannte Kante des Targets dargestellt; in rot die Position des Schwellwertes der Helligkeitsverteilung

zillierende Helligkeitsverlauf auf dem Target ist gut zu erkennen. Im Folgenden wird der Kurvenverlauf über einen fließenden Mittelwert mit 5 px Kern tiefpassgefiltert und im Anschluss über eine Kantendetektion auf Basis eines einfachen Schwellwertes die Kante des Targets bestimmt (grüne Linie). Die Kante bestimmt die Position des Targets im aufgenommenen Kamerabild. Neben der Position des Targets gilt es, die Position des Helligkeitsverlaufs auf dem Target zu bestimmen. Hierzu wurde ein Schwellwert von 50 ADUs festgelegt und die Position des Helligkeitsverlaufs auf der steigenden Flanke von links kommend bestimmt (Kreuzungspunkt der roten Linien). Die genaue Position auf dem Target ist dabei nicht relevant, da nur relative Positionsänderungen ausgewertet werden. Das Vorgehen wird auf jeden einzelnen

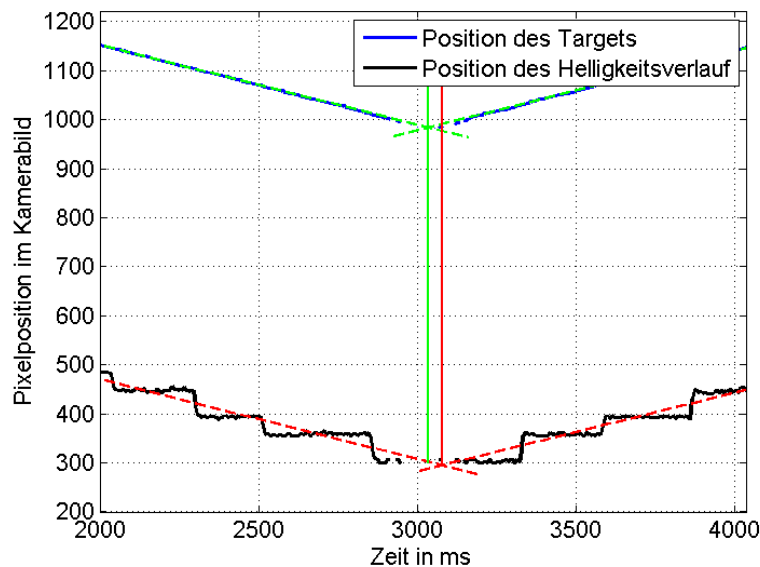


Abbildung 4.25: Latenzmessung: Verlauf der Targetposition (blau) und der Helligkeitsverteilungposition (schwarz) im Kamerabild dargestellt über die Zeit

Kameraframe angewendet. Wird die gefundene Position der Targetkante und des Helligkeitsverlaufs über die Kameraframes bzw. die Zeit aufgetragen, ergibt sich die Darstellung in Abbildung 4.25. In blau ist die Position des Targets und der Verlauf der Position des Helligkeitsverlauf in schwarz dargestellt. Auf der x-Achse ist hierbei statt der Framenummer die Zeit aufgetragen, die sich aus der Division mit der Framerate der Messkamera von 150 Hz ergibt. Auf der y-Achse ist die Position im Kamerabild in px angegeben. Von Interesse ist jedoch nur der Abstand der Verläufe in x-Richtung.

Es ist gut zu erkennen, dass das Target kontinuierlich verschoben wird, während die Barriere auf Grund der diskreten Barriereauflösung nur in Schritten auf die Positionsänderung reagiert.

An der Wendestelle ändert sich die Richtung der Bewegung des Targets und des Helligkeitsverlaufs. Die Helligkeitsverlauf ändert dabei zeitlich später die Richtung. An beide Verläufe werden an die Flanken Geraden angefügt und der Schnittpunkt dieser bestimmt. Die Differenz der x-Positionen der Schnittpunkte der Verläufe der Targetposition und der Helligkeitsverteilungsposition ergibt sich die gemessene Latenzzeit (Differenz der grünen und roten vertikalen Linien).

Für die in Abbildung 4.25 dargestellte Messung wurde eine Latenzzeit von 42,2 ms bestimmt.

Zur Bestimmung der Genauigkeit der Messmethode wurde die Messung vier Mal wiederholt und die Messergebnisse statistisch ausgewertet. Es ergibt sich eine mittlere Latenzzeit von $44,7 \pm 4,3$ ms ,wobei als Fehler die Standardabweichung angenommen wird.

Mit 44 ms ist die gemessene Latenzzeit bereits in dem Bereich, der auch bei einer späteren Umsetzung im Fahrzeug realistischerweise erreicht werden kann.

Messung des Stereokontrasts bei lateraler Adaption

Ziel der Messung ist es, zu untersuchen, wie weit der Stereokontrast bei der lateralen Adaption abfällt, bevor er nach erfolgter Barriereanpassung erneut ansteigt. Der Betrachter sollte zu keinem Zeitpunkt einen Stereokontrast geringer als 10:1 wahrnehmen.

Hierzu wurde die Konoskopmessung erweitert, indem an jedem der drei Messpunkte die Verteilungen L_{WB}, L_{BW}, L_{WW} und L_{BB} für zwei weitere Barriereeinstellungen gemessen werden, bei denen die Barriere jeweils um eine Suböffnung nach links und rechts verschoben wurde.

Auswertung des Stereokontrasts bei lateraler Adaption

In Abbildung 4.26 sind die gemessenen Helligkeitsverläufe L_{WB} und L_{BW} für den mittleren Messpunkt auf der Anzeige für jeweils drei benachbarte Barriereeinstellungen (-1,0,+1) dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, wie die Abstrahlcharakteristik beim Schalten der Barriere verschoben wird. Der Abstand der Kreuzungspunkte für

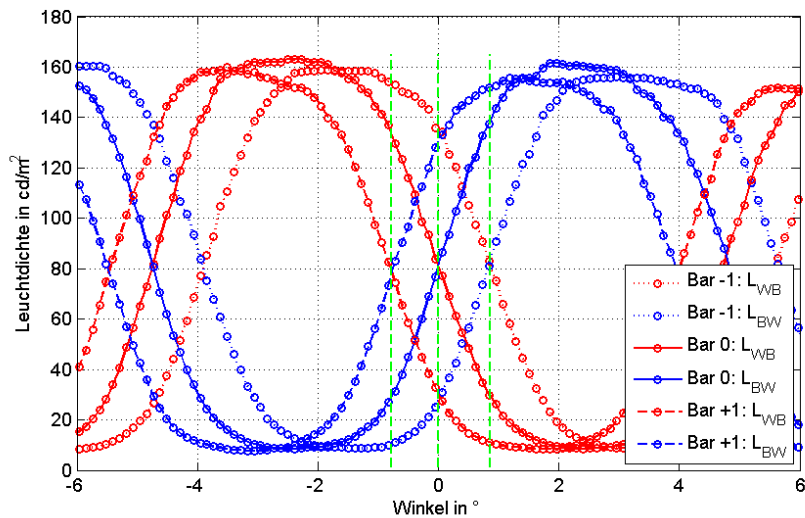


Abbildung 4.26: Gemessene Abstrahlcharakteristik für drei verschiedene Barriereinstellungen der Prototypischen Anzeige 1

die drei Barriereinstellungen der Verteilungen L_{WB} und L_{BW} (grüne Linien) ergibt dabei die Sprungweite.

Die Auswertung zeigt: wird die Barriere nach links geschaltet, wird die Verteilung um $0,772^\circ$ und beim Nachrechtsschalten um $0,843^\circ$ verschoben. Aus den Geometrieparametern ergibt sich in Kleinwinkelnäherung der erwartete Verschiebungswinkel zu Gleichung (4.21).

$$\alpha_0 = \arcsin\left(n \cdot \frac{p_{B,sub}}{d_B}\right) = 0,809^\circ \quad (4.21)$$

Erwartet wurde ein symmetrisches Schaltverhalten der Barriere, der Verschiebungswinkel sollte unabhängig von der Schaltrichtung gleich sein. Weitere Untersuchungen haben gezeigt, dass sich das unsymmetrische Schaltverhalten periodisch wiederholt, so dass bei jedem zweiten Schalten zu weit geschaltet wird. Der Grund hierfür ist vermutlich ein Herstellungsfehler, der zu einer Ungenauigkeit der Elektrodenstruktur der Barriere führt und vom Anzeigehersteller analysiert wird. Im Mittel ist die Sprungweite korrekt.

Um den während der lateralen Adaption wahrgenommenen Stereokontrast zu bestimmen werden die 3D-Stereozonen für die drei Barriereinstellungen berechnet, welche in Abbildung 4.27 dargestellt sind. Die weißen Linien stellen die Schaltpositionen dar, an denen die Barriere um eine Öffnung weiterschaltet wird, wenn sich

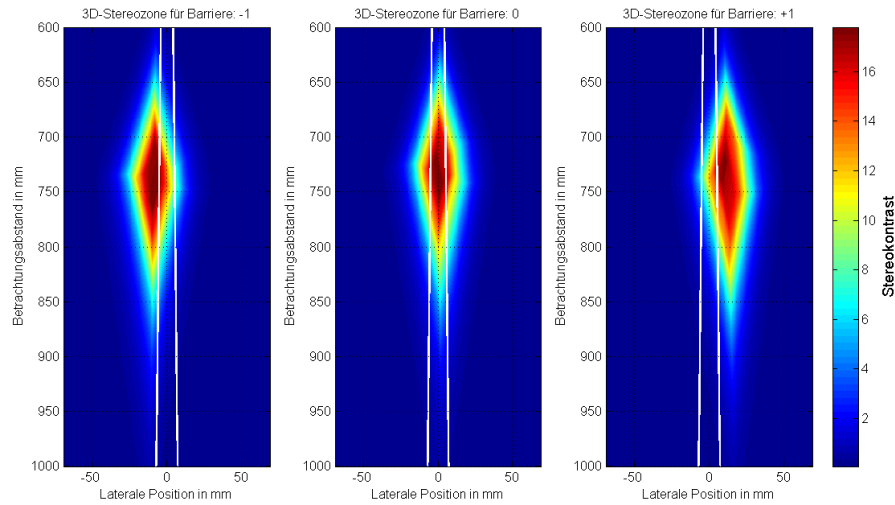


Abbildung 4.27: 3D-Stereozonen für die drei Barriereereinstellungen

ein Betrachter aus zentraler Lage lateral heraus bewegt.

Bei einer adiabatisch langsamen Positionsänderung bewegt sich der Betrachter mit einer so niedrigen Geschwindigkeit, dass Latenzen keine Rolle spielen und sich der Betrachter während des Schaltvorgangs an der Position der weißen Linien befindet. Für den adiabatischen Fall sind in Abbildung 4.28 (links) die Stereokonzentrationen über dem Betrachtungsabstand dargestellt, wenn sich ein Betrachter aus zentraler Position nach links bewegt. In Abbildung 4.28 (rechts) ist der gleiche Fall dargestellt, wenn sich der Betrachter nach rechts bewegt. Hierzu wird bei der Bewegung nach links ein Schnitt entlang der linken weißen Linie für die Barriereereinstellung 0 und -1 durchgeführt und der Stereokonzentrationswert bestimmt. Bei der Bewegung nach rechts wird der Schnitt für die Barriereereinstellung 0 und +1 entlang der rechten weißen Linie gebildet. Während des Schaltvorgangs springt der Betrachter im Abstand d von dem Stereokonzentrationswert des Kurvenverlaufs Mitte auf den Kurvenverlauf links oder rechts (gestrichelte Linie). Es ist zu erkennen, dass beim Übergang nach links der Stereokonzentrationswert beim Schalten verbessert wird, während er bei der Bewegung nach rechts verschlechtert wird. Idealerweise würden sich keine Unterschiede der Kurven ergeben. Das unterschiedliche Verhalten ist eine Folge des fehlerhaften unsymmetrischen Schaltverhaltens.

Aus den Kurven kann abgelesen werden, in welchem Betrachtungsabstandsbereich

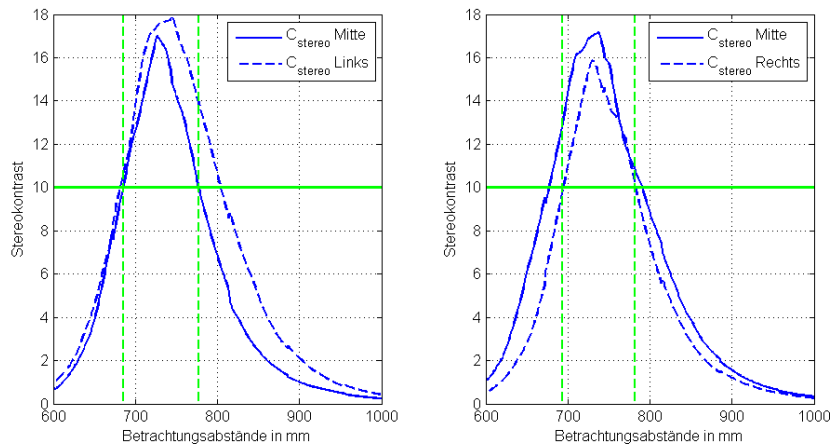


Abbildung 4.28: Wahrgenommener Stereokontrast bei adiabatischer Bewegung beim Übergang von der zentralen Position nach links (links) und bei Bewegung nach rechts (rechts)

eine laterale Adaption möglich ist, ohne dass der wahrgenommene Stereokontrast unter den Schwellwert von 10:1 fällt (horz. grüne Linie).

Es ergibt sich für den Übergang nach links ein Abstandsbereich von 685-777 mm und für den Übergang nach rechts ein Bereich von 694-782 mm. Innerhalb diesen Betrachtungsabstandsbereichs von $\approx \pm 50$ mm um den idealen Betrachtungsabstand erfolgt die laterale Adaption bei langsamer Bewegung, ohne dass der Stereokontrast zu stark abfällt. Außerhalb steigt die Wahrscheinlichkeit schnell an, dass Störungen in Form von Doppelbildern wahrgenommen werden.

Im nichtadiabatischen Bewegungsfall ändert der Betrachter so schnell seine Position, dass er sich einige Millimeter weiter aus der Stereozone herausbewegt hat, bevor die Barriere adaptiert. Im Rahmen des Fahrsimulatorversuchs, der im nächsten Abschnitt vorgestellt wird, wurden auch die auftretenden Kopfgeschwindigkeiten detektiert (die Ergebnisse finden sich im Anhang A).

Es wurde festgestellt, dass der Betrachter sich während der Fahrt sehr wenig bewegt. Auftretende Kopfgeschwindigkeiten liegen in der Regel unter 100 mm/s , erreichen jedoch vereinzelt Geschwindigkeiten über 250 mm/s . Mit der gemessenen Latenzzeit von 44 ms ergibt sich somit eine Strecke von bis zu 10 mm, die sich ein Betrachter bewegen kann, bevor die Barriere adaptiert. Die Schnittlinien der Plots der Stereozonen verschieben sich somit parallel um die Strecke der Latenz bei unterschiedlichen Ge-

schwindigkeiten.

In Abbildung 4.29 sind die 3D-Stereozonen der drei Barriereinstellungen mit Stereokontrast größer als 10:1 dargestellt. Überlappen sich zwei Zonen werden sie gelb dargestellt, bei drei Zonen rot. Bei der Adaption soll der Stereokontrast nicht unter den Schwellwert fallen, in den gelben Bereichen ist dies für die jeweiligen benachbarten 3D-Stereozonen erfüllt. Bei einem Stereokontrast größer als 10:1 ist die Wahrscheinlichkeit Störungen wahrzunehmen sehr gering.

Die dargestellten magenta Linien stellen die Kopfposition (bezogen auf den Na-

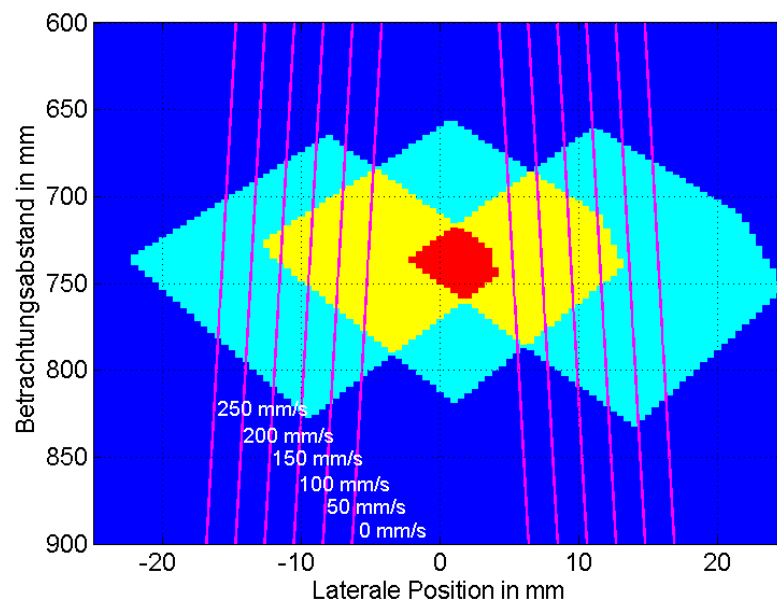


Abbildung 4.29: 3D-Stereozonen der drei Barriereinstellungen mit Stereokontrast größer als 10:1; Überlappung von zwei Zonen sind gelb, drei Zonen rot dargestellt; Die roten Linien beschreiben jeweils von innen nach außen, die Orte an denen sich ein Betrachter zum Zeitpunkt der Adaption befindet, wenn er sich mit der jeweiligen Kopfgeschwindigkeit bewegt

senwurzelpunkt) des Betrachters in verschiedenen Betrachtungsabständen dar, an denen er sich zum Zeitpunkt der Adaption der Barriere befindet, wenn er sich mit Kopfgeschwindigkeiten von 50, 100, 150, 200 und 250 mm/s und der gemessenen Latenz von 44 ms bewegt. Die Linie für 0 mm/s entspricht der adiabatisch langsamen Bewegung, bei welcher die Latenz des Systems vernachlässigt werden kann. Ihre Lage ergibt sich rein aus dem Verschiebungswinkel bzw. der Barriereauflösung.

Der Betrachtungsabstandsbereich in dem ein Betrachter einen Kontrast größer als 10:1 wahrnimmt ergibt sich aus der Größe des Bereichs, wie lange eine magentafarbene Schnittgerade durch einen gelben Bereich verläuft.

Aus der Abbildung wird ersichtlich, dass für Geschwindigkeiten größer 200 mm/s in keinem Betrachtungsabstand mehr ein Übergang mit ausreichendem Stereokontrast für eine störungsfreie Wahrnehmung erreicht wird. Die größte laterale Bewegungsfreiheit besteht im idealen Betrachtungsabstand. Die höchste Kopfgeschwindigkeit, bei der ein Betrachter während der lateralen Adaption zur jeder Zeit ein Stereokontrast größer 10:1 wahrnimmt, wenn auch nur in einem definierten Betrachtungsabstand, beträgt für die Prototypische Anzeige 1 180 mm/s. Diese Geschwindigkeit von nun an als *Grenzeschwindigkeit der lateralen Adaption* benannt. Für Geschwindigkeiten unterhalb der Grenzeschwindigkeit nimmt der Betrachtungsabstandsbereich, in dem ein Übergang mit ausreichendem Kontrast möglich ist, mit abnehmender Geschwindigkeit kontinuierlich zu. Außerhalb des gelben Bereichs steigt die Wahrscheinlichkeit an Störungen zu sehen.

Die Auswertung bestätigt die visuelle Beobachtung, dass bei schnelleren Kopfbewegungen Unschärfen und Doppelbilder wahrgenommen werden, die nach erfolgter Adaption wieder verschwinden. Bei dargestellten Objekten mit wenig Tiefe und somit einer geringen Disparität wird ein Übersprechen hauptsächlich als Unschärfe wahrgenommen.

Eine natürliche Unschärfe ist die Bewegungsunschärfen, die wahrzunehmen ist, wenn der Mensch sich schneller bewegt. Eigene einfache Tests des Autors mit einem Target, welches durch einen Roboter in unterschiedlichen Geschwindigkeiten bewegt wurde, zeigte, dass für Geschwindigkeiten unter 50 mm/s das Objekt bei aufmerksamer Betrachtung jederzeit ablesbar ist. Im Bereich von 50-100 mm/s, welcher im Fahrzeug selten auftritt, wurden schon leichte Unschärfen während der Bewegung wahrgenommen. Und für Geschwindigkeiten über 100 mm/s, welche im Fahrzeug hauptsächlich bei Kopfdrehungen auftreten, bei denen der Betrachter nicht auf die Anzeige blickt, wurde das Target nur noch peripher und somit deutlich unscharf wahrgenommen. Diese Unschärfe ist ein natürlicher Effekt der Wahrnehmung und wird daher nicht als störend wahrgenommen.

Die von einer Anzeige erzeugten Unschärfen durch einen zu geringen Stereokontrast unterscheiden sich von der Bewegungsunschärfe jedoch immer dann, wenn große Latenzen auftreten und wenn die Tiefe der dargestellten Objekte sehr groß ist. Bei hohen Latenzen nimmt der Betrachter auf Grund des verzögerten Verhaltens der Barriere noch in einem merklichen Zeitraum Unschärfen wahr, obwohl er sich schon wieder in Ruhe befindet. Ab einer gewissen Disparität und somit mit zunehmender Tiefe wird ein Übersprechen nicht mehr als Unschärfe, sondern als Doppelbild wahrgenommen.

Die Einstufung, ab wann eine Störung als solche wahrgenommen wird, hängt somit von mehreren Parametern ab. Für die angestrebten Inhalte eines Kombiinstruments mit entsprechender Tiefe und im relevanten Kopfgeschwindigkeitsbereich bis 100 mm/s bestätigt sich jedoch der Schwellwert des Stereokontrasts von 10:1, ab dem Störungen sichtbar wahrgenommen werden.

Untersuchung von Helligkeitsschwankungen bei lateraler Adaption

Die visuelle Bewertung der Prototypischen Anzeige 1 zeigte, dass Helligkeitsschwankungen bei der lateralen Adaption das größte Problem der prototypischen Anzeige darstellen und diese bei der weiteren Entwicklung reduziert werden müssen.

Zur Untersuchung der Einflussfaktoren, welche die Helligkeitsschwankungen verursachen und zur weiteren Optimierung, wurde ein Modell zur Erklärung der Helligkeitsschwankungen aufgestellt und experimentell verifiziert.

Modell In Abbildung 4.30 ist die Abstrahlcharakteristik der Prototypischen Anzeige 1 über dem Winkel vor und nach einer Adaption nach rechts dargestellt. Die Augen eines Betrachters mit Augenabstand 62 mm, der sich im idealen Betrachtungsabstand von 730 mm zentral vor der Anzeige befindet, blicken unter den Betrachtungswinkeln auf die Anzeige, unter denen sich bei den Verteilungen L_{WB} und L_{BW} die Maxima befinden (schwarze Kreise mit roter Füllung). Bewegt sich der Betrachter von dieser Startposition lateral nach rechts, erfolgt nach einer Positionsänderung des halben Verschiebungswinkel $\frac{\alpha_0}{2}$ (grüne senkrechte Linie) eine Adaption der Barriere, bei welcher die Abstrahlcharakteristik um den Winkel α_0 (vgl.

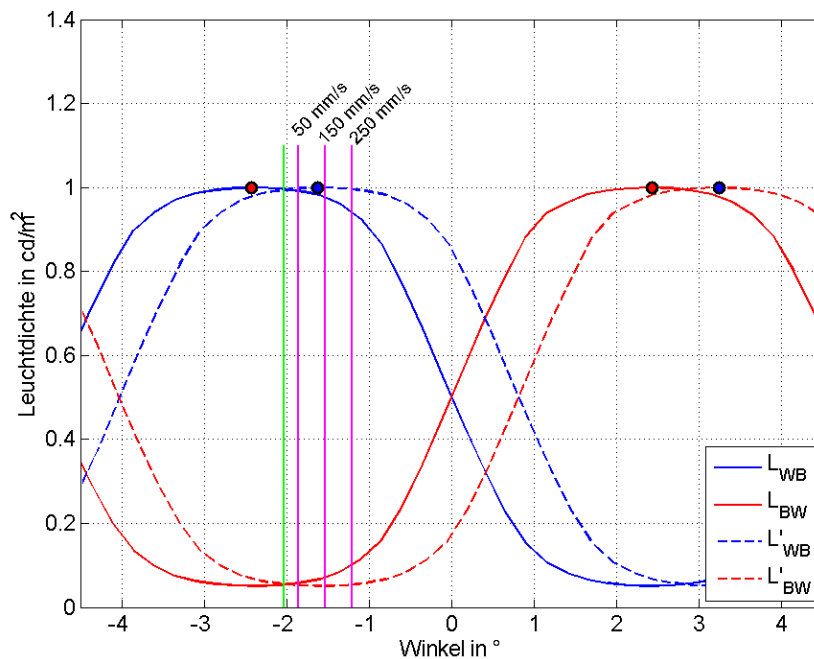


Abbildung 4.30: Entstehung von wahrgenommenen Helligkeitssprüngen bei unterschiedlichen Kopfgeschwindigkeiten und lateraler Adaption

Gl. (4.21)) verschoben wird (Verteilungen L'_{WB} und L'_{BW}). Ein Betrachter, der sich adiabatisch langsam bewegt, würde mit seinem linken Auge bis zum Schaltpunkt die Verteilung L_{WB} wahrnehmen und im Anschluss die Verteilung L'_{WB} . Bewegt er sich weiter bis zum Maximum der neuen Verteilung (schwarzer Kreis mit blauer Füllung), nimmt er die gleiche Helligkeit wie am Ausgangspunkt wahr. Aus der Abbildung ist zu erkennen, dass bei dieser Bewegung verschwindend geringe Helligkeitsdifferenzen auftreten. Für ein kontinuierliche Bewegung wiederholt sich der Adaptionsvorgang periodisch.

Bewegt sich der Betrachter jedoch schneller und das Gesamtsystem besitzt eine endliche Latenzzeit, tritt der nicht adiabatische Fall ein. Hierbei reagiert die Anzeige auf eine Positionsänderung um die Latenzzeit verzögert. Bei einer kontinuierlichen Bewegung befindet sich der Betrachter nicht mehr am Ort der grünen Linie, wenn die Anzeige adaptiert, sondern hat sich um die Strecke y_l im Raum weiterbewegt.

Die Strecke ist abhängig von der Latenzzeit t_l und der Kopfgeschwindigkeit v_K der Bewegung (vgl. Gl. (4.22)).

$$\begin{aligned}
 y_l &= v_K \cdot t_l \\
 \alpha_l &= \frac{\alpha_0}{2} + \arctan\left(\frac{y_l}{z}\right) \\
 v_K &:= \text{Kopfgeschwindigkeit} \\
 t_l &:= \text{Gesamtlatenz des Systems} \\
 z &:= \text{Betrachtungsabstand}
 \end{aligned}
 \tag{4.22}$$

Hierbei ist v_K die Kopfgeschwindigkeit und t_{lat} die Latenzzeit des Systems. Der Winkel α_l , um den sich der Betrachter bewegen kann, bevor die Anzeige schaltet, ist nun größer als im adiabatischen Grenzfall und berücksichtigt zusätzlich den Betrachtungsabstand z .

Messungen im Rahmen des Probandenversuchs, der im nächsten Abschnitt vorgestellt wird, bestätigten den Erfahrungswert, dass sich der Fahrer während der Fahrt nur wenig bewegt und seine Kopfposition nur selten ändert. Die auftretenden Kopfgeschwindigkeiten liegen in der Regel unter 100 mm/s, jedoch wurden vereinzelt auch Werte größer als 250 mm/s gemessen (siehe Daten im Anhang A). Diese traten jedoch insbesondere mit einer Kopffrotation (z.B. bei Spiegelblick) auf und damit in Fällen in denen der Fahrer nicht auf die Anzeige blickt. Geschwindigkeiten bis 100 mm/s treten jedoch auch in Situationen auf, in denen der Betrachter auf die Anzeige blickt und somit Störungen wahrgenommen werden können.

In Abbildung 4.30 sind für den idealen Betrachtungsabstand drei Geraden (magenta) eingezeichnet, an denen sich der Betrachter beim Schaltvorgang befindet, wenn er sich mit Kopfgeschwindigkeiten von 50, 150 oder 250 mm/s bewegt und die Latenzzeit der Anzeige, wie gemessen bei 44 ms liegt. Der Betrachter bewegt sich auch hier bis zum Schaltzeitpunkt auf der Verteilung L_{WB} und nimmt nach dem Schalten die Verteilung L'_{WB} wahr. Aus der Abbildung kann abgelesen werden, dass mit steigender Kopfgeschwindigkeit die Differenz zwischen den Verteilungen an den Schaltstellen zunimmt. Der Betrachter nimmt einen deutlichen Helligkeitssprung wahr.

Auf Grund der Abhängigkeit des Winkels α_l vom Betrachtungsabstand z ist zu erwarten, dass die größten Probleme für kleine Betrachtungsabstände entstehen, da

eine laterale Bewegung zu einer größeren Winkeländerung führt als in großen Betrachtungsabständen.

Ein weiterer Punkt, der bei der Simulation der Helligkeitssprünge berücksichtigt werden muss, ist die Augenposition auf der Helligkeitsverteilung, die nur für den idealen Betrachtungsabstand symmetrisch mittig auf den Maxima der Helligkeitsverteilung liegt. Für Betrachtungsabstände kleiner als der ideale Betrachtungsabstand befinden sich die Augen näher an den äußeren Flanken der Helligkeitsverteilung und für Betrachtungsabstände größer als der ideale Betrachtungsabstand näher an den inneren Flanken der Helligkeitsverteilung (vgl. Abb. 4.31). Bei einer Bewegung nach links

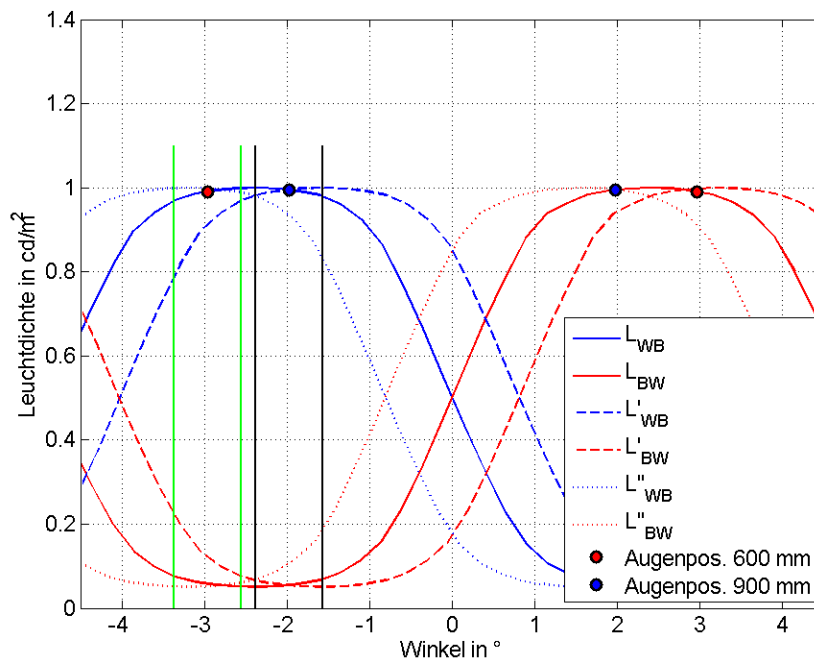


Abbildung 4.31: Helligkeitssprünge bei lateraler Adaption für variable Betrachtungsabstände

erfolgt für das linke Auge ein Übergang von L_{WB} auf L''_{WB} und bei einer Bewegung nach rechts ein Übergang nach L'_{WB} . Das Schaltverhalten ist unsymmetrisch. Während im Betrachtungsabstand 600 mm bei der Bewegung nach links an der Schaltstelle für das linke Auge die Leuchtdichte sprunghaft zunimmt, fällt sie bei einer Bewegung nach rechts sprunghaft ab. Im Betrachtungsabstand 900 mm ist das Verhalten invertiert. Das unsymmetrische Verhalten führt dazu, dass bei nicht adiabatischer Bewegung außerhalb des Betrachtungsabstandes die Helligkeitssprün-

ge für ein Auge nahezu verschwinden, zugleich auf dem anderen Auge aber deutlich ansteigen.

Verschärfend kommt hinzu, dass außerhalb des idealen Betrachtungsabstandes in den Randbereichen noch höhere Helligkeitssprünge auftreten können, da es auf Grund des festen Barrierepitchs zu zusätzlichen Winkelabweichungen kommt.

Zusammenfassend gilt es festzuhalten, dass die Stärke der Helligkeitsschwankungen abhängig vom Ort des Betrachters und der Position auf der Anzeige ist und bisweilen sehr komplex in seiner Beschreibung werden kann. Im Folgenden werden daher nur Helligkeitsschwankungen simuliert, die mittig auf der Anzeige auftreten. Dieser Bereich ist der wichtigste, da dort die meisten Inhalte mit größter Tiefe dargestellt werden.

In Abbildung 4.32 sind die Amplituden der simulierten Helligkeitssprünge dargestellt, welche ein Betrachter mit dem linken Auge (durchgezogene Linie) und mit dem rechten Auge (gestrichelte Linien) bei einer Bewegung nach rechts mit unterschiedlichen Kopfgeschwindigkeiten für verschiedene Latenzen wahrnehmen würde. Für das linke Auge (durchgezogene Linien) wird angenommen, dass WB auf der Anzeige dargestellt wird, was somit dem maximalen Kontrast zwischen den Anzeigen entspricht. Für das rechte Auge wird dementsprechend die Darstellung BW simuliert. Aus Symmetriegründen ist dies gleich dem, was das linke Auge bei einer Bewegung nach links wahrnehmen würde. Die Simulation wurde für den idealen Betrachtungsabstand 730 mm (in Abb. mittig dargestellt) durchgeführt, bei dem sich beide Augen mittig der monokularen Stereozone befinden und zusätzlich für die Betrachtungsabstände 650 mm (in Abb. oben) und 850 mm (in Abb. unten).

Simulationsgrundlage bildet die gemessene und normierte Helligkeitsverteilung der Prototypischen Anzeige 1 (siehe 4.13).

Es wird ersichtlich, dass die Latenzzeit einen kritischen Parameter bei der Adaption darstellt. Mit steigender Latenz und ebenfalls steigender Kopfgeschwindigkeit nehmen die Helligkeitssprünge schnell zu. Die größten Schwankungen treten wie erwartet für kleine Betrachtungsabstände auf und sind im idealen Betrachtungsabstand am geringsten. Ebenfalls wird das unsymmetrische Verhalten deutlich. Im Abstand 650 mm und 850 mm sind die Unterschiede zwischen den Verteilungen WB

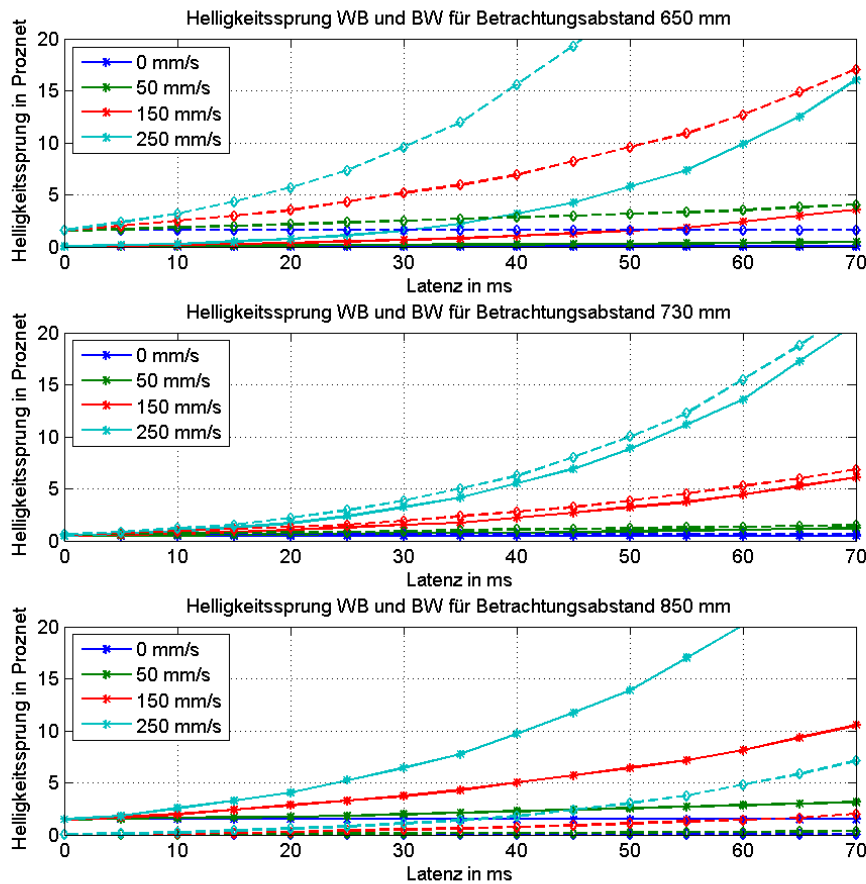


Abbildung 4.32: Simulierte Helligkeitssprünge für die Prototypischen Anzeige 1 für Kopfgeschwindigkeiten von 0, 50, 150, 250 mm/s in den Betrachtungsabständen 650 mm (oben), 730 mm (mittig) und 850 mm (unten); die durchgezogenen Linien beschreiben die Helligkeitsschwankungen für unterschiedliche Latenzen bei Anzeige von WB, wahrgenommen mit dem linken Auge; die gestrichelten Linien beschreiben die Helligkeitsschwankungen, wahrgenommen vom rechten Auge bei Darstellung von BW

und BW deutlich zu erkennen, während sie im idealen Betrachtungsabstand 730 mm annähernd gleiches Verhalten zeigt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass außerhalb dem idealen Betrachtungsabstand die Augen sich nicht mittig der monokularen Stereozone befinden. Der Bewegungsbereich und somit die notwendige Latenzzeit ist geringer, bevor sich der Betrachter mit seinem Auge auf der Flanke der Helligkeitsverteilung befindet und dadurch größere Helligkeitsschwankungen wahrnimmt.

Mit der gemessenen Latenzzeit von 44 ms kann aus den Kurvenverläufen die erwarteten Helligkeitsschwankungen für die Prototypische Anzeige 1 bei Anzeige von WB vorausgesagt werden (vgl. Abb. 4.33 (links)). Die Kurvenverläufe beschreiben die

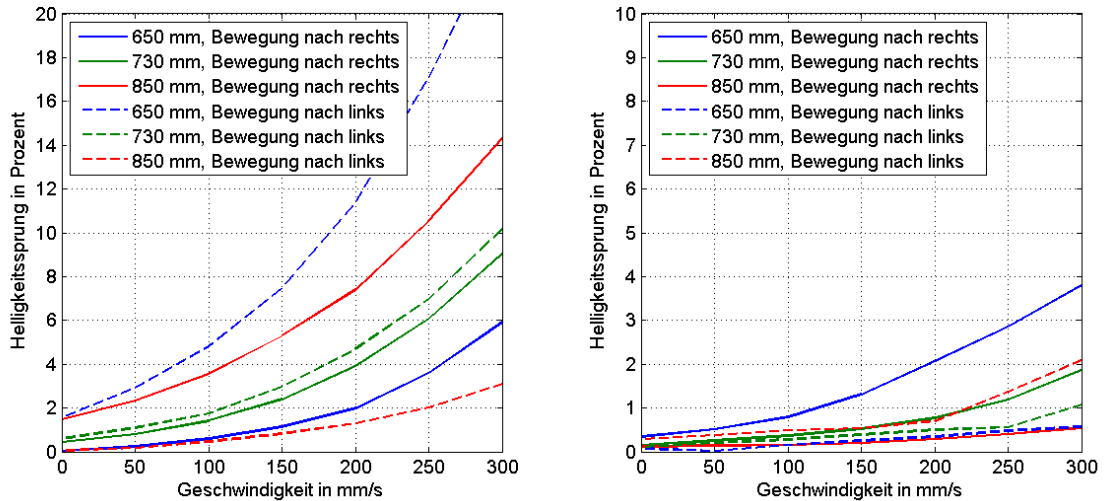


Abbildung 4.33: Simulierte Helligkeitssprünge der Prototypischen Anzeige 1 mit einer Latenzzeit von 44 ms bei Anzeige von WB (links) und WW (rechts)

Amplitude der mit einem Auge wahrgenommenen Helligkeitssprünge für die Prototypische Anzeige 1 bei der Darstellung von WB. Die gestrichelte Kurve beschreibt eine Bewegung nach links und die durchgängige Kurve eine Bewegung nach rechts. Im Maximum werden somit Helligkeitssprünge über 20% erwartet. Im Minimum einer sehr langsamen Bewegung treten in den Betrachtungsabständen 850 mm und 650 mm Helligkeitssprünge von 1,5% auf, während sie im idealen Betrachtungsabstand 0,5% betragen. Die Helligkeitssprünge verschwinden somit niemals gänzlich, sondern nehmen nur in ihrer Amplitude ab.

Die Darstellung von WB stellt den Grenzfall des maximal möglichen Kontrasts zwischen der linken und rechten Ansicht dar. Die Simulation wird daher um eine Darstellung von WW ergänzt, indem die vorangegangene Simulation mit Verteilung L_{WW} wiederholt wird. Dies entspricht dem Fall, dass auf beiden Ansichten das gleiche Bild angezeigt wird, wie es für Inhalte in der Nullebene zutrifft. In Abbildung 4.33 (rechts) sind die erwarteten Amplituden der Helligkeitssprünge für die Anzeige von WW dargestellt. Die auftretenden Amplituden sind deutlich geringer und nehmen im Maximum Werte von 4% an. Es zeigt sich aber, dass auch bei Anzeige von

Inhalten ohne Tiefe auf der Anzeige ein schwaches Flackern wahrgenommen wird. Der Grund hierfür ist die gemessene Helligkeitsvariation von L_{WW} . Je geringer diese ausfällt desto geringer werden auch die beobachteten Helligkeitsschwankungen. Die Simulation bestätigt damit auch den visuellen Eindruck, dass auf der gesamten Anzeige und nicht nur an Orten mit hohem Übersprechen ein Flackern wahrgenommen wird.

Die Helligkeitssprünge mit der zuvor bestimmten Amplitude wiederholen sich bei kontinuierlicher Bewegung periodisch. Dadurch entsteht der Eindruck des Flackerns. Die Frequenz des Flackerns ergibt sich aus der Subpixelbreite der Barriere, ausgedrückt durch den Verschiebungswinkel α_0 , der Kopfgeschwindigkeit v_K und dem Betrachtungsabstand z (vgl. Gl. (4.23)).

$$f = \frac{v_K}{\tan(\alpha_0) \cdot z}$$

$$v_K := \text{Kopfgeschwindigkeit} \tag{4.23}$$

$$\alpha_0 := \text{Verschiebungswinkel}$$

$$z := \text{Betrachtungsabstand}$$

In Abbildung 4.34 sind die erwarteten Frequenzen der Helligkeitssprünge dargestellt. Mit Werten zwischen 0-30 Hz liegen diese in einem Frequenzbereich der von einem Menschen sehr gut wahrgenommen werden kann.

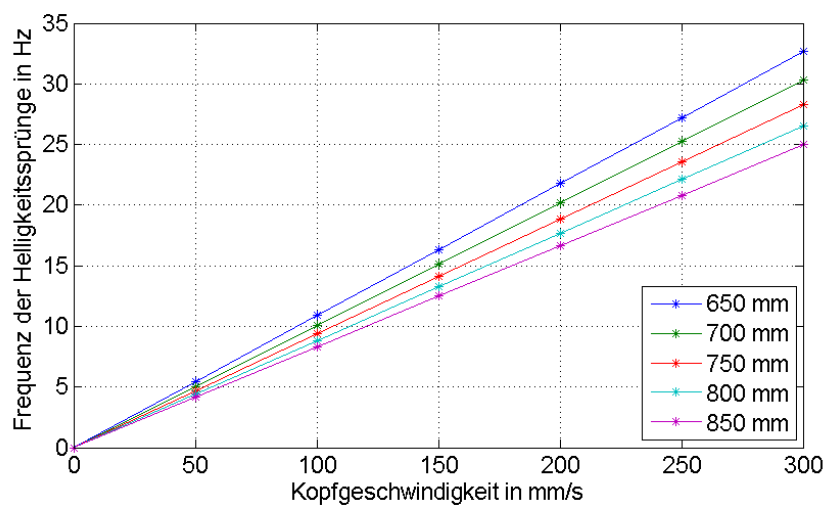


Abbildung 4.34: Simulierte Frequenz der Helligkeitssprünge als Funktion der Kopfgeschwindigkeit für verschiedene Betrachtungsabstände

Messtechnische Untersuchung der Gültigkeit des Modells

Das aufgestellte Modell wurde unter zu Hilfenahme des im vorherigen Abschnitt vorgestellten Roboters UR-10 überprüft. Hierzu wird auf dem Roboterarm ein modifiziertes Target angebracht, welches einen stilisierten menschlichen Kopf zeigt, jedoch am Ort des linken Auges eine ungefähr 10 mm große radiale Öffnung aufweist, hinter der sich eine Kamera befindet. Bei der Kamera handelt es sich um eine weitere acA2000-50gm(Basler) mit einem 35 mm Objektiv der Firma KOWA. Die Kamera detektiert klassischerweise die Lichtintensität. Durch Aufnahme der Anzeige und Abgleich mit einer Goniometermessung ist es möglich, die Lichtintensität bei Darstellung eines Grauverlaufs in eine Leuchtdichte umzurechnen. Die Blende des Objektivs wird so eingestellt, dass sie mit einem Durchmesser von 5 mm ungefähr der Apertur des menschlichen Auges entspricht. Der Bildausschnitt (engl. Region of Interest [ROI]) wird klein gewählt, um eine Bildwiederholffrequenz von 80 Hz zu erreichen. Der Roboter wird zentral vor der Anzeige platziert (vgl. Abb. 4.35) und

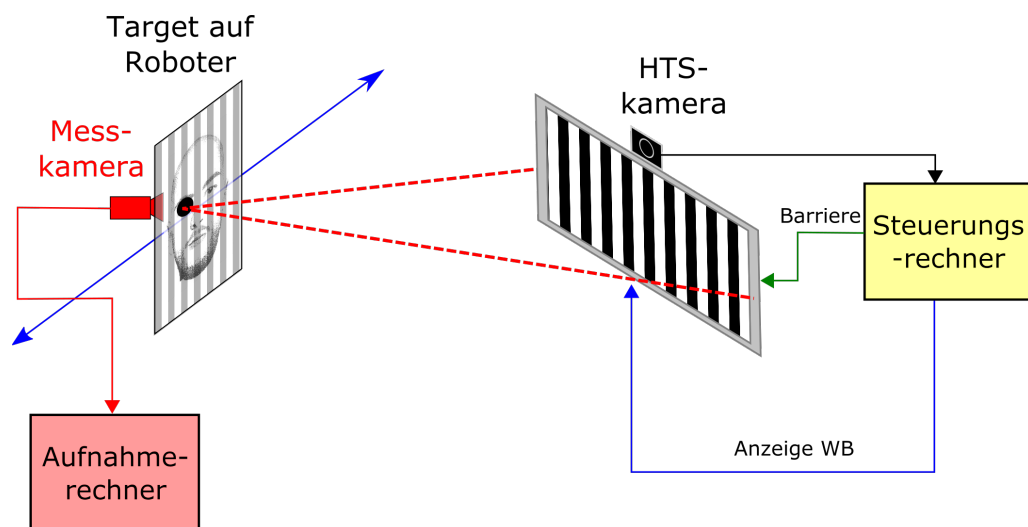


Abbildung 4.35: Aufbau zur Messung der Helligkeitssprünge auf der Anzeige bei lateraler Adaption

programmiert, dass er periodisch um ungefähr $\pm 100\text{mm}$ lateral linear verfährt. Die Kamera samt Target wird dabei so ausgerichtet, dass sie immer auf den gleichen, zentralen Punkt mittig auf der Anzeige schaut. Die HTS-Kamera auf der Anzeige erfasst das Target und adaptiert kontinuierlich die Barriere. Somit wird immer der gleiche Punkt auf der Anzeige während des Verfahrens gefilmt.

Gemessen wurde in den drei Betrachtungsabständen 650, 750 und 850 mm. In jedem Betrachtungsabstand wurde der Konvergenzwinkel der Messkamera kalibriert, sodass die Kamera mittig auf die Anzeige blickt. Im Anschluss wird der Roboter mehrere Male nach links und nach rechts lateral verfahren, wobei für die Geschwindigkeit Werte von 50, 100, 200, 250 und 300 mm/s eingestellt wurden.

Auf der Anzeige wird WB oder WW dargestellt. Es ergeben sich somit 30 Messdurchläufe.

In jedem aufgenommenen Kameraframe wird die Leuchtdichte zentral auf der Anzeige bestimmt, in dem über 3×10 px (h x v) gemittelt wird. Es ergeben sich Leuchtdichteverläufe über die Zeit, wie sie in Abbildung 4.36 exemplarisch für den Betrachtungsabstand 650 mm und eine Geschwindigkeit von 250 mm/s dargestellt sind. Der dargestellte Helligkeitsverlauf ist für eine periodische Bewegung, bei der

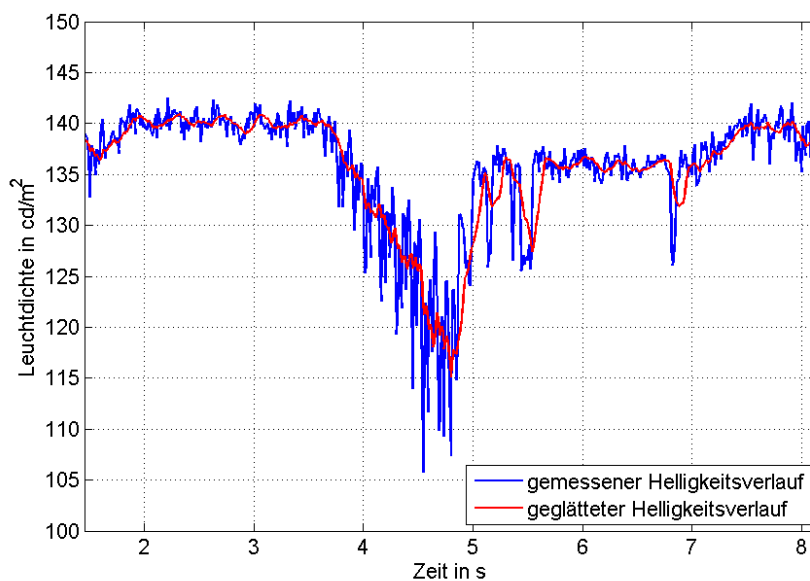


Abbildung 4.36: Gemessener Leuchtdichteverlauf (blau) bei lateraler Bewegung vor der Anzeige im Abstand 650 mm und einer Geschwindigkeit von 250 mm/s; in rot geglätteter Kurvenverlauf; dargestellt ist ein Periode der Bewegung, bis 4,7 s bewegt sich das Target nach links, im Anschluss wieder zurück auf die Ausgangsposition

sich das Target mit Messkamera bis zum Zeitpunkt 4,7 s nach links bewegt und im Anschluss nach rechts zurück zum Ausgangspunkt.

Es ist zu erkennen, dass die gemessene Leuchtdichte (blaue Kurve) deutliche Schwan-

kungen zeigt. Wie aus dem Modell für einen Betrachtungsabstand von 650 mm vorausgesagt, zeigt die Messung ein unsymmetrisches Verhalten beim Verfahren nach links und nach rechts. Bei einer Fahrt nach links werden deutlich größere Helligkeitsschwankungen detektiert, als bei der Bewegung nach rechts. Jedoch ist nicht nur eine Zunahme der Helligkeitssprünge (Amplitude der Schwankungen) zu beobachten, sondern auch eine Abnahme der Gesamthelligkeit. Dies lässt sich zu einem gewissen Anteil durch eine allgemeine Abnahme der Leuchtdichte bei größeren Blickwinkeln erklären, da jede Flüssigkristallanzeige nicht konstant über den gesamten Blickwinkelbereich abstrahlt. Der größere Anteil ist jedoch auf Winkelabweichungen bei der Detektion des Headtrackingsystems und der Detektion durch die Kamera zurückzuführen, welche auf Ungenauigkeiten des Messaufbaus (Platzierung und Programmierung des Roboters) zurückzuführen sind. Die Abweichungen sind jedoch durchaus repräsentativ für Fehler, die in der Realität und auch bei der visuellen Begutachtung auftreten können. Geringe Winkelfehler des Headtrackings führen beispielsweise zu einer Abweichung, die auch auftreten würde, wenn ein Betrachter mit einem von 62 mm abweichenden Augenabstand die Anzeige betrachtet.

Die erwarteten Helligkeitsschwankungen liegen laut der Simulation im Bereich von 5-30 Hz. Um die Schwankungen des Helligkeitsverlaufs unabhängig der Variation der Gesamthelligkeit zu untersuchen, wird der gemessene Kurvenverlauf mit einem fließenden Durchschnitt mit Kernlänge von 10 Frames (0.12 s) tiefpassgefiltert. Es ergibt sich die rote Kurve.

Zur Analyse der höher frequenten Anteile werden beide Kurven normiert und der rote Kurvenverlauf von der blauen Kurve des gemessenen Helligkeitsverlaufs abgezogen. Es verbleiben die höherfrequenten Anteile, welche als Flackern der Anzeige bei der Adaption wahrgenommen werden. In Abbildung 4.37 sind diese für unterschiedliche Geschwindigkeiten für den Betrachtungsabstand 650 mm bei Anzeige von WB dargestellt. Durch das periodische Wechseln der Fahrtrichtung und die zuvor beschriebenen Abweichungen auf Grund von Ungenauigkeiten des Headtrackingsystems tritt eine Bandbreite unterschiedlicher Amplituden der Helligkeitsschwankungen auf. Die zu untersuchenden Amplituden der Helligkeitsschwankungen auf Grund der diskreten Barriere werden hierbei überlagert von Ausleserauschen des Messsys-

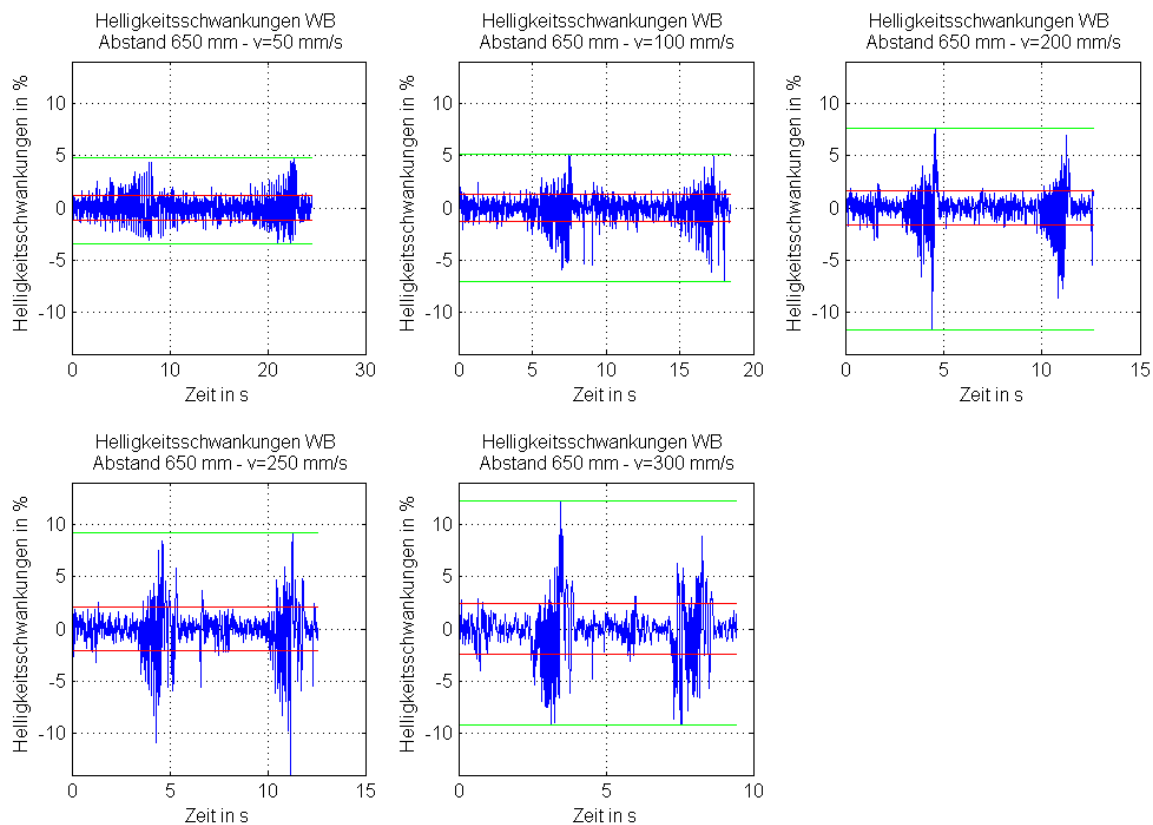


Abbildung 4.37: Helligkeitsschwankungen bei lateraler Adaption für die Geschwindigkeiten 50, 100, 200, 250 und 300 mm/s im Betrachtungsabstand 650 mm bei Anzeige von WB; die roten Linien markieren das Intervall der Standardabweichung und sind Ausdruck für die Stärkere der mittleren Helligkeitsschwankungen; die grüne Linie markieren die maximalen Helligkeitsschwankungen

tems, welches unabhängig von der Bewegung des Betrachters ist.

Die Auswertung der Amplituden erfolgt daher über statistische Größen. Als einfaches Maß zur Bestimmung der „mittleren“ Helligkeitsschwankungen wird die Standardabweichung eingeführt. Die roten horizontalen Linien in Abbildung 4.37 liegen bei der positiven und negativen Standardabweichung der Amplitudenverteilung symmetrisch um Null. Da sich bei einer Erhöhung der bewegungsinduzierten Helligkeitsschwankungen des Ausleserausens nicht mit erhöht, stellt die Standardabweichung ein gutes Maß für die relative Änderung der Helligkeitsschwankungen dar.

Als zweite statische Größe werden die Amplituden mit dem maximalen Betrag der

Helligkeitssprünge bestimmt (grüne Linien). Auch diese Linien werden symmetrisch eingezeichnet, um vergleichbare Intervalle zu erhalten.

In Abbildung 4.38 sind die mittleren Helligkeitsschwankungen für die Anzeige von WB (links oben) und WW (rechts oben) dargestellt. Die Helligkeitsschwankung entspricht für die oberen Abbildungen der doppelten Standardabweichung (Differenz der roten Linien in Abbildung 4.37) und für die unteren Abbildungen dem doppelten des maximalen Wertes (grüne Linien in Abbildung 4.37). Die gemessenen Verläufe

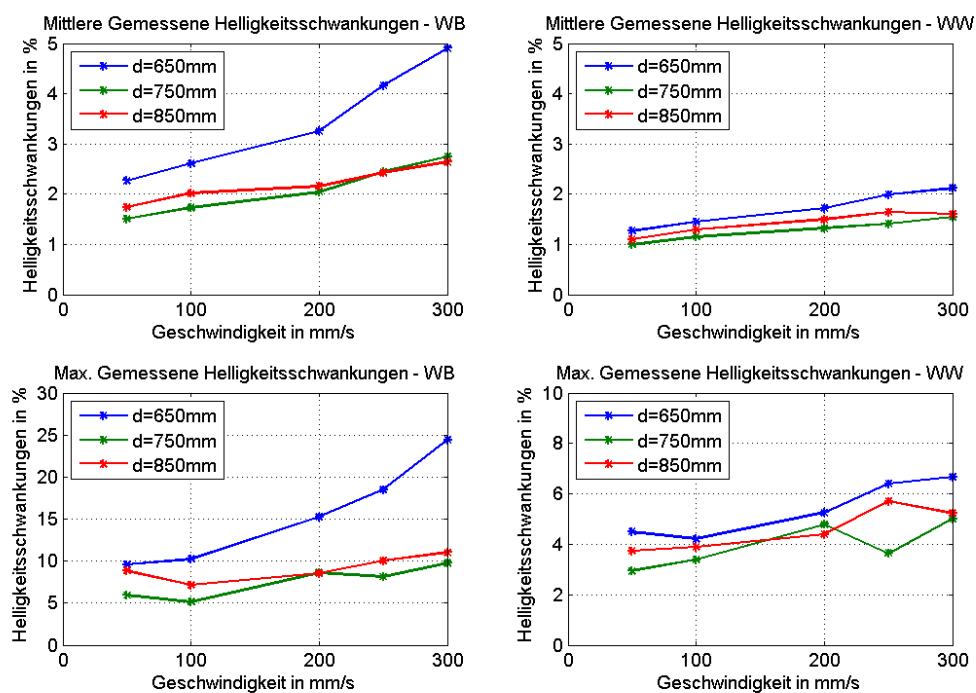


Abbildung 4.38: Amplituden der mittleren (obere Zeile) und maximalen (untere Zeile) Helligkeitsschwankungen bei lateraler Adaption für die Geschwindigkeiten 50, 100, 200, 250 und 300 mm/s für die Betrachtungsabstände 650, 750 und 850 mm bei Anzeige von WB (linke Spalte) und WW (rechte Spalte)

fe bestätigen das vorhergesagte Ansteigen der Helligkeitssprünge bei Erhöhung der Kopfgeschwindigkeit. Wie im Modell prognostiziert, treten die größten Helligkeitssprünge beim kleinsten Betrachtungsabstand auf.

Im Vergleich der Messwerte der maximalen Helligkeitsschwankungen (untere Zeile der Abbildung) mit den Vorhersagen des Modells (siehe Abb. 4.33) ist für hohe Kopfgeschwindigkeiten eine gute Übereinstimmung zu erkennen. Für niedrige Kopfge-

schwindigkeiten sind die Werte jedoch allesamt zu groß. Würden die Kurvenverläufe auf die Geschwindigkeit $v=0 \text{ mm/s}$ extrapoliert werden, würde diese auch dort Werte von ungleich null annehmen. Dies bedeutet, dass auch bei der adiabatisch langsamen Bewegung sichtbare Störungen auftreten würden. Diese werden vom Modell nur für Betrachtungsabstände ungleich des idealen Betrachtungsabstandes vorhergesagt, treten bei der Messung jedoch auch im idealen Betrachtungsabstand auf. Dies kann vermutlich auf die angewendete Messmethode zurückgeführt werden, bei der ein bewegungsunabhängiges Rauschen der Messkamera in der Größenordnung von 1-2% die relevanten Helligkeitsschwankungen überlagert.

Messung der Frequenz der Helligkeitsschwankungen

Zur Messung der Frequenz der Helligkeitssprünge werden die Helligkeitsverläufe durch eine Fourieranalyse frequenzzerlegt und die Frequenz mit der maximalen Amplitude bestimmt.

In Abbildung 4.39 ist als Beispiel das einseitige Spektrum der Helligkeitssprünge im Betrachtungsabstand 750 mm für eine Kopfgeschwindigkeit von 200 mm/s dargestellt. In rot wurde die Frequenz mit der maximalen Amplitude hervorgehoben.

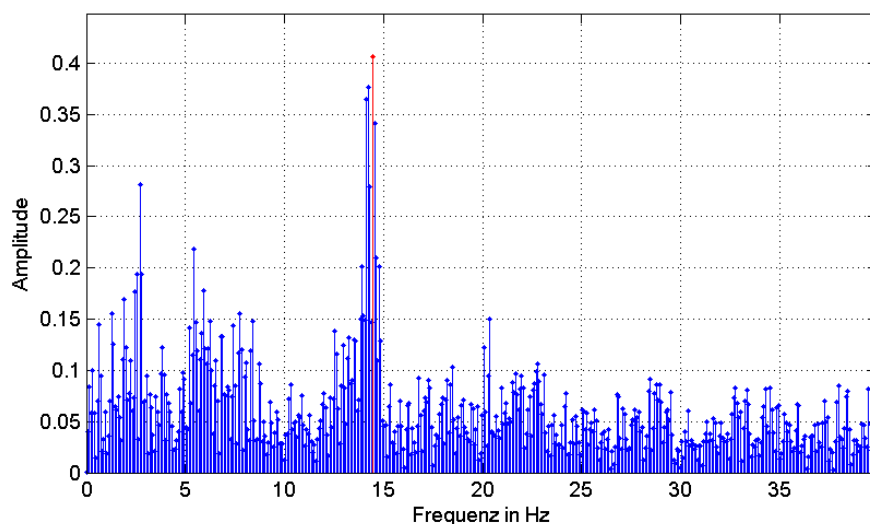


Abbildung 4.39: Frequenzanalyse der gemessenen Helligkeitsschwankungen dargestellt an der Messung im Abstand 750 mm und einer Kopfgeschwindigkeit von 200 mm/s bei Darstellung von WB; in rot ist die Frequenz mit der größten Amplitude dargestellt

Angewendet auf alle Helligkeitsverläufe bei Anzeige von WB ergibt sich das in Abbildung 4.40 dargestellte Verhalten der Frequenz der Helligkeitssprünge. Die Fehler-

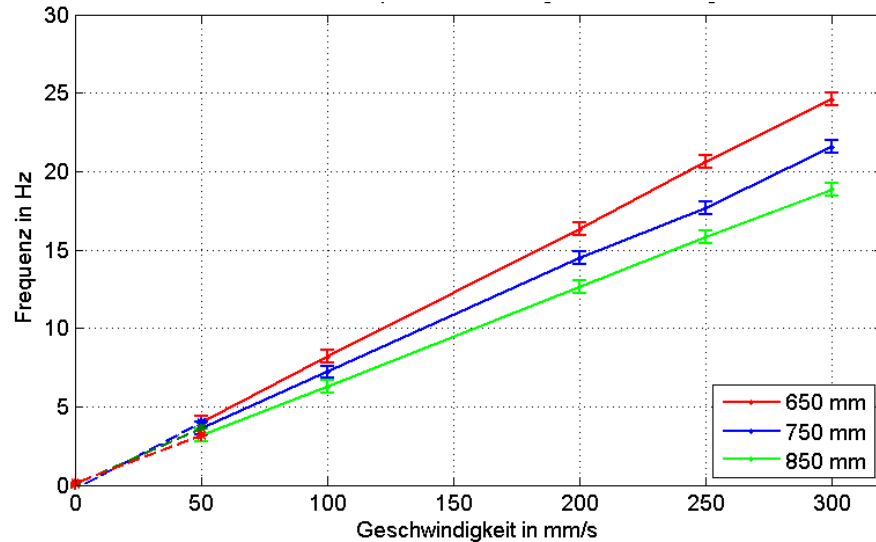


Abbildung 4.40: Gemessene Frequenzen der Helligkeitssprünge als Funktion der Kopfgeschwindigkeit bei Anzeige von WB

balken wurden anhand der Breite der Frequenzpeaks im Spektrum abgeschätzt. Die Werte zwischen 0 und 50 mm/s wurden linear extrapoliert. Es ergibt sich, wie in der Simulation vorausgesagt, ein linearer Verlauf der Frequenzänderung bei Bewegung. Jedoch stimmen die Steigungen der Geraden nicht mit den in der Simulation vorausgesagten überein (vgl. Abb. 4.34).

Die gemessenen Steigungen sind ungefähr um einen Faktor von 1.3 kleiner. Nach Gleichung (4.23) könnten hierfür Abweichungen bei der Sprungweite der Barriere, dem Betrachtungsabstand oder der Kopfgeschwindigkeit verantwortlich sein. Die Kopfgeschwindigkeit wird durch den Roboter mit hoher Genauigkeit vorgegeben und wurde experimentell verifiziert, hierbei konnte keine Abweichung festgestellt werden. Der Abstand des Targets von der Anzeige wurde auf einige wenige Millimeter bestimmt, auch hierbei lässt sich keine Abweichung in der festgestellten Größenordnung erklären. Am wahrscheinlichsten ist eine Variation der Sprungweite der Barriere. Durch den bereits festgestellten Herstellungsfehler bei der Barriere (siehe 4.4.5), ist die Sprungweite der Barriere im Mittel korrekt, jedoch bei jedem zweiten Schalten zu groß und ansonsten zu klein. Um den gemessenen Frequenzver-

lauf mit der Formel (4.23) erklären zu können, müsste der Winkel α_0 von $0,809^\circ$ auf $1,05^\circ$ vergrößert werden. Unter der Annahme, dass der mittlere Verschiebungswinkel $0,809^\circ$ korrekt ist, muss demnach bei jedem zweiten Schalten ein Winkel von $0,62^\circ$ auftreten. Im Frequenzspektrum würden zwei Peaks sichtbar sein. Dies kann nicht direkt festgestellt werden. Jedoch muss beachtet werden, dass bei geringeren Verschiebungswinkeln auch die Amplitude der Helligkeitsschwankungen geringer wird und sich diese somit nicht mehr signifikant vom Untergrundrauschen unterscheiden. Dies würde die gemessenen Abweichungen erklären und nicht im Widerspruch zu der Simulation stehen. Für eine genaue Klärung müsste die Messung mit verbesserter Messtechnik wiederholt und ergänzende Untersuchungen durchgeführt werden. Dies war im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht mehr möglich.

Trotz der Einschränkungen hinsichtlich der Messmethode und der festgestellten Abweichungen bei der Messung der auftretenden Frequenzen kann festgehalten werden, dass kein grundsätzlich anderes Verhalten gefunden wurde.

Ausgehend von der Gültigkeit des Modells folgen die visuell beobachteten Helligkeitsschwankungen der Prototypischen Anzeige 1 dem simulierten Verlauf, dargestellt in Abbildung 4.33. Die visuelle Beobachtung zeigt, dass bei sehr langsamen Bewegungen keine Helligkeitssprünge sichtbar waren, jedoch schon bei moderaten Bewegungen sichtbar wurden. Der Schwellwert. Sobald die Geschwindigkeit moderat erhöht wurde, konnten sichtbare Störungen beobachtet werden. Der Schwellwert liegt demnach im Bereich von 2-3% der Helligkeitsschwankungen. Der Wert liegt somit tiefer als die zuvor eingeführte Grenze von Leuchtdichteunterschieden innerhalb der Stereozone von 5%, jedoch handelte es sich hierbei um eine kontinuierliche Abnahme der Leuchtdichte, während sie bei der lateralen Adaption sprunghaft erfolgt. Auf eine sprunghafte Änderung der Leuchtdichte, die sich zuweilen periodisch wiederholt, reagiert das menschliche Auge sensitiver als auf langsame kontinuierliche Änderungen.

Aus dem aufgestellten Modell folgt, dass die Amplitude der wahrgenommenen Helligkeitssprünge abhängig vom der charakteristischen Abstrahlcharakteristik der Anzeige, der Latenzzeit und des Verschiebungswinkels (bzw. der Anzahl der Barriere-subpixel) ist.

In Abbildung 4.31 wird deutlich, dass die Latenzzeit einen sehr großen Einfluss auf die wahrgenommenen Helligkeitssprünge hat. Jede Verbesserung dieser reduziert die wahrgenommenen Störungen. Mit gemessenen 44 ms liegt sie jedoch bereits in einem Bereich, der für einen Fahrzeugeinsatz als realistische Zielgröße anzusehen ist. Eine deutliche Verringerung ist nicht zu erwarten.

Die Sprungweite der Barriere, ausgedrückt durch den Winkel α_0 , stellt ebenfalls einen Ansatzpunkt zur Optimierung der Helligkeitsschwankungen dar. Eine Verringerung verbessert hauptsächlich Helligkeitssprünge für niedrige Kopfgeschwindigkeiten. Bei hohen Kopfgeschwindigkeiten ist die Wegstrecke, die ein Betrachter auf Grund der Latenz nach Überschreiten des Schaltzeitpunktes zurücklegt, größer als die Wegstrecke bis zum Schaltzeitpunkt, welche durch eine höhere Barriereauflösung verringert werden würde.

Eine Optimierung der Abstrahlcharakteristik in Form eines breiteren Helligkeitsplateaus stellt die beste Möglichkeit dar, Helligkeitssprünge zu reduzieren. Verläuft die Leuchtdichtekurve über einen größeren Winkelbereich flach, entstehen auch bei höheren Kopfgeschwindigkeiten nur geringe Helligkeitssprünge. Es ist jedoch darauf zu achten, dass ein breiteres Plateau nicht auf Kosten einer Verschlechterung der Helligkeitsverteilung L_{WW} erfolgt, wie es im Abschnitt der geometrisch optischen Auslegung der Barrieremaske gezeigt wurde, da dies die Helligkeitsschwankungen für Inhalte ohne Tiefe verschlechtern würden. Diese sind in der Prototypischen Anzeige 1 bereits auf einem sehr guten Wert.

4.4.6 Diskussion der Experimentellen Untersuchung

Im Entwurf der Prototypischen Anzeige 1 wurde gezeigt, dass es nicht möglich ist, die geometrisch optische Zielfunktion zu erfüllen, ohne deutliche Helligkeitsvariationen bei Anzeige von L_{WW} zu verursachen. Es wurde daher ein Kompromiss gefunden, der in der geometrisch-optischen Auslegung die Breite des Helligkeitsplateaus verkleinert.

Die Einführung der Messgröße des Stereokontrasts ermöglicht die Definition der monokularen Stereozonen als „nutzbaren“ Bereich. Es zeigt sich, dass die gemessenen monokularen Stereozonen nicht signifikant größer sind als die geometrisch-optisch vorhergesagten. Der laterale Bewegungsbereich der Prototypischen Anzeige 1 ist mit

26 mm an der breitesten Stelle deutlich kleiner als die in der optischen Zielfunktion geforderten 47 mm und nimmt für andere Betrachtungsabstände noch weiter ab. Das hat Einschränkungen in der Stereoqualität bei lateraler Adaption zur Folge, die nur für Kopfgeschwindigkeiten unter 200 mm/s (und hierbei auch nur nahe des idealen Betrachtungsabstandes) zu keinem Absinken des Stereokontrasts unter 10:1 führt. Des Weiteren ist die longitudinale Ausdehnung der 3D-Stereozone beschränkt und deckt mit einem für die laterale Adaption nutzbaren Betrachtungsabstandsbereich von ± 50 mm nicht den in der optischen Zielfunktion definierten Bereich ab.

Ein weiterer Unterschied zu den geometrisch-optisch vorhergesagten Eigenschaften ist die Abstrahlcharakteristik, die dazu führt, dass die Leuchtdichte innerhalb der Stereozone nicht konstant ist, sondern abfällt und ein verstärktes Übersprechen zu beobachten ist. Der Helligkeitsabfall führt zu Helligkeitssprüngen während der lateralen Adaption, die als störendes Flackern wahrgenommen werden. Diese treten schon bei Kopfgeschwindigkeiten ab 50 mm/s auf und stellen die am stärksten wahrnehmbare Störung der Anzeige dar.

Aus dem Modell zur Erklärung der Helligkeitssprünge folgt, dass diese abhängig sind von der Abstrahlcharakteristik, der Latenzzeit und der Sprungweite der Barriere. Die Latenzzeit ist bereits auf einem solchen Niveau, dass dies nur mit viel Aufwand minimiert werden kann. In Kombination mit der notwendigen Vergrößerung der 3D-Stereozone ergeben sich die folgenden Ansatzpunkte für die weitere Verbesserung der Anzeige.

- **Minimierung des Crosstalks**

Das Übersprechen muss reduziert werden, um einen höheren Stereokontrast zu erreichen und die vereinzelt auftretende Sichtbarkeit von Geisterbildern zu vermeiden.

- **Verkleinerung der Sprungweite der Barriere bei Adaption**

Eine kleine Sprungweite bei der Adaption verbessert die wahrgenommenen Helligkeitssprünge bei niedrigen Kopfgeschwindigkeiten und vergrößert die longitudinale Ausdehnung des Übergangsbereichs mit Stereokontrast größer 10:1,

da sich benachbarte 3D-Stereozonen stärker überlappen. Die Sprungweite kann durch eine Erhöhung der Barriereauflösung und eine Verringerung des Abstandes der Barriere zum LCD verbessert werden. Diese wird für die Prototypische Anzeige 2 im nächsten Abschnitt vorgestellt.

- **Verbreiterung des Helligkeitsplateaus**

Die Optimierung der Abstrahlcharakteristik durch eine Ausbildung eines breiteren Helligkeitsplateaus wirkt sich positiv auf fast alle festgestellten Probleme aus. Der Crosstalk wird reduziert, der statische Bewegungsbereich vergrößert und Helligkeitssprünge reduziert. Die Optimierung kann jedoch nicht durch eine große Änderung des Öffnungsverhältnisses der Barriere und der Pixelgröße erfolgen, da dies zu vermehrten Helligkeitssprüngen bei der Anzeige von L_{WW} führen würde. Von dem Öffnungsverhältnis der Subpixelbreite zur Barriereöffnung von 0.5 sollte möglichst wenig abgewichen werden. Im Kapitel 6 wird daher eine wellen-optische Optimierung der Abstrahlcharakteristik vorgestellt.

- **Adaption auf den Betrachtungsabstand**

Die longitudinale Ausdehnung der 3D-Stereozone ist durch die Barrieregeometrie vorgegeben und deckt für die Prototypische Anzeige 1 nicht den gesamten geforderten Betrachtungsabstandsbereich ab. Mit einer Zunahme der Anzeigenbreite, wie sie für die finale Anzeige angestrebt wird, vergrößert sich die Problematik weiter. Es wird daher notwendig sein, die 3D-Stereozone auf den Betrachtungsabstand anzupassen, um insbesondere eine störungsfreie laterale Adaption in Betrachtungsabständen außerhalb des idealen Abstandes zu ermöglichen. Die Abstandsadaption bildet den Schwerpunkt des folgenden Kapitels.

4.5 Probandenstudie im Fahrsimulator zur Evaluierung der Zielerreichung

Die Evaluierung der Zielerreichung stellt den letzten Teil im Entwicklungsprozess einer autostereoskopischen Anzeige dar, wie er in dieser Arbeit angewendet wird. Sie schließt den Zyklus eines Entwicklungsdurchlaufs und gibt Rückmeldung über den Grad der Zielerreichung. Bisher wurde die Anzeigefunktion und Abbildungsfunktion bestimmt, welche die optische Zielfunktion erfüllen sollen und diese als Prototypische Anzeige 1 umgesetzt. Die messtechnische Auswertung der Prototypischen Anzeige 1 stellte bereits fest, dass die aus der Zielvorgabe abgeleiteten objektiven Kriterien der optische Zielfunktion in einigen Punkten nicht erreicht wurden. Zum Ausgang der Probandenstudie wurde daher davon ausgegangen, dass die Prototypische Anzeige 1 die gestellten Anforderungen für die Verwendung als 3D-Kombiinstrument noch nicht vollständig erfüllt.

Dennoch sollten die bisher getroffenen Entscheidungen und der Grad der Zielerfüllung durch eine subjektive Überprüfung im Rahmen einer Probandenstudie im dynamischen Fahrsimulator für die Prototypische Anzeige 1 abgeprüft werden.

Die Planung und Leitung der Versuchsdurchführung erfolgte durch den Autor der Arbeit. Die Formulierung des Fragebogens, die Befragung der Probanden und die Auswertung des Fragebogens wurde durch das *Customer Research Center (CRC)* der Daimler AG unterstützt, womit sichergestellt wurde, dass die gezogenen Schlüsse valide und statistisch signifikant sind.

4.5.1 Ziel des Versuchs

Der Probandenversuch im Fahrsimulator hatte drei Zielsetzungen, aus denen sich die folgenden Fragestellungen ergeben haben:

1. Ziel: Absicherung der technischen Qualität

Werden die messtechnisch festgestellten Einschränkungen in Form von einem hohem Crosstalk, einer kleinen 3D-Stereozone und Helligkeitssprüngen in einer normalen Nutzungssituation sichtbar und falls ja, wie störend werden diese von den Fahrern empfunden?

2. Ziel: Akzeptanz der Innovation 3D-Kombiinstrument

Wie wird die Innovation des 3D-Kombiinstrumentes aus Sicht der Nutzer bewertet? Schafft es die 3D-Anzeige bei den Kunden einen emotionalen Mehrwert zu stiften?

3. Ziel: Erhebung von Daten zur Optimierung des Systems

Welche Rückmeldungen zur Gestaltung gibt es aus Sicht der Kunden und gibt es Personenmerkmale (wie Körpergröße oder Pupillenabstand), die das Auftreten von Störungen begünstigen?

Im Rahmen dieser Arbeit wird hauptsächlich der erste Punkt behandelt, die zwei weiteren werden nur in Ausschnitten besprochen. Eine vollständige Versuchsauswertung findet sich im Anhang A der Arbeit.

4.5.2 Versuchsplanung und Ablauf

Zur Realisierung von typischen realitätsnahen Fahrsituationen wurde die Probandenstudie im dynamischen Fahrsimulator der Daimler AG in Sindelfingen durchgeführt. In diesem besteht die Möglichkeit, die fahrdynamischen Kräfte, die in typischen Situationen auf einen Probanden einwirken, zu simulieren. Dies ist insbesondere wichtig, da bereits in der messtechnischen Untersuchung festgestellt wurde, dass viele Störungen erst bei bestimmten Kopfgeschwindigkeiten auftreten.

Versuchsentwurf

Für die Festlegung des Versuchablaufs musste als die Frage geklärt werden, ob der Testproband eine vorgegebene Teststrecke abfährt, ohne von außen beeinflusst zu werden, um das Verhalten des 3D-Kombiinstrumentes während seines natürlichen Fahrverhaltens zu testen oder ob Situationen künstlich herbeigeführt werden sollen, bei denen das System von Headtracking und Anzeige vermeintliche Schwierigkeiten bekommen kann, um die Auswirkungen des Auftretens dieser zu evaluieren.

Ein zu starkes Provozieren kritischer Situationen erschwert die Evaluierung des Entwicklungsstandes bei normaler Nutzung. Es wurde sich daher dafür entschieden, eine Zusammenstellung von den drei Fahrumgebungen „Stadt“, „Überlandfahrt“ und „Autobahn“ zu erstellen, die nur durch wenige künstliche Fahrmanöver angereichert wurden. Der Proband fuhr daher über weite Strecken unbeeinflusst durch äußere Vorgaben.

Die Gesamtstrecke betrug virtuelle 65 km, von der ungefähr 10% in einer Stadtumgebung gefahren wurde und der Rest zu gleichen Anteilen auf der Landstraße und auf der Autobahn. Die unterschiedlichen Umgebungssituationen unterscheiden sich durch die erlaubte Höchstgeschwindigkeit, das Vorkommen von Kreuzungen in Verbindung mit den gültigen Vorfahrtsregelungen, der Möglichkeit des Überholens und des Auftretens von (simuliertem) Gegenverkehr. Dies wiederum beeinflusst die Kopfbewegung zum Beispiel bei einer Rechts-vor-Links Kreuzung oder einem Schulterblick beim Überholen. Die Gesamtdauer der Fahrt im Simulator betrug zwischen 40 und 50 Minuten.

Während der Fahrt wurden vom Probanden die folgenden Manöver gefordert oder provoziert:

- Kreuzung mit Vorfahrtsregelung
- Überholmanöver
- Ablesen von Werbeschildern am Straßenrand
- Bedienung des Kombiinstruments (Ändern des Tachos, Ablesen des Tankfüllstandes, Raussuchen einer Telefonnummer)
- Dynamischer Spurwechsel mit Ablesen der Geschwindigkeit im Kombiinstrument

Zusätzlich wurden situationsabhängige Warnhinweise eingeblendet, auf welche der Proband in einigen Fällen durch Tastendruck am Lenkrad zu reagieren hat. Der Proband wurde somit in Situationen versetzt, in denen er während der Fahrt kurz oder auch länger auf das Kombiinstrument blicken muss.

Jeder Proband fuhr den Großteil der Strecke mit einer stereoskopischen Anzeige auf dem Kombiinstrument, die jedoch ungefähr für ein Viertel der Strecke auf eine monoskopische Darstellung umgeschaltet wurde.

Eine untergeordnete Fragestellung war hierbei, ob Indikatoren festgestellt werden können, die aussagen, dass sich die Zeit zum Ablesen sicherheitskritischer Elemente auf der Anzeige durch die stereoskopische Darstellung verlängert. Hauptsächlich galt der Wechsel zwischen monoskopischer und stereoskopischer Darstellung jedoch dem Vergleich der Wirkung einer Anzeige mit und ohne Tiefe.

Des Weiteren wurden zwei unterschiedliche Designs der dargestellten Kombiinhalte geschaffen, um den Einfluss der Gestaltung der Inhalte auf das Gesamturteil der Funktionalität einer Anzeige mit Tiefe abschätzen zu können.

Fahrsimulator

Durchgeführt wurde der Versuch am dynamischen Fahrsimulator der Daimler AG in Sindelfingen. Hierbei handelt es sich um einen der weltweit modernsten Simulatoren für fahrdynamische Untersuchungen.

Dieser besteht wie in Abbildung 4.41 dargestellt aus einer Kabine mit einem Durchmesser von ungefähr 10 m, die auf einem aktuatorgetriebenen Dreibein montiert ist, das wiederum auf einem linear verfahrbaren Schlitten steht. Dieser Aufbau ermöglicht es, Fahrdynamiken zu erzeugen, deren auf den Probanden wirkende Kräfte bei typischen Spurwechselmanövern



Abbildung 4.41

70% der real auftretenden Kräfte entsprechen. Die Simulatorkabine ist so dimensioniert, dass ein vollständiges Fahrzeug in ihr platziert werden kann. In diesem Versuch handelte es sich dabei, wie in Abbildung 4.42 dargestellt, um eine Mercedes S-Klasse der Baureihe W221. Die Kabine besitzt eine 360° Leinwand, auf die eine vollständige computergenerierte Rundumsicht projiziert wird. Die Spiegel des Fahrzeugs wurden durch Monitore ersetzt, wodurch ein hoher Grad der Immersion des Fahrers erreicht wird. Zur besseren Realisierung von Querbeschleunigungen wurde das Fahrzeug orthogonal zum Schlitten innerhalb der Kabine ausgerichtet.

Versuchsaufbau

Zur Evaluierung der Zielerreichung der Prototypischen Anzeige 1, wurde der im vorangegangenen Abschnitt 4.4.1 beschriebene Aufbau in ein realitätsnahes Modell einer S-Klasse integriert. Um die prototypische 10,26"-Anzeige samt Ansteuerungselektronik in das Modell zu integrieren wurde die Instrumententafel modifiziert. Der Steuerungsrechner wurde im Kofferraum verbaut. Das Headtracking System zur Steuerung der Barriere war ebenfalls identisch zum vorherigen Laboraufbau der Prototypischen Anzeige 1.



Abbildung 4.42

Die Kamera wurde mittig auf der Anzeige montiert. Da das Fahr simulatormodell zum Abgriff der Lenkbewegungen mit einem modifizierten Lenkrad mit starrer Achse ausgestattet ist, musste aus dem Lenkradkranz das obere Viertel entnommen werden, um eine freie Sicht der Headtracking Kamera auf den Fahrer zu garantieren. Die Abbildung 4.43 zeigt die Integration der verbauten Anzeige, HTS-Kamera und das modifizierte Lenkrad im Fahrzeugmodell vor dem Hintergrund der Projektionsleinwand.

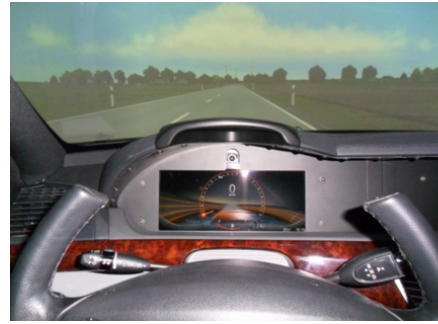


Abbildung 4.43

Dargestellte Inhalte

Die dargestellten Inhalte orientieren sich im Design an vorhandenen monoskopischen Kombiinstrumenten, wurden jedoch im Rahmen der Umsetzung als stereoskopische Inhalte künstlerisch angepasst. Sie entsprechen dem im Kapitel 2 beschriebenen Konzept 1. Im Vergleich zu den monoskopischen Vorlagen lag das besondere Augenmerk auf der Erstellung neuer Hintergründe, die ausreichende Struktur besitzen müssen, um eine Disparität und somit Tiefe wahrnehmen zu können. In Abbildung 4.44 sind die zwei unterschiedlichen Hintergründe dargestellt die im Versuch zur Anwendung kommen. Hier wurde bei der ersten Darstellung (links) ein offener Hintergrund mit Horizont gewählt, der einen klar begrenzten Bereich gleich einer Bühne schafft, auf dem die funktionalen Inhalte präsentiert werden. Der zweite Hintergrund (rechts) orientiert sich eher an bekannten physischen Kombiinstrumenten, die ähnlich einer Röhre den Raum zum Rand begrenzen. Für eine bessere Wahrnehmung von Tiefenebenen wurden Lamellen geschaffen, die sich mit zunehmender Tiefe verjüngen. Von der Farbgebung ist dieser Hintergrund dunkler gehalten. Die bedienbaren Menüs und Inhalte sind unabhängig vom Hintergrund und befinden sich wie dargestellt auf drei Rundinstrumenten mit einer zentralen Hauptanzeige. Hier wird hauptsächlich die Geschwindigkeitsanzeige dargestellt. Bei Bedienungsaufgaben wird jedoch ein Menü eingeblendet und bei Navigationsaufgaben auf eine Darstellung mit räumlichem Zeiger umgeschaltet.

Die umgesetzten funktionalen Inhalte orientieren sich an den vorgegebenen Aufga-

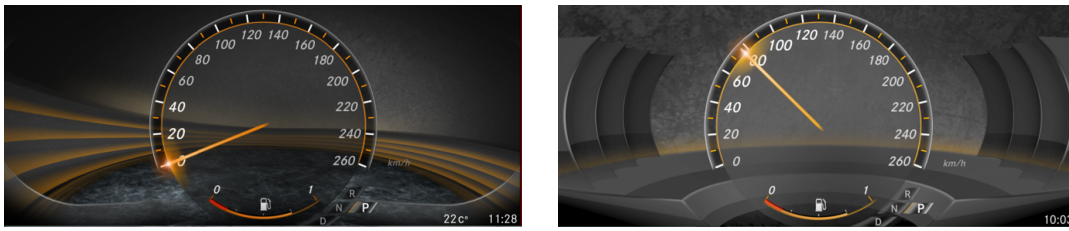


Abbildung 4.44: Im Probandenversuch wurden bedienbare Inhalte mit zwei unterschiedlichen Hintergründen verwendet

ben, die ein Proband zu erfüllen hat und stellen nicht den vollen Funktionsumfang eines normalen Kombiinstruments dar.

Die Bedienung der Inhalte erfolgt über das Tastenfeld am Lenkrad, alle eingeblendeten Informationen wie Geschwindigkeit sind der Fahrsituation entsprechende Werte, die vom Simulator generiert werden.

Messtechnik

Die hauptsächliche Datenerhebung zur Evaluierung der Anzeige erfolgt durch Befragung der Probanden. Darüber hinaus werden eine Reihe objektiver Daten während jeden Durchlaufs erfasst.

Alle Daten über den Fahrzeugzustand, wie Geschwindigkeit, Lenkwinkel und sämtliche Tastendrucke am Lenkrad werden aufgezeichnet. Zusätzlich wird erfasst, in welchem Modus (ausgewählte Menüebene, Hintergrund, etc.) sich das Kombiinstrument befindet. Der Zustand des Kombiinstruments wird an bestimmten Punkten der Strecke auf Ausgangszustände zurückgesetzt, sodass jeder Proband die gleiche Ausgangslage bei aufgerufenen Bedienaufgaben vorfindet. Die Fahrzeugdaten und Kombiinstrumentzustände werden über simulierte CAN-Bus Systeme in den Führungsstand des Fahrsimulators übertragen und dort gespeichert.

Während der Fahrt wird der Proband durch mehrere Kameras im Fahrzeug gefilmt. Dies ermöglicht es im Nachhinein, aufgezeichnete Daten zur Kopfposition und Dynamik visuell zu verifizieren und während der Fahrt den Zustand des Probanden zu überwachen.

Die wichtigste messtechnische Datenerhebung ist jedoch die Erfassung der Kopfposition und der Geschwindigkeit. Hierzu wird die vom HT-System, bestehend aus der Firefly MV Kamera mit einer aktiven IR-Beleuchtung, berechneten Kopfpositionen

für jedes Fahrmanöver gespeichert. Es ist somit möglich, nachzuvollziehen, ob der Proband in jeder Situation von der Kamera erfasst wurde und die Barriere ordentlich geschaltet hat. Kann während der Fahrt die Kopfposition nicht mit ausreichender Sicherheit bestimmt werden, geht die stereoskopische Darstellung innerhalb weniger Sekunden durch kontinuierliche Reduzierung der Tiefe in eine monoskopische Darstellung über. Auf gleiche Weise wird bei valider Position die Tiefe wiederhergestellt. Die Kamera läuft mit einer Bildwiederholfrequenz von 60 Hz, im gleichem Takt wird die Kopfposition erfasst. Auf eine Aufzeichnung des Kamerabildes wurde verzichtet, da dies in Vorversuchen zu einer Erhöhung der Latenzzeit führte.

Da die Erfassung der Kopfposition mit einer Monokamera bekannterweise eine hohe Ungenauigkeit im Betrachtungsabstand aufweist, wurde ein zweites Kopferfassungssystem in Form des Laserscanners „Laserbird 2“ der Firma *Ascension Technology Corp* eingesetzt. Dieses besteht aus einem kabelgebundenen Sensor, der vom Probanden seitlich am Kopf getragen wird. Der Laserscanner selbst war im Innenraum oberhalb der Beifahrertür montiert.

Die Genauigkeit der Kopfposition wird vom Hersteller im mm Bereich angegeben. Dies bezieht sich jedoch auf die Genauigkeit der Sensorposition. Die Umrechnung auf den Nasenwurzelpunkt erfolgt durch Addition fester Offsets, die nicht individuell für jeden Probanden ermittelt wurden. Dadurch sinkt die Genauigkeit der Kopfposition und wird mit mindestens $\pm 20mm$ abgeschätzt.

Probanden

Die Probanden des Versuchs wurden durch das professionelle Probandenmanagement der Daimler AG aus eigenen Datenbanken ausgewählt. Es wurden insgesamt 83 Probanden befragt, woraus sich 77 auswertbare Datensätze ergaben (6 Probanden wurden auf Grund technischer Probleme während des Versuchs, Vorabwissen zum Versuch oder auf Grund unplausibler Antworten ausgeschlossen). Von den 77 Probanden waren 51% weiblich und 49% männlich. Die Altersstruktur erstreckt sich über die gesamte Spanne von unter 25 bis über 65 Jahren. Mit 59% der Teilnehmer war der Großteil externe Probanden, der Rest waren Konzernangehörige der Daimler AG. Weitere erfasste Daten zur Altersstruktur, jährlicher Fahrleistung und gefahrene Fahrzeugmarke sind im Anhang zu finden.

4.5.3 Versuchsdurchführung

Die Versuchsdurchführung gliederte sich in die drei Abschnitte der Vorbesprechung, der Versuchsfahrt und der Nachbesprechung.

Vorbesprechung

In der Vorbesprechung wurde der Proband über den anstehenden Versuch informiert, ohne dass er darauf hingewiesen wird, welche Arten von Störungen auftreten können.

Im Anschluss wurde mit Hilfe des Sehtestgeräts „Rodatest 300“ der Firma Vistec AG die Sehstärke und die Fähigkeit stereoskopische Tiefe wahrnehmen zu können getestet. Das Gerät bietet hierzu eine eigene Testroutine. Zudem wurde der intraokulare Pupillenabstand mit dem Gerät „PM-600“ der Firma Nidek gemessen.

Die Vorsprechung endete mit dem Ausfüllen eines Fragebogens, in dem neben Personenmerkmalen wie Größe und Brillenträger auch die Erwartung an ein 3D-Kombiinstrument (ohne dies zuvor gesehen zu haben) und allgemeine Vorerfahrung im Bereich von 3D-Darstellungen erfasst wurden.

Versuchsfahrt

Für die Versuchsfahrt wurde der Proband zum Fahrzeugmodell im Fahrsimulator geführt und mit dem Messsensor ausgestattet. Es folgte eine Erläuterung der Darstellung des Kombiinstrumentes und eine Einführung in die Bedienmöglichkeiten dieses. Während der Einführung war das Kombiinstrument im stereoskopischen Modus.

Am Ende des Instruktionsteils wurde der Proband zu seinem ersten Eindruck befragt, alle freien Äußerungen wurden vom Versuchsleiter vermerkt.

Im Anschluss verließ der Versuchsleiter den Fahrsimulator und begibt sich in den Kontrollstand. Während der gesamten Fahrt bestand die Möglichkeit über eine Gegensprechanlage mit dem Proband zu kommunizieren. Der Proband konnte zu jedem Zeitpunkt gemachte Beobachtungen an den Versuchsleiter melden, die dieser protokollierte.

Zum Beginn der Fahrt wurde der Proband gebeten, die Anzeige in den Kategorien der Erkennbarkeit, Schärfe der Darstellung, Wertigkeit der Anzeige, Qualität der Grafiken, Hintergrundbild und die Anzeige insgesamt in fünf Abstufungen zwischen

sehr schlecht und sehr gut zu bewerten.

Während der Fahrt durchlief der Proband die zuvor aufgeführten Manöver. Nach jedem dieser Manöver wurde der Proband gebeten, die Anzeigenqualität auf den letzten Kilometern auf einer fünfstufigen Skala zu bewerten.

Am Ende der Fahrt wurde der Proband befragt, ob er die folgenden vier Störungen wahrgenommen hat: Helligkeitsschwankungen, Unschärfen, „springendes“ Bild und Sichtbarkeit von Doppelbildern. Hat der Proband diese schon aus eigenem Antrieb zuvor erwähnt, wird er nicht erneut gefragt. Zuletzt wurde der Versuchsteilnehmer zu der Akzeptanz der von ihm beobachteten Störungen der vier genannten Punkte und seinen freien Nennungen befragt. Hierbei bewertete er diese in den Kategorien akzeptabel, gerade noch akzeptabel und nicht akzeptabel.

Nachbefragung

Nach der Versuchsfahrt erfolgte außerhalb des Simulators eine Nachbefragung in Form eines auszufüllenden Fragebogens. Der Proband wurde aufgefordert, die Anzeige zu bewerten, indem er vorgegebene Aussagen als zutreffend oder nicht zutreffend bewertet. Zuletzt wurde er zu Unterschieden zwischen der stereoskopischen und monoskopischen Darstellung befragt. Alle Fragebögen sind detailliert im Anhang A dieser Arbeit zu finden.

4.5.4 Auswertung

Die Auswertung konzentriert sich auf die Bewertung der Zielerreichung der Prototypischen Anzeige 1. Hierzu werden die Ergebnisse des Probandenversuchs aus den zwei Versuchszielen „Absicherung der technischen Qualität“ und „Akzeptanz der Innovation 3D-Kombiinstrument“ verwendet und durch zusätzliche gemessene Daten objektiviert.

Auswertung: Absicherung der technischen Qualität

In Abbildung 4.45 ist das Ergebnis der Befragung vor Start der Versuchsfahrt dargestellt, nachdem der Betrachter sich einen ersten Eindruck machen konnte. Die ersten fünf Punkte beziehen sich direkt auf die Anzeige, die letzten drei auf die dargestellten Inhalte. Es ist jedoch anzumerken, dass mit dem durchgeführten Versuch keine

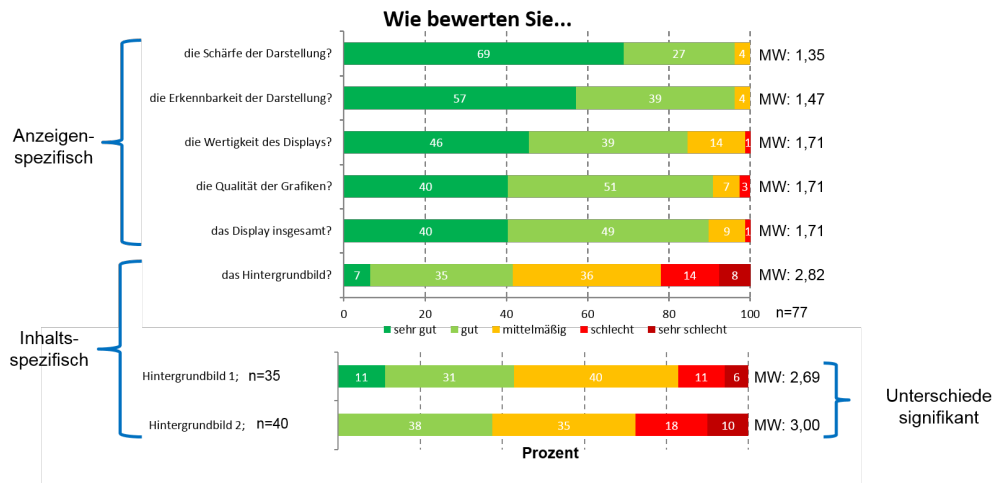


Abbildung 4.45: Bewertung der Anzeige vor Beginn der Versuchsfahrt und nach der Instruktion durch den Versuchsleiter

exakte Trennung zwischen den Inhalten und der Anzeige gezogen werden kann. Beides beeinflusst sich gegenseitig.

Es ist zu erkennen, dass die Anzeige von annähernd 90% der Probanden mit gut bis sehr gut bewertet wird. Am besten wird die Schärfe der Anzeige bewertet. In der Gesamtbewertung beurteilen nur 9 Prozent die Anzeige mit mittelmäßig und 1 Prozent mit schlecht.

Die dargestellten Inhalte werden dagegen deutlich schlechter bewertet. In der Summe aller Probanden bewerten nur 42% der Probanden das Hintergrundbild mit gut oder sehr gut.

Im Vergleich der zwei verschiedenen Hintergründe ist ein statistisch signifikanter Unterschied in der Bewertung festzustellen. Das Hintergrundbild 1 wird besser bewertet, als das Hintergrundbild 2. Weitere Auswertungen zeigen jedoch keine signifikanten Unterschiede zur Bewertung der Anzeige abhängig vom dargestellten Hintergrundbild. Die Anzeige als Ganzes wird unabhängig vom Inhalt gut bewertet. Während der Fahrt wurde nach verschiedenen Sektionen, in denen die oben beschriebenen Manöver durchfahren worden sind, der Proband aufgefordert, die Anzeige zu bewerten.

In Abbildung 4.46 sind die Ergebnisse der Bewertung der Anzeige während der Fahrt

dargestellt. Es zeigt sich, dass die gute Bewertung der Anzeige mit stereoskopischer

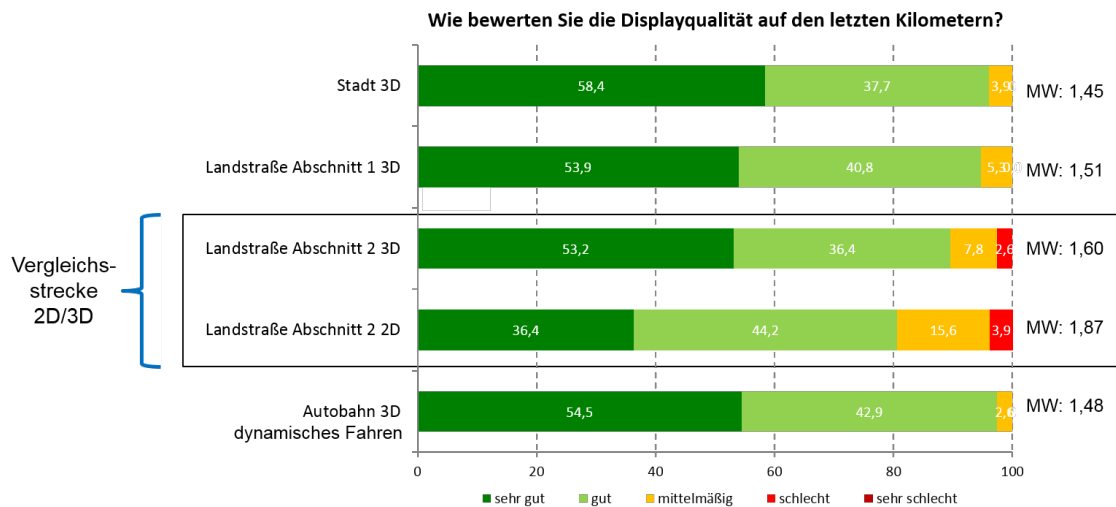


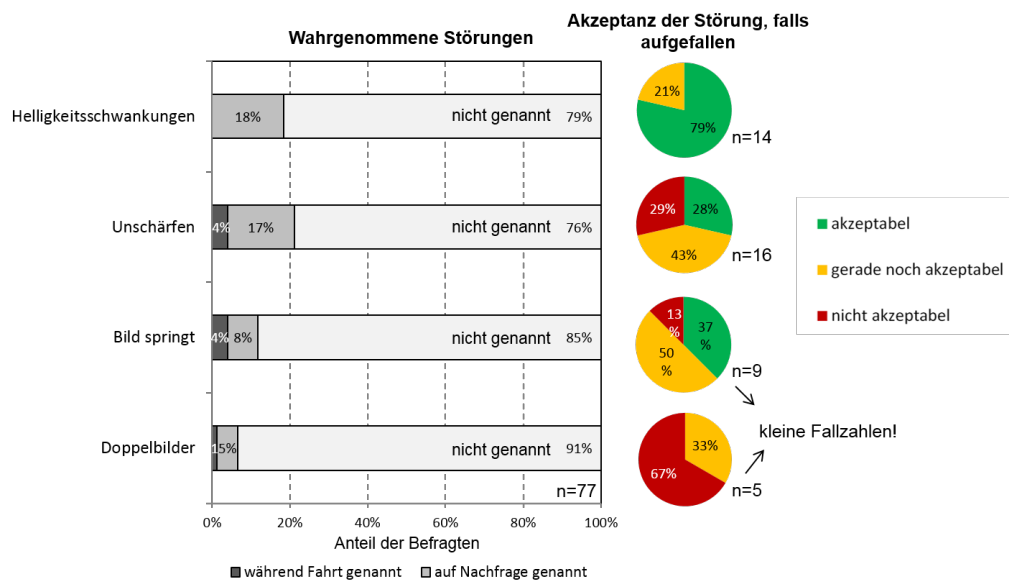
Abbildung 4.46: Bewertung der Anzeige während der Fahrt

Darstellung vor der Fahrt auch während der Fahrt nicht signifikant abnimmt. Die gefahrenen typischen Fahrmanöver führten nicht dazu, dass die Bewertung signifikant variierte.

Eine Ausnahme bildet hierbei die Strecke, welche mit monoskopischer Darstellung gefahren wurde. Dabei fuhren die Probanden einen identischen Streckenabschnitt auf der Landstraße sowohl in 3D, als auch in 2D. Im Vergleich dieser Streckenteile gibt sich eine signifikant schlechtere Bewertung der 2D-Darstellung. Freie Nennungen legen Nahe, dass dies hauptsächlich auf den Wunsch einer erneuten 3D-Darstellung zurückzuführen ist. Die 3D-Darstellung wird gegenüber der 2D-Darstellung bevorzugt.

In Abbildung 4.47 sind die wahrgenommenen Störungen dargestellt, die Probanden während der Fahrt beobachtet haben. Die Auswertung beschränkt sich auf die vier vorher definierten und erwarteten Störungen der Helligkeitsschwankungen, der Unschärfen, des Bildspringens und der Doppelbilder. Durch freie Nennungen sind keine gehäuften weiteren Störungen von den Probanden genannt worden.

Dunkelgrau ist der Prozentsatz an Probanden dargestellt, die während der Fahrt aus freien Stücken diese Störungen erwähnten. Im mittleren Grauton sind die Nennungen an Störungen, die ein Proband auf Nachfrage angibt, beobachtet zu haben.



Abbildungung 4.47: Wahrgenommene Störungen während der Fahrt

Die restlichen Probanden haben keine Störungen wahrgenommen.

Es zeigt sich, dass nur wenige Probanden Störungen wahrgenommen haben. Am häufigsten wurden Unschärfen und Helligkeitsschwankungen genannt.

Wurden Störungen beobachtet, wurde der Proband gebeten, diese mit akzeptabel, gerade noch akzeptabel oder nicht akzeptabel zu bewerten. Es zeigt sich, dass die Helligkeitsschwankungen durchgängig als akzeptabel bewertet werden, die Unschärfen jedoch von einem Drittel der Probanden, welche diese beobachteten, als nicht akzeptabel angesehen werden. Doppelbilder und springende Bilder wurden selten wahrgenommen, aufgrund dessen die Fallzahlen zu gering sind, um eine Akzeptanzaussage zu treffen.

Auswertung: Akzeptanz der Innovation 3D-Kombiinstrument

Zur Bewertung der Akzeptanz der „Innovation des 3D-Kombiinstrument“ benotete der Proband das Zutreffen der in Abbildung 4.48 dargestellten Aussagen. Die Akzeptanz, bewertet von allen Probanden (vgl. Abb. 4.48, links), ist gut bis sehr gut, das System wird vor allem als innovativ, hochwertig und passend zu Mercedes-Benz wahrgenommen. Das System wird nicht von allen Befragten als sinnvoll erachtet und es gibt zum Teil Bedenken, dass das System noch nicht ausgereift ist und vom Fahren ablenken könnte.

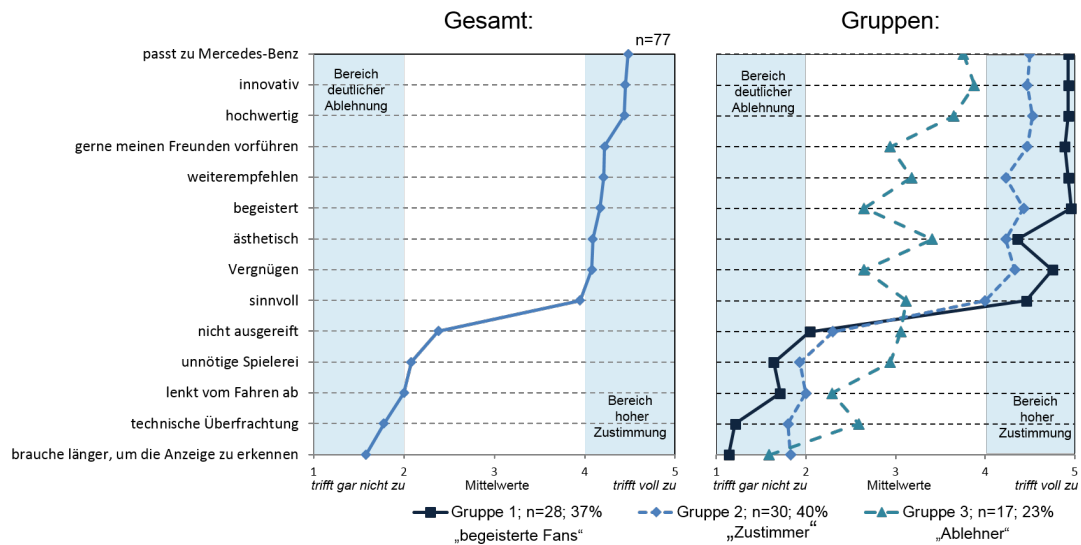


Abbildung 4.48: Akzeptanz der Innovation 3D-Kombiinstrument

Eine Akzeptanzgruppenbildung (Ward-Methode) ergibt drei interpretierbare Gruppen (vgl. Abb. 4.48, rechts), welche die 3D-Anzeige unterschiedlich beurteilen. In der Gruppe 1 (begeisterte Fans) gibt es signifikant mehr technikaffine Personen, ansonsten unterscheiden sich die Gruppen in personenbezogenen Merkmalen nicht signifikant voneinander.

Die Gruppen 1 und 2 (Zustimmer) bewerten die Anzeige insgesamt sehr positiv. Dagegen bewertet die Gruppe 3 (Ablehner), welche mit 23% in der Minderheit sind, die Innovation 3D-Kombiinstrument kritischer. Hierbei wird gegenüber den anderen Gruppen eine technische Überfrachtung gesehen und insgesamt der Sinn der Innovation bezweifelt.

Um einen Eindruck zu bekommen, welchen Einfluss die Versuchsfahrt auf die Einschätzung der Anzeige hat, wurde der Proband vor der Fahrt und nach der Fahrt befragt. Bei der Befragung vor der Versuchsfahrt wurde der Proband nur anhand einer schriftlichen Beschreibung über die Anzeige informiert. Nach der Versuchsfahrt hat der Proband einen echten Eindruck von der Anzeige erlangt. Das Ergebnis ist in Abbildung 4.49 dargestellt. Die Einschätzung vor der Fahrt unterscheidet sich in keinem Punkt von der Bewertung nach der Fahrt. Das 3D-Kombiinstrument erfüllte somit die Erwartungen der Probanden.

In der Nachbefragung wurden die Probanden aufgefordert, wie sie die stereoskopi-

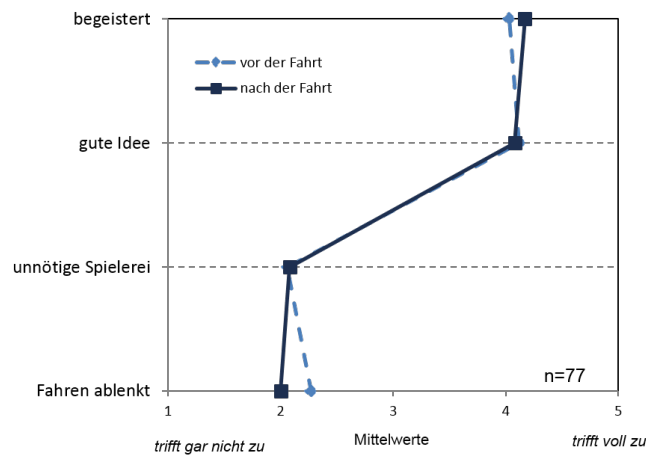


Abbildung 4.49: Vergleich der Erwartung und der Bewertung nach der Fahrt

sche Darstellungsart im Vergleich mit der monoskopischen bewerten. Das Ergebnis ist in Abbildung 4.50 dargestellt. Die Mehrheit der Probanden (78%) bewertet die

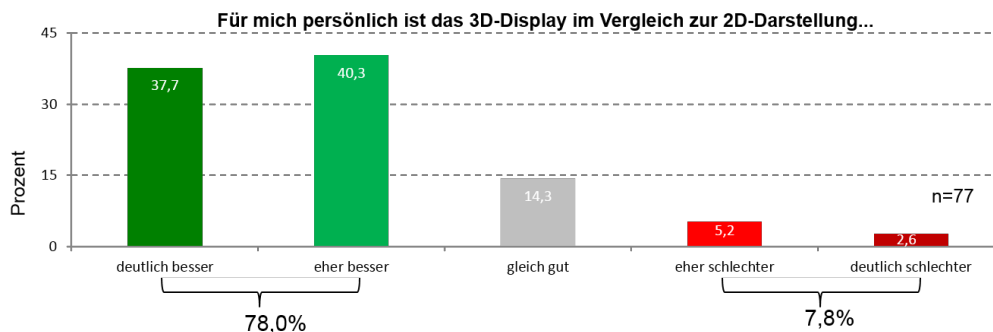


Abbildung 4.50: Vergleich 2D/3D-Darstellung

stereoskopische Darstellung besser als die monoskopische Darstellung. Schlechter bewerten die Darstellung 7,8% der Probanden, der Rest ist unentschieden. In den freien Nennungen wird als positive Eigenschaften ein hochwertiger Eindruck, eine bessere Ablesbarkeit und eine übersichtlichere Darstellung genannt. Als negative Punkte werden Unschärfen und eine gefühlte größere Anstrengung für die Augen genannt. Die Polarisierung in zwei Gruppen deckt sich sowohl mit der Einteilung der Akzeptanzgruppen im Abschnitt zuvor als auch mit vorangegangenen Untersuchungen [1].

Ein 3D-Kombiinstrument wird von einer Minderheit von 10-20% abgelehnt, jedoch von einer Mehrheit als bereichernde Innovation angesehen.

Daten zur Objektivierung der Probandenbefragung

In der vorangegangenen objektiven Untersuchung der Prototypischen Anzeige 1 wurde bereits festgestellt, dass die 3D-Stereozone in ihrer longitudinalen Ausdehnung nicht die optische Zielfunktion erfüllt und dass bei schnellen Kopfbewegungen Störungen auftreten können. Im Probandenversuch wurde daher die Kopfposition und -geschwindigkeit erfasst.

In Abbildung 4.51 ist die mittlere Kopfposition (Nasenwurzel) aller Probanden während einer Landstraßenfahrt dargestellt. Gemessen wurden diese mit dem Laserscanner. Die Fehlerbalken setzen sich aus der Messungenauigkeit aufgrund der Koordinatentransformation in das System der Nasenwurzel und der doppelten Standardabweichung der Position durch Bewegung zusammen. Auf der x-Achse ist der Abstand

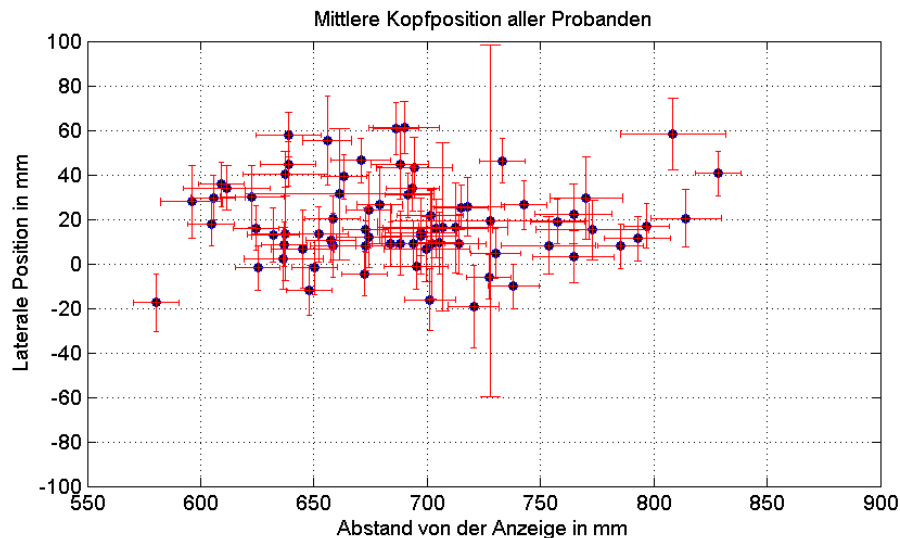


Abbildung 4.51: Kopfposition aller Probanden vor der Anzeige während einer Landstraßenfahrt

des Betrachters zur Anzeige dargestellt, die y-Achse entspricht der lateralen Position vor der Anzeige. Der Ursprung liegt zentral mittig auf der Anzeige.

Es ist zu erkennen, dass die meisten Probanden während der Fahrt ihre Kopfposition nur wenig verändern. Der mittlere Abstand liegt bei 690 mm, der minimale bei 580 mm und der maximale Abstand bei 830 mm. Der laterale Offset von 20 mm wird

bedingt durch die Einbaulage des Kombiinstruments und ist kein Messfehler.

Im Vergleich mit der gemessenen maximalen longitudinalen Ausdehnung der 3D-Stereozone der Prototypischen Anzeige 1 von 667-826 mm wird deutlich, dass die Probanden zum Teil in größeren Betrachtungsabständen saßen als von der 3D-Stereozone eigentlich abgedeckt werden. Der Betrachtungsbereich in dem lateral störungsfrei adaptiert werden kann ist sogar noch kleiner, wodurch sich das Problem bei lateralen Bewegungen verschärft. Eine signifikante Korrelation zwischen beobachteten Störungen und dem Betrachtungsabstand konnte aus den Versuchsdaten jedoch nicht nachgewiesen werden.

Der Anteil der Probanden, die Störungen beobachtet haben, ist im Hinblick auf die gemessenen Kopfpositionen und die Ausdehnung der 3D-Stereozone geringer als ursprünglich erwartet wurde. Ein Grund hierfür kann die Priorisierung des zentralen Anzeigenbereichs und eine Reduzierung der Tiefe zum Rand sein, wodurch sich die 3D-Stereozone effektiv vergrößert.

Als weitere Messgröße wurde die Kopfgeschwindigkeit der Probanden erfasst. Hierzu wurde aus den Headtrackingdaten die Geschwindigkeit zwischen zwei Datenpunkten, die mit 100 Hz aufgezeichnet werden, bestimmt. In Abbildung 4.52 ist eine statistische Verteilung der Kopfgeschwindigkeiten während des gesamten Versuchs aller Probanden dargestellt. Der Proband bewegt sich insgesamt sehr wenig, wodurch die mittlere Kopfgeschwindigkeit nur bei 7,5 mm/s liegt. Die meiste Zeit befindet sich der Proband annähernd in Ruhe. Eine bessere Aussage über das Auftreten von höheren Geschwindigkeiten ergibt sich, wenn wie in Abbildung 4.53 die Anzahl der Abschnitte mit einer bestimmten Geschwindigkeit kumuliert aufgetragen werden. Hieraus ist die Geschwindigkeit für das 95% Perzentil abzulesen (rot eingezeichnet). Dieses besagt, dass 95% der aufgetretenen Geschwindigkeiten unter 28 mm/s liegen. Die Geschwindigkeit für das 99% Perzentil liegt bei 87 mm/s. Nur ein Prozent der auftretenden Kopfgeschwindigkeiten lag im Versuch über 87 mm/s. Im Einzelfall können die Kopfgeschwindigkeiten jedoch Werte bis zu den zuvor angenommenen 300 mm/s annehmen. Die Ergebnisse des Probandenversuchs zeigen jedoch, dass es sinnvoll ist, das Augenmerk verstärkt auf Geschwindigkeiten unter 100 mm/s zu legen, da diese hauptsächlich auftreten.

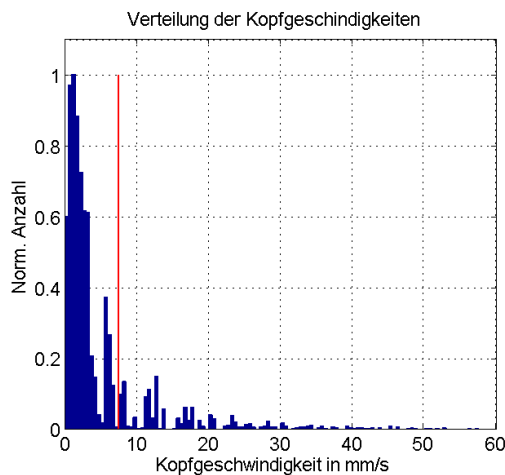


Abbildung 4.52: Verteilung der Kopfgeschwindigkeiten aller Probanden während der gesamten Testfahrt; Mittelwert rot eingezeichnet

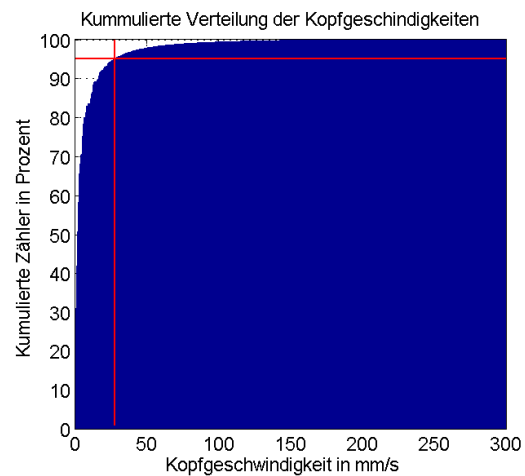


Abbildung 4.53: Kummulierte Anzahl der Kopfgeschwindigkeiten; 95% Perzentil in rot eingezeichnet

4.5.5 Diskussion des Probandenversuchs

Die Ergebnisse des Probandenversuchs bestätigen, dass die getroffenen Entscheidungen über die Auswahl der Technologie und den gemachten Einschränkungen bei der Umsetzung der Anzeige richtig waren. Die Anzeige wird von der Mehrheit der Probanden mit gut bis sehr gut bewertet.

Störungen wurden nur von wenigen Personen beobachtet und teilweise als akzeptabel eingestuft. Die technischen Einschränkungen haben so gut wie keinen Einfluss auf die Bewertung der Anzeige. Die Erwartungen an ein 3D-Kombiinstrument werden erfüllt und die Gesamtbewertung zeigt Zustimmungsraten, die in Übereinstimmung mit vorherigen Befragungen sind.

Von den beobachteten Störungen wurden Unschärfen und Helligkeitsschwankungen am meisten genannt, wovon die Unschärfen als größtes Problem bewertet werden. Im Vergleich mit der vorangegangenen messtechnischen Untersuchung der Prototypischen Anzeige 1 fällt die Bewertung besser aus als erwartet. Die Gründe können zum einen die langsamen Bewegungen der Probanden während der Fahrt und zum anderen die Priorisierung der zentralen Bereiche der Anzeige zur Darstellung von Tiefe sein, wodurch Probanden außerhalb der 3D-Stereozone weniger Störungen als

erwartet wahrgenommen haben.

Der Versuch zeigt auch, dass durch eine sorgfältige Gestaltung der Darstellung technische Unzulänglichkeiten teilweise kompensiert werden können.

Die beobachteten Störungen und deren Bewertung als teilweise nicht akzeptabel führen zu dem Ergebnis, dass das Ziel eines 3D-Kombiinstrumentes für den Einsatz im Automobil mit der Prototypischen Anzeige 1 noch nicht erreicht wurde. Zudem entspricht die Anzeigengröße noch nicht der Zielgröße. Es ist zu erwarten, dass die Störungen bei einer Vergrößerung der Anzeigefläche zunehmen würden.

Ob die beobachteten Störungen identisch zu den objektiv definierten Helligkeitssprüngen oder auch dem Übersprechen in Form von Crosstalk sind, ist nicht mit 100% Bestimmtheit zu sagen, da es sich um subjektive Bewertungen der Probanden handelt. Die Schlussfolgerung ist jedoch naheliegend.

Als Konsequenz aus dem Probandenversuch gilt es, die Anzeige weiterzuentwickeln und dabei das Übersprechen in Form von Crosstalk zu reduzieren, Helligkeitsschwankungen zu minimieren und den Betrachtungsabstandsbereich zu vergrößern. Dies deckt sich mit der objektiven messtechnischen Untersuchung der Anzeige, welche als Schlussfolgerung eine Adaption auf den Betrachtungsabstand und eine Optimierung der Abstrahlcharakteristik fordert und welche in den folgenden Kapiteln vorgestellt werden.

4.6 Zusammenfassung Kapitel 4

In diesem Kapitel wurde das inverse Problem für die Zielfunktion im idealen Betrachtungsabstand in Näherung der geometrischen Optik gelöst, in dem die Zusammenhänge zwischen der Barriereöffnung und dem Abstand der Barriere zum Bildgeber hergeleitet wurden. Hierbei wurde deutlich, dass für die gesetzte Nebenbedingung einer ausreichend großen Pixelgröße der Anzeige, um genügend Helligkeit zu erhalten, keine Lösung für die Auslegung der Barriere existiert, mit der die optische Zielfunktion erfüllt werden kann. Als Konsequenz wurde sich daher für den Kompromiss entschieden, eine schmalere horizontale Ausdehnung des Plateaus der Helligkeitsverteilung zu akzeptieren, um Helligkeitsschwankungen bei lateralen Bewegungen zu vermeiden. Die Subpixelgröße der Barriere, welche die dynamischen Eigenschaften

der Anzeige maßgeblich bestimmt, wurde so klein wie technisch herstellbar gewählt. Dies komplementierte die vollständige Definition der Abbildungsfunktion.

Die so über die Anzeige- und Abbildungsfunktion definierte autostereoskopische Anzeige wurde in Form der „**Prototypischen Anzeige 1**“ aufgebaut. Ziel war die experimentelle und visuelle Überprüfung der Zielerreichung der gesetzten qualitativen Anforderungen. Die notwendige Messtechnik zur weitgehendsten automatisierten Auswertung der optischen Eigenschaften der Anzeige wurde vom Autor softwaretechnisch in Matlab programmiert. Neben den statischen Eigenschaften der Anzeige, wie Größe und Lage der Stereozone, wurde ein Schwerpunkt bei der Auswertung auf die dynamischen Eigenschaften der Anzeige gesetzt. Hierbei wurden neue Messmethoden unter Verwendung eines Roboters und mehrerer Kamerasysteme entwickelt, um die Latenz des Gesamtsystems und die auftretenden Helligkeitsschwankungen bei dynamischen Bewegungen messen zu können.

Die messtechnische Auswertung der „Prototypischen Anzeige 1“ ergab, dass die gemessenen Helligkeits- und Crosstalkverläufe von den geometrisch-optisch simulierten abweichen, da die Abstrahlungscharakteristik der Anzeige durch **Beugungseffekte** deutlich beeinflusst wird. Die gemessene 3D-Stereozone der „Prototypischen Anzeige 1“, welche den „nutzbaren“ Raumbereich beschreibt, in dem ein stereoskopisches Bild wahrgenommen werden kann, ist mit einer maximalen lateralen Ausdehnung von 26 mm und eine longitudinale Ausdehnung von ± 50 mm deutlich kleiner als der geforderte Betrachtungsbereich. Zudem traten trotz einer bereits sehr niedrigen Gesamtlatenz von gemessenen 44 ms bei schnellen Kopfbewegungen wahrnehmbare Helligkeitsschwankungen und eine Abnahme des Stereokontrastes auf.

Um die Auswirkungen der quantitativ festgestellten Einschränkungen der Anzeige auf die wahrgenommene Qualität zu untersuchen, wurde ein **Probandenversuch im Fahrsimulator** durchgeführt, welcher das Ziel hatte das Maß der qualitativen Zielerreichung zu bestimmen. Hierzu wurde die „Prototypische Anzeige 1“ in einem dynamischen Fahrsimulator verbaut und durch 80 Probanden getestet, welche verschiedene Fahrmanöver durchführten und die Anzeige in stereoskopischer und monoskopischer Darstellung bewerteten.

Von den Probanden wurden hier hierbei Störungen in Form von Unschärfen (21%

aller Probanden nahmen diese wahr) und Helligkeitsschwankungen (18%) wahrgenommen. Während Unschärfen größtenteils als akzeptabel eingestuft wurden, bewerteten die Probanden die Helligkeitsschwankungen zu 29% als nicht akzeptabel. Trotz den beobachteten Einschränkungen bewerteten im **Gesamtergebnis** bereits **78% der Probanden** die Prototypische Anzeige 1 mit **gut oder sehr gut**. Dies bekräftigte die Wahl von dynamischen Parallaxebarrieren als zielführenden Technologieansatz.

Der Probandenversuch bestätigte damit die messtechnischen Untersuchungen darin, dass die hohen qualitativen Anforderungen mit dieser Anzeige noch nicht erreicht wurden. Folglich wurden **drei** wesentliche **Verbesserungsansätze** identifiziert: die Minimierung der Helligkeitsschwankungen bei lateraler Bewegung, die Vergrößerung der 3D-Stereozone in longitudinaler und lateraler Ausdehnung und die Verbesserung der stereoskopischen Eigenschaften, wie des Crosstalks.

5. Adaption von Parallaxebarrieren auf variable Betrachtungsabstände

Mit steigender Breite der Anzeige nimmt die longitudinale Ausdehnung der Stereozone ab, sodass es nicht mehr möglich ist einen stereoskopischen Betrachtungsabstandsbereich mit großer longitudinaler Ausdehnung abdecken zu können. Eine Lösung ist die longitudinale Adaption der Stereozone auf die Betrachterposition. In diesem Kapitel werden drei entwickelte Methoden vorgestellt, die es ermöglichen durch diskrete Anpassung des Barrierepitchs auf variable Betrachtungsabstände zu adaptieren. Im ersten Teil werden die Grundlagen hergeleitet und zwei Methoden experimentell umgesetzt und bewertet. Im zweiten Teil wird eine umfangreiche Simulation vorgestellt, die es ermöglicht, die zu erwartende Qualität aller drei Adaptionismethoden zu simulieren. Die Simulation wird verwendet, um die beste Adaptionismethode für die Zielvorgabe eines 3D-Kombiinstrumentes zu bestimmen.

Schon aus der einfachen geometrisch-optischen Betrachtung des Funktionsprinzips einer autostereoskopischen Anzeige wird ersichtlich, dass die 3D-Stereozone in ihrer Ausdehnung lateral und longitudinal beschränkt ist.

Im Kapitel 4 wurden Methoden präsentiert, wie mit einer dynamischen Parallaxebarriere der Betrachtungsbereich für laterale Bewegungen erweitert werden kann. Es wurde gezeigt, dass der Betrachter bei lateraler Bewegung die geringsten Störungen wahrnimmt, wenn er sich im idealen Betrachtungsabstand befindet, an dem die 3D-Stereozone ihre breiteste Ausdehnung hat.

In diesem Kapitel werden Möglichkeiten untersucht, die 3D-Stereozone für variable Betrachtungsabstände dynamisch zu erweitern und ihre laterale Ausdehnung zu maximieren. Das Ziel ist eine störungsfreie Wahrnehmung der stereoskopischen Anzeige über einen großen Bereich von Betrachtungsabständen!

Für autostereoskopische Anzeigen auf Basis von Parallaxebarrieren, wie sie in dieser

Arbeit thematisiert werden, existieren in der Literatur bisher keine beschriebenen Ansätze zur Adaption auf den Betrachtungsabstand! Für viele Anwendungen ist es einfacher, dass sich der Betrachter, wie bei tragbaren Spielekonsolen, in den idealen Betrachtungsabstand bewegt oder von vornherein ein anderer Technologieansatz gewählt wird. Aus Sicht des Autors, ist jedoch die Beschränkung der Bewegungsfreiheit durch einen limitierten Betrachtungsabstandsbereich ein Grund für die nur zögerliche Verbreitung von brillenlosen 3D-Anzeigen und den nach wie vor hohen Anteil von brillenbasierten stereoskopischen Technologien.

5.1 Grundlagen der Adaption auf den Betrachtungsabstand

5.1.1 Größe der statischen 3D-Stereozone

Die Adaption einer autostereoskopischen Anzeige auf variable Betrachtungsabstände wird notwendig, wenn die statische 3D-Stereozone die geforderten Betrachtungsabstände nicht abdeckt! Dies tritt auf, wenn entweder die Bandbreite der geforderten Betrachtungsabstände sehr groß ist oder die statische 3D-Stereozone in ihrer longitudinalen Ausdehnung klein gegenüber dem geforderten Betrachtungsabstandsbereich ist.

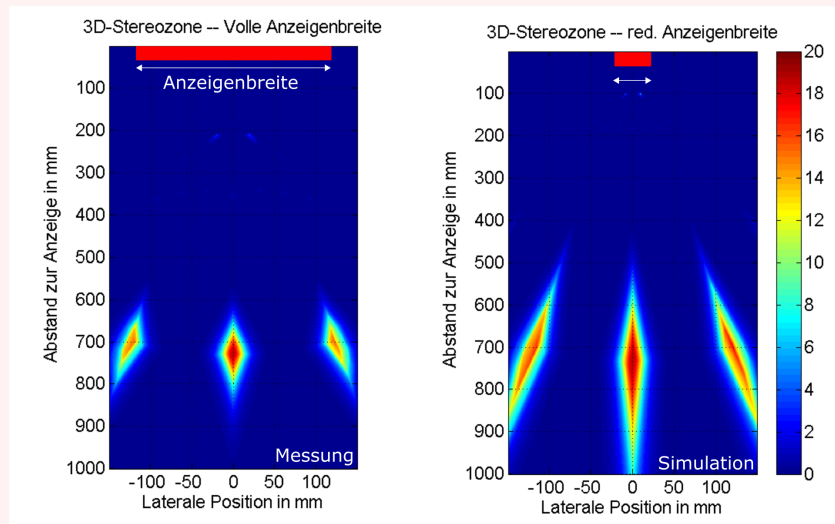
Die longitudinale Ausdehnung der statischen 3D-Stereozone ist unter anderem abhängig von der Größe der Barriereöffnung, der Pixelbreite und der Breite der Anzeige.

Eine Änderung der Pixel- oder Barriereöffnungsbreite mit dem Ziel, die Ausdehnung der 3D-Stereozone zu optimieren, führt jedoch zu einer Änderung der Abstrahlcharakteristik, was nicht gewünscht ist. Die einzige Möglichkeit die longitudinale Ausdehnung der 3D-Stereozone ohne Anpassung des idealen Betrachtungsabstandes zu vergrößern, ist die Verringerung der *Stereoskopischen Anzeigenbreite*.

Als stereoskopische Anzeigenbreite wird der Bereich bezeichnet, in dem auf einer Anzeige ein stereoskopisches Bild angezeigt wird. Dieser muss nicht zwingend mit der physikalischen Anzeigebreite übereinstimmen. Es besteht die Möglichkeit auf einer autostereoskopischen Anzeige nur im zentralen Anzeigebereich Objekte mit räumlicher Tiefe darzustellen und in den Randbereichen die Ansicht für das linke und

rechte Auge gleich zu wählen. Auftretendes Übersprechen in den Randbereichen bei Änderung des Betrachtungsabstands, welches die 3D-Stereozone verkleinern würde, wäre nicht als Störung wahrnehmbar.

Beispiel: Einfluss der Anzeigenbreite auf die 3D-Stereozone



Die *Prototypische Anzeige 1* aus Kapitel 4 hat eine Anzeigenbreite von 240 mm. Die gemessene longitudinale Ausdehnung der 3D-Stereozone mit Stereokontrast größer als 10:1 ergab einen Bereich von 667-795 mm.

Wollte man einen Betrachtungsbereich von 650-950 mm abdecken, müsste die stereoskopische Anzeigenbreite deutlich auf **45 mm** reduziert werden. Der Nutzen der räumlichen Anzeige würde spürbar eingeschränkt.

In der Regel wird jedoch angestrebt, die volle Anzeigenbreite als räumliche Anzeige zu nutzen. Die Reduzierung der Breite des stereoskopischen Anzeigebereichs durch Priorisierung des zentralen Bereichs der Anzeige bei Objekten mit größerer Tiefe stellt jedoch immer eine Möglichkeit dar, ein Gesamtsystem robuster gegenüber Störungen zu gestalten.

Ist der geforderte stereoskopische Betrachtungsabstandsbereich zu groß, um durch eine statische 3D-Stereozone abgedeckt werden zu können, muss eine dynamische Adaption auf die Betrachterposition erfolgen.

Eine solche Adaption für Anzeigen mit Parallaxebarriere findet sich bisher in keiner bekannten Anwendung und wurde bisher auch nicht beschrieben. Bekannte tragbare

Geräte aus der Unterhaltselektronik [3] besitzen eine schmale Anzeigenbreite, die eine Adaption auf den Betrachtungsabstand nicht notwendig macht. Zusätzlich wird bei dieser Art der Anwendungen davon ausgegangen, dass der Betrachter sich oder die Anzeige bewegt, um wieder einen geeigneten Abstand wiederherzustellen und eine störungsfreie Wahrnehmung zu erhalten.

Mit zunehmender Breite der autostereoskopischen Anzeige nimmt die longitudinale Ausdehnung der statischen 3D-Stereozone ab. Für Anzeigen im Automobil ist es nicht möglich den geforderten Betrachtungsabstandsbereich mit einer statischen 3D-Stereozone abzudecken. Es muss daher eine Adaption auf den Betrachtungsabstand erfolgen.

5.1.2 Adaption auf variable Betrachtungsabstände

Für die Adaption auf variable Betrachtungsabstände wird die Kopfposition des Betrachters durch geeignete Systeme erfasst und die Lage der 3D-Stereozone abhängig vom Betrachtungsabstand angepasst.

Die Adaption einer Anzeige auf variable Betrachtungsabstände ist in der Literatur nur für autostereoskopische „MultiView“ Systeme beschrieben [74]. Hierbei wird die Zuordnung der Ansichten zu einzelnen Pixeln unter einer Barriere- oder Linsenöffnung dynamisch angepasst. Die Methode beschreibt somit eine dynamische Anpassung der Anzeigefunktion. Die Abbildungsfunktion bleibt unverändert.

Für autostereoskopische Anzeigen basierend auf Parallaxebarrieren mit zwei Ansichten existieren in der Literatur keine Ansätze zur Adaption auf den Betrachter. Eine Adaption durch Änderung der Pixelzuordnung ist bei dieser Art der Anzeige nicht möglich. Da nur zwei Pixel unter einer Barriereöffnung liegen, kann maximal die Ansicht invertiert werden. Eine Adaption auf den Betrachtungsabstand kann bei einer Parallaxebarriere mit zwei Ansichten daher nicht durch die Anpassung der Anzeigefunktion geschehen, sondern muss durch Änderung der Abbildungsfunktion erfolgen.

5.1.3 Parameter zur Beeinflussung des Betrachtungsabstandes von Parallaxebarrieren

Zur Adaption auf variable Betrachtungsabstände durch Änderung der Abbildungsfunktion sollen kurz die grundlegenden Formeln wiederholt und präzisiert werden. Die Formel (4.5) zu Bestimmung des Abstands der Parallaxebarriere zur Flüssigkristallanzeige ergibt umgestellt nach dem Betrachtungsabstand:

$$z_{i,A} = \frac{d_B \cdot d_A}{n \cdot p_{D,sub}}$$

$n := \text{Brechungsindex}$

$p_{D,sub} := \text{Subpixelpitch der Anzeige} \quad (5.1)$

$d_A := \text{Interpupillardistanz/Augenabstand (62 mm)}$

$d_B := \text{Abstand Barriere-LCD}$

Hierbei ist $z_{i,A}$ der ideale Abstand des Betrachters zur Barriere.

In den bisherigen Ausführungen wurde der ideale Betrachtungsabstand über die breiteste Stelle der 3D-Stereozone definiert. Bei genauerer Betrachtung sind zwei verschiedene Betrachtungsabstände zu unterscheiden.

Über die Formel (5.1) wird der Abstand der Barriere zum LCD bestimmt, so dass der Betrachter im idealen Abstand $z_{i,A}$ mit seinen Augen jeweils in der Mitte der Helligkeitsverteilung der Ansichten des rechten und linken Auges sitzt. Der Betrachtungsabstand wird daher ab jetzt als *Idealer Augbetrachtungsabstand* bezeichnet. Der Augenabstand wird mit 62 mm gewählt, was dem Mittelwert der Augenabstandsverteilung für Frauen und Männer entspricht. Für Betrachter mit größerem oder kleinerem Augenabstand liegt der wahre Augbetrachtungsabstand dementsprechend näher oder weiter zur Anzeige entfernt.

Die zweite wichtige Formel zum Entwurf einer Parallaxebarriere aus den vorangegangenen Kapiteln (4.7) beschreibt die Bestimmung der Periode der Barriere. Umgestellt nach dem Betrachtungsabstand ergibt sich:

$$z_{i,B} = \frac{d_B}{n \cdot \left(\frac{2 \cdot p_{D,sub}}{p_B} - 1 \right)}$$

$$n := \text{Brechungsindex}$$

$$p_{D,sub} := \text{Subpixelpitch der Anzeige}$$

$$p_B := \text{Barrierepitch}$$

$$d_B := \text{Abstand Barriere-LCD}$$
(5.2)

Für den Barrierepitch ergibt sich damit immer ein Wert, der kleiner als der Pixelpitch der Anzeige ist! Zeichnet man den Strahlengang vom Mittelpunkt jedes unter einer Barriereöffnung liegenden Pixelpaares durch die Mitte der Barriereöffnung ein, schneiden sich alle Strahlen in einem Punkt. Die Entfernung dieses Punktes zur Anzeige wurde bisher als idealer Betrachtungsabstand bezeichnet und wird nun präziser als *Idealer Barrierebetrachtungsabstand* bezeichnet. Der ideale Barrierebetrachtungsabstand ist unabhängig vom Augenabstand und somit für alle Betrachter gleich!

Der ideale Barrierebetrachtungsabstand $z_{i,B}$ und der ideale Augbetrachtungsabstand $z_{i,A}$ müssen grundsätzlich nicht identisch sein, werden jedoch in der Regel für einen Betrachter mit Augenabstand 62 mm gleich gewählt. Ein Betrachter würde im idealen Barrierebetrachtungsabstand ein störungsfreies stereoskopisches Bild über die gesamte Anzeigebreite wahrnehmen und auf Grund des identischen idealen Augbetrachtungsabstand den größtmöglichen störungsfreien lateralen Bewegungsbereich haben.

5.1.4 Möglichkeiten der Abstandsadaption

Aus den Formeln (5.2) und (5.1) ergibt sich bei der Veränderung der folgenden Parameter eine Verschiebung der idealen Betrachtungsabstände.

1. Variation des Brechungsindex
2. Variation des Abstandes der Barriere zur Flüssigkristallanzeige

3. Variation des Pixelpitchs der Anzeige
4. Variation des Pixelpitchs der Barriere

Variation des Brechungsindex

Der Brechungsindex n beschreibt die optischen Eigenschaften des Materials zwischen der Flüssigkristallanzeige und der Barriere. Er geht sowohl in der Formel des idealen Augbetrachtungsabstand und der Formel des idealen Barrierebetrachtungsabstand linear ein. Eine Variation des Brechungsindex führt zu einer Verschiebung beider idealen Betrachtungsabstände. Der Betrachter nimmt im neuen Betrachtungsabstand ein ungestörtes stereoskopisches Bild über die gesamte Anzeigenbreite wahr und befindet sich mit seinen Augen weiterhin mittig zur Helligkeitsverteilung. Eine Verringerung des Brechungsindex verschiebt den Betrachtungsabstand zu größeren Werten, eine Erhöhung des Index verkleinert die Betrachtungsabstände.

Beispiel: Brechungsindexvariation für Prot. Anzeige 1

Am Beispiel der Prototypischen Anzeige 1 wird deutlich, in welchen Größenordnungen der Brechungsindex variiert werden muss.

Um einen Betrachtungsabstandsbereich von 650-1100 mm abzudecken müsste der Brechungsindex von **1 bis 1,7** variiert werden. Die Variation müsste kontinuierlich oder diskret mit geringer Sprungweite erfolgen, um wahrnehmbare Störungen zu vermeiden.

Die funktionale Umsetzung einer solchen Adaptionmethode ist nur schwer zu realisieren.

Eine Pockels Zelle oder Flüssigkristalle bieten auf Grund ihrer doppelbrechenden Eigenschaften grundsätzlich die Möglichkeit den Brechungsindex zu variieren. Die maximale Variation wird durch die Differenz des ordentlichen und außerordentlichen Strahls bestimmt. Bei Flüssigkristallen für Anzeigen liegt die maximale Differenz im Bereich von 0,2-0,25 [75]. Die geforderte Brechungsindexvariation von 0,7 kann daher nicht von Flüssigkristallen abgedeckt werden.

Die Anisotropie des Materials würde zusätzlich zu Einschränkungen der Blickwinkelstabilität der Anzeige führen. Eine Adaptionmethode durch Variation des Bre-

chungsindex ist möglich, jedoch in der Umsetzung schwer zu realisieren und wird in dieser Arbeit nicht weiter verfolgt!

Variation des Abstandes der Barriere zur Flüssigkristallanzeige

Der Abstand der Barriere zur Flüssigkristallanzeige geht linear in beide Formeln (5.2) und (5.1) ein. Eine Variation des Abstandes führt zu einer Verschiebung des Aug- und Barrierebetrachtungsabstand. Eine Verkleinerung des Abstandes rückt die idealen Betrachtungsabstände näher zur Anzeige, eine Vergrößerung des Abstandes verschiebt sie zu einem größeren Abstand.

Beispiel: Variation Abstand LCD-Barriere für Prot. Anzeige 1

Um einen Betrachtungsabstandsbereich von 650-1100 mm abzudecken müsste der Abstand zwischen 1,4-2,5 mm variiert werden.

In einer typischen autostereoskopischen Anzeige mit Parallaxebarriere wird die Barriere durch ein Glas mit exakt bestimmter Dicke in einem festen Abstand zur Anzeige angebracht. Die Elemente werden durch Klebstoffe mit speziell angepassten Brechungsindices miteinander verbunden. Es ergibt sich ein starrer Verbund mit bekannten optischen Eigenschaften. Für eine Adaption auf den Betrachtungsabstand durch Variation des Abstandes zwischen Barriere und Anzeige müsste dieser starre Verbund gelöst werden. Dies würde zu zusätzlichen Grenzflächen führen, welche die optische Qualität der Anzeige reduzieren würde.

Zur Variation des Abstandes könnten grundsätzlich Piezoelemente eingesetzt werden, da diese in der Lage sind eine Längenvariation im Submillimeterbereich mit guter Genauigkeit zu realisieren. Dagegen spricht, dass eine Implementierung von piezoelektrischen Elementen zur Änderung des Abstandes die Anzeige mechanischer anfälliger und teurer machen würde.

Eine weitere Möglichkeit wäre, mehrere schaltbare Barrieren in unterschiedlichen Abständen zum LCD in die Anzeige einzubringen. Die maximale Anzahl der Barrieren wäre bautechnisch bedingt jedoch begrenzt, sie würde die Transmission der Anzeige verschlechtern und die Anzeige in der Herstellung verteuern.

Für den Einsatz im Automobil wurde diese Möglichkeit der Adaption auf den Be-

trachtungsabstand zunächst ausgeschlossen und im Rahmen der Arbeit nicht weiterverfolgt!

Variation des Pixelpitchs der Anzeige

Potenziell ergibt sich bei Änderung des Pixelpitchs der Anzeige ebenfalls eine Änderung des Betrachtungsabstands. Im klassischen Herstellungsprozess von Anzeigen existiert jedoch keine Technologie, die es ermöglicht den Pixelpitch einer Anzeige kontinuierlich zu variieren. Die Variation des Pixelpitchs der Anzeige stellt somit keinen Ansatz zur Adaption dar.

Anzumerken ist, dass aus den Formeln abzulesen ist, dass eine Erhöhung der Auflösung der zugrundeliegenden Anzeige immer eine Neuberechnung des Barriereabstands zur Folge haben muss. Es gilt dabei, je höher die Auflösung der Anzeige ist, desto geringer muss der Abstand zwischen dem LCD und der Barriere werden. Dies gilt es bei zukünftigen Anzeigen mit hohen Anzeigaufösungen zu beachten, da es die Fertigung solcher Anzeigen komplizierter machen kann.

Variation des Pixelpitchs der Barriere

Aus der Formel (5.2) ergibt sich eine Verschiebung des Barrierebetrachtungsabstands bei Änderung des Pixelpitchs der Barriere. Der Augbetrachtungsabstand wird durch eine Pixelpitchänderung nicht verändert.

Eine Verringerung des Pixelpitch der Barriere verschiebt den Betrachtungsabstand näher zur Anzeige, eine Vergrößerung führt zu größeren Betrachtungsabständen.

Beispiel: Variation Pixelpitch der Barriere für Prot. Anzeige 1

Aus Formel (5.2) ergibt sich für die *Prototypische Anzeige 1* für den Betrachtungsabstand von 650 mm ein Pixelpitch der Barriere von 0,18716 mm. Für einen Betrachtungsabstand von 1100 mm ändert sich dieser nur auf 0,18729 mm. Dies entspricht einer Änderung im Nanometerbereich.

Es wird deutlich, dass für eine Anpassung des Betrachtungsabstands über einen Bereich von einigen Zentimetern der Pixelpitch nur um einige Nanometer geändert werden muss.

Eine Änderung des Pixelpitchs führt zu einer Verschiebung der Barriereöffnungen. Als Verschiebung s wird die Differenz zwischen dem Zentrum der Barriereöffnung

und dem darunter liegendem Pixelpaar bezeichnet (vgl. Abb. 5.1). Die Verschiebung erfolgt für einen Betrachter in zentraler Position symmetrisch um die Anzeigenmitte. Bei Verringerung des Pixelpitchs verschieben sich die Barriereöffnungen horizontal nach innen zum Zentrum der Anzeige. Bei einer Vergrößerung des Pixelpitch erfolgt die Verschiebung nach außen. Je weiter eine Barriereöffnung vom Zentrum der Anzeige entfernt ist, desto größer ist die Verschiebung der Barriereöffnung.

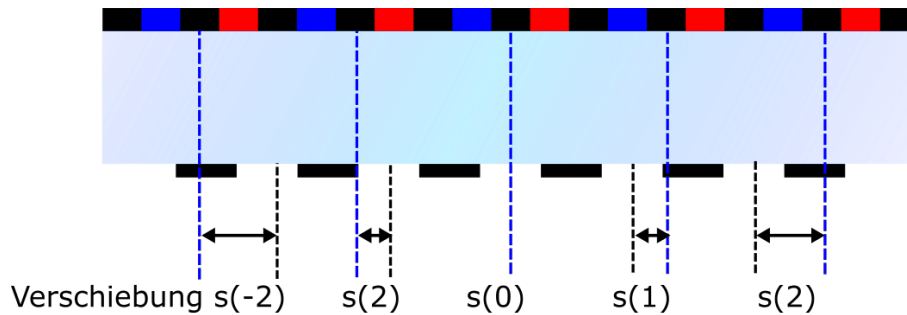


Abbildung 5.1: Die Verschiebung beschreibt den Versatz der Barriereöffnung gegenüber dem Pixelpaar unter der Öffnung. Da der Barrierepitch geringer als der Pixelpitch der Anzeige ist nimmt die Verschiebung zu den Rändern der Anzeige kontinuierlich zu.

Die Verschiebung an einer Barriereöffnung ist hierbei ein von der Position auf der Anzeige abhängiges Vielfaches der Differenz des Pixelpitchs der Anzeige und der Barriere. Es ergibt sich die Gleichung (5.3).

$$s_z(k) = (2 \cdot p_{D,sub} - p_B(z)) \cdot k$$

$$z := \text{Betrachtungsabstand}$$

$$p_{D,sub} := \text{Subpixelpitch der Anzeige} \quad (5.3)$$

$$p_B(z) := \text{Barrierepitch für den Betrachtungsabstand } z$$

$$k := \text{Laufparameter der Barriereöffnung}$$

Hierbei ist s die Verschiebung (engl. shift) an der Barriereöffnung k . Mit k wird k -te Barriereöffnung bezeichnet. Diese wird von der Mitte ausgehend durchnummeriert: $k = [-K/2, K/2]$ mit K maximale Anzahl der Barriereöffnungen.

Der Pixelpitch der Barriere $p_B(z)$ für einen Betrachtungsabstand z ergibt sich durch

Umstellung von Gl. (5.2), wobei z nun den geforderten und nicht mehr den initialen Betrachtungsabstand z_i beschreibt.

Wird der Pixelpitch der Barriere um einige Nanometer geändert, hat dies durch die hohe Anzahl von Barriereöffnungen an den Rändern der Anzeige dort eine Verschiebung im Mikrometerbereich zur Folge (vgl. Abb. 5.2).

In Abbildung 5.2 ist exemplarisch für die *Prototypische Anzeige 1* die ideale Ver-

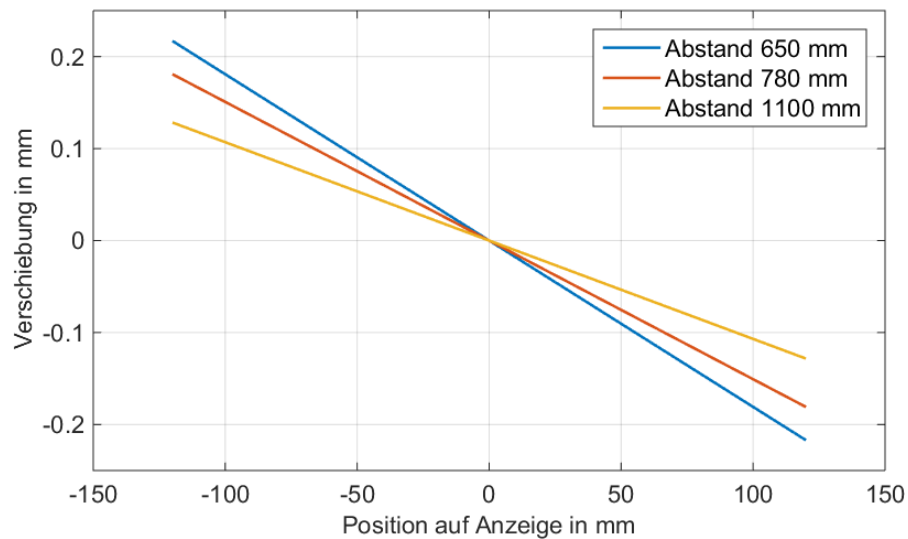


Abbildung 5.2: Ideale Verschiebungsfunktionen für die drei Betrachtungsabstände 650, 780 und 1100 mm. Die Gerade beschreibt die Verschiebung der Barriereöffnungen gegenüber dem jeweils darunterliegenden Pixelpaar über die gesamte Breite der Anzeige.

schiebung der Barriereöffnungen $s_z(\hat{y})$ dargestellt, die sich für drei verschiedene Betrachtungsabstände z ergeben würde. Auf der x-Achse der Abbildung wurde anstatt der Nummer der Barriereöffnung k , die diskrete Position der Barriereöffnung \hat{y} auf der Anzeige dargestellt.

$$s_z(\hat{y}) = s_z(k \cdot p_B(z)) \quad (5.4)$$

Auf Grund der unterschiedlichen Barrierepitchs ergeben sich Geraden mit unterschiedlicher Steigung. Die Geraden beschreiben die Verschiebung jeder Barriereöffnung an Positionen \hat{y} , für den idealen Fall, dass der Barrierepitch für jeden Betrachtungsabstand exakt gewählt werden kann. Sie werden daher ab jetzt als ideale Verschiebungsfunktionen bezeichnet.

In Abbildung 5.3 sind die monokularen Stereozonen dargestellt, die sich für die unterschiedlichen Barrierepitchs aus der geometrisch-optischen Simulation aus Kapitel 4 ergeben würden. Die Barrierepitchs wurden nach Formel (5.2) bestimmt. Der Abstand Barriere-LCD ist konstant. Es ist deutlich zu erkennen, dass eine Änderung

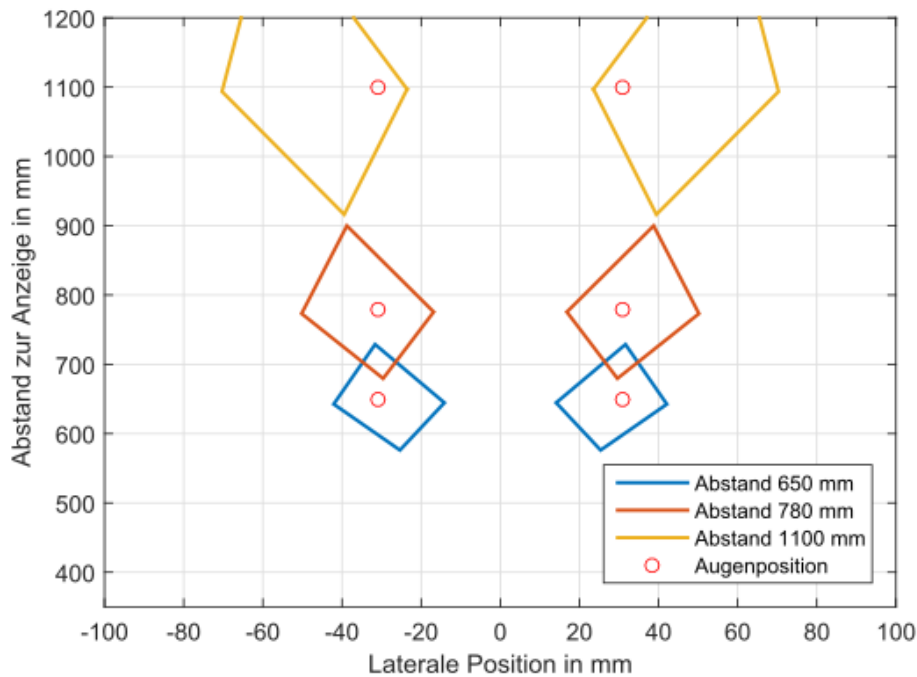


Abbildung 5.3: Simulierte Monokulare Stereozonen bei Änderung des Barrierepitchs für drei unterschiedliche Barrierepitchs; die rote Kreise entsprechen der Augenposition mit Abstand 62 mm

des Pixelpitchs der Barriere die Rauten verschiebt. Dies zeigt, dass die Adaption auf variable Betrachtungsabstände durch Anpassung des Pixelpitchs möglich ist.

Zusätzlich wurden die Augenpunkte eines Betrachters mit Augenabstand 62 mm für die drei Betrachtungsabstände eingezeichnet. Die Augen des Betrachters befinden sich nur für den Betrachtungsabstand 780 mm mittig in den monokularen Stereozonen. Dies ist eine Konsequenz dessen, dass eine Änderung des Pixelpitchs der Barriere nur in den Barrierebetrachtungsabstand eingeht, nicht jedoch den Augbetrachtungsabstand ändert.

Dies hat zur Folge, dass ein Betrachter sich für kleine und sehr große Betrachtungsabstände nicht zur gleichen Zeit mit beiden Augen in den monokularen Stereozonen

befinden kann. Er würde kein stereoskopisches Bild mehr wahrnehmen können. Der maximale Adaptionsbereich dieser Methode ist daher beschränkt! Die begrenzenden Betrachtungsabstände ergeben sich aus dem Pixellayout, der Barriereöffnung und der Breite der Anzeige. Durch Wahl des Augbetrachtungsabstand können die Grenzen verschoben werden.

In der bisherigen Beschreibung ist von einer kontinuierlichen Änderung des Pixelpitchs der Barriere ausgegangen worden. Der Pixelpitch konnte individuell für jeden Betrachtungsabstand exakt gewählt werden. Die technische Realisierung ist, wenn überhaupt, nur mit sehr großem Aufwand möglich. In den nächsten Abschnitten wird daher die Möglichkeit der Anpassung des Pixelpitchs durch **diskrete** Manipulation der Barriere vorgestellt und experimentell untersucht.

5.2 Experimentelle Untersuchung der Diskreten Abstandsadaptionsmethode Voll-Pitch

Ziel der experimentellen Untersuchung der diskreten Abstandsadaption ist die Entwicklung von Methoden zur Adaption auf den Betrachtungsabstand unter der Prämisse der Umsetzbarkeit in einer Anzeige. Es werden zwei Methoden entwickelt, von denen eine teil- und die zweite vollfunktional in der *Prototypischen Anzeige 2* umgesetzt wurden. In diesem Abschnitt wird die Voll-Pitch Adaptionsmethode vorgestellt und im Anschluss objektiv und subjektiv bewertet.

5.2.1 Diskrete Adaptionsmethode: Voll-Pitch

Im vorherigen Abschnitt wurde gezeigt, dass eine Adaption auf den Betrachtungsabstand durch Anpassung des Barrirepitchs möglich ist.

Eine kontinuierliche Anpassung für jeden Betrachtungsabstand würde eine Barriere erfordern, deren Periode beliebig variiert werden kann. Eine solche Umsetzung ist, wenn überhaupt, nur schwer zu realisieren.

Abgeleitet aus dem grundlegendem Prinzip der dynamischen Erweiterung des Betrachtungsabstandsbereich durch Anpassung des Pixelpitchs wurde eine Methode entwickelt, die es ermöglicht, durch **diskrete** Anpassung des Barriere den Pixelpitch zu variieren.

Grundlage der diskreten Adaption ist eine submodulierte schaltbare Barrieremaske, wie sie bereits für die laterale Adaption in Kapitel 4 entwickelt wurde. Die Parallaxebarriere besteht aus einer Flüssigkristallzelle mit hoher Auflösung in horizontaler Ausrichtung. Die Anordnung der Barriereöffnungen ist unabhängig vom Adaptionsprinzip und kann in verschiedenen Mustern erfolgen. Im Vorversuch wird eine Anordnung im sogenannten Schachbrettmuster gewählt. Eine Anordnung der Barriereöffnungen in vertikaler Streifenform, bei der ein Streifen eine vertikale Ausdehnung über die gesamte Anzeigehöhe besitzt, hat sich jedoch im Verlauf der Arbeit als vorteilhaft erwiesen, da keine vertikale Beschränkung des Betrachtungsbereichs auftritt.

In periodischer Anordnung ergeben sich Barriereöffnungen mit initialen Pixelpitch $p_{B,init}$ und schaltbaren Subpixeln mit Breite $p_{B,sub} = \frac{p_{B,init}}{N_{sub}}$ (mit N_{sub} = Anzahl der Subpixel pro Barriereöffnung). Der initiale Pixelpitch der Barriere legt den idealen Barrierebetrachtungsabstand fest, in dem ohne aktivierte Adaption auf der Anzeige ein störungsfreies stereoskopisches Bild wahrgenommen werden kann.

Im idealen Betrachtungsabstand ist die Barriere der diskreten Voll-Pitch Methode identisch mit einer Barriere, wie sie sich für eine kontinuierliche Adaption ergeben würde. In Abbildung 5.4 wurde die Verschiebung der Barriereöffnungen über der für den initialen Betrachtungsabstand 780mm eingezeichnet (schwarz). Die Gerade wird über die Formel (5.5) beschrieben. Die Verschiebung wird nach (5.3) bestimmt.

$$g_0(\hat{y}) = s_{780}(\hat{y}) \quad (5.5)$$

Wird die Barriere wie bei der lateralen Adaption global über die gesamte Anzeigebreite jeweils um einen Barriersubpixel mit Breite $p_{B,sub}$ nach links oder rechts verschoben, ergeben sich die in Abbildung 5.4 dargestellten Geraden $g_m(\hat{y})$ (magenta).

$$\begin{aligned} g_m(\hat{y}) &= (2 \cdot p_{D,sub} - p_{B,init}) \cdot \hat{y} + m \cdot p_{B,sub} \\ &= g_0(\hat{y}) + m \cdot p_{B,sub} \end{aligned} \quad (5.6)$$

Hierbei ist m die Anzahl der Verschiebungen um welche die Barriere nach links oder rechts verschoben wurde, mit $m = \pm 1, 2, 3, \dots$.

Der Pixelpitch ändert sich nicht, die Steigung der Geraden entspricht der des initialen Barrierepitchs. Der vertikale Abstand der Geraden entspricht gerade der Breite

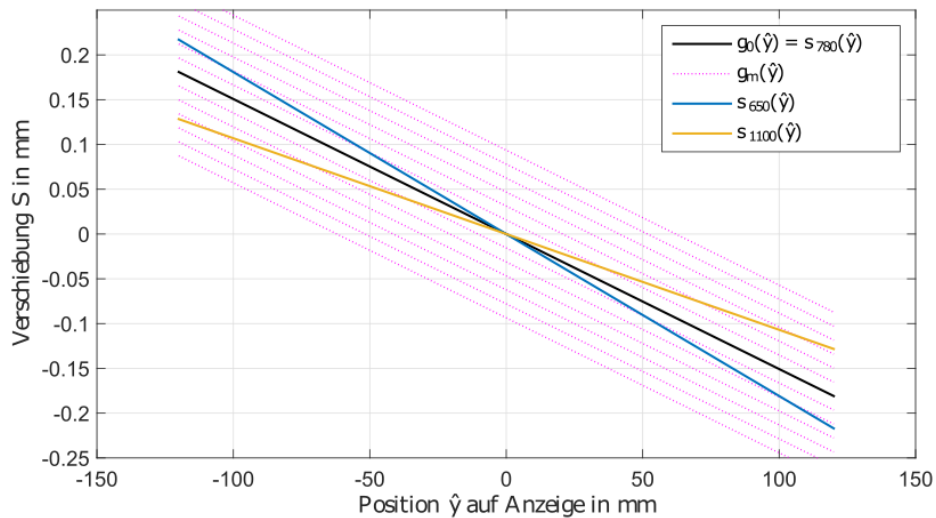


Abbildung 5.4: Die blauen und gelben Geraden zeigen Verschiebungsfunktionen für die Betrachtungsabstände 650 und 1100 mm. In schwarz ist die Verschiebungsfunktion für den idealen Betrachtungsabstand dargestellt, auf welchen die Barriere angepasst wurde. Die in magenta dargestellten Linien stellen die Verschiebungsgeraden dar, wenn die Barriere über die gesamte Breite der Anzeige um ein Vielfaches eines Barriersubpixels verschoben wird.

der Suböffnung der Barriere. Die Verschiebungsfunktionen $g_m(\hat{y})$ stellen die Geraden der Verschiebung dar, die durch eine diskrete Barriere realisiert werden können.

Ändert sich der Betrachtungsabstand des Betrachters ergibt sich eine notwendige Änderung des Pixelpitchs der Barriere. Exemplarisch wurden die Geraden für die Betrachtungsabstände 650 mm (blau) und 1100 mm (gelb) in die Abbildung eingezeichnet.

Es stellt sich die Frage, wie die diskrete Barriere geschaltet werden muss, um sich den Geraden der Betrachtungsabstände 650 mm und 1100 mm bestmöglich anzunähern.

In der folgenden Beschreibung wird zunächst davon ausgegangen, dass der Betrachter zentral vor der Anzeige sitzt und den Betrachtungsabstand variiert. Wird der Betrachtungsabstand verringert, muss sich der Pixelpitch der Barriere ebenfalls verringern. Die Adaption auf den neuen Betrachtungsabstand erfolgt diskret durch Sprünge an dezidierten Pixeln der Barriere, welche von nun an Schaltpixel genannt

werden. Die Sprungweite beträgt hierbei gerade eine volle Subpixelöffnung der Barriere, wovon sich der Name der Adaptionmethode ableitet. An diesen Stellen wird die Periodizität der Barriere gebrochen und die nachfolgenden Barriereöffnungen um eine Suböffnung verschoben. (vgl. Abb. 5.5). Bei Verringerung des Pixelpitchs wird

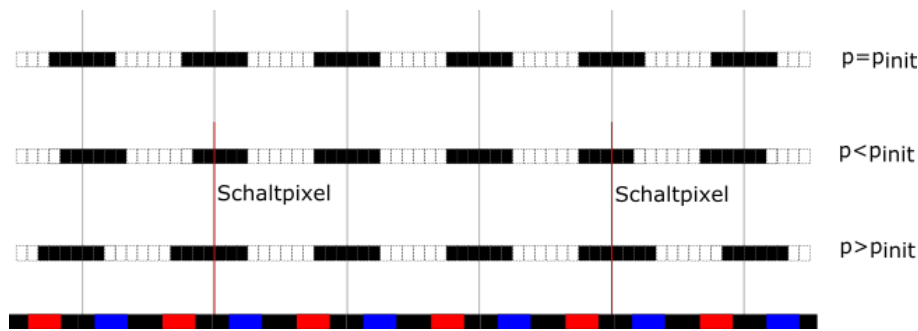


Abbildung 5.5: Änderung des Pixelpitch durch diskrete Schaltstellen

an den Schaltpixeln symmetrisch um die Anzeigenmitte eine Suböffnung nach innen verschoben (vgl. Abb. 5.5 (Mitte)). Betrachtet man die mittlere Verschiebung der Barriereöffnungen über die gesamte Anzeigenbreite, ergibt sich ein im Mittel geringerer Barrierepitch. Wird der Betrachtungsabstand vergrößert, muss der Barrierepitch ebenfalls vergrößert werden. An den Schaltpixel wird um eine Suböffnung nach außen von der Anzeigenmitte weg geschaltet (5.5 unten).

Der mittlere Pixelpitch der Barriere wird mathematisch durch die folgende Gleichung beschrieben:

$$\bar{p}_B = p_{B,init} + \frac{j \cdot p_{B,sub}}{K}$$

$p_{B,init}$:= initialer Barrierepitch

K := Anzahl der Barriereöffnungen über die Breite der Anzeige (5.7)

$p_{B,sub}$:= Größe einer Suböffnung der Barriere

j := Anzahl der notwendigen Schaltstellen

Anzahl der Schaltstellen

Durch Umstellen der Gleichung nach j kann die notwendige Anzahl der Schaltstellen für eine Adaption auf einen vorgegebenen Betrachtungsabstand ermittelt werden. Es wird hierbei verwendet, dass unter jeder Barriereöffnung zwei Subpixel der Anzeige

liegen. Die Anzahl der Barriereöffnungen ergibt sich somit zu $K = \frac{D}{2 \cdot p_{D,sub}}$, wobei D , die Anzeigenbreite ist. Die Anzahl der Schaltstellen ergibt sich zu Gleichung (5.8).

$$j = \frac{D \cdot |\bar{p}_B - p_{B,init}|}{2 \cdot p_{D,sub} \cdot p_{B,sub}} \quad (5.8)$$

$$N_{voll} = \lfloor j \rfloor_2 = 2 \cdot \left\lfloor \frac{j}{2} + \frac{1}{4} \right\rfloor$$

Für den mittleren Barrirepitch \bar{p}_B wird der Barrirepitch für den angestrebten Betrachtungsabstand aus Gleichung 5.2 eingesetzt. Das Vorzeichen von j gibt dabei an, ob nach innen oder nach außen geschaltet wird. Die Beschreibung von N_{voll} durch die Gaußklammern $\lfloor j \rfloor_2$ bezeichnet in diesem Fall die Anzahl der Schaltstellen, welche diskret und aus Symmetriegründen ein Vielfaches von zwei sein muss. Der Wert von j wird daher immer auf das nächste Vielfache von zwei gerundet. Die Schaltpixel unterteilen die Anzeige in $N_{voll} + 1$ Zonen.

Lage der Schaltstellen

In der bisherigen Herleitung wurde nur die Anzahl der Schaltstellen bestimmt. Über die Lage dieser auf der Anzeige wurde noch keine Aussage getroffen. Bei der Voll-Pitch Methode wird davon ausgegangen, dass grundsätzlich an jeder Barriereöffnung geschaltet werden kann. Die Lage der Schaltpixel ist für jeden Betrachtungsabstand individuell; die Schaltstellen sind nicht fix.

Die Lage der Schaltstellen auf der Anzeige folgt der Prämisse, dass die Abweichung der stufenförmigen Verschiebungsfunktion h_z von der idealen Verschiebungsgerade s_z so gering wie möglich sein soll. Sobald die Abweichung größer als ein halber Barriersubpixel ist, schaltet die Barriere. Dabei kann die Barriere immer nur Zustände beschrieben durch g_m einnehmen. Gleichung (5.9) beschreibt die Menge der Positionen der Schaltstellen auf der Anzeige im Betrachtungsabstand z .

$$S_z(\hat{y}) = \left\{ \hat{y} \mid s_z(\hat{y}) - g_m(\hat{y}) = \frac{p_{B,sub}}{2} \right\} \quad (5.9)$$

Die resultierende Verschiebungsfunktion für den Betrachtungsabstand z ist abschnittsweise definiert:

$$h_z(\hat{y}) = \begin{cases} \dots \\ g_{-1}(\hat{y}) & \text{für } c_{-2} \leq \hat{y} < c_{-1} \\ g_0(\hat{y}) & \text{für } c_{-1} \leq \hat{y} < c_{+1} \quad \text{und } S_z = \emptyset \\ g_{+1}(\hat{y}) & \text{für } c_{+1} \leq \hat{y} < c_{+2} \\ \dots \end{cases} \quad (5.10)$$

Hierbei ist $c_k \in S_z$ die Schaltstelle für die gilt $s_z(c_k) - g_m(c_k) = \frac{p_{B,sub}}{2}$. In Abbildung 5.6 sind für die Betrachtungsabstände 650 mm und 1100 mm jeweils die diskret genäherten Verschiebungen der Barriereöffnungen eingezeichnet. Es ergeben

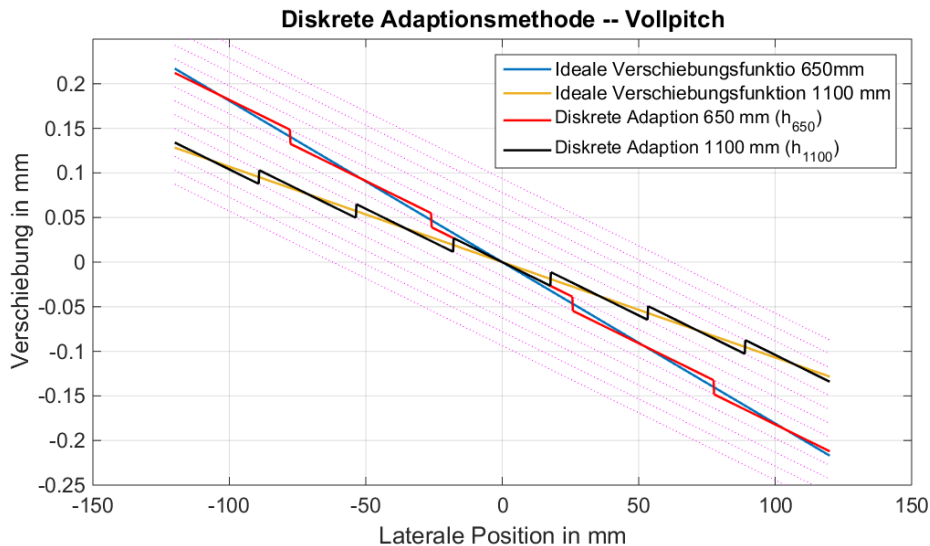


Abbildung 5.6: Die schwarzen und roten Linien beschreiben die diskrete Verschiebungsfunktionen der Adaptionmethode Voll-Pitch, welche sich für die Betrachtungsabstände 650 und 1100 mm ergeben. Auf Grund der diskreten Subpixelöffnungen der Barriere, verlaufen die Verschiebungsfunktionen nur auf magenta farbigen Linien

sich die dargestellten Stufenverläufe der Verschiebungsfunktionen mit 6 Sprungstellen (Schaltpixel) für den Betrachtungsabstand 1100 mm ($h_{1100}(\hat{y})$, schwarz) und 4 Sprungstellen für den Betrachtungsabstand 650 mm ($h_{650}(\hat{y})$, rot). Die Geraden nehmen nur Werte von g_m an (magenta). Die Abweichung von den idealen Verschiebungsgeraden (blau) und (gelb) beträgt maximal ein halbes Barriersubpixel.

Zwischen den Sprungstellen innerhalb einer jeder Zone besitzen die Barriereöffnungen den initialen Barrierepitch.

5.2.2 Aufbau: Vorversuch Adaptionmethode Voll-Pitch

Zur Untersuchung des Adaptionprinzips Voll-Pitch wurde im Rahmen eines Vorversuchs eine experimentelle autostereoskopische Anzeige aufgebaut. Ziel des Versuchs war der Nachweis der Funktion der Adaptionmethode, die Sicherstellung der Herstellbarkeit und die Untersuchung möglicher auftretenden Störungen. Für den Vorversuch wurde noch keine vollständig funktionale, sondern eine statische Barriere­maske gewählt. Die Barriere kann sich nicht dynamisch auf variable Betrachtungsabstände anpassen. Der Aufbau erfolgte in Kooperation mit einem japanischen Anzeigenhersteller. Ziel des Vorversuchs war der Nachweis des Adaptionprinzips durch Bestimmung der 3D-Stereozonen für verschiedene Betrachtungsabstände und die Untersuchung von auftretenden Störungen.

Aufbau der Anzeige

Bei der Anzeige handelt es sich um eine Flüssigkristallanzeige mit einer Bildschirm­diagonale von 10,4" und einer statischen Barriere auf Basis einer TN-Zelle. Die Barriere kann somit vollständig transparent geschaltet werden, jedoch nicht dynamisch angepasst werden. Die grundlegenden Parameter sind in Tabelle 5.1 zusammengefasst.

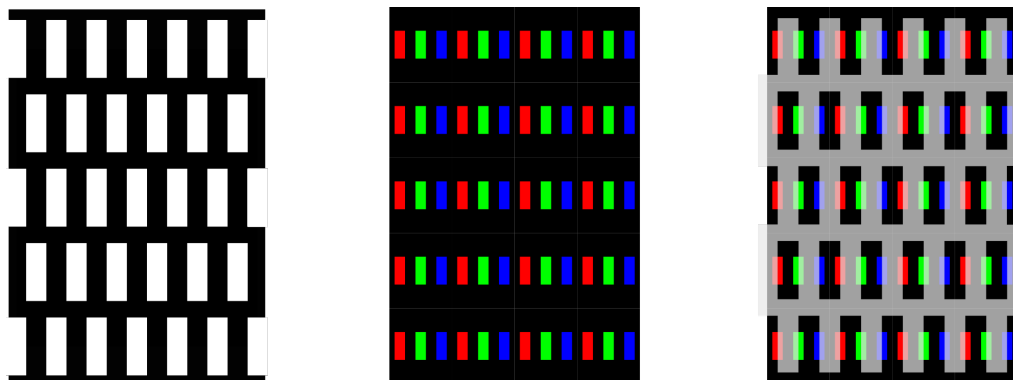


Abbildung 5.7: Anordnung der Barriereöffnungen auf der 10,4"-Anzeige des Vorversuchs (links); Pixellayout der Anzeige (mittig); Kombination der Barriereöffnungen mit dem Pixellayout (rechts)

Prototypische Anzeige Vorversuch		
	horizontal	vertikal
Anzeige:		
Anzeigendiagonale:	10,4"	
Anzeigenbreite:	210,43 mm	
Aspektverhältnis:	$\approx 4 : 3$	
Pixelanordnung:	RGB horizontal	
Auflösung:	1024 px	768 px
Pixelpitch:	205,5 μm	205,5 μm
Subpixelpitch:	68,5 μm	205,5 μm
Aperturöffnung Subpixel:	34,25 μm	76,03 μm
Größe horz. Schwarzbereich:	34,25 μm	-
Subpixel pro Pixel:	3	1
Barriere:		
Barriereanordnung:	Schachbrett	
Abstand Barriere-LCD:	1,224 mm	
Initialer Betrachtungsabstand:	750 mm	
Barrierepitch:	136,85 μm	410,55 μm
Öffnungsverhältnis Barriere:	0,5	0,39
Anzahlsubpixel pro Barrierepitch:	8	1
Subbarrierepitch:	17,10 μm	410,55 μm
Brechungsindex Material zw. Barriere-LCD	1,52	

Tabelle 5.1: Parameter der Anzeige des Vorversuchs der Voll-Pitch-Adaption

Die Barriereöffnungen sind in Form eines Schachbrettmusters angeordnet (siehe Abbildung 5.7 (links)). Unter jeder Barriereöffnung liegen zwei Subpixel der Flüssigkristallanzeige (vgl. Abb., rechts). Das Pixellayout der Anzeige ist eine klassische RGB-Anordnung (vgl. Abb., Mitte), bei der die Subpixel horizontal nebeneinander liegen. Pro Öffnung besitzt die Barriere 8 Subpixel. Das Öffnungsverhältnis der Barriere beträgt 0,5, sodass von den 8 Subpixeln vier transparent und vier nicht transparent geschaltet wurden. Der initiale Pixelpitch der Barriere ist für einen Betrachtungsabstand von 750 mm ausgelegt.

Zum Nachweis des Voll-Pitch Adaptionsprinzips wurde die Anzeige vertikal in fünf **Bereiche** unterteilt, die sich über die gesamte Breite der Anzeige erstrecken (siehe Abbildung 5.8). Die Barriere ist für jeden dieser Bereiche für einen Betrachtungsabstand optimiert. Der oberste Bereich ist für einen Betrachtungsabstand von 600

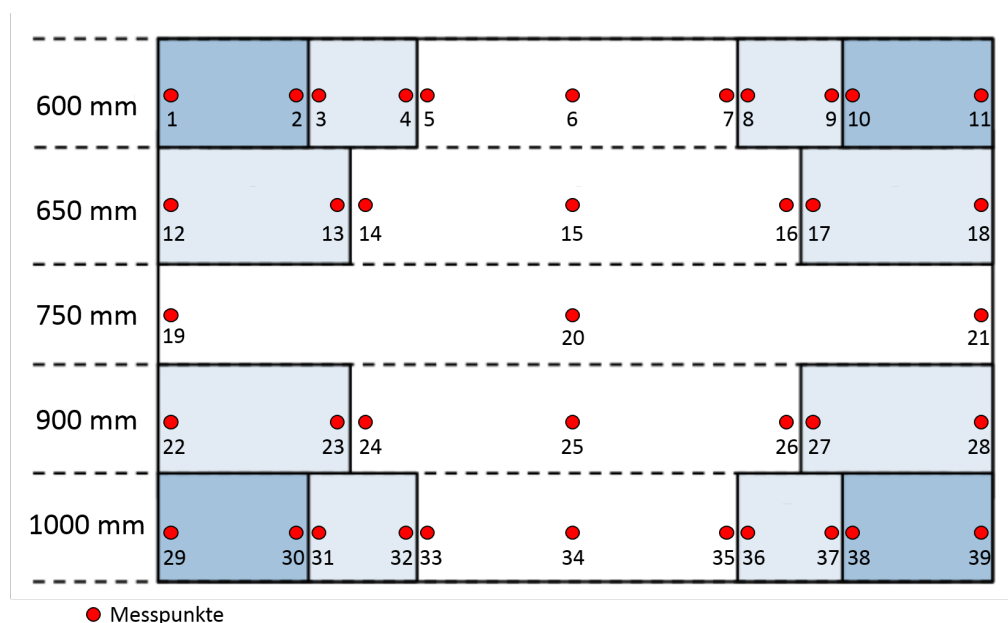


Abbildung 5.8: Aufteilung der Anzeige in Bereiche mit unterschiedlichen Betrachtungsabständen, an der Grenze der farbigen Flächen liegen die Schaltstellen –
 Quelle:[76]

mm optimiert. Aus Gleichung (5.2) würde sich mit den Parametern aus Tabelle 5.1 ein idealer Barrierepitch von 136,816 μm ergeben. Wird dieser zusammen mit dem Pixelpitch der Anzeige in Gleichung (5.8) eingesetzt, ergibt sich, dass für einen Betrachtungsabstand von 600 mm vier Schaltstellen benötigt werden. Auf Grund des

Vorzeichens ist zu erkennen, dass an den Schaltstellen nach innen geschaltet wird. Der zweite Bereich von oben wurde für einen Betrachtungsabstand von 650 mm ausgelegt. Hierfür werden nur zwei Schaltstellen benötigt. Im mittleren Bereich gibt es keine Schaltstellen, der Pixelpitch der Barriere entspricht durchgehend dem initialen Pixelpitch. Der Betrachtungsabstand ist für den initialen Betrachtungsabstand von 750 mm ausgelegt. In den beiden unteren Bereichen wurde die Lage der Schaltstellen von den beiden oberen Bereichen übernommen, jedoch wird an Schaltstellen nach außen geschaltet. Rechnerisch ergeben sich Betrachtungsabstände von ungefähr 900 mm und 1000 mm. Die Lage Schaltstellen wurde über die Formel (5.9) bestimmt. In Abbildung 5.9 sind die berechneten Verschiebungsfunktionen für die fünf Bereiche und die Geraden der jeweiligen idealen Verschiebungsfunktionen dargestellt. Zur besseren Erkennbarkeit wurden die Darstellungen für die Bereiche 1 und 5 und Bereiche 2 und 4 aufgeteilt. Es wird deutlich, dass für die Betrachtungsabstände 600

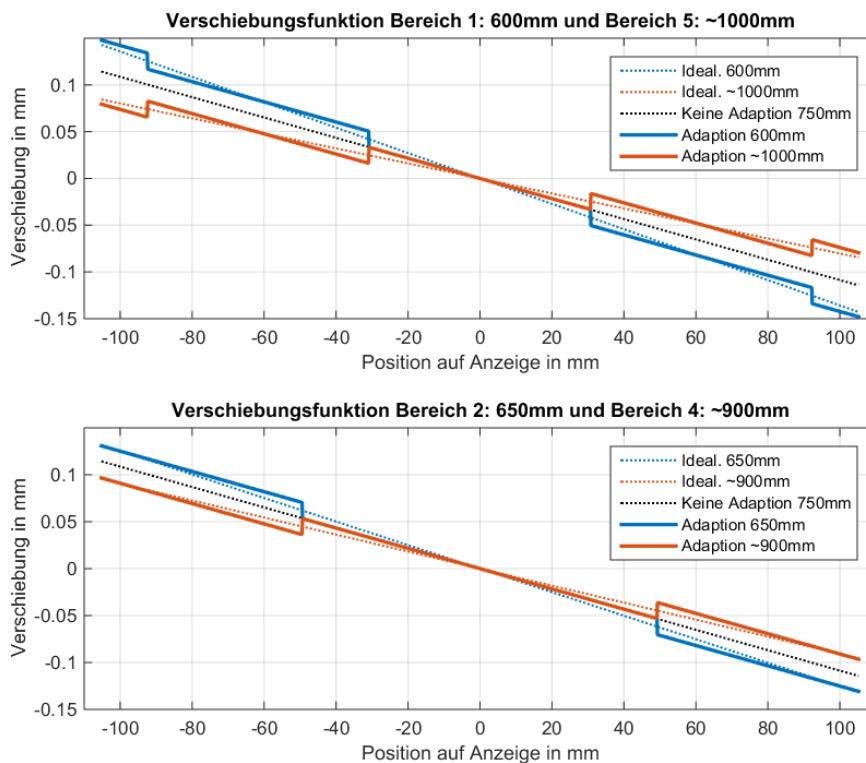


Abbildung 5.9: Bestimmung der Lage der Schaltstellen für die vier Bereiche der Anzeige des Vorversuchs

und 1000 mm jeweils vier Schaltstellen und für die Abstände 650 und 900 mm jeweils nur zwei Schaltstellen benötigt werden. Die Lage der Schaltstellen entspricht der Umsetzung auf der Anzeige, wie in Abb. 5.8 dargestellt.

5.2.3 Messung: Adaptionismethode Voll-Pitch

Ziel der Vermessung ist der Nachweis der Adaptionismethode durch Bestimmung der Lage der monokularen und 3D-Stereozonen für die 5 Bereiche. Zusätzlich sollen mögliche sichtbare Störungen bestimmt werden.

Die Anzeige wurde hierzu an mehreren Messpunkten mit der Konoskop-Leuchtdichtekamera vermessen. Gegenüber der Messung mit dem Goniometer hat das Konoskop den Vorteil, in kürzerer Zeit mehrere Punkte auf der Anzeige zu vermessen.

Die Schaltstellen der Barriere unterteilen jeden Bereich der Anzeige in $j+1$ **Zonen** (mit j =Anzahl der Schaltstellen pro Bereich). Bei der Vermessung werden zwei Messungen pro Zone, jeweils am Rand, durchgeführt. Das eingesetzte Konoskop hat einen Messfleck von ungefähr 1-2 mm. Um Störungen am Übergang der Zonen zu vermeiden, wurden die Messpunkte in einem Abstand von 30 Barriereöffnungen von den Schaltstellen gewählt. Zusätzlich wird in jedem Bereich mittig und am Rand der Anzeige gemessen. Die resultierenden 39 Messpunkte sind in Abbildung 5.8 als rote Punkt eingezeichnet. An jedem Messpunkt wurden die vier Leuchtdichteverteilungen WB, BW, WW und BB gemessen.

Es ergeben sich die in Abbildung 5.10 dargestellten Leuchtdichteaufnahmen, hier

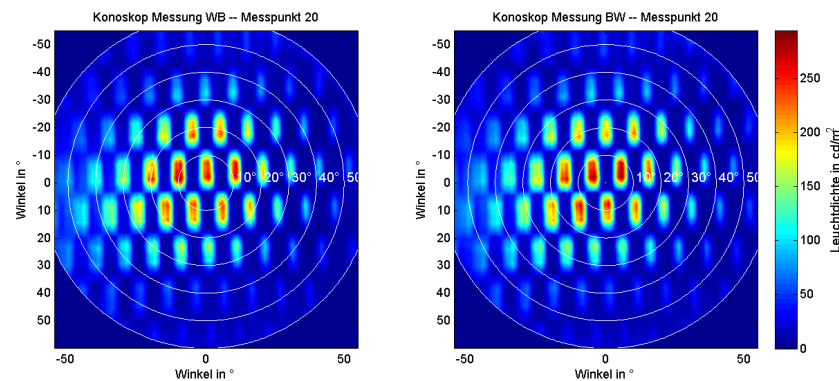


Abbildung 5.10: Konoskopmessung der Anzeige des Vorversuchs mit Schachbrettbarriere

am Beispiel des zentralen Messpunkts für den Betrachtungsabstand 750mm, mittig (Messpunkt 20) bei der Darstellung von WB und BW abgebildet. Man erkennt, dass die schachbrettartige Anordnung der Barriereöffnungen auch das Abstrahlverhalten in vertikaler Richtung beeinflusst. Anders als bei einer Streifenbarriere muss sich der Betrachter in einer bestimmten Höhe vor der Anzeige befinden, um ein stereoskopisches Bild wahrzunehmen! Diese Einschränkung führte mit zu der Entscheidung, im weiteren Verlauf der Arbeit nur Barrieremasken in Streifenanordnung einzusetzen. Die horizontale Abstrahlcharakteristik ergibt sich, wenn ein horizontaler Schnitt unter dem vertikalen Winkel von 0 Grad durch die Leuchtdichteaufnahme gelegt wird. In Abbildung 5.11 ist die Abstrahlcharakteristik für die Anzeige des Vorversuchs, gemessen am Messpunkt 20 dargestellt. Auf die Darstellung der Fehlerbalken wurde zur besseren Übersicht verzichtet.

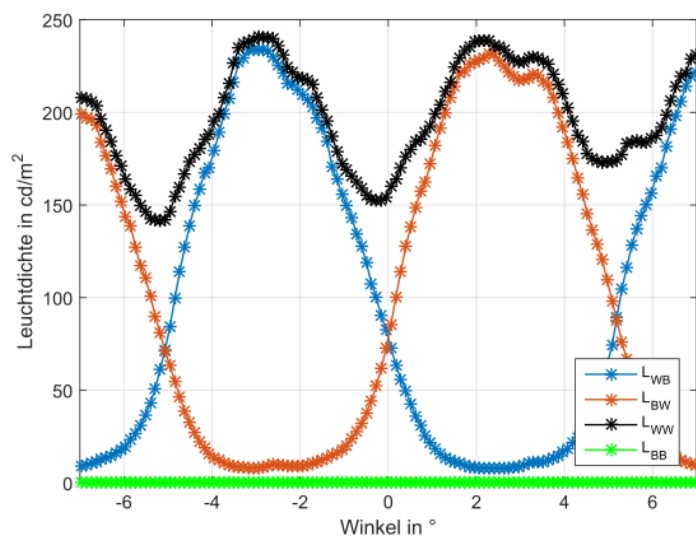


Abbildung 5.11: Mit dem goniometrischen Aufbau gemessene Abstrahlcharakteristik am Messpunkt 20 der Anzeige des Vorversuchs

5.2.4 Auswertung: Adaptionismethode Voll-Pitch

Im ersten Schritt der Auswertung soll die Lage der monokularen Stereozone im Raum vor der Anzeige bestimmt werden.

Monokulare Stereozone

Die Auswertung orientiert sich hierbei an dem in Kapitel 4 vorgestellten Vorgehen zur Bestimmung der Stereoraute. In dem dort beschriebenen Verfahren wurde die

Stereoraute durch Messung von nur drei Punkten auf der Anzeige bestimmt. Dies war möglich, da die Barriere keine Schaltstellen aufwies und die Verschiebung der Barriereöffnung über den Pixelpaaren kontinuierlich zum Rand zunahm.

Bei der hier untersuchten prototypischen Anzeige nimmt die Verschiebung der Barriereöffnung nur innerhalb einer Zone kontinuierlich zu. An den Schaltstellen erfolgt ein nichtkontinuierlicher Sprung. Aus zwei Messpunkten kann nur auf das Abstrahlverhalten der Barriereöffnungen zwischen den Messpunkten geschlossen werden, wenn keine Schaltstelle zwischen den Messpunkten liegt. Dies ist der Grund, warum jeweils zwei Messpunkten pro Zone benötigt werden.

Die Auswertung erfolgt jeweils einzeln für jeden der fünf Bereiche der Anzeige. An jedem Messpunkt $n = 1, \dots, N_{max}$ wird die monokulare Stereokontrastverteilung für die linke und die rechte Ansicht bestimmt.

$$\begin{aligned} C_L^n(\varphi) &= \frac{L_{WB}(\varphi)}{L_{BW}(\varphi, \hat{y})} \\ C_R^n(\varphi) &= \frac{L_{BW}(\varphi)}{L_{WW}(\varphi, \hat{y})} \end{aligned} \quad (5.11)$$

Hierbei ist L_{WB} die horizontale Abstrahlcharakteristik am Messpunkt \hat{y} bei Anzeige von WB und L_{BW} die gemessene Abstrahlcharakteristik bei Anzeige von BW. Diese Verteilungskurven geben Auskunft, welchen Stereokontrast ein Betrachter wahrnimmt, der unter dem Winkel φ auf diesen Messpunkt schaut. Analog zum Vorgehen aus Kapitel 4 wird der Raum vor der Anzeige diskretisiert ($y = -100, 99.5, \dots, 100mm$ und $z = 400, 401, \dots, 1500mm$).

Von allen diskreten Raumpunkten wird der Winkel zu jedem Messpunkt bestimmt und die resultierenden Stereokontraste $C_L^n(y, z)$ und $C_R^n(y, z)$ im Raum aus der monokularen Stereokontrastverteilungsfunktion für die linke und rechte Ansicht des jeweiligen Messpunktes n bestimmt. Für jeden Raumpunkt ergeben sich N_{max} monokulare Stereokontraste. Der geringste wahrgenommene Stereokontrast definiert den monokularen Stereokontrast am Raumpunkt (y, z) .

$$\begin{aligned} C_L(y, z) &= \min(C_L^1(y, z), \dots, C_L^n(y, z)) \\ C_R(y, z) &= \min(C_R^1(y, z), \dots, C_R^n(y, z)) \end{aligned} \quad (5.12)$$

Es resultieren die rautenförmigen monokularen Stereozonen mit Kontrastverlauf, wie in Abbildung 5.12 exemplarisch für den Messpunkt 22 des Betrachtungsabstan-

des 750 mm dargestellt. An diesem werden im Maximum Kontraste von über 25:1

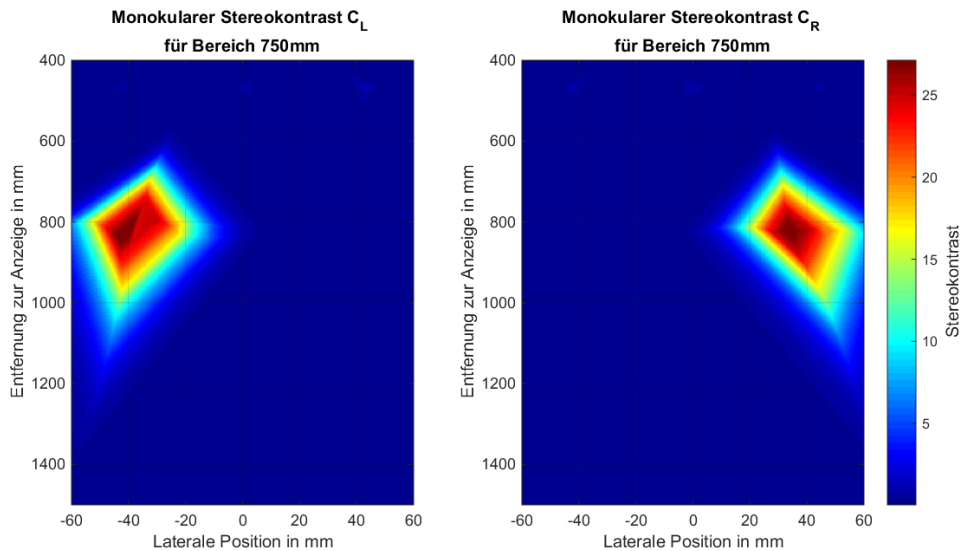


Abbildung 5.12: Darstellung der monokularen Stereozonen C_L und C_R im Raum vor der Anzeige für den Fall einer Voll-Pitch Adaption auf den Betrachtungsabstand 750 mm für die Anzeige des Vorversuchs; Farbblich dargestellt ist der Stereokonstrast

für den monokularen Stereokonstrast erreicht. Die breiteste Ausdehnung wird bei 800 mm gemessen.

Zur Bestimmung der monokularen Stereoraute wird der Schwellwert des Stereokonstrast von 10:1 angenommen. In Abbildung 5.13 sind die gemessenen monokularen Stereoraute für alle 5 Bereiche der Anzeige eingezeichnet. Die Kontur definiert die Grenze, ab derer der Stereokonstrast über dem festgelegten Schwellwert von 10:1 liegt. Es ist klar zu erkennen, dass die Adaptionmethode funktioniert. Bei Änderung des mittleren Pixelpitch der Barriere durch die Voll-Pitchmethode verschieben sich die Stereozonen.

Es fällt jedoch auf, dass die breiteste laterale Ausdehnung der monokularen Stereoraute nicht an den berechneten Betrachtungsabständen auftritt, sondern für ungefähr um 50-100 mm größere Betrachtungsabstände. Ausnahme bildet hierbei der Bereich für den Betrachtungsabstand 1100 mm, der deutlich weiter verschoben ist. Grund hierfür können Schwankungen des Abstandes von der Flüssigkristallanzeige zur Barriere sein. Die im weiteren Verlauf der Arbeit getesteten Anzeigen wiesen keine Abweichung auf, sodass die Theorie und die Messtechnik als richtig angesehen

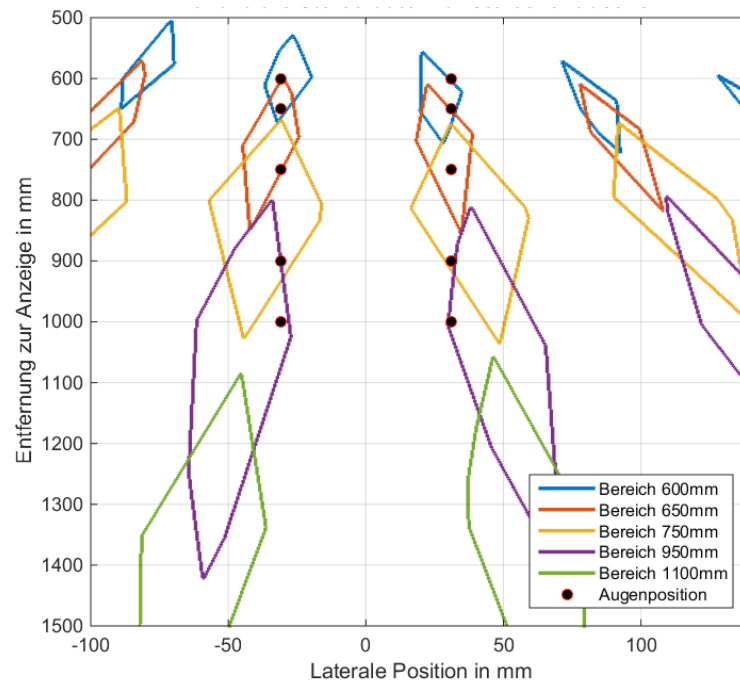


Abbildung 5.13: Gemessene Monokulare Stereozonen für die 5 Betrachtungsbereiche der Anzeige des Vorversuchs

werden. Es ist zu vermuten, dass ein Herstellungsfehler beim Bonding (Verbindung der Barriere mit der Flüssigkristallanzeige) auftrat.

Des Weiteren ist erkennbar, dass die longitudinale Ausdehnung der stereoskopischen Bereiche mit dem Betrachtungsabstand zunimmt. Der Grund hierfür ist die Abnahme des Blickwinkels auf die Ränder der Anzeige bei Vergrößerung des Betrachtungsabstandes. Der Überlappungsbereich der abstrahlenden Barriereöffnungen nimmt zu. Die größte laterale Ausdehnung des stereoskopischen Betrachtungsbereichs beträgt ≈ 40 mm und tritt für den Bereich des initialen Betrachtungsabstand von 750 mm auf. Für kleinere Betrachtungsabstände nimmt die laterale Ausdehnung schnell ab. Als schwarze Punkte wurden in Abbildung 5.13 die Augenpositionen in den geplanten Augenabständen eingezeichnet.

Für den initialen Betrachtungsabstand 750 mm liegen beide Augen wie erwartet relativ zentral in den monokularen Stereorauten. Für die Betrachtungsbereiche 600 mm und 650 mm liegen die Augenpositionen tendenziell am äußeren Rand der Stereorauten. Im Betrachtungsabstand 950 mm liegen die Augen an der inneren Grenze

der Stereoraute. Für den Betrachtungsabstand 1100 mm liegen die Augenpositionen außerhalb der Stereoraute. In diesem Abstand würde ein Betrachter mit Augenabstand 62 mm einen Stereokontrast kleiner als 10:1 wahrnehmen.

Unabhängig von der fehlerhaften Adaption auf die vorgegebenen Betrachtungsabstände ist zu erkennen, dass der Abstand der linken und rechten monokularen Stereozonen mit größerem Betrachtungsabstand zunimmt, was dazu führt, dass ein Betrachter sich mit seinen Augen nicht mehr mittig in der Stereozone befindet.

3D-Stereozone

Zur Bestimmung der Größe des Bewegungsbereichs des Betrachters, in dem er mit beiden Augen ein stereoskopisches Bild wahrnimmt, wird die 3D-Stereozone bestimmt. Die Bestimmung der 3D-Stereozonen für die fünf Betrachtungsabstände mit Stereokontrasten größer als 10:1 erfolgt analog zum Vorgehen in den vorherigen Kapiteln, indem die minimale wahrgenommene Leuchtdichte der linken und rechten monokularen Stereozonen bestimmt wird. In Abbildung 5.14 sind die 3D-Stereozone für einen Betrachter mit Augenabstand 62 mm dargestellt. Das Koordinatensystem beschreibt hierbei die Lage des Nasenwurzelpunktes des Betrachters. In der Abbildung sind nur die Stereozonen für vier Betrachtungsabstände zu erkennen. Für den Betrachtungsabstand 1100 mm liegen die monokularen Stereozonen zu weit auseinander, sodass es für einen Betrachter nicht möglich ist, zugleich mit beiden Augen einen Stereokontrast größer als 10:1 wahrzunehmen.

Die größte Ausdehnung besitzt die 3D-Stereozone für den Betrachtungsabstand 750 mm, was erwartet wurde, da der Augbetrachtungsabstand mit 750 mm gewählt wurde.

Drei der vier 3D-Stereozonen überlappen sich. Die überlappenden Rauten ergeben einen Zusammenhängenden Betrachtungsbereich, der von nun an als „**Dynamische 3D-Stereozone**“ bezeichnet wird. Die Zone stellt die Erweiterung der statischen 3D-Stereozone durch dynamische Adaption dar.

Aus der Abbildung ist zu erkennen, dass die Adaptionmethode grundsätzlich funktioniert. Die Dynamische-3D-Stereozone hat eine größere longitudinale Ausdehnung gegenüber der einzelnen 3D-Stereozone für den Betrachtungsabstand 750 mm.

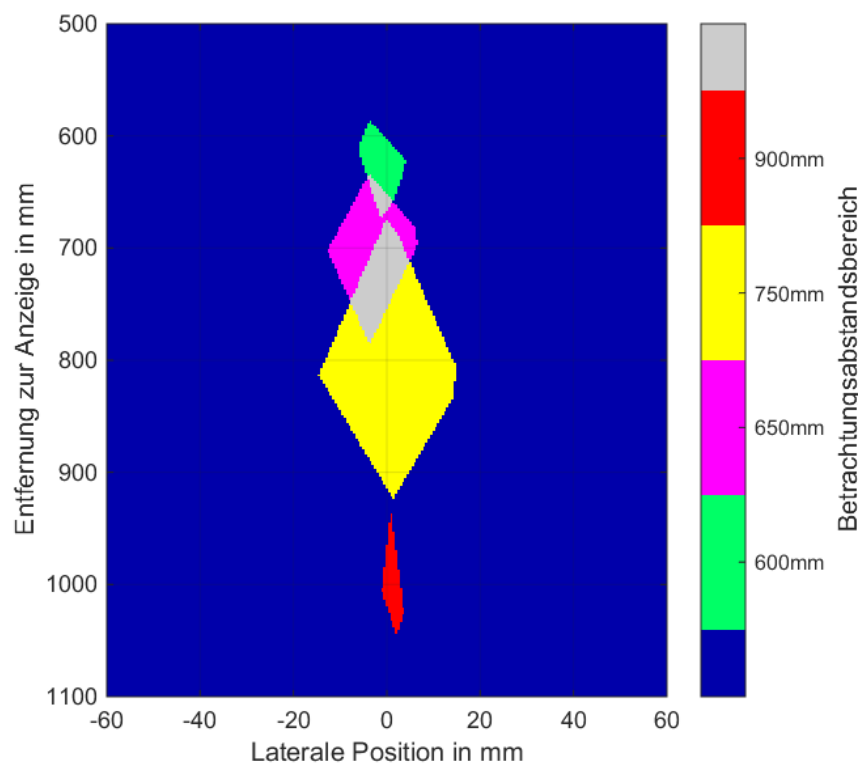


Abbildung 5.14: Die dynamische 3D-Stereozone ergibt sich aus den überlappenden 3D-Stereozonen der vier (für den Betrachtungsabstand 1100 mm ergibt sich keine 3D-Stereozone mehr) Betrachtungsbereiche der Anzeige des Vorversuchs

Untersuchung sichtbarer Störungen auf der Anzeige

Neben dem Nachweis der Funktionsweise der Adaptionmethode wird untersucht, ob das Verfahren zu wahrnehmbaren Störungen führt. Im Mittelpunkt steht die Frage, ob Helligkeitssprünge oder ein sprunghaftes Ansteigen des Crosstalks auf der Anzeige sichtbar ist. Die Auswertung erfolgt aus den Messdaten der zuvor beschriebenen Messung.

Hierzu wird eine Methode vorgestellt, wie aus den Messungen an den einzelnen Punkten auf der Anzeige auf den wahrgenommenen Helligkeits- und Crosstalkverlauf über die gesamte Anzeigebreite geschlossen werden kann.

Das Vorgehen wird für einen Betrachter mit Augenabstand 62 mm und die Betrachtungsabstände (600, 650, 750 und 900 mm) angewendet.

Wahrgenommener horizontaler Helligkeitsverlauf über die Anzeige Ausgehend von der Position des linken und rechten Auges des Betrachters im Raum werden die horizontalen Winkeln φ_L und φ_R , vom Auge zu jedem Messpunkt n am Ort \hat{y} auf der Anzeige bestimmt. Für die stereoskopische Wahrnehmung muss das linke und rechte Auge die jeweils zugehörige Ansicht ungestört wahrnehmen. Der größte Kontrast tritt bei Anzeige von schwarz auf der einen Ansicht und weiß auf der anderen Ansicht auf. Für eine ideale Ansicht ohne Störungen würde ein Betrachter bei Anzeige von L_{WB} mit dem linken Auge ein homogenes weißes Bild und mit dem rechten Auge ein homogenes schwarzes Bild wahrnehmen. Bei L_{BW} entsprechend umgekehrt.

Ausgewertet wird zunächst, welche Leuchtdichte ein Betrachter für die vermessene Anzeige an den Messpunkten wahrnimmt. Es gilt:

$$\begin{aligned} L_L(\hat{y}) &= L_{WB}^n(\varphi_L) \\ L_R(\hat{y}) &= L_{BW}^n(\varphi_R) \end{aligned} \quad (5.13)$$

Hierbei sind $L_L(\hat{y})$ und $L_R(\hat{y})$ die Leuchtdichten des Messpunkts n am Ort \hat{y} .

In den Abbildungen 5.16 und 5.17 sind die an den Messpunkten wahrgenommenen Leuchtdichten für einen Betrachter zentral vor der Anzeige im jeweiligen Betrachtungsabstand als schwarze Rauten eingezeichnet.

Um den Helligkeitsverlauf über die gesamte Anzeigenbreite und nicht nur an den gemessenen Punkten zu bestimmen, wird die Verschiebung der Barriereöffnung jeweils innerhalb einer Zone berechnet. Als Zone wird hierbei der Bereich zwischen zwei Schaltstellen bezeichnet (vgl. Abb. 5.10). Aus der Verschiebung wird die Leuchtdichte aus der Abstrahlcharakteristik bestimmt. Hierzu wird zunächst der Verschiebungswinkel an jedem Messpunkt berechnet. Dies geschieht, indem der Schnittpunkt der Helligkeitsverteilungen $L_{WB}^n(\varphi)$ und $L_{BW}^n(\varphi)$ bestimmt wird. Exemplarisch sind in Abbildung 5.15 die Leuchtdichteverteilungen für die Messpunkte 12 und 13 dargestellt. Am Messpunkt 12, am äußersten Rand der Anzeige ist die Helligkeitsverteilung um $7,8^\circ$ verschoben (roter Kreis), an Messpunkt 13 beträgt der Verschiebungswinkel $5,1^\circ$. Im idealen Betrachtungsabstand entspricht dies dem Winkel zwischen dem Nasenwurzelpunkt des Betrachters und dem Messpunkt. Wie in der Beschreibung der Adaptionmethode dargestellt, verhält sich die Verschiebung innerhalb einer

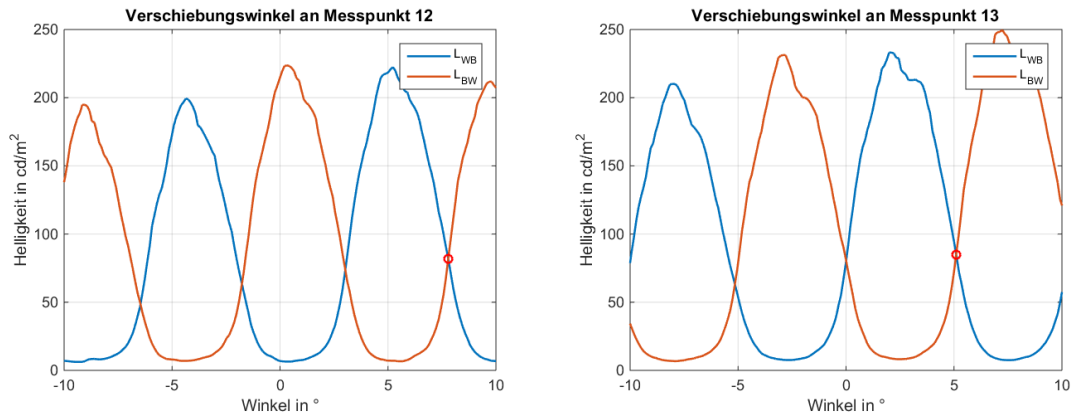


Abbildung 5.15: Der Verschiebungswinkel (roter Kreis) beschreibt den Winkel zwischen Nasenwurzelpunkt eines Betrachters zentral vor der Anzeige und dem Messpunkt auf der Anzeige. An dem Punkt schneiden sich die Helligkeitsverteilungen L_{WB} und L_{BW} . Da sich der Messpunkt 12 (linke Darstellung) weiter am Rand der Anzeige befindet, als Punkt 13 (rechte Darstellung) ist dieser größer.

Zone der Anzeige linear. In jeder Zone wurden jeweils am Rand Messungen durchgeführt. Die gemessenen Verschiebungswinkel an den zwei Messpunkten werden als Stützstellen einer linearen Interpolation angenommen. In jede Zone wird der Verschiebungswinkel für alle Barriereöffnungen durch lineare Inter- und Extrapolation bestimmt. Als Beispiel wird hier die Zone für die Messpunkte 12 und 13 angegeben.

$$\alpha_{12/13}(\hat{y}) = \alpha_{12} + \frac{\alpha_{13} - \alpha_{12}}{(\hat{y}_{13} - \hat{y}_{12})} \cdot (\hat{y} - y_{12}) \quad (5.14)$$

Hierbei ist $\alpha_{12/13}(\hat{y})$ der Verschiebungswinkel an den Barriereöffnung k der Zone, in welcher die Messpunkte 12 und 13 liegen; $\alpha_{12,13}$ sind die jeweiligen Verschiebungswinkel an den Messpunkten 12 und 13 und $y_{12/13}$ sind die Position der Barriereöffnung an den Messpunkten 12 und 13.

Da die Verschiebung der Barriereöffnung nur den Abstrahlwinkel nicht jedoch die Charakteristik des Abstrahlverhaltens ändert, kann die Abstrahlcharakteristik jeder Barriereöffnungen innerhalb einer Zone bestimmt werden, indem die an einem Messpunkt bestimmten Helligkeitsverteilungen um die Differenz der Verschiebungswinkel des Messpunktes und der untersuchten Position verschoben wird. In Gleichung (5.15)

ist die Bestimmung der Abstrahlcharakteristik L_{WB} für beliebige Barriereöffnungen innerhalb der Zone der Messpunkte 12 und 13 dargestellt.

$$L_{WB}(\hat{y}, \varphi) = L_{WB}(\hat{y}_{12}, \varphi + [\alpha_{12/13}(\hat{y}) - \alpha_{12}]) \quad (5.15)$$

Die Bestimmung der Helligkeitsverteilungen L_{BW} , L_{WW} und L_{BB} erfolgt analog in jeder Zone. Zur Bestimmung der relativen Helligkeiten wird für jede Barriereöffnung der Winkel zum linken und rechten Auge des Betrachters bestimmt und mit diesem aus den normierten Verteilungskurven L_{WB} und L_{BW} die Leuchtdichten abgelesen. Es ergeben sich die in den Abbildungen 5.16 und 5.17 dargestellten Helligkeitsver-

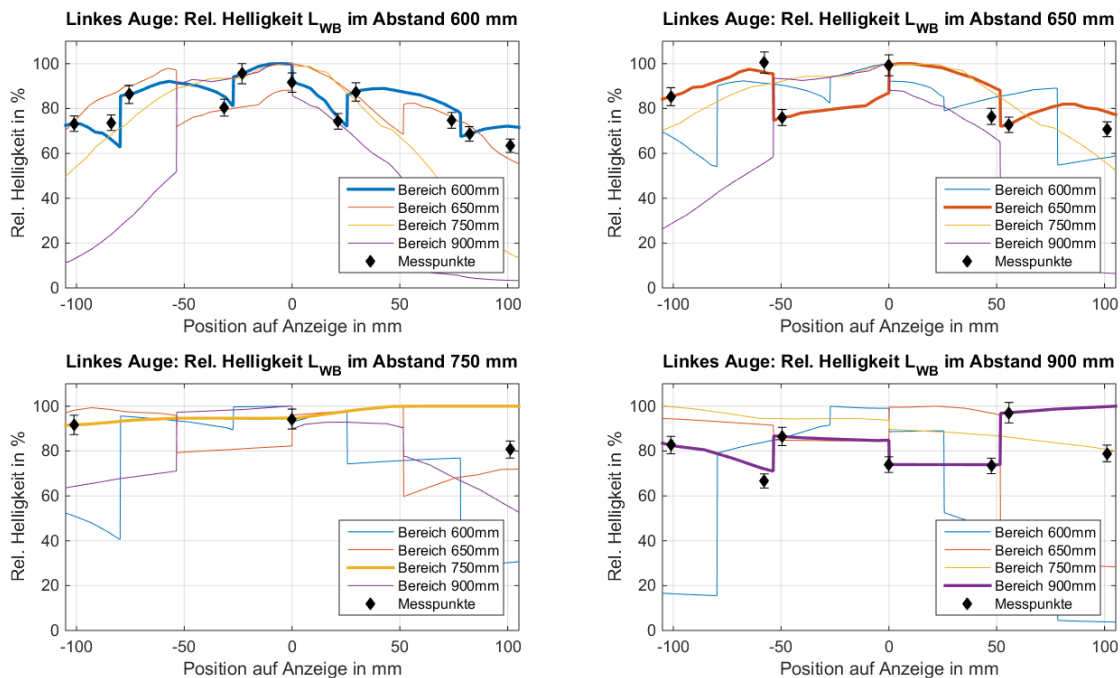


Abbildung 5.16: Simulierte Leuchtdichteverläufe und gemessene Leuchtdichten für L_{WB} dargestellt über die Anzeigenbreite. Links oben befindet sich der Betrachter zentral im Abstand von 600 mm vor der Anzeige. Die farblichen Verläufe beschreiben die berechneten Helligkeiten, die ein Betrachter in den vier Bereichen auf der Anzeige mit dem linken Auge wahr nimmt. Die weiteren Grafiken zeigen die gleiche Darstellung für Betrachtungsabstände 650 mm, 750 mm und 900 mm.

läufe über die gesamte Anzeigenbreite. In den vier Abbildungen 5.16 wird jeweils für die Betrachtungsabstände 600, 650, 750 und 950 mm dargestellt, welche Helligkeitsverläufe mit dem linken Auge in jedem Bereich der Anzeige wahrgenommen

werden. In Abbildung 5.17 erfolgt die gleiche Darstellung für das rechte Auge. Be-

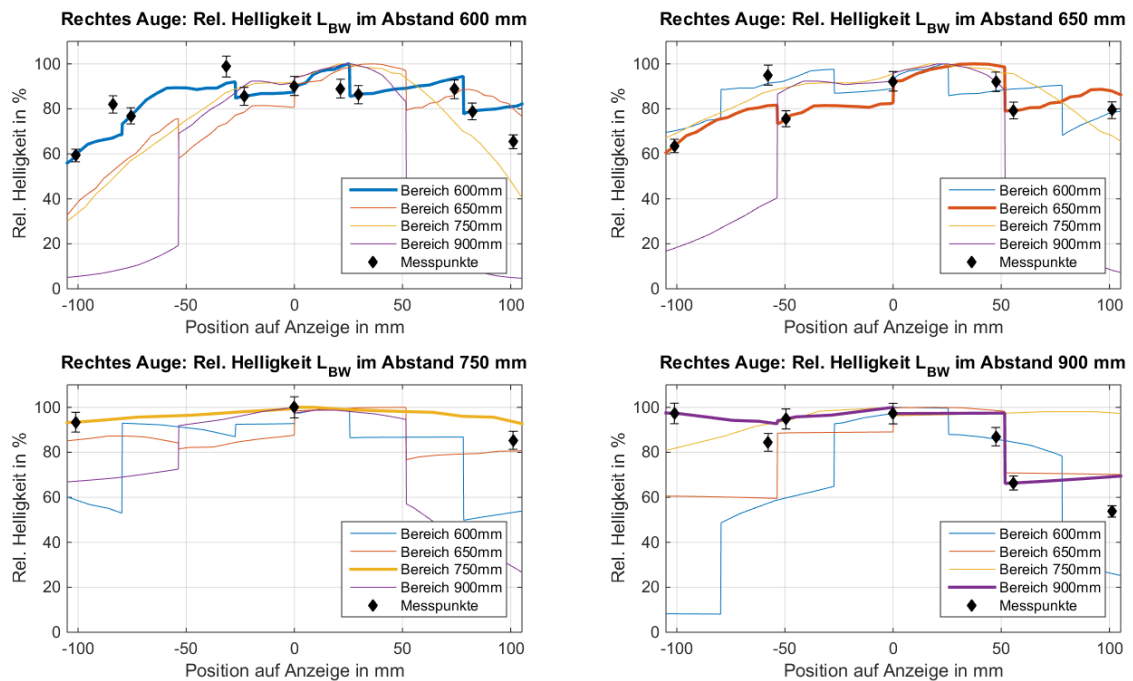


Abbildung 5.17: Simulierte Leuchtdichteverläufe und gemessene Leuchtdichten für L_{BW} dargestellt über die Anzeigenbreite. Links oben befindet sich der Betrachter zentral im Abstand von 600 mm vor der Anzeige. Die farblichen Verläufe beschreiben die berechneten Helligkeiten, die ein Betrachter in den vier Bereichen auf der Anzeige mit dem rechten Auge wahr nimmt. Die weiteren Grafiken zeigen die gleiche Darstellung für Betrachtungsabstände 650 mm, 750 mm und 900 mm.

findet sich der Betrachter im Abstand 600 mm vor der Anzeige, nimmt er im Bereich 600 mm auf der Anzeige einen Helligkeitsverlauf wahr, der als blaue Kurve dargestellt wird. Betrachtet er vom gleichen Abstand aus den Bereich, der für den Betrachtungsabstandes 750 mm ausgelegt ist, würde er den gelb dargestellten Helligkeitsverlauf der Anzeige wahrnehmen. Es zeigt sich, dass wie erwartet die geringsten Helligkeitsschwankungen in den Bereichen auftreten, die am nächsten dem realen Betrachtungsabstand entsprechen (fett gedruckte Kurven).

Im Abstand 750 mm und den Betrachtungsbereich 750 mm nimmt die Leuchtdichte zum Rand hin leicht ab, der Betrachter würde dies kaum wahrnehmen. In diesem Betrachtungsabstand findet keine Adaption der Barriere statt.

Für alle anderen Betrachtungsabstände, in denen die Barriere adaptieren muss, treten selbst im besten Bereich der Anzeige an den Schaltstellen Helligkeitssprünge auf. Diese sprunghafte Änderung der wahrgenommenen Leuchtdichte ist von den im vorherigen Kapitel beschriebenen Helligkeitssprüngen bei der lateralen Adaption zu unterscheiden. Bei der lateralen Adaption handelte es sich um einen zeitlichen Effekt, wodurch die Helligkeitsvariation verschwindet sobald der Betrachter in Ruhe ist. Die hier auftretenden Helligkeitssprünge an den Schaltstellen sind ortsabhängig und sind auch vorhanden, wenn der Betrachter in Ruhe ist.

Die Wahrnehmung von Helligkeitsunterschieden benachbarter Bereiche wird durch das „Weber-Gesetz“ [77] beschrieben. Dies besagt, dass Helligkeitsunterschiede wahrnehmbar sind, wenn die Differenz mehr als 1% des dominanten Leuchtdichtereizes beträgt.

Für die gemessenen Helligkeitssprünge im Bereich von 5-20% für den Betrachtungsabstand 600 mm und sogar 10-30% im Betrachtungsabstand 950 mm bedeutet dies, dass die Differenzen deutlich wahrgenommen werden.

Vergleicht man die gemessenen Leuchtdichten an den einzelnen Messpunkten mit den rechnerisch bestimmten Leuchtdichteverläufen fällt auf, dass nicht alle Punkte auf den erwarteten Kurven liegen. Die Methode, den Leuchtdichteverlauf aus wenigen Messpunkten zu interpolieren, zeigt sich sehr anfällig, da kleine Messfehler durch die Interpolation auf die gesamte Zone übertragen werden.

Dennoch ist die Methode ausreichend gut, um zu erkennen, dass an den Schaltstellen große Helligkeitssprünge auftreten.

Crosstalkverlauf über die Anzeigenbreite Neben der wahrgenommenen Helligkeitsverteilung wird auch untersucht, wie sich der Crosstalk auf der Anzeige ändert.

Der Crosstalkverlauf über die Anzeigenbreite kann aus den zuvor berechneten Helligkeitsverteilungskurven bestimmt werden:

$$\begin{aligned}
 XT_L(\hat{y}, \varphi) &= \frac{L_{BW}(\hat{y}, \varphi) - L_{BB}(\hat{y}, \varphi)}{L_{WB}(\hat{y}, \varphi) - L_{BB}(\hat{y}, \varphi)} \\
 XT_R(\hat{y}, \varphi) &= \frac{L_{WB}(\hat{y}, \varphi) - L_{BB}(\hat{y}, \varphi)}{L_{BW}(\hat{y}, \varphi) - L_{BB}(\hat{y}, \varphi)}
 \end{aligned}
 \tag{5.16}$$

In den Abbildungen 5.18 und 5.19 sind die Crosstalkverläufe jeweils für das linke und rechte Auge für alle Bereiche dargestellt, betrachtet aus den vier Betrachtungsabständen 600, 650, 750 und 950 mm. Wie bei der Leuchtdichte gilt, dass Sprünge

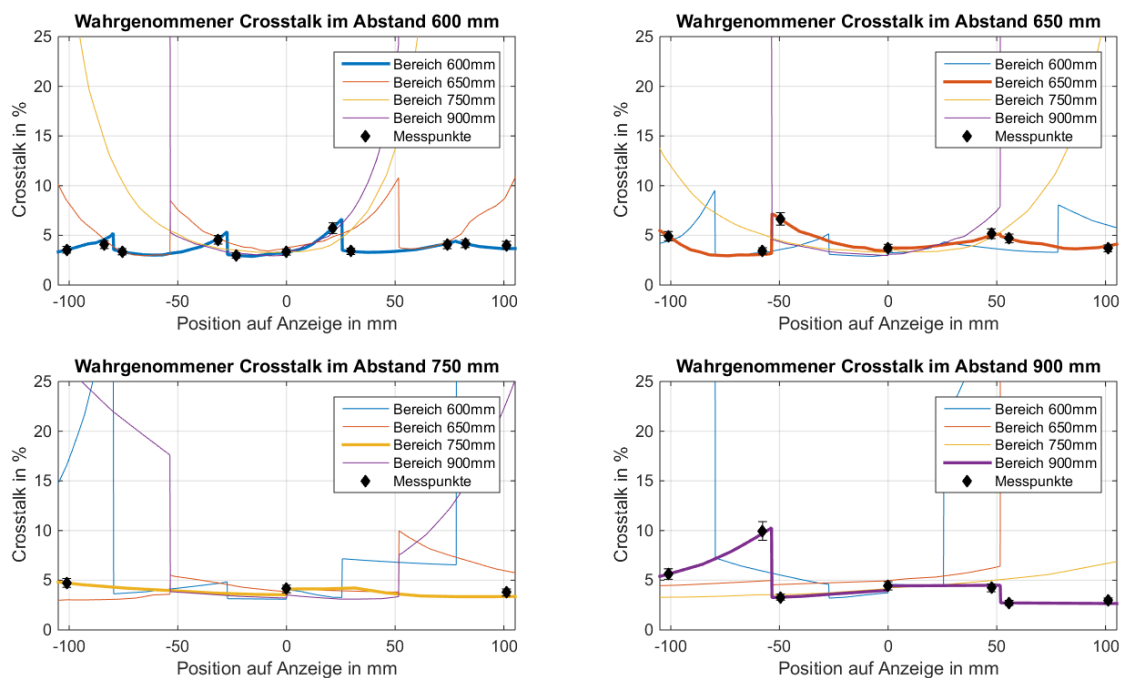


Abbildung 5.18: Simulierte Crosstalkverläufe und gemessene Werte für XT_L dargestellt über die Breite der Anzeige. Links oben befindet sich der Betrachter zentral vor der Anzeige im Abstand 600 mm. Die farblich unterschiedlich dargestellten Verläufe beschreiben die simulierte Crosstalkwerte, die ein Betrachter in den vier Bereichen auf der Anzeige mit dem linken Auge wahrnehmen würde. Die weiteren Grafiken zeigen die gleichen Darstellungen für einen Betrachter in den Abständen 650 mm, 750 mm und 900 mm.

an den Schaltstellen auftreten. Diese sind im designierten Betrachtungsabstand des jeweiligen Bereichs am geringsten.

An den Schaltstellen nimmt der Crosstalk um 3-7% zu und nimmt im Maximum Werte von 12% an. Eine solche starke Zunahme des Übersprechens führt mit einer hohen Wahrscheinlichkeit zu einer Wahrnehmung von Geisterbildern oder hat zur Folge, dass die zulässigen Kontraste zwischen den Ansichten deutlich eingeschränkt werden müssen.

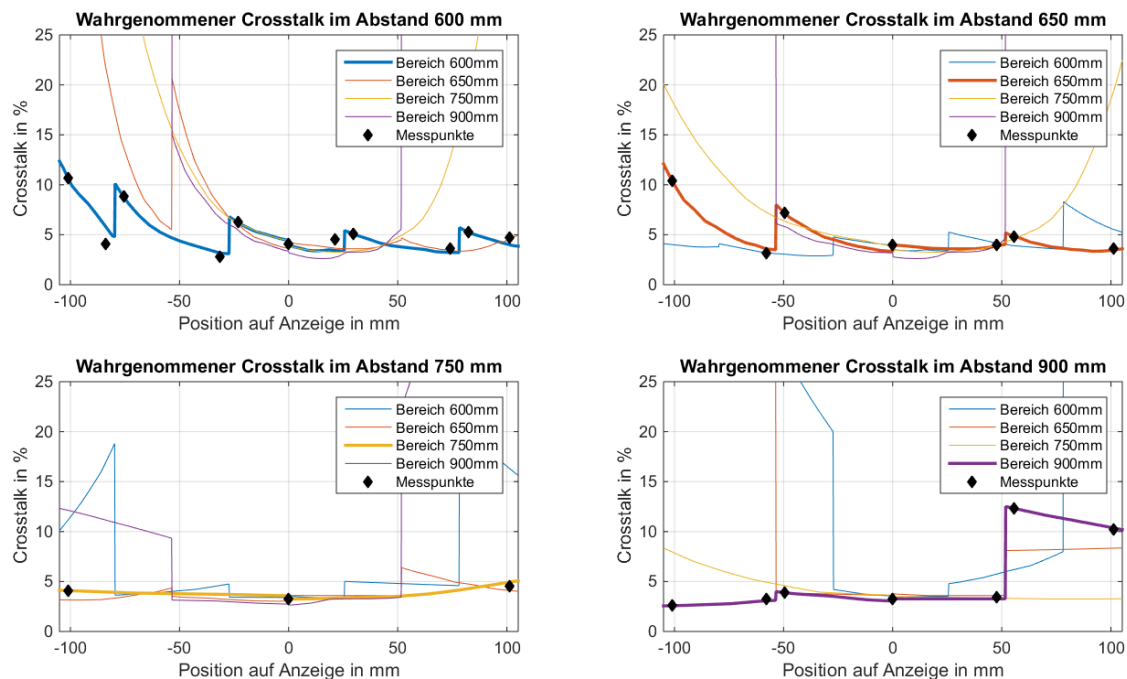


Abbildung 5.19: Simulierte Crosstalkverläufe und gemessene Werte für XT_R dargestellt über die Breite der Anzeige. Links oben befindet sich der Betrachter zentral vor der Anzeige im Abstand 600 mm. Die farblich unterschiedlich dargestellten Verläufe beschreiben die simulierten Crosstalkwerte, die ein Betrachter in den vier Bereichen auf der Anzeige mit dem rechten Auge wahrnehmen würde. Die weiteren Grafiken zeigen die gleichen Darstellungen für einen Betrachter in den Abständen 650 mm, 750 mm und 900 mm.

Zwischen den Verläufen, wahrgenommen mit dem rechten und linken Auge bestehen inhaltlich kaum Unterschiede, sodass es für die folgenden Messungen ausreichend ist, nur eine Ansicht zu untersuchen.

5.2.5 Visuelle Bewertung: Adaptionmethode Voll-Pitch

Bei der visuellen Auswertung der Anzeige wurden verschiedene Testbilder auf der Anzeige dargestellt und durch den Autor visuell bewertet.

Das erste Testbild war die Darstellung eines vollflächig roten Bildes für die linke Ansicht (R:255,G:0,B:0) und eines vollflächig grünen Bildes für die rechte Ansicht (R:0,G:255,B:0). Diese Darstellung stellt eine gute Möglichkeit dar, die Kanaltrennung zu bewerten. Je größer das Übersprechen, desto gelber wird das wahrgenom-

mene Bild. Es war klar zu erkennen, dass die Adaptionsmethode funktioniert. Bei Änderung des Betrachtungsabstandes von 600-1000 mm bei zentraler Position vor der Anzeige konnte beobachtet werden, wie die Kanaltrennung jeweils für den zum Betrachtungsabstand zugehörigen Bereich ihr Optimum annahm.

Für Betrachtungsabstände außerhalb des idealen Betrachtungsabstandes wurde jedoch Übersprechen an den Schaltstellen beobachtet. Die Sichtbarkeit der Störungen nahm schon bei kleinen lateralen Positionsänderungen zu.

Bei Darstellungen eines stereoskopischen Bildes mit typischen Inhalten eines Kombiinstruments waren weniger Störungen an den Schaltstellen sichtbar. Bei lateraler Bewegung stieg der Crosstalk jedoch schnell an, wodurch Geisterbilder in Erscheinung traten.

Im idealen Betrachtungsabstand wurden nur bei starken Kontrasten zwischen den Ansichten Übersprechen beobachtet. Der Vergleich mit den Messdaten lässt darauf schließen, dass erst ab einem Crosstalk von über 5% für das Testbild deutlich sichtbare Störungen auftraten.

Als letzten Inhalt wurden WB und BW Bilder angezeigt, bei denen jeweils eine Ansicht vollflächig weiß und die andere vollflächig schwarz ist. Dies stellt den extremsten Kontrast zwischen den Ansichten dar. Bei dieser Darstellung konnten deutliche Helligkeitssprünge an den Schaltstellen beobachtet werden. Die Helligkeitssprünge wurden in jedem Betrachtungsabstand beobachtet. Selbst kleine Helligkeitsschwankungen an einer Schaltstelle wurden durch die sprunghafte Änderung als Kante wahrgenommen.

5.2.6 Diskussion: Vorversuch Adaptionsmethode Voll-Pitch

Der Vorversuch hat gezeigt, dass die Adaptionsmethode grundsätzlich funktioniert. Die maximalen und minimalen Betrachtungsabstände, auf die adaptiert werden kann, sind limitiert, da ab einer gewissen Entfernung der Betrachter nicht mehr mit beiden Augen innerhalb der monokularen Stereozone liegen kann. Für den geforderten stereoskopischen Betrachtungsbereich ist die Methode jedoch anwendbar. Die visuelle und messtechnische Auswertung hat gezeigt, dass an den Schaltstellen deutlich wahrnehmbare Helligkeitssprünge auftreten. Diese sind allen Betrachtungsabständen sichtbar mit Ausnahme des idealen Betrachtungsabstandes, da die An-

zeige dort prinzipbedingt keine Schaltstellen besitzt.

Crosstalksprünge traten ebenfalls auf, führten jedoch bei Anzeige von angestrebten Inhalten zu weniger sichtbaren Störungen als die Helligkeitssprünge.

Der Grund für die sichtbaren Helligkeitssprünge liegt in der Abstrahlcharakteristik der Anzeige und der Sprungweite während der Adaption. An einer Schaltstelle wird bei der Voll-Pitch-Adaptionsmethode um einen ganzen Barriersubpixel weitergeschaltet.

Ein Barriersubpixel der Anzeige des Vorversuchs hat eine horizontale Ausdehnung von $p_{B,sub} = 17,1 \mu\text{m}$. Mit dem Abstand Barriere-LCD d_B von 1,224 mm und dem Brechungsindex $n = 1.52$ kann nach Gleichung (5.17) der Winkel bestimmt werden, um den sich die Abstrahlcharakteristik an einer Schaltstelle sprunghaft ändert. In Kleinwinkelnäherung gilt:

$$\Delta\alpha_{voll} \approx \arctan\left(\frac{n \cdot p_{B,sub}}{d_B}\right) = 1,21^\circ \quad (5.17)$$

In Abbildung 5.20 ist die Helligkeitsverteilung L_{WB} über dem Winkel dargestellt, wie sie einer Barriereöffnung zentral auf der Anzeige abgestrahlt wird (rot). Liegt

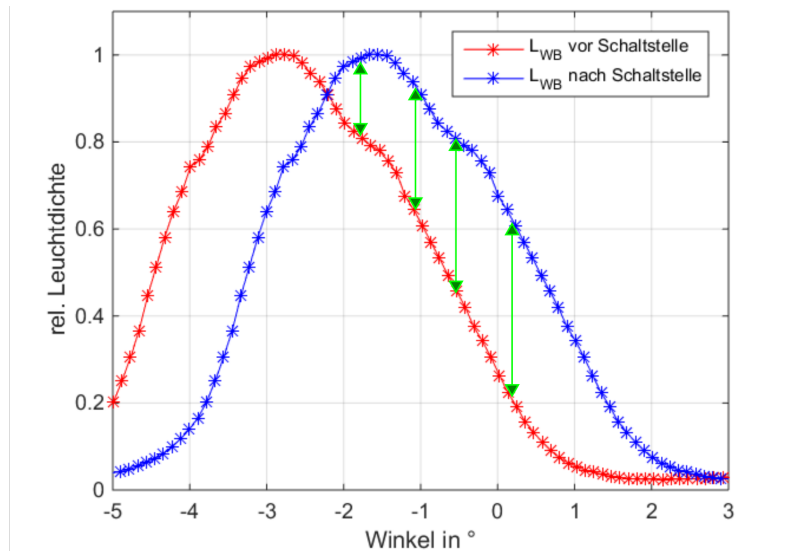


Abbildung 5.20: Die wahrgenommenen Helligkeitssprünge (grün) an den Schaltstellen sind abhängig von der Abstrahlcharakteristik und der Subpixelgröße der Barriere

nun zwischen einer benachbarten Barriereöffnung eine Schaltstelle, wird von der benachbarten Barriereöffnung die um den Winkel $\Delta\alpha_{voll}$ verschobene Helligkeitsverteilung (blau dargestellt) abgestrahlt. Abhängig von dem Blickwinkel, unter dem ein

Betrachter auf die zwei benachbarten Barriereöffnungen blickt, nimmt er die Leuchtdichtedifferenz zwischen den Kurven als Helligkeitssprung wahr (angedeutet durch die grünen Pfeile). Im dynamischen Fall, in dem die Barriere kontinuierlich auf die Betrachterposition reagiert, wird der Blickwinkel auch von der Latenz des Gesamtsystems bestimmt. Je größer diese ist, desto weiter kann sich ein Betrachter bewegen bevor die Anzeige adaptiert und umso stärker steigen die Helligkeitssprünge an.

Um die wahrgenommenen Helligkeitssprünge zu reduzieren, muss die Abstrahlcharakteristik optimiert, die Sprungweite reduziert und bei dynamischen Anzeigen, wie im nächsten Abschnitt beschrieben, die Latenzzeit minimiert werden.

Würde die Abstrahlcharakteristik ein Helligkeitsplateau mit ausreichender Breite bilden, wären kaum Leuchtdichteunterschiede sichtbar, wenn die Kurven gegeneinander verschoben würden. Eine Konsequenz des Vorversuchs ist daher die Optimierung der Abstrahlcharakteristik, wie sie ausführlich im Kapitel 6 vorgestellt wird.

Eine Reduzierung des Winkels, um den die Kurven gegeneinander verschoben sind, wird erreicht, indem die Sprungweite der Barriere bei Adaption verringert wird. Dies könnte durch eine Minimierung der Subpixelgröße der Barriere geschehen, was herstellungstechnisch jedoch nicht beliebig möglich ist. Es wurde daher eine neue Adaptionmethode entwickelt, die im nächsten Abschnitt vorgestellt wird.

5.3 Experimentelle Untersuchung der Diskreten Abstandsadaptionsmethode Halb-Pitch

Die im vorherigen Abschnitt vorgestellte Adaptionmethode demonstriert erfolgreich das grundlegende Adaptionsprinzip. Bei der Adaption traten jedoch sichtbare Helligkeits- und Crosstalksprünge auf. Zur Reduzierung der Störungen an den Schaltstellen soll die Sprungweite bei der Adaption verringert werden. Eine Steigerung der Barriereauflösung ist technisch jedoch kein leichtes Unterfangen. Bei der Anzeige des Vorversuchs beträgt die Subpixelgröße der Barriere ungefähr bei 17 μm . Die Anzeigauflösung entspricht jedoch nicht der angestrebten hochauflösenden Anzeige. Bei Verringerung des Pixelpitchs der Anzeige muss der Abstand der Barriere zur Flüssigkristallanzeige ebenfalls verringert werden, um den Augbetrachtungsabstand konstant zu halten.

Um die Sprungweite bei der Adaption deutlich unter die $1,2^\circ$ der Voll-Pitch Anzeige zu verbessern und gleichzeitig die Anzeigenauflösung zu steigern, muss die Subpixelgröße der Barriere unter $10\ \mu\text{m}$ verringert werden. Dies stellt sehr hohe Anforderungen an den Herstellungsprozess.

Ein weiteres Problem stellt die Ansteuerung der einzelnen Subpixel der Barriere dar. Bei einer theoretischen Verdoppelung der Barriereauflösung für eine Anzeige mit 2560 Pixeln in horizontaler Anordnung würde sich eine Anzahl von 60.000 Subpixeln ergeben die individuell mit gleicher Anzahl an Spaltentreibern adressiert werden müssten. Dies ist mit heutiger Anzeigentechnik nicht zu realisieren. Um die Sprungweite dennoch zu reduzieren, wurde daher die Halb-Pitch Adaptionmethode entwickelt.

Im folgenden Abschnitt wird die neue Adaptionmethode erklärt und im Anschluss die Umsetzung in der „*Prototypischen Anzeige 2*“ demonstriert.

Der Aufbau der Anzeige erfolgte in Kooperation mit einem japanischen Anzeigehersteller. Neben der Halb-Pitch Adaptionmethode wurde in der prototypischen Anzeige auch eine optimierte Abstrahlcharakteristik der Barriereöffnungen umgesetzt. Eine ausführliche Herleitung erfolgt im nächsten Kapitel 6, die Anwendung erfolgt jedoch bereits in der hier vorgestellten Anzeige.

5.3.1 Diskrete Adaptionmethode: Halb-Pitch

Die Halb-Pitch Adaptionmethode basiert auf dem Ansatz fixer Schaltstellen. Die Lage der Schaltstellen wird initial festgelegt. Dies vereinfacht die Ansteuerung der Barriere deutlich, da die Barriere bei der Adaption in der Zone zwischen zwei Schaltstellen eine feste Periode besitzt und bei Adaption das gesamte periodische Muster nur subpixelweise nach links und rechts verschoben wird. Innerhalb einer Zone verhält sich jeder n -te Barriersubpixel (mit n =Anzahl der Subpixel pro Barriereöffnung) identisch. Die minimale Anzahl an Spaltentreibern zum Adressieren reduziert sich auf wenige hundert.

An den örtlich festen Schaltstellen wird ein Subpixel mit einer 1.5fachen Breite eines normalen Subpixels eingebracht. Ein solcher Subpixel mit 1.5facher Breite stellt produktionstechnisch keine Herausforderung dar. In Abbildung 5.21 ist die Änderung des Pixelpitchs bei Vergrößerung und Verringerung des mittleren Pixelpitchs

dargestellt. Die Schaltpixel mit 1.5-facher Breite wurden farblich markiert, in dem dargestellten Beispiel wären diese nicht transparent geschaltet.

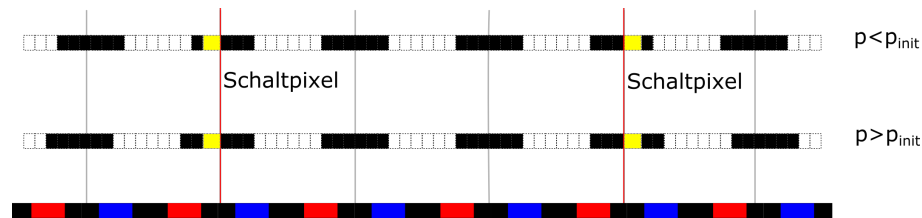


Abbildung 5.21: Prinzip der Halb-Pitch Adaption mit örtlich festen Schaltstellen; In gelb sind die Schaltstellen mit einer Größe des 1.5-fachen der Barrieresubpixelgröße dargestellt, für den Fall einer Barrierepixelpitchverkleinerung (oben) und einer Vergrößerung (unten) dargestellt.

Das Einfügen eines Subpixels mit 1.5facher Breite ermöglicht es, die Periodizität der Barriere um einen halben Subpixelpitch zu ändern. Die Methode wird daher als **Halb-Pitch Adaption** bezeichnet. Im Gegensatz zur Voll-Pitch Adaption besteht jedoch nicht mehr die Möglichkeit, einen Barrierezustand ohne jegliche Schaltstellen zu erhalten. Die fest eingebrachten „halben“ Subpixel machen es zwingend notwendig, an jeder Schaltstelle nach innen oder außen zu schalten.

Anzahl der Schaltstellen

Im Gegensatz zur Voll-Pitch Methode ist die Anzahl der Schaltstellen für verschiedene Betrachtungsabstände nicht variabel, sondern für alle Abstände durch die Anzahl der eingebrachten 1,5-fachen Subpixel fest vorgegeben.

Da jede Schaltstelle potentiell zu sichtbaren Störungen führen kann, wurde die Prämisse verfolgt, die Anzahl der Schaltstellen so gering wie möglich zu halten.

Die minimale Anzahl der Schaltstellen bestimmt sich über den größten oder kleinsten Betrachtungsabstand und die Breite der Anzeige. Die größte Differenz zwischen

dem idealen Betrachtungsabstand und dem maximalen oder minimalen Abstand bestimmt die minimal notwendige Anzahl an Schaltstellen.

$$j_{min} = \max \left\{ \frac{D \cdot |p_{B,init} - p_{B,d_{min}}|}{p_{D,sub} \cdot p_{B,sub}}, \frac{D \cdot |p_{B,init} - p_{B,d_{max}}|}{p_{D,sub} \cdot p_{B,sub}} \right\}$$

$$N_{halb} = \lfloor j_{min} \rfloor_2$$

$p_{B,init}$:= initialer Barrierepitch

D := Breite der Anzeige

$p_{B,d_{min}}$:= idealer Barrierepitch für den kleinsten Betrachtungsabstand

$p_{B,d_{max}}$:= idealer Barrierepitch für den größten Betrachtungsabstand

$p_{B,sub}$:= Subpitch der Barriere

j := Anzahl der notwendigen Schaltstellen

(5.18)

Die minimale Anzahl der Schaltstellen für die Halb-Pitch Methode N_{halb} ergibt sich, wenn j_{min} auf das nächste Vielfache von Zwei gerundet wird. N_{halb} beschreibt die minimale notwendige Anzahl von Schaltstellen, die Auswirkung von mehr Schaltstellen wird im späteren Verlauf untersucht.

Lage der Schaltstellen

Die Schaltstellen werden in äquidistanten Abständen von der Mitte ausgehend auf der Anzeige platziert. Der Abstand der Schaltstellen bestimmt sich durch Gleichung (5.19).

$$\Delta c = \frac{D}{j_{min}} \quad (5.19)$$

Die Schaltstellen stellen ergeben sich zu

$$c_k = \pm \left(\frac{\Delta c}{2} + k \cdot \Delta c \right) \quad \text{mit} \quad k = [1, \dots, N_{halb}] \quad (5.20)$$

Aus dieser Definition folgt, dass die bestmögliche Adaption am maximalen oder minimalen Betrachtungsabstand erfolgt, abhängig davon, welcher näher am idealen Betrachtungsabstand liegt. In der Abbildung 5.22 ist exemplarisch die stufenförmige Verschiebungsfunktionen (blau) jeweils für die Betrachtungsabstände 650 (oben), 730 (mittig) und 950 mm (unten) dargestellt. Zur besseren Erkennbarkeit der Schaltbereiche ist nur ein Ausschnitt von -70-70 mm der Anzeige und nicht die gesamte Breite dargestellt!

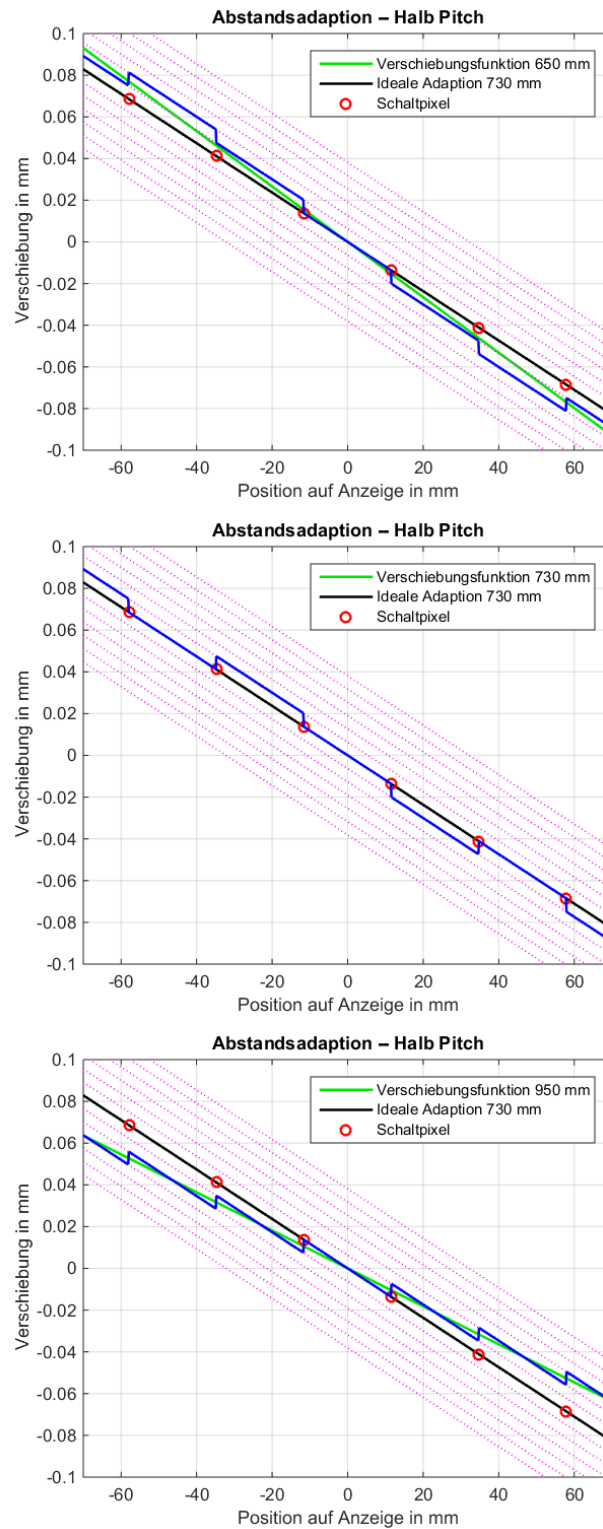


Abbildung 5.22: Berechnete Halb-Pitch Verschiebungsfunktionen (blau) für die Adaption auf die Betrachtungsabstände 650 (oben), 730 (mittig) und 950 mm (unten)

Die Verschiebungsgeraden (Magenta) werden durch Gleichung (5.21) beschrieben und besitzen nun einen Abstand von einem halben Barriersubpixel.

$$g_m(\hat{y}) = (p_{D,sub} - p_{B,init}) \cdot \hat{y} + m \cdot \frac{p_{B,sub}}{2} \quad (5.21)$$

Die drei gewählten Abstände stellen jeweils charakteristische Fälle der Barriereadaption dar.

Der Betrachtungsabstand 730 mm stellt den idealen Barrierebetrachtungsabstand der Prototypischen Anzeige 2 dar. Es ist zu erkennen, dass die Verschiebungsfunktion an den Schaltstellen abwechselnd nach innen und außen geschaltet wird. Die Richtung, in die geschaltet wird, ist für diesen Fall unerheblich und wurde willkürlich festgelegt. Da die Schaltstellen fest in die Barriere eingebracht sind, muss an diesen zwangsweise geschaltet werden, auch wenn es im Fall des idealen Betrachtungsabstand eigentlich nicht notwendig wäre. Es existiert somit kein Betrachtungsabstand mehr, an dem keine Schaltstellen auf der Anzeige mehr existieren.

Der Betrachtungsabstand 950 mm repräsentiert den Betrachtungsabstand, dessen Verschiebungsfunktion am weitesten von der idealen Verschiebungsfunktion den Betrachtungsabstand 730 mm abweicht. Es ist somit der Abstand, der die Lage der Schaltstellen definiert. Als Folge ist zu erkennen, dass für den Betrachtungsabstand 950 mm die diskrete stufenförmige Verschiebungsfunktion (blau) der kontinuierlichen Verschiebungsgeraden (grün) optimal folgt. Die Abweichung ist niemals größer als ein Viertel des Barriersubpixel.

Der Betrachtungsabstand 650 mm steht stellvertretend für alle weiteren Betrachtungsabstände. Für diese adaptiert die Barriere bestmöglich auf den geforderten Betrachtungsabstand (grün). Die Schaltstellen liegen hierbei jedoch eigentlich nicht ideal, wodurch die Abweichungen vom Ideal größer werden können.

Für alle Betrachtungsabstände mit Ausnahme des idealen Betrachtungsabstandes wird nach der folgenden Schaltlogik entschieden, in welche Richtung an der Schaltstelle geschaltet wird. Im Gegensatz zur Voll-Pitch Adaption muss an jeder Schaltstelle geschaltet werden.

Startpunkt hierbei sind die Schaltstellen am nächsten zum Zentrum der Anzeige. Die resultierende Verschiebungsfunktion ist für einen Betrachter zentral vor der An-

zeige punktsymmetrisch, es ist daher ausreichend, die Funktion nur für eine Hälfte der Anzeige zu bestimmen und für die andere Hälfte mit geändertem Vorzeichen zu übernehmen.

Von der Mitte der Anzeige bis zur ersten Schaltstelle ist jede Verschiebungsfunktion $h_z(\hat{y})$ identisch mit der Funktion $g_0(\hat{y})$ (vgl. Gl. (5.22)).

$$h_z(0 \leq \hat{y} \leq c_1) = g_0(0 \leq \hat{y} \leq c_1) \quad (5.22)$$

Ab der ersten Schaltstelle erfolgt die Definition der Verschiebungsfunktion iterativ und abschnittsweise.

Ein Schaltvorgang an einer Schaltstelle beeinflusst auch immer die folgende Schaltstelle. Es wird die Differenz zwischen der Verschiebungsfunktion und der idealen Verschiebungsgeraden an der Schaltstelle c_k und der darauffolgenden c_{k+1} berechnet.

$$\begin{aligned} \Delta d_{+1}(c_k) &= |s_z(c_k) - \left(h_z(c_k) + \frac{p_{B,sub}}{2}\right)| \\ \Delta d_{-1}(c_k) &= |s_z(c_k) - \left(h_z(c_k) - \frac{p_{B,sub}}{2}\right)| \\ \Delta d_{+1}(c_{k+1}) &= |s_z(c_{k+1}) - \left(h_z(c_{k+1}) + \frac{p_{B,sub}}{2}\right)| \\ \Delta d_{-1}(c_{k+1}) &= |s_z(c_{k+1}) - \left(h_z(c_{k+1}) - \frac{p_{B,sub}}{2}\right)| \end{aligned} \quad (5.23)$$

Die Adaption hat das Ziel, die Abweichung von der idealen Adaptionsgeraden so gering wie möglich zu halten. Es wird daher zunächst die größte Abweichung bestimmt.

$$\Delta d = \max \{ \Delta d_{+1}(c_k), \Delta d_{-1}(c_k), \Delta d_{+1}(c_{k+1}), \Delta d_{-1}(c_{k+1}) \} \quad (5.24)$$

Dieser Fall der größten Abweichung soll vermieden werden. Es wird daher die komplementäre Schaltrichtung gewählt. Tritt die größte Abweichung beim Schalten nach außen auf, wird an der Schaltstelle nach innen geschaltet. Tritt die größte Abweichung beim Schalten nach innen auf, wird an der Schaltstelle nach außen geschaltet.

$$h_z(c_k \leq \hat{y} < c_{k+1}) = \begin{cases} h_z(c_k \leq \hat{y} < c_{k+1}) + \frac{p_{B,sub}}{2} & \text{falls } \Delta d \in \{ \Delta d_{-1}(c_k), \Delta d_{-1}(c_{k+1}) \} \\ h_z(c_k \leq \hat{y} < c_{k+1}) - \frac{p_{B,sub}}{2} & \text{falls } \Delta d \in \{ \Delta d_{+1}(c_k), \Delta d_{+1}(c_{k+1}) \} \end{cases} \quad (5.25)$$

Dieses Vorgehen wird bis zur Schaltstelle $c_{\frac{N}{2}-1}$ wiederholt. Bei der äußersten Schaltstelle werden nur noch die Differenzen $\Delta d_{+1}(c_k)$ und $\Delta d_{-1}(c_k)$ gebildet und es wird die Verschiebungsfunktion mit gleicher Logik bis zum Rand der Anzeige fortgesetzt. Auf Grund der Punktsymmetrie ergibt sich die gesamte Verschiebungsfunktion zu Gleichung (5.26).

$$h_z \left(0 > \hat{y} \geq -\frac{D}{2} \right) = -h_z \left(0 \leq \hat{y} \leq \frac{D}{2} \right) \quad (5.26)$$

mit $D =$ Anzeigenbreite.

Sitzt der Betrachter nicht mittig, sondern lateral verschoben vor der Anzeige verschiebt sich auch die ideale Verschiebungsgerade. Das Schaltverhalten wird auch hier iterativ mit obiger Logik bestimmt.

5.3.2 Aufbau: Prototypische Anzeige 2 mit Halb-Pitch Methode

Im Entwurf der *Prototypischen Anzeige 2* wurden die Erfahrungen aus den vorherigen Experimenten berücksichtigt. Die Anzeige besitzt eine vollfunktionale Barriere mit Halb-Pitch-Adaption. Als Konsequenz aus dem Vorversuch und der Prototypischen Anzeige 1 wurde die Prototypische Anzeige 2 in drei Punkten optimiert.

- **Verkleinerung des Barrieresubpixel**

Die Subpixelgröße der Barriere konnte durch technische Verbesserungen von $17,1 \mu\text{m}$ auf einen Wert von $12,7 \mu\text{m}$ verringert werden. Mit dem neuen LCD-Barriere Abstand von $1,315 \text{ mm}$, der auf Grund der gesteigerten Barriereauflösung kleiner als bei Prototypischen Anzeige 1 ist, ergibt sich ein Verschiebungswinkel von $0,84^\circ$ für die Verschiebung der Abstrahlcharakteristik bei lateraler Adaption. Der Verschiebungswinkel ist somit trotz Erhöhung der Barriereauflösung ungefähr gleich zur Prototypischen Anzeige 1.

- **Neues Adaptionsverfahren Halb-Pitch**

Durch die Einführung des neuen Adaptionsverfahrens Halb-Pitch kann die Sprungweite bei der Adaption auf variable Betrachtungsabstände im Idealfall halbiert werden. Die Sprungweite an den Schaltstellen liegt somit nur noch bei $0,42 - 0,84^\circ$.

- **Optimierung der Abstrahlcharakteristik**

Die Abstrahlcharakteristik der Anzeige bildet auf Grund von wellenoptischer Optimierung (Inhalt des nächsten Kapitels) ein stärkeres Helligkeitsplateau aus, was zu einer allgemeinen Verbesserung der stereoskopischen Eigenschaften führt und insbesondere die Helligkeitsschwankungen an den Schaltstellen bei Adaption auf den Betrachtungsabstand reduziert.

Darüber hinaus wurde die Breite der Anzeige vergrößert.

In den vorherigen Abschnitten wurde gezeigt, dass die Anzeigenbreite sowohl einen großen Einfluss auf die longitudinale Ausdehnung der statischen 3D-Stereozone als auch auf die Auslegung der Halb-Pitch-Adaptionsmethode hat.

Die *Prototypische Anzeige 2* wurde mit dem Ziel aufgebaut, eine prototypische Anzeige zu schaffen, die mindestens die Breite der Zielgröße einer 12,3"-Anzeige von 290 mm besitzt. Zum Zeitpunkt der Arbeit stand eine solche Anzeige nicht zur Verfügung und hätte nur unter sehr großen Kosten hergestellt werden können.

Um dennoch die geforderte Anzeigenbreite zu erhalten wurden, wie in Abbildung 5.23 dargestellt, drei Anzeigen der Größe 8.4" an einem halbdurchlässigen Spiegel¹ (Reflektivität 50%) kombiniert.

Die mittlere Anzeige wird von oben eingespiegelt, die äußeren durchleuchten den Spiegel von hinten. Von den Anzeigen wurde jeweils der mittlere Bereich ausmaskiert. Für den Betrachter ergibt sich eine zusammenhängende Anzeigenfläche mit Größe 330x82 mm.

Die Anzeigen und der Spiegel werden von speziell hergestellten Haltern gefasst, die es ermöglichen die Darstellung mechanisch zu justieren, sodass ein Betrachter vor dem halbdurchlässigen

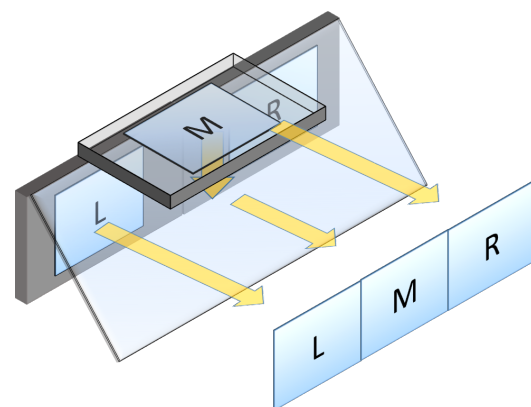


Abbildung 5.23: Kombination dreier Anzeigen zu einer Anzeigenfläche durch einen halbdurchlässigen Spiegel

¹Floatglas 3 mm mit rückseitiger AR-Beschichtung der Firma Flabeg

Spiegel eine durchgehende, in einer Ebene liegende Anzeigefläche wahrnimmt. Die stereoskopische Kalibrierung erfolgt im Anschluss. Hierbei wird der Winkeloffset durch Festlegung der initialen Verschiebung für jede Anzeige festgelegt, sodass alle drei Anzeigen im idealen Betrachtungsabstand 730 mm konvergieren.

Der gesamte Aufbau mit Kamerasystem wurde prototypisch als Tischaufbau entworfen. In Abbildung 5.24 ist das dreidimensionale Konstruktionsmodell der Prototypischen Anzeige 2 dargestellt. Im oberen Teil des Aufbaus wurde ein Headtracking-

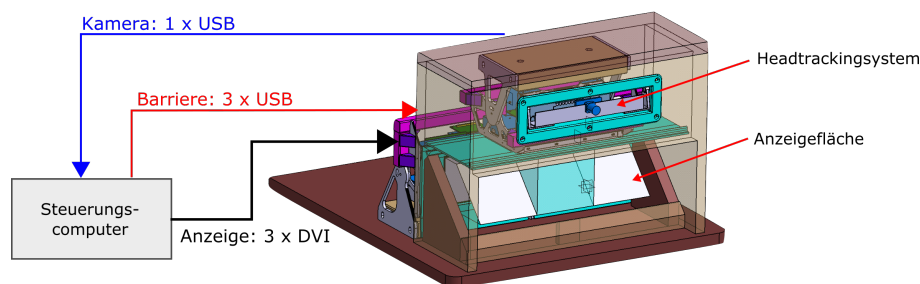


Abbildung 5.24: Der Tischaufbau der Prototypischen Anzeige 2 besteht aus der prototypischen Anzeige und einem Steuerungsrechner auf dem das Headtracking läuft und die anzuzeigenden Inhalte generiert werden

System verbaut. Die Hardware besteht aus einer monochromen Firefly MV Kamera der Firma PointGrey und einer synchron aktiv gepulsten Infrarotbeleuchtung, die von der Kamera direkt getriggert wird. Die Kamera ist über USB an den Steuerungsrechner angeschlossen. Das Headtracking erfolgt durch die Softwarelösung FaceApi der Firma Seeing Machines. Die Software API wurde dabei um die Funktion der Barriereansteuerung erweitert, die in Kooperation mit dem Hersteller der Anzeigen erstellt wurde. Hierbei wird von der Headtrackinglösung die Kopfposition in kartesische Koordinaten umgesetzt und diese an die Barriereansteuerung weitergeleitet. Die softwareseitige Barriereansteuerung setzt den detektierten Betrachtungsabstand nach obiger Logik in eine Verschiebungsfunktion um und überträgt diese per USB auf die jeweilige elektrische Barriereansteuerungseinheit an der Anzeige. Auf laterale Bewegung wird wie bei der Prototypischen Anzeige 1 durch laterales Verschieben der Barriereöffnungsanordnung auf der Anzeige reagiert. Die Anzeige ist somit in der Lage auf laterale Positionswechsel und auf Änderungen des Betrachtungsabstands

zu adaptieren.

Gesteuert wird der gesamte Aufbau durch einen leistungsstarken PC ². Neben der Headtracking Lösung läuft auf dem Rechner die von der Daimler Protics AG entwickelte 3D-Umgebung „Veo“. Diese ermöglicht es, eigene Inhalte zu generieren und auf der Anzeige darzustellen. Die Inhalte wurden durch Vorgabe des Autors in enger Absprache durch und mit der Firma Daimler Protics erstellt.

Der gesamte Aufbau wurde in einer sogenannten Sitzkiste verbaut, die aus einem

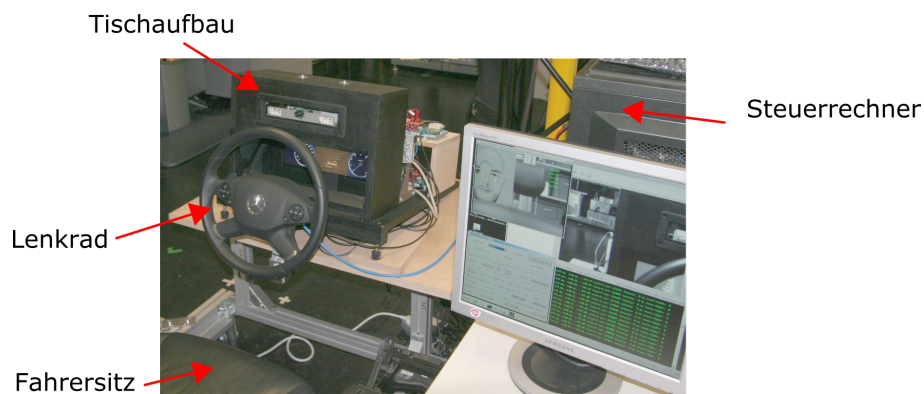


Abbildung 5.25: Foto des der Sitzkiste zum Testen der Prototypischen Anzeige 2

verstellbaren Fahrersitz, einem Lenkrad und einer Halteplatte für den Aufbau besteht. Ein Foto des Testsetups ist in Abbildung 5.25 dargestellt. Die Lage der Anzeige wurde der Fahrzeuggeometrie nachempfunden.

Anzeige

Der Aufbau besteht aus drei 8.4"-Flüssigkristallanzeigen (IPS). Diese wurden ursprünglich im Rahmen eines sachverwandten Projektes entwickelt, wodurch es möglich wurde, Komponenten der Anzeigen zu übernehmen, um den Entwicklungszeitraum zu verkürzen und die Kosten zu reduzieren. Die wesentlichen Parameter sind in Tabelle 5.2 dargestellt.

Die Anzeigen besitzen eine native Auflösung von 1280x760 px, es wird jeweils ein mittlerer Bereich von 720x540 px ausmaskiert. Die am Halbspiegel kombinierte Anzeige besitzt eine Größe von 2160x540 px. Daraus ergeben sich eine Anzeigenbreite von 329,4mm und eine Höhe von 82,3mm. Die Anzeige ist damit weniger hoch, jedoch leicht breiter als die Zielanzeige mit 12,3".

²Intel i7 Quadcore, 16 GB Ram, 2 x Geforce GTX 680

Prototypische Anzeige 2		
	horizontal	vertikal
Anzeige:		
Anzeigendiagonale:	≈ 13,4"	
Anzeigenbreite:	329,4 mm	
Aspektverhältnis:	≈ 4 : 1	
Pixelanordnung:	RGBW	
Auflösung:	3 x 720 px	540 px
Pixelpitch:	152,5 μm	152,5 μm
Subpixelpitch:	76,25 μm	76,25 μm
Aperturöffnung Subpixel:	37,25 μm	42,7 μm
Größe horz. Schwarzbereich:	39 μm	-
Subpixel pro Pixel:	2	2
Barriere:		
Barriereanordnung:	Streifenmaske	
Abstand Barriere-LCD:	1,315 mm	
Initialer Betrachtungsabstand:	730 mm	
Barrierepitch:	152,32 μm	-
Öffnungsverhältnis Barriere:	0,5	-
Anzahlsubpixel pro Barrierepitch:	12	1
Subbarrierepitch:	12,7 μm	410,55 μm
Brechungsindex Material zw. Barriere-LCD	1,52	

Tabelle 5.2: Parameter der Prototypischen Anzeige 2

Pixellayout

Ein besonderes Merkmal der *Prototypischen Anzeige 2* ist das RGBW-Pixellayout. Die Anzeige besitzt zusätzlich zu den Rot-, Grün- und Blausubpixeln ein weiteres, weißes Subpixel (vgl. Abb. 5.26, links). Hierfür wurde sich entschieden, da ein vierter

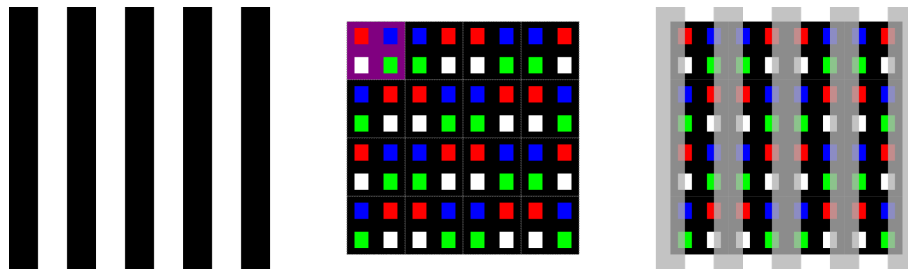


Abbildung 5.26: Streifenbarriere der Prototypischen Anzeige 2 (links); Pixellayout mit vier Subpixelarten [RGBW] (mittig); Kombination der Barriere und dem Pixellayout (rechts)

weißer Subpixel durch den Verzicht eines Farbfilters die Transmission der Anzeige steigert und somit zu einer Steigerung der Gesamthelligkeit beiträgt. Dies ist insbesondere bei autostereoskopischen Anzeigen von Vorteil, bei denen sich bei Anzeige eines stereoskopischen Bildes die mit dem linken und rechten Auge wahrgenommene Helligkeit halbiert! Ein weiterer Vorteil des Pixellayouts ist eine gesteigerte horizontale Auflösung im 3D-Modus. Die Subpixel eines Pixels (lilauer Bereich in Abb.) sind quadratisch (2x2) angeordnet. Unter drei Barriereöffnungen liegen damit drei Pixel, während bei einer Anzeige mit vertikaler RGB-Anordnung (1x3), nur zwei Pixel unter drei Barriereöffnungen liegen.

Die farbliche Zuordnung der Subpixel wurden für eine stereoskopische Darstellung optimiert. Bei eingeschalteter Barriere (vgl. Abb. 5.26 (rechts)) nimmt der Betrachter mit einem Auge immer die roten und weißen Subpixel und mit dem anderen Auge immer die blauen und grünen Subpixel eines Pixels wahr. Dies wurde bewusst gewählt, um Helligkeitsunterschiede zu minimieren. Der weiße Subpixel ist deutlich heller als die anderen Subpixel. Die Helligkeitsunterschiede von den Kombinationen rot/weiß im Vergleich mit grün/blau sind jedoch gering, wodurch die Wahrnehmung eines Schachbrettmusters bei Anzeige von Vollweiß vermieden wird.

Ein weiterer Leitgedanke beim Entwurf des Pixellayouts war die Farbauflösung im

stereoskopischen Anzeigemodus. In der hier dargestellten Umsetzung sind die farbigen Subpixel im 3D-Modus, bei dem das Auge nur jeden zweiten horizontalen Subpixel wahrnimmt, äquidistant über die Anzeige verteilt. Der Nachteil der etwas schlechteren Farbaufösung im 2D-Modus fällt auf Grund der höheren Bildaufösung kaum ins Gewicht.

Bei dem Verhältnis der Subpixelbreite zur Barriereöffnung wurden gegenüber der Prototypischen Anzeige 1 nur geringe Änderungen vorgenommen. Diese führen zu einer Verbreiterung des Helligkeitsplateaus um den Preis einer geringen Zunahme der Helligkeitsvariation von L_{WW} .

Barriere

Bei der Barriere handelt es sich um eine TN-Zelle in Streifenanordnung. Pro Barriereöffnung besitzt die Barriere 12 Subpixel. Die Anzahl der horizontalen Subpixel (Streifen) beträgt 26016 Stück. Das Öffnungsverhältnis beträgt 50%, sodass die Hälfte der Subpixel der Barriere immer intransparent geschaltet werden.

Wie zuvor beschrieben wird die Halb-Pitch-Adaptionsmethode umgesetzt. Diese bedingt in äquidistanten Abständen 1.5-fache Barrieresubpixel einzubringen. Die Abstände wurden so gewählt, dass sie symmetrisch auf den drei Anzeigen verteilt sind und dass ein maximaler Betrachtungsabstand von 910 mm erreicht werden kann, was nahe am maximalen Betrachtungsabstand der Zielvorgabe von 950 mm liegt. Es ergeben sich Schaltstellen im Abstand von 180 Barriereöffnungen. Diese unterteilen die Anzeige in 13 Zonen, wovon die Äußersten nur die halbe Breite besitzen. Auf Grund der festen Schaltstellen, ist es möglich innerhalb der Zonen jeden 12-ten Subpixel über den gleichen Spaltentreiber zu adressieren. Im Minimum sind somit nur 156 Spaltentreiber notwendig um die Barriere zu treiben. Zur Optimierung der elektronischen Ansteuerung werden pro Anzeige 1440 Spaltentreiber verwendet. Im Vergleich zu der Anzahl an Treibern, die bei der Voll-Pitch-Methode benötigt würde, ist diese bei der Halb-Pitch-Methode deutlich geringer und ermöglicht überhaupt erst die praktische Herstellung einer solchen Anzeige.

Der Aufbau der Anzeige ist vereinfacht im Querschnitt in der Abbildung 5.27 dargestellt. Die Barriere, bestehend aus zwei Deckgläsern und der TN-Zelle ist unterhalb des LCDs angebracht. Der Grund hierfür liegt hauptsächlich in der Optimierung

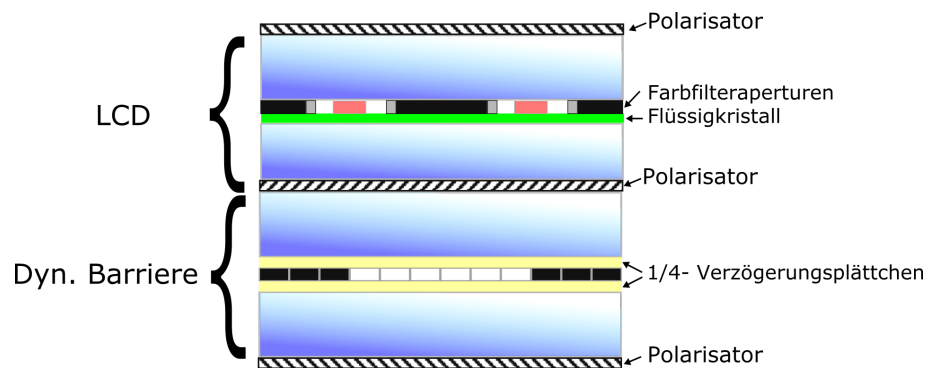


Abbildung 5.27: Schematischer Aufbau der Flüssigkristallanzeige mit Barriere der Prototypischen Anzeige 2

der Abstrahlcharakteristik der Anzeige durch Modifikation der Farbfileraperturen, welche ausführlich im nächsten Kapitel beschrieben wird. Das Funktionsprinzip bedingt jedoch, dass die Barriere unterhalb des LCDs liegt.

Die Barriere und der LCD sind durch Einbringung brechungsindexoptimierter Klebstoffe miteinander verbunden. Der Gesamtverbund kommt mit drei Polarisatoren und zwei zusätzliche $\frac{\lambda}{4}$ -Verzögerungsplättchen aus, die Reflexionen verhindern.

5.3.3 Messung und Auswertung: Adaptionmethode Halb-Pitch

Ziel der Untersuchung der Prototypischen Anzeige 2 ist die experimentelle Überprüfung der Adaptionmethode Halb-Pitch. Eine ausführliche Besprechung der verbesserten stereoskopischen Eigenschaften gegenüber der Prototypischen Anzeige 1 findet sich im nächsten Kapitel, in dem die Maßnahmen zur Optimierung der Abstrahlcharakteristik erläutert werden. In diesem Kapitel werden nur die Auswirkungen auf die Adaption auf den Betrachtungsabstand untersucht.

Messung der Abstrahlcharakteristik

Die Abstrahlcharakteristik der Anzeige wurde mit dem Goniometrischen Messaufbau zentral auf der mittleren Anzeige gemessen. Hierfür wurde die Anzeige aus dem Tischaufbau ausgebaut.

In Abbildung 5.28 ist die gemessene Abstrahlcharakteristik dargestellt. Auf Fehlerbalken wurden zur besseren Erkennbarkeit verzichtet. Im Vergleich zu der Anzeige

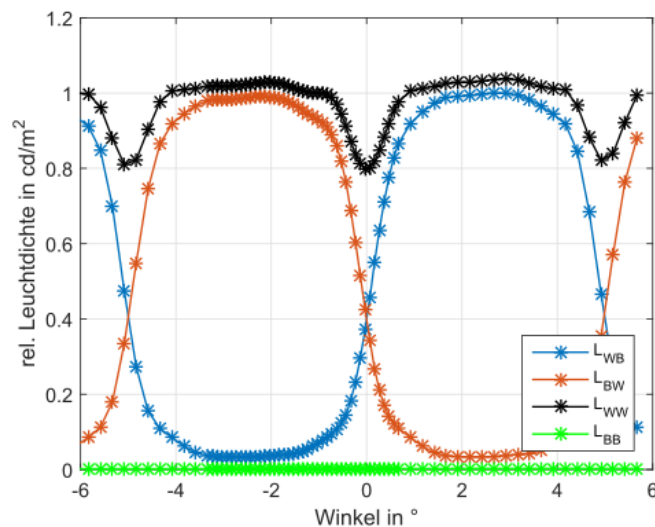


Abbildung 5.28: Mit dem goniometrischen Aufbau gemessene Abstrahlcharakteristik der Prototypischen Anzeige 2

des Vorversuchs (vgl. Abb. 5.11) ist deutlich zu erkennen, dass die Leuchtdichteverteilungen L_{WB} und L_{BW} Helligkeitsplateaus bilden, innerhalb derer die Leuchtdichte nur gering abfällt. Ein Abfall der Leuchtdichte erfolgt erst unter größeren Winkeln. Die Helligkeitsvariation von L_{WW} ist mit 20% größer als bei Prototypischen Anzeige 1. Der Grund hierfür ist eine bewusste Abweichung der beim Verhältnis der Barriereöffnung zur Subpixelöffnung um ein breiteres Plateau zu erreichen. Die größere Breite des Helligkeitsplateaus ist aber auch Folge der wellenoptischen Optimierung der Abstrahlcharakteristik, die im nächsten Kapitel beschrieben wird.

Messung der Dynamischen 3D-Stereozone

Die drei 8.4"-Anzeigen wurden im verbauten Zustand aufeinander kalibriert, sodass alle Anzeigen im idealen Betrachtungsabstand konvergieren. Anschließend werden die Anzeigen zur Vermessung mit dem Konoskop ausgebaut und einzeln vermessen. Die Messdaten der Anzeigen werden virtuell nebeneinander angeordnet und rechnerisch erneut zu einer Anzeige fusioniert. In Abbildung 5.29 sind die Messpunkte auf den drei Anzeigen dargestellt (rote Punkte). An den Grenzen zwischen zwei farblich unterschiedlich dargestellten Zonen liegen die Halb-Pitch Schaltstellen, in äquidistanten Abständen über die Anzeige verteilt.

Pro Zone wird an einem Punkt gemessen, mit Ausnahme der Zonen am Rand einer

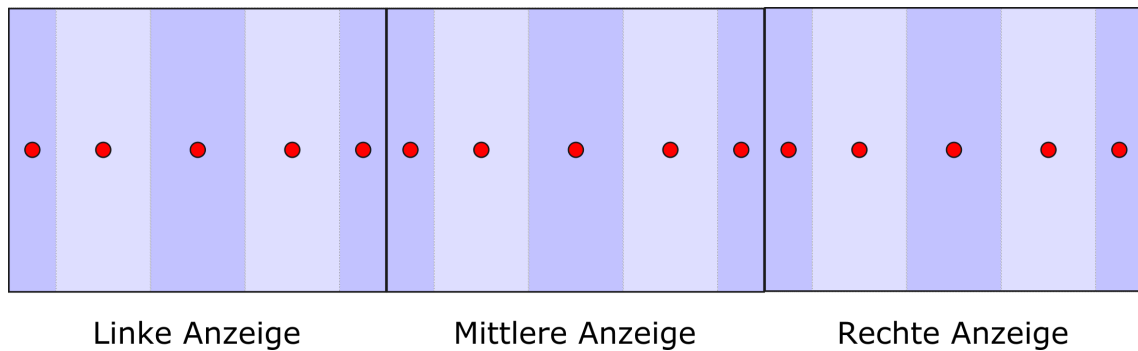


Abbildung 5.29: Messpunkte (rot) der Prototypischen Anzeige 2

Anzeige, die auf zwei unterschiedlichen Anzeigen liegt. Hier wird jeweils an einem Punkt pro Anzeige und Zone gemessen. Da die wahrgenommenen Helligkeitssprünge auf der Anzeige mit einer anderen Methode als im Vorversuch gemessen werden, ist es zur Bestimmung der 3D-Stereozonen ausreichend an einem Punkt pro Zone eine Messung durchzuführen.

An jedem Messpunkt werden die Verteilungen L_{WB}, L_{BW}, L_{WW} und L_{BB} für die Betrachtungsabstände 650 mm, 700 mm, 750 mm, 800 mm, 850 mm, 900 mm und 950 mm gemessen. Es wird angenommen, dass der Betrachter jeweils in den Betrachtungsabständen zentral vor der Anzeige sitzt. Die Barriere adaptiert entsprechend ihrer Logik auf den Betrachtungsabstand.

Auswertung: Dynamische 3D-Stereozone

Die Bestimmung der monokularen Stereozonen und der 3D-Stereozonen erfolgt analog zum Vorgehen des Vorversuchs. In Abbildung 5.30 sind die monokularen Stereozonen für die sieben gemessenen Betrachtungsabstände dargestellt. Es ist gut zu erkennen, wie die neue Adaptionsmethode Halb-Pitch die monokularen Stereozonen verschiebt.

Die größte laterale Ausdehnung nehmen die monokularen Stereozonen bei Adaption in guter Nähe zum vorgegebenen Betrachtungsabstand ein. Etwas abweichend hiervon ist einzig die Adaption auf den Abstand 950 mm.

Die größte laterale und longitudinale Ausdehnung hat die monokulare Stereozone 950 mm mit einer Breite von 38-42 mm. Für die weiteren Betrachtungsabstände nimmt die laterale Ausdehnung ab, jedoch weniger als dies im Vorversuch der Fall war. Dies ist bemerkenswert, da zugleich die Anzeigenbreite deutlich vergrößert wur-

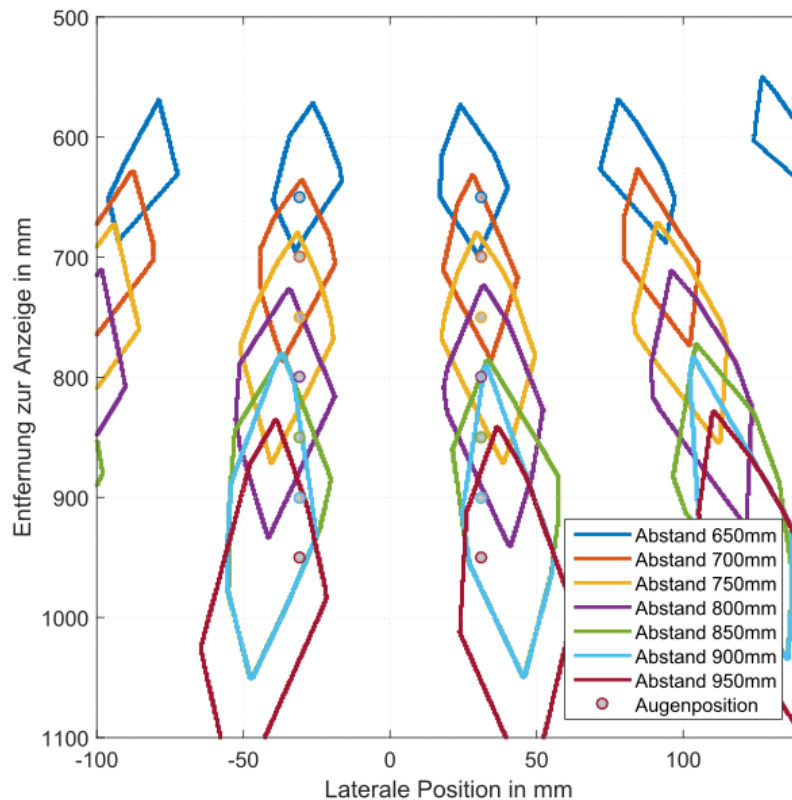


Abbildung 5.30: Messung der monokularen Stereozonen mit Kontrast größer als 10:1 der Prototypischen Anzeige 2 bei Adaption auf verschiedene Betrachtungsabstände durch die Halb-Pitch Methode

de, was mit einer Abnahme der Größe der monokularen Stereozone einhergeht.

Wie erwartet liegen die Augen eines Betrachters für Betrachtungsabstände in der Nähe des idealen Betrachtungsabstandes von 730 mm mittig innerhalb der Stereozonen. Für größere Betrachtungsabstände wandert die Augenposition stärker zum Rand der Zone, da sich der Abstand der Zonen der linken und rechten Ansicht vergrößert.

Aus den eingezeichneten Augenpositionen kann die jeweilige 3D-Stereozone berechnet werden, welche den Bewegungsbereich beschreibt, in dem sich ein Betrachter bewegen kann und mit beiden Augen ein stereoskopisches Bild sieht.

In Abbildung 5.31 ist dargestellt, welche statischen 3D-Stereozonen sich für die untersuchten Betrachtungsabstände ergeben. Auch ist gut zu erkennen, wie die 3D-S-

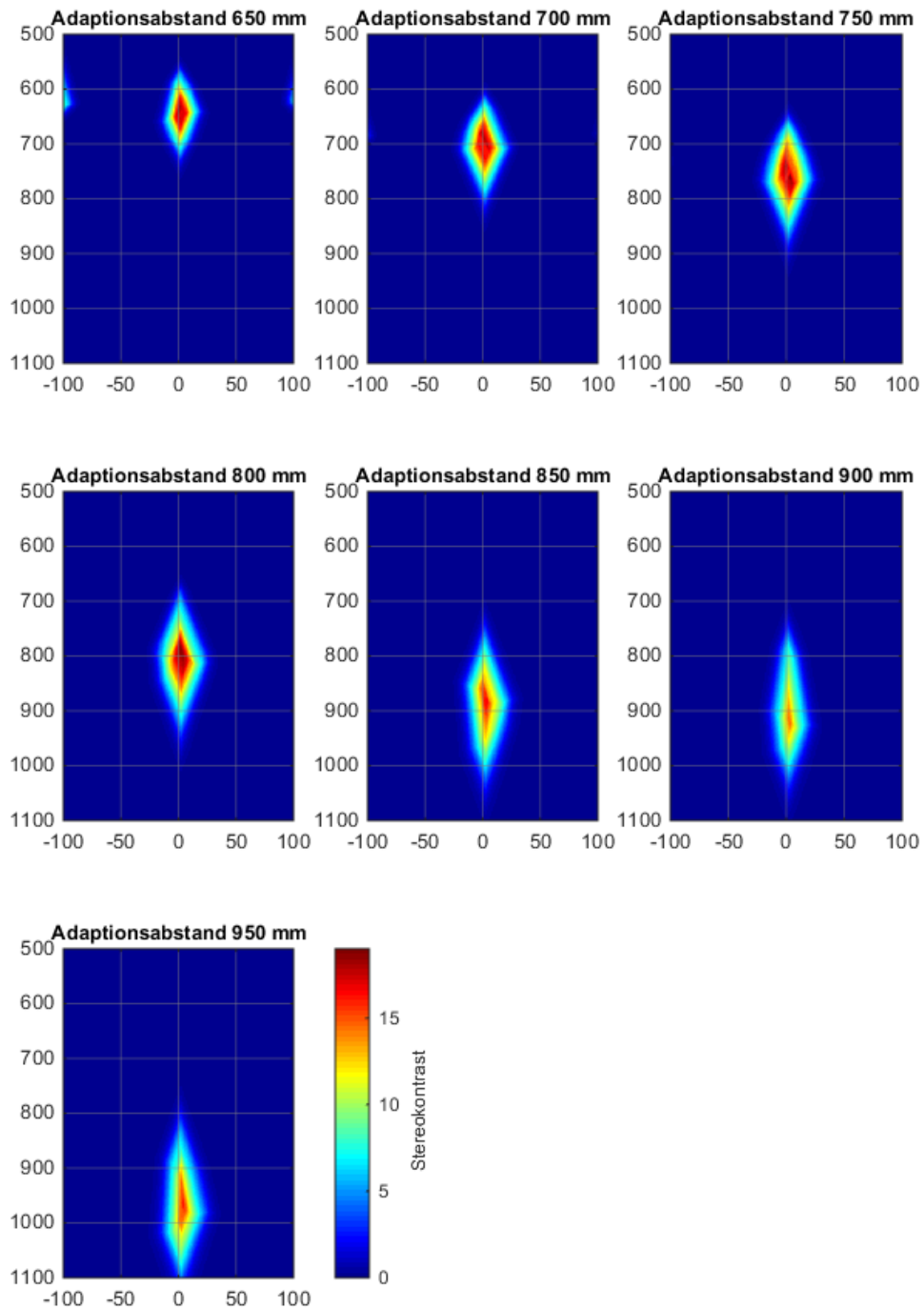


Abbildung 5.31: Messung der 3D-Stereozone bei Adaption auf verschiedene Betrachtungsabstand durch die Halb-Pitch Methode der Prototypischen Anzeige 2

tereozone durch die Adaption verschoben wird. Die größte laterale Ausdehnung hat die 3D-Stereozone für 750 mm, die am nächsten am idealen Betrachtungsabstand liegt. Mit steigender Entfernung zum idealen Betrachtungsabstand nimmt auch die laterale Ausdehnung der 3D-Stereozone ab. Im Vergleich mit dem Vorversuch haben die 3D-Stereozonen für größere Betrachtungsabstände jedoch eine breitere Ausdehnung und dies, obwohl die Anzeigenbreite deutlich vergrößert wurde.

Im Maximum werden Stereokontraste von $\approx 20 : 1$ angenommen. Zur Bestimmung der Dynamischen 3D-Stereozone sind in Abbildung 5.32 alle statischen 3D-Stereozonen mit Stereokontrast größer als 10:1 dargestellt. Die statischen Stereozonen über-

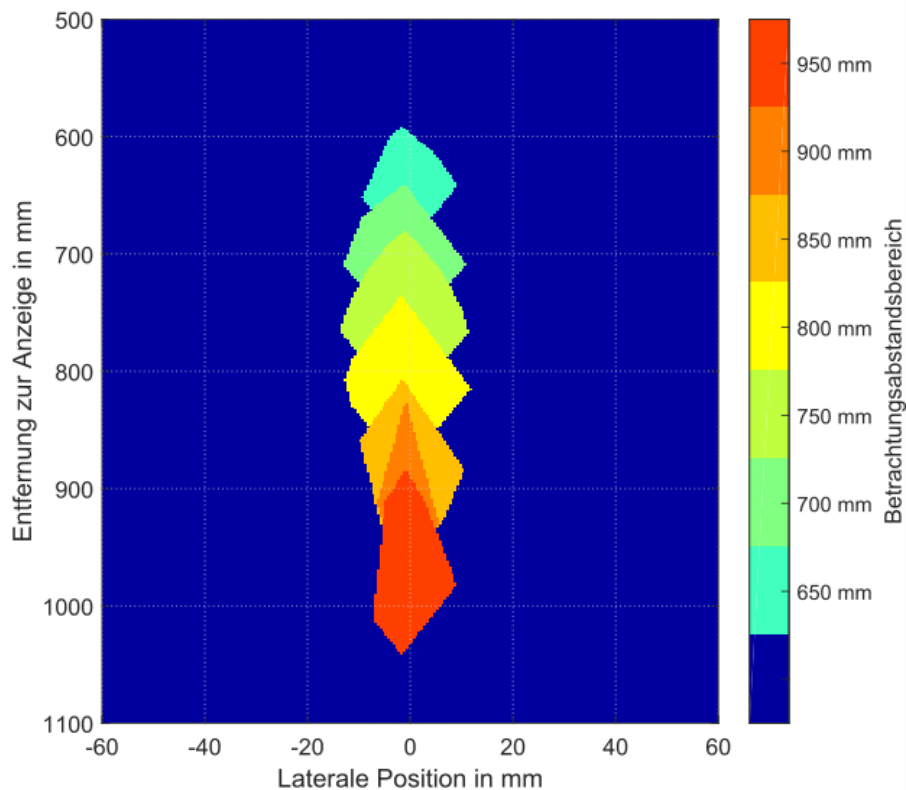


Abbildung 5.32: Die dynamische 3D-Stereozone der Prototypischen Anzeige 2 ergibt sich durch die Überlagerung aller 3D-Stereozonen, welche mit der Halb-Pitch Methode auf unterschiedliche Betrachtungsabstände adaptieren.

lappen sich und ergeben die gemessene dynamische Stereozone, die sich über den Betrachtungsabstandsbereich von 600 mm bis über 1000 mm erstreckt. Die Adaptionmethode erweitert somit den longitudinalen Betrachtungsbereich deutlich,

gegenüber einer einzelnen statischen 3D-Stereozone (z.B. hellgrün für 750 mm Abstand).

Die laterale Ausdehnung der dynamischen Stereozone nimmt im Maximum ≈ 25 mm an. Für den Betrachtungsabstand 650mm beträgt die laterale Ausdehnung nur noch 18 mm und für den Betrachtungsabstand 950mm nur noch 16 mm.

Messung der Helligkeitssprünge auf der Prototypischen Anzeige 2

Im Vorversuch wurde festgestellt, dass zwischen der linken und rechten Ansicht keine wesentlichen Unterschiede im Verhalten der Helligkeits- und Crosstalksprünge zu beachten waren. Die Messung der Helligkeitssprünge erfolgt daher nur für die linke Ansicht mit Darstellung WB.

In der visuellen Bewertung der beobachteten Störungen waren die Helligkeitssprünge die deutlich stärkeren Störungen. Es wurde daher für die Auswertung der Prototypischen Anzeige 2 auf die Messung der Crosstalksprünge verzichtet.

Dies ermöglicht, eine neue Messtechnik einzusetzen, welche die fehlerbehaftete Interpolationsmethode des Vorversuchs ersetzt. Zur Vermessung des Helligkeitsverlaufs über die gesamte Anzeigenbreite wird die Leuchtdichtekamera LMK-98 Color, aus dem Konoskopaufbau verwendet. Jedoch wird das Konoskopobjektiv mit einem kalibrierten 25mm-Objektiv getauscht. Es wird dadurch möglich, Flächenaufnahmen der gesamten Anzeige zu machen. In Abbildung 5.33 ist exemplarisch eine Leuchtdichtemessung der gesamten Anzeige dargestellt, für den Fall, dass die Barriere nicht ideal auf den Betrachtungsabstand eingestellt ist. Es sind teilweise deutliche Helligkeitsunterschiede zwischen den Zonen zu erkennen. Des Weiteren wird deutlich, dass die drei Anzeigen sich untereinander in der Helligkeit unterscheiden. Diese Unterschiede konnten trotz Anpassung der Hintergrundbeleuchtung der jeweiligen LCDs nicht vollständig vermieden werden. Da die mittlere Anzeige kopfüber eingespiegelt wird, entstehen aufgrund der Einbaulage und durch unterschiedliches Transmissions- und Reflektionsverhalten am Halbspiegel Helligkeits- und Farbunterschiede. Diese sind jedoch nur dem experimentellen Aufbau geschuldet und sollen zur Beurteilung des Adaptionsprinzips vernachlässigt werden.

Der Helligkeitsverlauf über die Anzeigenbreite ergibt sich, indem ein horizontaler

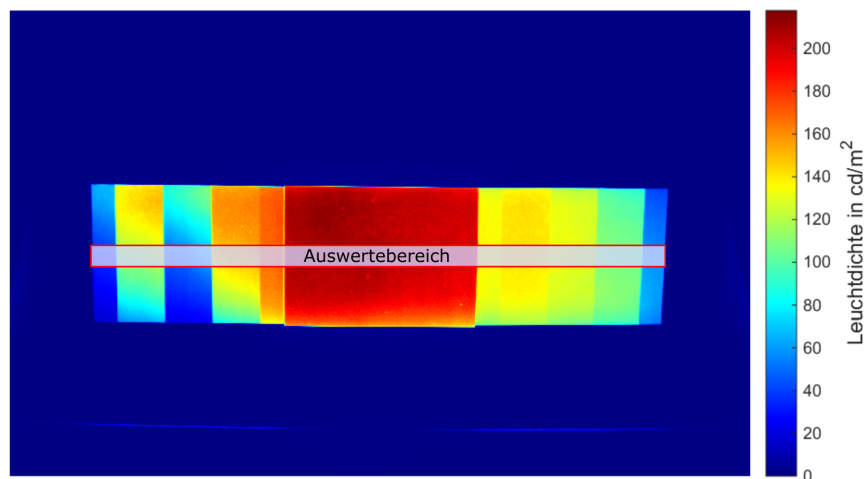


Abbildung 5.33: Exemplarische Darstellung der gemessenen Leuchtdichte auf der Prototypischen Anzeige 2, hier dargestellt für den Fall, dass die Barriere nicht auf den richtigen Abstand der Messkamera (Betrachter) adaptiert.

Schnitt durch das Messbild gelegt wird, der mittig durch die Anzeige läuft. Um kamerabedingtes Rauschen zu verhindern, wird über einen Bereich von 10px vertikal gemittelt. Es ergeben sich Kurvenverläufe über die gesamte Anzeigenbreite, wie in Abbildung 5.34 dargestellt.

Die Verläufe wurden für vier Betrachtungsabstände gemessen. Die Messkamera wurde in den vier Betrachtungsabständen 650 mm, 750 mm, 850 mm und 950 mm an die Position des linken Auges eines Betrachters mit Augenabstand 62 mm gestellt, der sich zentral vor der Anzeige befindet.

In jedem Betrachtungsabstand wird die Anzeige für die Fälle aufgenommen, dass die Anzeige auf die Abstände 650 mm, 750 mm, 850 mm und 950 mm adaptiert.

Auswertung: Helligkeitssprünge der Prototypischen Anzeige 2

In Abbildung 5.34 sind die Leuchtdichteverläufe über die Anzeigenbreite dargestellt, die ein Betrachter im jeweiligen Abstand mit seinem linken Auge bei Anzeige von L_{WB} wahrnehmen würde. Wie zuvor erwähnt, ergeben sich Helligkeitsunterscheide zwischen den Anzeigen. Diese stellen jedoch keine Heilligkeitssprünge im Sinne von Störungen auf Grund des Adaptionsprinzips dar und werden daher ignoriert.

Die kamerabasierte Messmethode der Flächenaufnahme besitzt ein Ausleserauschen, welches die Auflösung der Leuchtdichtedifferenz begrenzt. Helligkeitsunterschiede

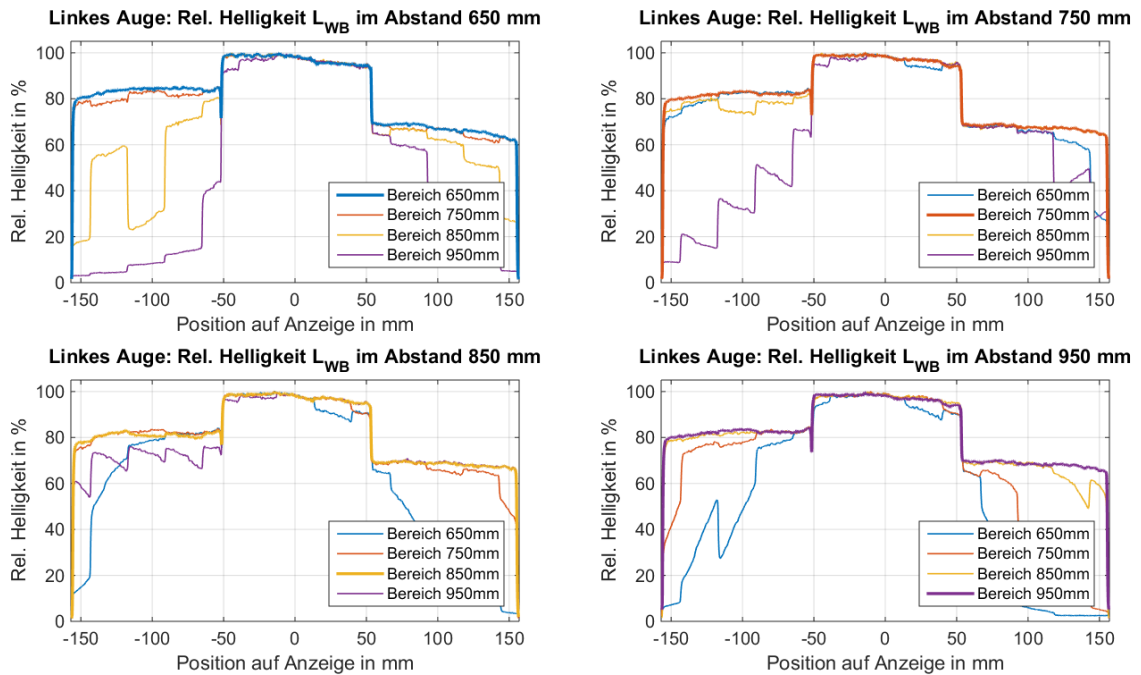


Abbildung 5.34: Gemessene Leuchtdichteverläufe, welche von einem Betrachter mit seinem linkem Auge bei einer Darstellung von L_{WB} wahrgenommen würden, dargestellt über die Anzeigenbreite für die vier verschiedene Betrachtungsabstände 650 mm (links oben), 750 mm (rechts oben), 850 mm (links unten) und 950 mm (rechts unten). Die verschiedenfarbigen Verläufe beschreiben jeweils Barriereadaptionen der Halbpitchmethode, bei welcher auf die Abstände 650 mm (blau), 750 mm (rot), 850 mm (gelb) und 950 mm (violett) adaptiert wird.

von kleiner als 1-2% können mit dieser Methode nicht exakt gemessen werden.

Es zeigt sich, dass für alle vier untersuchten Betrachtungsabstände keine messbaren Helligkeitssprünge festgestellt wurden, wenn die Barriere auf den Betrachtungsabstand der Kamera adaptiert (fett gedruckte Kurven).

Auch für benachbarte Betrachtungsabstände fallen die sichtbaren Störungen geringer als im Vorversuch aus. Befindet sich ein Betrachter beispielsweise im Abstand 750 mm vor der Anzeige (Plot rechts oben) und adaptiert die Barriere auf einen Abstand von 850 mm (gelbe Kurve), sind Helligkeitssprünge von ungefähr 5% sichtbar, ebenso, wenn die Anzeige auf den Abstand 650 mm adaptieren würde. Erst bei größeren Abweichungen vom designierten Betrachtungsabstand sind deutliche

Helligkeitssprünge messbar. Im Vergleich zum Vorversuch konnten somit die Helligkeitssprünge erfolgreich auf kleiner als 1-2% minimiert werden.

5.3.4 Visuelle Bewertung: Adaptionmethode Halb-Pitch

Ziel des Verbaus der Anzeige in eine Sitzkiste war die Beurteilung der Anzeige in einer realitätsnahen Umgebung. Das verbaute Lenkrad war dabei fest montiert, der Fahrersitz konnte verstellt werden. Zur Untersuchung der Anzeige wurden erneut die Testbilder WB und RG auf der Anzeige dargestellt.

Ergänzt wurden diese durch interaktiv bedienbare Inhalte, die typisch für ein 3D-Kombiinstrument sind und von der 3D-Umgebung „veo“ erzeugt werden. Es handelt sich hierbei um Bilder die nach dem Konzept 2 (siehe 2) erstellt wurden.

Die Inhalte sind so ausgelegt, dass die größte Tiefe in der Mitte der Anzeige dargestellt wird und zum Rand hin abnimmt. Bei der Farbgebung wurden die Kontraste einzelner Objekte abhängig von Tiefe und Umgebung angepasst (vgl. Bilder im Anhang A).

Zur Beurteilung der Qualität der Anzeige wurde das Headtrackingsystem individuell auf den Betrachter kalibriert, um richtige Abstandswerte zu erhalten. Die Beurteilung erfolgte durch den Autor und weitere Personen.

Bei Anzeige des Testbildes WB konnten keine oder nur geringe Helligkeitssprünge an den Zonenübergängen beobachtet werden, wenn sich der Betrachter in Ruhe befindet. Bei lateraler Bewegung adaptiert die Anzeige erfolgreich auf Bewegung. Hierbei wurden leichte Helligkeitssprünge an den Zonengrenzen sichtbar. Mit steigenden Kopfgeschwindigkeiten nahmen die Unterschiede deutlich zu. Diese traten in allen Betrachtungsabständen, auch am idealen Betrachtungsabstand auf. Die größten Störungen waren in den Randbereichen der Anzeige zu beobachten.

Bei Darstellung des Testbildes RG wurden in fast allen Betrachtungsabständen eine saubere Trennung der Ansichten beobachtet, wenn sich der Betrachter in Ruhe befindet. Nur für Betrachtungsabstände kleiner als 650 mm wurden vermehrt Störungen wahrgenommen. Bei lateralen Bewegungen konnte in allen Betrachtungsabständen an den Zonengrenzen ein zunehmendes Übersprechen beobachtet werden, das sich wieder verbesserte, sobald der Betrachter in Ruhe ist.

Bei der Darstellung von typischen 3D-Kombiinstrument Inhalten konnte ein ruhen-

der Betrachter in allen untersuchten Betrachtungsabständen (650-950 mm) ein stereoskopisches Bild wahrnehmen. Die wahrgenommene Auflösung in 2D und 3D war sehr gut und führt zu einem hochwertigen Eindruck der Anzeige. Wird die laterale Position langsam verändert, konnten keine sichtbaren Störungen wahrgenommen werden. Auch Kopfdrehungen führten zu keinen Störungen. Bei schnellen lateralen Positionsänderungen konnten Helligkeitsschwankungen beobachtet werden, Zonengrenzen wurden sichtbar. In seltenen Fällen konnten in den Randbereichen vereinzelt Helligkeitsschwankungen und Übersprechen beobachtet werden. Da die Darstellung in diesen Bereichen jedoch wenig Tiefe besitzt und die linke und rechte Ansicht damit wenig Disparität besitzt, wurden die auftretenden Störungen nur selten wahrgenommen.

5.3.5 Diskussion: Adaptionmethode Halb-Pitch

Die aufgebaute Prototypische Anzeige 2 mit implementierter Abstandsadaptionsmethode Halb-Pitch demonstriert erfolgreich die Funktionalität der Abstandsadaptionsmethode. Der geforderte Betrachtungsbereich wird von der Adaptionmethode vollständig abgedeckt. Die im Vorversuch beobachteten Helligkeits- und Crosstalksprünge an den Schaltstellen konnten durch Einführung der optimierten Abstrahlcharakteristik und der neuen Halb-Pitch-Adaptionmethode deutlich reduziert werden. Die messtechnische Untersuchung zeigt eine klare Verbesserung der lateralen und longitudinalen Ausdehnung der gemessenen Dynamischen Stereozone und dies, obwohl die Anzeigenbreite deutlich vergrößert wurde. Der Nachweis der größeren Stereozone wurde für einige ausgewählte Betrachtungsabstände demonstriert. Eine vollständige Betrachtung für alle möglichen Betrachtungsabstände findet im nächsten Abschnitt statt.

Die laterale Ausdehnung der Dynamischen Stereozone mit Stereokontrast größer als 10:1 wurde mit $\approx 8-12$ mm gemessen. Dies ist kleiner als der Bereich, welcher in der optischen Zielfunktion gefordert wird und kann bei schnellen lateralen Bewegungen zu gesteigertem Übersprechen und Geisterbildern führen.

Die messtechnisch festgestellten Verbesserungen werden durch die visuelle Bewertung bestätigt. Bei langsamen Bewegungen wurden keine oder nur geringe wahrnehmbare Störungen beobachtet. Erst bei schnellen lateralen Kopfbewegungen wer-

den Störungen hauptsächlich an den Schaltstellen sichtbar. Dies kann auf die verkleinerte Sprungweite der Halb-Pitch Methode zurückgeführt werden. Ein Nachteil der Adaptionmethode ist jedoch, dass auch im idealen Betrachtungsabstand Schaltstellen vorhanden sind, an denen Störungen sichtbar sind. Wird angenommen, dass der ideale Betrachtungsabstand dem Abstand entspricht, an dem der statischen Verteilung folgend die meisten Fahrer im Fahrzeug sitzen werden, gilt es festzustellen, dass die Halb-Pitch Adaptionmethode insgesamt die Störungen reduziert, jedoch im idealen Abstand überhaupt potentielle Störstellen einführt. Die erfolgreiche Umsetzung im späteren Fahrzeugeinsatz ist maßgeblich davon abhängig, ob die verbleibenden Störungen reduziert werden können.

Die Gründe für die sichtbaren Störungen liegen, wie im Vorversuch beschrieben, in der Abstrahlcharakteristik, der Barriereauflösung und in der Latenz des Gesamtsystems. Da bei langsamer lateraler Bewegung keine Störungen auftreten, ist die Barriereauflösung und die Abstrahlcharakteristik bereits sehr gut. Bei schnellen Bewegungen bewegt sich der Betrachter jedoch auf Grund der Latenz des Gesamtsystems soweit aus der Stereozone, bevor die Barriere schaltet, dass er Helligkeitssprünge wahrnimmt.

Eine Optimierung der Latenzzeit des Gesamtsystems Headtracking und Barriereansteuerung könnte die sichtbaren Störungen minimieren. Eine Möglichkeit hierfür könnte ein speziell für den Anwendungszweck ausgelegtes Steuergerät sein, wie es im späteren Verlauf im Fahrzeug Anwendung findet. Jedoch liegt die gemessene Latenzzeit der Prototypischen Anzeige 2 mit 47 ms bereits jetzt am unteren Ende der prognostizierten Zeiten für eine Anwendung im Fahrzeug. Es verbleiben somit die Möglichkeiten, die Abstrahlcharakteristik weiter zu optimieren und die Barriereauflösung weiter zu steigern. Die Optimierung der Abstrahlcharakteristik hat bereits in der vorgestellten Anzeige zu einer deutlichen Verbesserung geführt. Jede weitere Optimierung würde sich positiv auf alle wahrgenommenen Störungen und die Größe der Dynamischen 3D-Stereozone auswirken.

Um die Sichtbarkeit von geringen Helligkeitsunterschieden an den Schaltstellen zu minimieren, würde es sich empfehlen, die Lage der Schaltstellen auf der Anzeige zwischen den Zeilen leicht zu variieren. In der momentanen Anordnung der Schaltstellen

ergibt sich eine vertikale Kante, die über die gesamte Anzeighöhe verläuft. Die menschliche Wahrnehmung nimmt solche durchgehenden Kanten von Helligkeitsunterschieden verstärkt wahr. Dies könnte durch eine stärkere Verteilung der Lage der Schaltstellen rund um die ideale Lage vermieden werden. Die Auswirkungen auf die Lage der statischen Stereozonen ist bei Verschiebung um einige Barriereöffnungen gering.

Die aufgebaute Anzeige bestätigt die Wahl der Parallaxebarriere als Technologie für den Einsatz im Automobil. Die Verbesserung der Abstrahlcharakteristik und die Implementierung der Halb-Pitch Adaptionsmethode in Kombination mit dem gewählten Pixellayout führen zu einer Anzeige, die es ermöglicht, über einen großen Abstandsbereich eine hochwertige Darstellung stereoskopischer Inhalte zu erreichen. Die Anzeige kommt somit der gestellten Zielsetzung sehr nahe.

5.4 Numerische Simulation der Adaptionsmethoden

Die experimentellen Untersuchungen haben gezeigt, dass mit der Prototypischen Anzeige 2 einige Probleme des Vorversuchs gelöst werden konnten. Es entstanden jedoch auch neue Probleme wie die Notwendigkeit von Schaltstellen im idealen Betrachtungsabstand. Um ein genaueres Bild zu bekommen, welchen Einfluss spezifische Änderungen auf die Qualität der Abstandsadaption haben und um ein Werkzeug zu schaffen, um ohne teure experimentelle Aufbauten neue verbesserte Adaptionismethoden zu untersuchen, wurde eine umfangreiche numerische Simulation programmiert. Diese ermöglicht es, die zwei existierenden und eine weitere Adaptionismethode auf Basis einer gemeinsamen Simulationsgrundlage zu untersuchen. Ziel ist es, die beste Adaptionismethode für die in der Zielvorgabe beschriebene Anzeige zu identifizieren.

Der Abschnitt gliedert sich in drei Teile. Im ersten Teil wird die neue Adaptionismethode „*Fixer Voll-Pitch*“ vorgestellt. Es folgt die Beschreibung der numerischen Simulation an Hand des Beispiels der „*Fixer Voll-Pitch Methode*“. Im letzten Abschnitt werden die drei Adaptionismethoden miteinander verglichen und die beste Methode für die Anzeige in Zielgröße bestimmt.

5.4.1 Diskrete Adaptionismethode: Fixer Voll-Pitch

Die Adaptionismethode Fixer Voll-Pitch ist eine modifizierte Version der Voll-Pitch Methode. Eine dynamische Umsetzung der Voll-Pitch Methode stellt große Anforderungen an die individuelle Ansteuerung der Subbarrierepixel. Die Halb-Pitch Methode umgeht dies, indem sie feste Schaltstellen einführt, welche jedoch auf Grund des halben Subpixelpitchs nicht abschaltbar sind. Die Fixe Voll-Pitch Methode kombiniert beide Methoden, indem feste Schaltstellen eingeführt werden, an denen um einen vollen Subpixel geschaltet wird. Dies macht es möglich, im idealen Betrachtungsabstand keine Schaltstellen auf der Barriere zu benötigen und somit auch die Störungen für den Betrachtungsabstand zu reduzieren, an dem statistisch die meisten Betrachter sitzen. Ein Nachteil ist jedoch, dass die Sprungweite erneut vergrößert wird. Es stellt sich somit die Frage, ob die Verbesserungen der Abstrahlcharakte-

ristik ausreichend sind, um die größere Sprungweite zu kompensieren und somit die Vorteile beider Methoden zu maximieren.

Adaptionsmethode

Anzahl der Schaltstellen Die minimale Anzahl der Schaltstellen bestimmt sich ähnlich dem Vorgehen zur Bestimmung der fixen Schaltstellen der Halb-Pitch-Methode. Die größere Differenz zwischen dem initialen Betrachtungsabstand und den maximalen bzw. minimalen Betrachtungsabständen bestimmt die Anzahl der minimalen Sprungstellen N_{fix} . Die Sprungweite bei Adaption beträgt bei dieser Methode jedoch einen vollen Subpixel. Die minimale Anzahl der Schaltstellen bestimmt sich durch die Gleichung (5.27).

$$j_{min} = \max \left\{ \frac{D \cdot |p_{B,init} - p_{B,dmin}|}{2 \cdot p_{D,sub} \cdot p_{B,sub}}, \frac{2 \cdot D \cdot |p_{B,init} - p_{B,dmax}|}{p_{D,sub} \cdot p_{B,sub}} \right\} \quad (5.27)$$

$$N_{fix} = \lfloor j_{min} \rfloor_2$$

Lage der Schaltstellen Die Schaltstellen werden wie bei der Halb-Pitch-Methode in äquidistanten Abständen auf der Anzeige platziert. Es gelten die Gleichungen der Halb-Pitch Methode (5.19) und (5.20).

Schaltlogik Auf Grund der Sprungweite bei Adaption von einem vollen Subpixel ergeben sich die Verschiebungsgeraden die eine Barriere einnehmen kann analog zu Gleichung (5.6) zu:

$$g_m(\hat{y}) = (2 \cdot p_{D,sub} - p_{B,init}) \cdot \hat{y} + m \cdot p_{B,sub} \quad (5.28)$$

Bei Adaption der Barriere auf eine Betrachtungsabstandsänderung kann an jeder Schaltstelle entschieden werden, ob und in welche Richtung geschaltet werden soll. Dies unterscheidet die Methode von der Halb-Pitch Methode, bei der geschaltet werden muss.

Das Schaltverhalten wird erneut iterativ bestimmt, das Vorgehen orientiert sich an dem der Halb-Pitch Methode.

Der Schaltvorgang an einer Schaltstelle c_k beeinflusst auch bei dieser Methode das Verhalten an der darauffolgenden Schaltstelle c_{k+1} . Es muss diesmal jedoch zusätzlich berücksichtigt werden, dass die Möglichkeit besteht, an der Schaltstelle nicht den

Pixelpitch zu verändern. Es werden die Differenzen zwischen der Verschiebungsfunktion und der idealen Verschiebungsgerade an der Schaltstelle c_k und der darauffolgenden c_{k+1} für die Fälle, dass die Barriere nach außen schaltet Δd_{+1} , nach innen schaltet Δd_{-1} oder gar nicht schaltet Δd_0 berechnet.

$$\begin{aligned}
\Delta d_0(c_k) &= |s_z(c_k) - h_z(c_k)| \\
\Delta d_{+1}(c_k) &= |s_z(c_k) - (h_z(c_k) + p_{B,sub})| \\
\Delta d_{-1}(c_k) &= |s_z(c_k) - (h_z(c_k) - p_{B,sub})| \\
\Delta d_0(c_{k+1}) &= |s_z(c_{k+1}) - h_z(c_{k+1})| \\
\Delta d_{+1}(c_{k+1}) &= |s_z(c_{k+1}) - (h_z(c_{k+1}) + p_{B,sub})| \\
\Delta d_{-1}(c_{k+1}) &= |s_z(c_{k+1}) - (h_z(c_{k+1}) - p_{B,sub})|
\end{aligned} \tag{5.29}$$

Die Adaption hat das Ziel, die maximale Abweichung von der idealen Adaptionseraden so gering wie möglich zu halten. Es wird festgestellt, für welchen der drei Fälle die geringste Abweichung an Schaltstelle c_k und c_{k+1} eintritt. Zunächst wird die größte Abweichung identifiziert und dann ausgeschlossen:

$$\Delta d_{max} = \max \{ \Delta d_0(c_k), \Delta d_{+1}(c_k), \Delta d_{-1}(c_k), \Delta d_0(c_{k+1}), \Delta d_{+1}(c_{k+1}), \Delta d_{-1}(c_{k+1}) \} \tag{5.30}$$

Im Anschluss wird von den verbleibenden Möglichkeiten die der größten Abweichung ausgeschlossen, welche nach der folgenden Vorschrift identifiziert wird.

$$\begin{aligned}
\Delta d'_{max} &= \max \{ \Delta d_{+1}(c_k), \Delta d_{-1}(c_k), \Delta d_{+1}(c_{k+1}), \Delta d_{-1}(c_{k+1}) \} \\
&\quad \text{falls } \Delta d'_{max} \in \{ \Delta d_0(c_k), \Delta d_0(c_{k+1}) \} \\
\Delta d'_{max} &= \max \{ \Delta d_0(c_k), \Delta d_{-1}(c_k), \Delta d_0(c_{k+1}), \Delta d_{-1}(c_{k+1}) \} \\
&\quad \text{falls } \Delta d'_{max} \in \{ \Delta d_{+1}(c_k), \Delta d_{+1}(c_{k+1}) \} \\
\Delta d'_{max} &= \max \{ \Delta d_0(c_k), \Delta d_{+1}(c_k), \Delta d_0(c_{k+1}), \Delta d_{+1}(c_{k+1}) \} \\
&\quad \text{falls } \Delta d'_{max} \in \{ \Delta d_{-1}(c_k), \Delta d_{-1}(c_{k+1}) \}
\end{aligned} \tag{5.31}$$

Diese Abweichung soll vermieden werden, es wird daher die komplementäre Schaltung gewählt.

$$h_z(c_k \leq \hat{y} < c_{k+1}) = \begin{cases} h_z(c_k \leq \hat{y} < c_{k+1}) + p_{B,sub} & \text{falls } \Delta d_{max} \text{ und } \Delta d'_{max} \\ & \in \{\Delta d_0(c_k), \Delta d_0(c_{k+1}), \Delta d_{-1}(c_k), \Delta d_{-1}(c_{k+1})\} \\ h_z(c_k \leq \hat{y} < c_{k+1}) & \text{falls } \Delta d_{max} \text{ und } \Delta d'_{max} \\ & \in \{\Delta d_{+1}(c_k), \Delta d_{+1}(c_{k+1}), \Delta d_{-1}(c_k), \Delta d_{-1}(c_{k+1})\} \\ h_z(c_k \leq \hat{y} < c_{k+1}) - p_{B,sub} & \text{falls } \Delta d_{max} \text{ und } \Delta d'_{max} \\ & \in \{\Delta d_0(c_k), \Delta d_0(c_{k+1}), \Delta d_{+1}(c_k), \Delta d_{+1}(c_{k+1})\} \end{cases} \quad (5.32)$$

Dieses Vorgehen wird bis zur vorletzten Schaltstelle $c_{\frac{N_{fix}}{2}-1}$ wiederholt. Bei der äußersten Schaltstelle werden nur noch die Differenzen $\Delta d_0(c_k), \Delta d_{-1}(c_k)$ und $\Delta d_{+1}(c_k)$ bestimmt und die Verschiebungsfunktion mit gleicher Logik bis zum Rand der Anzeige fortgesetzt.

Auf Grund der Punktsymmetrie ergibt sich die gesamte Verschiebungsfunktion zu Gleichung (5.33).

$$h_z\left(0 > \hat{y} \geq -\frac{D}{2}\right) = -h_z\left(0 \leq \hat{y} \leq \frac{D}{2}\right) \quad (5.33)$$

5.4.2 Simulationsgrundlage

Um die drei Adaptionmethoden vergleichen zu können wird eine gemeinsame Simulationsgrundlage in Form einer Anzeige gewählt.

Diese orientiert sich an der Zielvorgabe einer 12,3"-Anzeige mit einer Anzeigenbreite von 292 mm. Sie ist somit etwas schmaler als die Prototypische Anzeige 2. Als Abstrahlcharakteristik wird die gemessene und optimierte Charakteristik der Prototypischen Anzeige 2 angenommen. Eine geometrisch-optisch bestimmte Abstrahlcharakteristik zeigt zu große Abweichungen von der Realität. Eine hervorzuhebende Stärke der Simulation ist jedoch, dass sie grundsätzlich sowohl mit geometrisch-optisch bestimmten als auch mit einer gemessenen oder wellenoptisch simulierten Abstrahlcharakteristik aufgerufen werden kann und somit speziell im Zusammenspiel mit der wellenoptischen Simulation ein wertvolles Werkzeug darstellt, qualitative Voraussagen über zukünftige Anzeigen zu treffen.

Die Barrieregeometriedaten wie der Abstand der Barriere zum LCD werden von der

Prototypischen Anzeige 2 übernommen. Der ideale Betrachtungsabstand liegt bei 730 mm. Der zu simulierende Betrachtungsabstandsbereich beträgt 650-1000 mm, was dem Bereich der Zielvorgabe entspricht.

5.4.3 Simulation der Abstandsadaption am Beispiel der Fixen Voll-Pitch Methode

Mit der Simulation wird untersucht, wie gut eine Adaptionmethode auf einen vorgegebenen Betrachtungsabstand adaptieren kann und welche Störungen auf der Anzeige messbar und sichtbar wären.

Der Betrachtungsabstandsbereich wird hierfür in 1 mm Schritten diskretisiert. Eine höhere Auflösung bringt keine besseren Erkenntnisse, da die später eingesetzten Headtrackingsysteme mindestens Ungenauigkeiten von größer 1 mm haben werden.

Wann und wie oft schaltet die Barriere?

Die erste Frage, die sich stellt, ist, wie oft und wann eine Barriere bei einer Abstandsänderung adaptiert. Es wird angenommen, dass sich ein Betrachter mit Augenabstand 62 mm zentral vor der Anzeige befindet und sich langsam von 650 mm zu 1000 mm Betrachtungsabstand bewegt.

Für jeden Betrachtungsabstand wird die Verschiebungsfunktion h_z nach Gleichung (5.33) bestimmt. Aus dem Vergleich der Verschiebungsfunktionen benachbarter Betrachtungsabstände kann geschlossen werden, in welchem Betrachtungsabstand und in welcher Zone auf der Anzeige geschaltet wird.

In Abbildung 5.35 ist dargestellt, in welchem Betrachtungsabstand die jeweilige Zone auf der Anzeige schaltet. Es ist zu erkennen, dass für die in der Simulationsgrundlage beschriebene Anzeige für die Fixe Voll-Pitch Methode eine Anzahl von 8 Schaltstellen benötigt wird, welche die Anzeige in 9 Zonen einteilt. In der Regel werden nur zwei Zonen gleichzeitig geändert, nur bei Abstand 845 mm werden 4 Zonen auf der Anzeige zugleich angepasst. Die geringste Entfernung zwischen zwei Betrachtungsabständen, an den geschaltet wird, beträgt 5 mm (699 und 704 mm Betrachtungsabstand). Für ein Headtrackingsystem bedeutet dies, dass es für diese Adaptionmethode eine Genauigkeit in Richtung des Betrachtungsabstandes von kleiner als 5 mm haben muss.

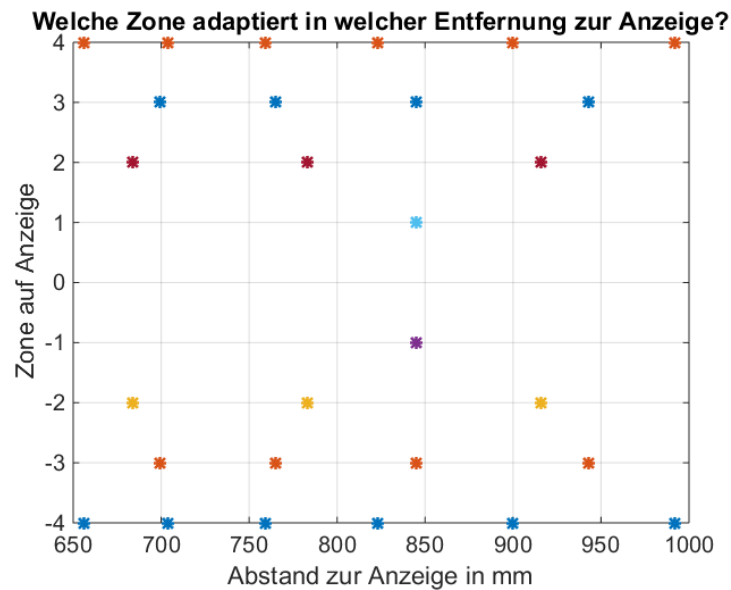


Abbildung 5.35: Schaltverhalten der Fixen Voll-Pitch Methode; Jeder Punkt markiert einen Betrachtungsabstand in dem eine Zone adaptiert.

Simulation der Dynamischen 3D-Stereozone

Simuliert wird die laterale und longitudinale Ausdehnung der Dynamischen 3D-Stereozone bei Adaption auf variable Betrachtungsabstände. Die dynamische Zone stellt die Erweiterung der statischen 3D-Stereozone bei quasi-adiabatischer Änderung des Betrachtungsabstandes dar. Als quasi-adiabatische Änderung wird die ausreichend langsame Änderung der Betrachterposition bezeichnet, bei der das Positionbestimmungssystem und die Barriere der Änderung folgen kann, ohne dass zusätzliche Abweichung (z.B. auf Grund von Latenzen) auftreten. Die dynamische Stereozone ergibt sich aus der Überlagerung aller statischen 3D-Stereozonen für alle Betrachtungsabstände des simulierten Abstandsbereichs.

Das Vorgehen zur Bestimmung der statischen 3D-Stereozonen der Simulation gleicht dem messtechnischen Vorgehen bei der Anzeige des Vorversuchs mit dem Unterschied, dass die Richtung der Abstrahlcharakteristik an einem Mess/Simulationspunkt nun rechnerisch bestimmt wird.

Die Barriere wird durch die Schaltstellen in $k+1$ Zonen unterteilt (k =Anzahl der Schaltstellen). In jeder Zone wird das Abstrahlverhalten an zwei Punkten bestimmt. Diese werden direkt am Rand der Zone und vor und hinter der Schaltstelle gewählt

(eine Barriereöffnung neben der Schaltstelle). Zusätzlich werden drei weitere Simulationspunkte am Rand der Anzeige und in der Mitte der Anzeige definiert. Diese Punkte werden im Weiteren als Simulationspunkte bezeichnet.

Für die Auswertung der Anzeige des Vorversuchs erfolgte die Bestimmung der Abstrahlcharakteristik experimentell durch Messung. Bei der Simulation wird das Abstrahlverhalten an den Simulationspunkten rechnerisch bestimmt. Die berechnete Verschiebungsfunktion definiert die Verschiebung der Barriereöffnung an jeder Stelle der Anzeige. Es wurde bereits gezeigt, dass bei Verschiebung der Barriereöffnung sich nur der Abstrahlwinkel der Barriereöffnung nicht jedoch deren charakteristische Verlauf ändert. Es ist somit möglich, aus dem Abstrahlverhalten einer einzelnen Barriereöffnung auf das Abstrahlverhalten einer jeden Barriereöffnung auf der Anzeige zu schließen. Für die Simulation wird die, wie in Abbildung 5.28 dargestellt, gemessene Abstrahlcharakteristik der Prototypischen Anzeige 2 angenommen. Diese wurde mittig auf der Anzeige gemessen, woraus folgt, dass der Verschiebungswinkel null beträgt.

Um die Abstrahlcharakteristik an beliebigen Barriereöffnungen an Position \hat{y} zu bestimmen, wird die Verschiebung auf der Anzeige, ermittelt aus der Funktion $h_z(\hat{y})$, über den Abstand Barriere-LCD in den Verschiebungswinkel umgerechnet.

$$\alpha_d(\hat{y}) = \arcsin \left(n \cdot \sin \left[\arctan \left(\frac{h_z(\hat{y})}{d_B} \right) \right] \right) \quad (5.34)$$

Der Winkel $\alpha_d(\hat{y})$ beschreibt die Winkelverschiebung der Helligkeitsverteilungen für den Betrachtungsabstand d an der Position \hat{y} auf der Anzeige. Die Umrechnung erfolgt nicht in Kleinwinkelnäherung, da die genaue Berechnung keinen Aufwand für die Simulation darstellt und selbst kleine Winkelabweichungen im späteren Verlauf der Simulation zu Helligkeitsschwankungen führen können. Die von einer Barriereöffnung auf der Anzeige abgestrahlten Helligkeitsverteilungen L_{WB} , L_{BW} , L_{WW} und L_{BB} bestimmen sich dann wie folgt:

$$\begin{aligned} L_{WB}(\hat{y}, \varphi) &= L_{WB}^{sim}(\varphi + \alpha_d(\hat{y})) \\ L_{BW}(\hat{y}, \varphi) &= L_{BW}^{sim}(\varphi + \alpha_d(\hat{y})) \\ L_{WW}(\hat{y}, \varphi) &= L_{WW}^{sim}(\varphi + \alpha_d(\hat{y})) \\ L_{BB}(\hat{y}, \varphi) &= L_{BB}^{sim}(\varphi + \alpha_d(\hat{y})) \end{aligned} \quad (5.35)$$

Dabei ist L_{XX}^{sim} die vorgegebene gemessene, simulierte oder geometrische Eingangsabstrahlcharakteristik der Simulation (das XX steht hierbei als Platzhalter für die möglichen Kombinationen wie z.B. WB). Die zur Bestimmung der 3D-Stereozone notwendigen monokularen Stereozonen werden analog zur Messung im vorherigen Abschnitt bestimmt. Die monokularen Stereokontraste für die linke und rechte Ansicht werden für jeden Simulationspunkt durch Gleichung (5.11) bestimmt. Im Anschluss werden aus der Gleichung (5.12) die monokularen Stereorauten im Raum berechnet. In Abbildung 5.36 sind die simulierten monokularen Stereozonen der Fi-

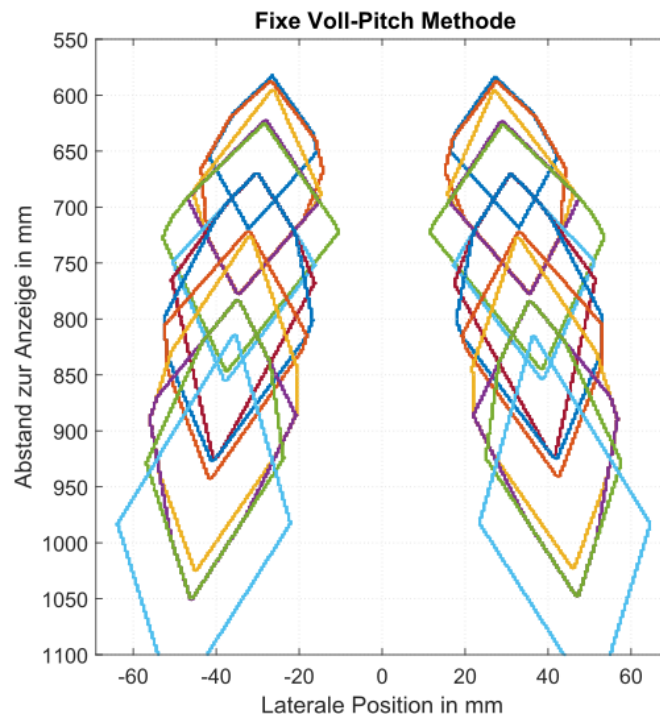


Abbildung 5.36: Simulierte Lage der monokularen Stereozonen mit Kontrast 10:1 der Fixen Voll-Pitch Methode

zen Voll-Pitch Adaptionsmethode für einen Stereokontrast von 10:1 dargestellt. Im Vergleich mit der messtechnischen Auswertung der monokularen Stereozonen sind in dieser Darstellung alle möglichen Stereorauten dargestellt. Es ergeben sich 12 verschiedene Rauten für die Fixe Voll-Pitch Methode, die den gesamten Betrachtungsbereich abdecken. Mit steigendem Betrachtungsabstand nimmt die Größe der Rauten zu.

Aus den monokularen Stereozonen wird nach bekanntem Vorgehen statischen 3D-Stereozonen gebildet, deren Vereinigung die dynamische 3D-Stereozone bildet. In Abbildung 5.37 ist die Dynamische Stereozone der Fixer Voll-Pitch Methode mit Stereokontrast größer 10:1 im Vergleich mit der statischen 3D-Stereozone des idealen Betrachtungsabstandes dargestellt. Die statische Stereozone entspricht dem Betrachtungsbereich, in dem ohne Adaption auf den Betrachtungsabstand ein stereoskopisches Bild wahrgenommen werden könnte. Der rote Bereich (inkl. dem gelben)

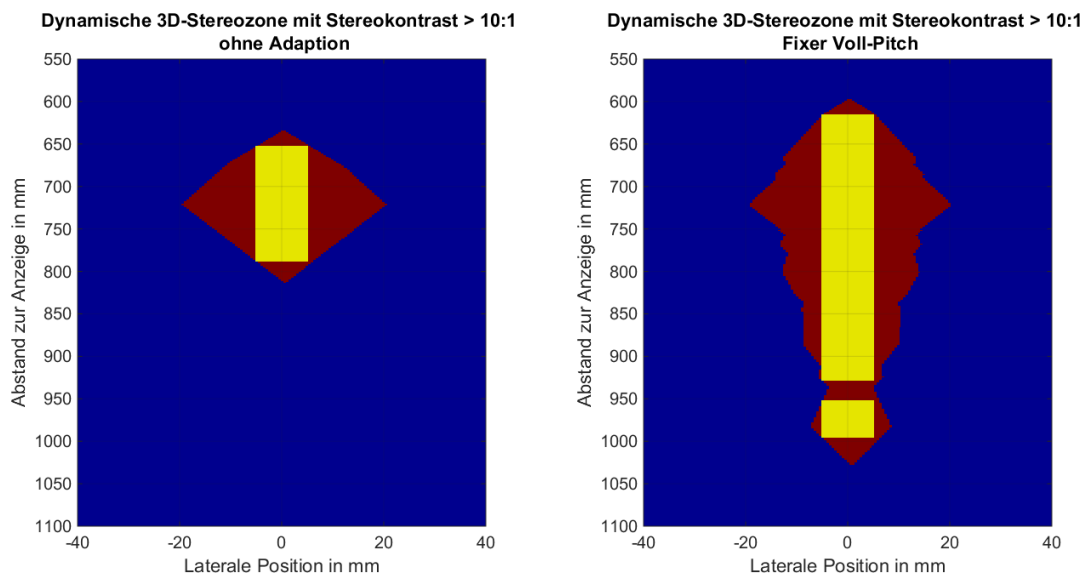


Abbildung 5.37: Vergleich der dynamischen Stereozone ohne (links) und mit Fixer Voll-Pitch Adaption (rechts); in rot ist die jeweilige dynamische Stereozone dargestellt. Die gelbe Farbe markiert die Abstände in denen die dynamische Stereozone eine Mindestbreite 10 mm besitzt, welche notwendig ist um lateral adaptieren zu können.

entspricht der Dynamischen 3D-Stereozone. Der gelbe Bereich hat eine Breite von $\pm 5\text{mm}$ und wird eingezeichnet, sobald die Dynamische 3D-Stereozone (rot) breiter als 10 mm ist. Dieser Wert stellt eine Mindestbreite der Dynamischen 3D-Stereozone um lateral zu adaptieren. Der Wert wurde hierbei aus den typischen Verschiebungswinkeln bei lateraler Adaption maximal abgeschätzt und stellt den minimal notwendigen Bereich dar, den sich ein Betrachter adiabatisch langsam bewegen muss, bevor die Anzeige lateral adaptiert, ohne dass der Stereokontrast unter 10:1 fällt.

Im Vergleich der Adaptionmethode mit dem Fall des Verzichts auf eine Adaption ist

deutlich zu erkennen, dass der Betrachtungsbereich speziell für große Betrachtungsabstände erweitert wird. Die laterale Ausdehnung nimmt jedoch mit steigendem Abstand zum idealen Betrachtungsabstand stark ab und liegt teilweise unter dem geforderten Minimum von 10 mm. Der geforderte Betrachtungsbereich von 650-950 mm wird nicht nicht vollständig von der Methode abgedeckt.

Laterale Adaption in Kombination mit Abstandsadaption

In Kapitel 4 wurde die Adaption auf eine laterale Änderung der Betrachterposition beschrieben. Es wurde gezeigt, dass bei lateraler Adaption die 3D-Stereozone in diskreten Schritten verschoben wird. Hierzu wird die Barriere um ein Subpixel nach links oder rechts verschoben. Bei Adaption auf den Betrachtungsabstand in Kombination mit lateraler Adaption ist das Vorgehen identisch. Die Schaltstellen auf der Anzeige bleiben an den zuvor bestimmten Orten und alle Barriereöffnungen werden um einen Subpixel verschoben. In Abbildung 5.38 ist die dynamische Stereozone für drei benachbarte laterale Barriereinstellungen für die Adaptionmethode Fixer Voll-Pitch dargestellt (zentral, ein Subpixel nach links und ein Subpixel nach rechts verschoben). Die weißen Linien stehen hierbei für die Grenzen der Kopfposition, bei deren Überschreitung die Anzeige lateral adaptiert. In dieser Betrachtung wird nur der Idealfall einer adiabatisch langsamen Bewegung betrachtet. Für schnellere Kopfbewegungen können die Ausführungen zu dynamischen lateralen Bewegungen aus Kapitel 4 angewendet werden.

Links von der ersten weißen Linie ist die Dynamische 3D-Stereozone dargestellt, wenn die Barriere um einen Subpixel nach links verschoben wird, in der Mitte zwischen den weißen Linien befindet sich die Dynamische 3D-Stereozone bei keiner Verschiebung und rechts der rechten weißen Linie die Stereozone bei Verschiebung der Barriere nach rechts.

Auf Grund der diskreten Auflösung der Barriere kann die Barriere nur in diesen Schritten adaptieren. Aus der Abbildung kann für jeden Betrachtungsabstand entlang der weißen Linien abgelesen werden, auf welchen Wert der Stereokontrast bei lateraler Adaption mit Abstandsadaption minimal abfällt.

Für die dargestellte Fixe Voll-Pitch Methode liegt der Wert von 600-900 mm immer über 10:1 und fällt danach ab. Für kleinere Betrachtungsabstände sind die minima-

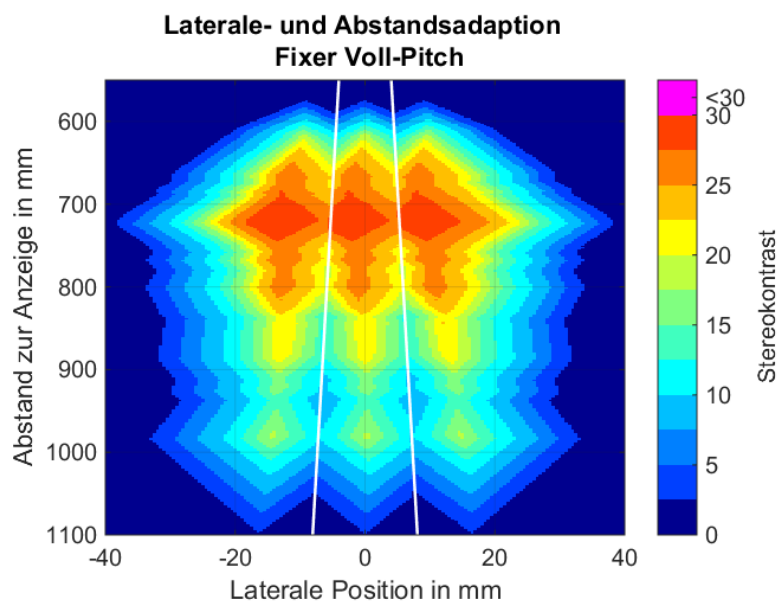


Abbildung 5.38: Die Darstellung beschreibt drei benachbarte dynamische Stereozonen der Fixen Voll-Pitch Methode, die sich jeweils ergeben, wenn zusätzlich zur Abstandsadaption eine laterale Adaption nach links und rechts zur zentralen Ausgangslänge angenommen wird. Die weißen Linien beschreiben die Positionen an denen die Barriere bei lateraler Bewegung auf die benachbarte Stereozone umschaltet

len Stereokontraste größer als für größere Betrachtungsabstände.

Die Simulation zeigt, dass die Fixe Voll-Pitch Methode die 3D-Stereozone dynamisch in die longitudinale Richtung erweitert und über einen großen Bereich auch bei lateralen adiabatisch langsamen Bewegungen der Stereokonstrast nicht unter 10:1 fällt. Jedoch liegen die Werte für große Betrachtungsabstände nur knapp über dem Schwellwert und die Breite der Stereozone ist gering, sodass bei schnelleren lateralen Bewegungen in größeren Betrachtungsabständen die Wahrscheinlichkeit hoch ist, Doppelbilder wahrzunehmen.

Quantitatives Maß: Winkelabweichung von der idealen Verschiebungsfunktion

Um die Qualität einer Adaptionmethode vergleichen zu können, wird ein quantitatives Maß eingeführt. Das quantitative Maß gibt keine Auskunft über die wahrgenommene Qualität, die über die Sichtbarkeit von Störungen in Form von Helligkeitsschwankungen und Crosstalk definiert wird. (siehe nächster Abschnitt). Das

quantitative Maß wird verwendet, um den Einfluss der Adaptionsmethode auf die wahrgenommene Qualität zu bewerten.

Die Abweichung der stufenförmigen Verschiebungsfunktion von der idealen Verschiebungsgeraden für variable Betrachtungsabstände stellt ein Maß für die Güte der Adaptionsmethode dar. Je besser die Adaptionsmethode, desto geringer ist die Abweichung von der idealen Verschiebungsgeraden.

Die bisher verwendeten Verschiebungsfunktionen (siehe Abb. 5.6) stellen die Verschiebung der Barriereöffnungen in mm dar. Um eine Darstellung unabhängig vom Abstand der Barriere zur Flüssigkristallanzeige zu erhalten, wird die resultierende Winkelabweichung als geeignetes Maß eingeführt. Sie gibt an, wie groß die Abweichung vom idealen Blickwinkel auf eine Barriereöffnung auf Grund der diskreten Sprünge der Adaptionsmethode ist.

$$\Delta\varphi_d(\hat{y}) = \arcsin \left(n \cdot \sin \left[\arctan \left(\frac{h_z(\hat{y}) - s_z(\hat{y})}{d_B} \right) \right] \right) \quad (5.36)$$

Hierbei ist $\Delta\varphi_d(\hat{y})$ die Winkelabweichung im Betrachtungsabstand d an der Position der Barriereöffnung \hat{y} ; $h_z(\hat{y})$ die stufenförmige Adaptionsfunktion für den Betrachtungsabstand d und $f_z(\hat{y})$ die ideale Verschiebungsgerade.

In Abbildung 5.39 (rechts) ist die Winkelabweichung für die simulierte Anzeige mit Fixer Voll-Pitch Methode dargestellt. Im Vergleich dazu ist in Abbildung 5.39 (links) die Winkelabweichung für die gleiche Anzeige ohne Adaption und fixer Barriere mit idealem Betrachtungsabstand 730 mm dargestellt. Auf der x-Achse ist hierbei die

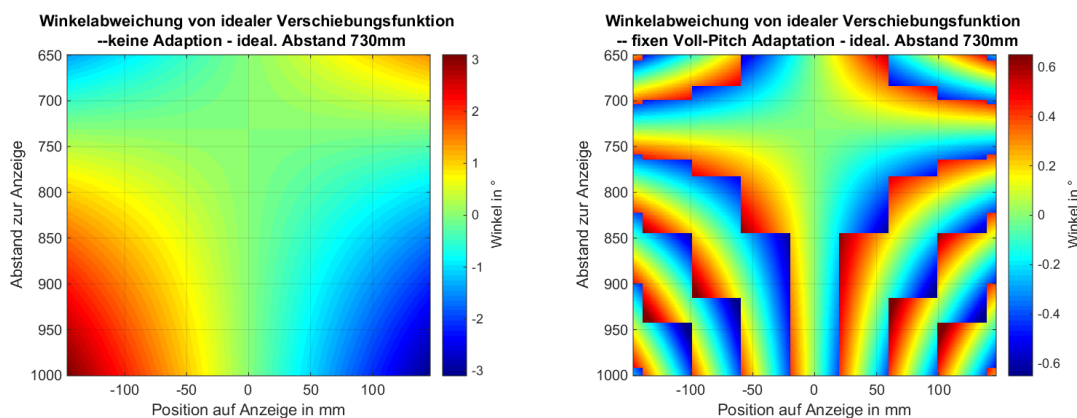


Abbildung 5.39: Abweichung vom idealen Blickwinkel auf die Barriereöffnung für die Anzeige ohne Adaption (links) und mit der Fixen Voll-Pitch Methode (rechts)

Position auf der Anzeige dargestellt und auf der y-Achse der Betrachtungsabstand zur Anzeige, wenn sich der Betrachter zentral vor der Anzeige befindet. Die Farbe gibt die Stärke der Abweichung des idealen Abstrahlwinkels zum Blickwinkel an. Zur besseren Erkennbarkeit wurde die farbliche Darstellung nicht identisch gewählt. Ohne Adaption beträgt die Winkelabweichung vom Ideal bis zu $\pm 2,5^\circ$. Im idealen Betrachtungsabstand tritt keine Abweichung auf, da für diesen die Barriere entworfen wurde. Je weiter man sich vom idealen Betrachtungsabstand entfernt, desto größer werden die Abweichungen. Diese sind an den Rändern der Anzeige am größten, da sich dort der Blickwinkel bei einer Abstandsänderung stärker ändert als zentral auf der Anzeige.

Die Winkelabweichung bei der Fixen Voll-Pitch Adaption nimmt einen maximalen Wert von $0,76^\circ$ an, der somit deutlich kleiner als für den Fall ohne Adaption ist. Im Vergleich der Abbildungen der Abweichungen mit und ohne Adaption sind bei der Fixen Voll-Pitch Methode deutlich die auftretenden Schaltstellen auf der Anzeige zu erkennen. Im idealen Betrachtungsabstand wird nicht geschaltet. Außerhalb eines Bereiches um diesen wird bei Vergrößerung des Abstandes an immer mehr Schaltstellen geschaltet. Am Übergang einer solchen Schaltstelle springt die Winkelabweichung von einer positiven zu einer negativen Winkelabweichung oder umgekehrt. Danach verringert sich die Abweichung, bevor sie bis zu nächsten Schaltstelle erneut ansteigt. Aus der Abbildung ist gut zu erkennen wie die Adaptionmethode die Winkelabweichung effizient minimiert.

Um die Adaptionmethoden mit einander zu vergleichen wird als Gütemaß der Adaption die maximale Winkelabweichung für jeden Betrachtungsabstand bestimmt.

$$\Delta\varphi_{max}(d) = \max(\Delta\varphi_d(\hat{y})) \quad (5.37)$$

Es ergeben sich die in Abbildung 5.40 dargestellten Verläufe für die Barriere ohne und mit Adaption. Es ist zu erkennen, dass die maximale Winkelabweichung bei der Anzeige ohne Abstandsadaption wie erwartet kontinuierlich zunimmt, je weiter der Betrachter vom idealen Betrachtungsabstand bei 730 mm entfernt ist.

Bei der Fixen Voll-Pitch Methode nimmt die maximale Winkelabweichung ebenfalls im idealen Betrachtungsabstand ihr Minimum an, da auch hier die initiale Barriere

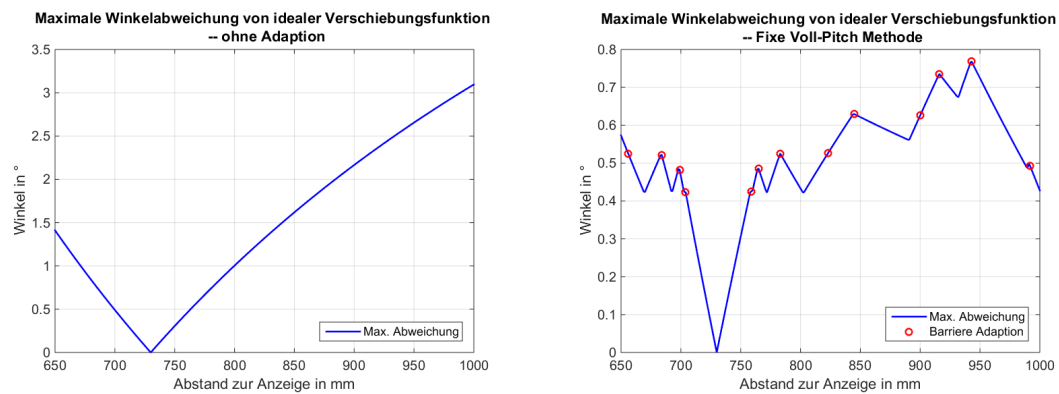


Abbildung 5.40: Maximale Winkelabweichung (blau) über dem Betrachtungsabstand für die Anzeige ohne Adaption (links) und mit der Fixen Voll-Pitch Methode (rechts). In rot die Betrachtungsabstände markiert, in denen die Barriere auf den Betrachter adaptiert.

ideal passt.

Im Vergleich zum Fall ohne Adaption ist jedoch gut zu erkennen, dass die Abstandsadaption die maximale Winkelabweichung begrenzt. In rot sind die Betrachtungsabstände markiert, an denen eine weitere Schaltstelle auf der Anzeige hinzukommt. Zwischen zwei Betrachtungsabständen, an denen geschaltet wird, nimmt die Winkelabweichung oftmals zunächst ab, bevor sie erneut ansteigt, bis erneut geschaltet wird.

Charakteristisch für die Fixe Voll-Pitch Adaptionsmethode ist, dass die Abweichung für den größten Betrachtungsabstand erneut abfällt. Dies liegt daran, dass sich die Lage der fixen Schaltstellen aus dem maximalen Betrachtungsabstand bestimmen. Die Abweichung beträgt dort daher gerade den halben Verschiebungswinkel, der sich aus der Subpixelgröße der Barriere und dem Abstand der Barriere zum LCD ergibt. Die maximale Abweichung vom idealen Barrirepitch stellt ein gutes Maß zum Vergleichen der Adaptionsmethoden dar, jedoch lässt sich damit noch keine Aussage über die sichtbare Qualität der Anzeige treffen.

Simulation von Helligkeitsunterschieden und Crosstalk

Die Qualität einer Adaptionsmethode misst sich an dem Grad der Sichtbarkeit von Störungen. Als Störungen gelten Helligkeitsunterschiede und sichtbares Übersprechen (Crosstalk).

Die Simulation beschreibt, welchen Helligkeitsverlauf ein Betrachter mit einem Augenabstand $d_A = 62$ mm in einem Betrachtungsabstand d_B über die gesamte Breite auf der Anzeige wahrnimmt. Die Simulation orientiert sich an dem Vorgehen bei der Vermessung der Prototypischen Anzeige 1.

Es wird zunächst der Winkel von der linken und rechten Augenposition für einen Betrachtungsabstand d_B zu jeder Barriereöffnung bestimmt. Dabei wird davon ausgegangen, dass der Betrachter zentral vor der Anzeige sitzt.

$$\begin{aligned}\varphi_L(\hat{y}, d_B) &= \arctan\left(\frac{\hat{y} - \frac{d_A}{2}}{d_B}\right) \\ \varphi_R(\hat{y}, d_B) &= \arctan\left(\frac{\hat{y} + \frac{d_A}{2}}{d_B}\right)\end{aligned}\quad (5.38)$$

Die Winkel beschreiben den Blickwinkel, unter dem ein Betrachter im Abstand d_B auf die Barriereöffnung an Position \hat{y} blickt.

Um zu bestimmen welche Leuchtdichte am Ort einer beliebigen Barriereöffnung wahrgenommen wird, muss das Abstrahlverhalten der Barriereöffnung in Richtung des Betrachters bestimmt werden.

Die Simulation stützt sich auf eine zentral gemessene, geometrisch optisch bestimmte oder simulativ berechnete Abstrahlcharakteristik. Aus dieser Einzelmessung kann die Abstrahlcharakteristik an jeder Barriereöffnung bestimmt werden, indem die gemessene Charakteristik um den Winkel verschoben wird, der sich aus der Verschiebungsfunktion für den Betrachtungsabstand d ergibt.

Gleichung (5.34) beschreibt die Abstrahlcharakteristik jeder Barriereöffnung für den Betrachtungsabstand d_B .

Die wahrgenommene Leuchtdichte für das linke L^L und rechte L^R Auge an der Barriereöffnung \hat{y} bei Darstellung von WB, BW, WW und BB ergeben sich zu:

$$\begin{aligned}L_{WB}^L(\hat{y}, d_B) &= L_{WB}(\hat{y}, \varphi_L(\hat{y}, d_B)) & L_{WB}^R(\hat{y}, d_B) &= L_{WB}(\hat{y}, \varphi_R(\hat{y}, d_B)) \\ L_{BW}^L(\hat{y}, d_B) &= L_{BW}(\hat{y}, \varphi_L(\hat{y}, d_B)) & L_{BW}^R(\hat{y}, d_B) &= L_{BW}(\hat{y}, \varphi_R(\hat{y}, d_B)) \\ L_{WW}^L(\hat{y}, d_B) &= L_{WW}(\hat{y}, \varphi_L(\hat{y}, d_B)) & L_{WW}^R(\hat{y}, d_B) &= L_{WW}(\hat{y}, \varphi_R(\hat{y}, d_B)) \\ L_{BB}^L(\hat{y}, d_B) &= L_{BB}(\hat{y}, \varphi_L(\hat{y}, d_B)) & L_{BB}^R(\hat{y}, d_B) &= L_{BB}(\hat{y}, \varphi_R(\hat{y}, d_B))\end{aligned}\quad (5.39)$$

Die größtmöglich sichtbaren Helligkeitsvariationen treten für den Extremfall der Darstellung von L_{WB} für das linke und L_{BW} für das rechte Auge auf.

In Abbildung 5.41 sind die simulierten Helligkeitsverläufe auf der Anzeige für die Adaptionsmethode Fixer Voll-Pitch dargestellt. Die Helligkeitsverläufe wurden normiert. Auf der x-Achse ist die Position auf der Anzeige angegeben und auf der y-Achse der Betrachtungsabstandsbereich von 650-1000 mm. Die wahrgenommenen

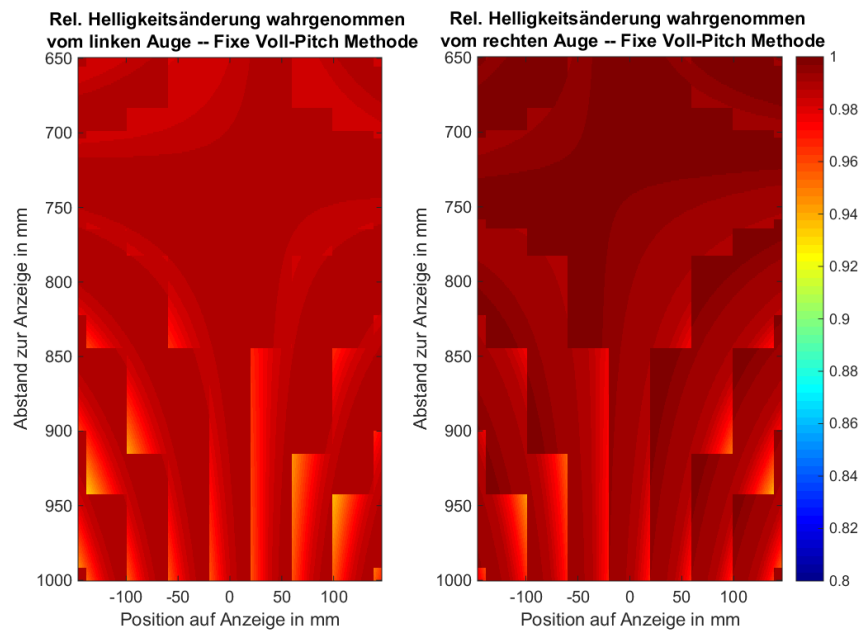


Abbildung 5.41: Simulation der rel. Leuchtdichteveriation auf der Anzeige, wahrgenommen mit dem linken und rechten Auge in verschiedenen Betrachtungsabständen für die Fixe Voll-Pitchmethode

Helligkeitsschwankungen ergeben sich aus der zuvor berechneten Winkelabweichung und dem Verlauf der Abstrahlcharakteristik. Je größer und flacher das Plateau der Abstrahlcharakteristik ist, desto größere Winkelabweichungen können ausgeglichen werden, ohne dass es zu Helligkeitsvariationen kommt.

Für die Fixe Voll-Pitch Methode ist zu erkennen, dass sich für die hypothetische 12,3"-Anzeige mit einer Abstrahlcharakteristik gleich der Prototypischen Anzeige 2 maximal Helligkeitsvariationen von ungefähr 7% auftreten. Diese treten hauptsächlich an den Schaltstellen auf.

Nimmt die wahrgenommene Helligkeit graduell über einige Barriereöffnungen ab, wird dies vom Betrachter als weniger störend wahrgenommen als eine sprunghafte Abnahme der Helligkeit.

Es wird daher der Gradient der Leuchtdichteänderung gebildet. In Abbildung 5.42 sind exemplarisch die Verläufe des Helligkeitsgradienten in den frei gewählten Betrachtungsabständen 650, 730 und 950 mm dargestellt. Im idealen Betrachtungs-

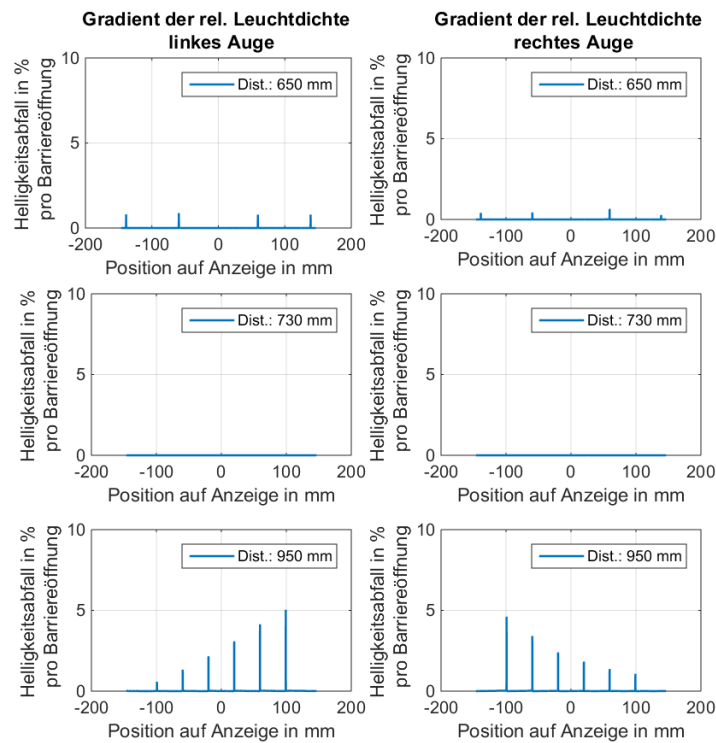


Abbildung 5.42: Simulierte Gradienten der rel. Leuchtdichte in den Betrachtungsabständen 650, 730 und 950 mm für die Fixe Voll-Pitch Methode

abstand 730 mm treten wie erwartet keine Helligkeitssprünge auf, da die Barriere dort keine Schaltstellen besitzt. Für die Entfernungen 650 und 950 mm ist zu erkennen, dass sich die Leuchtdichte an den Schaltstellen sprunghaft ändert. Wie zuvor beschrieben, kann ein Betrachter Helligkeitsunterschiede ab einem Wert von 1-2% wahrnehmen.

Der Fall des maximalen Kontrasts bei Anzeige von WB oder BW tritt bei der Darstellung typischer stereoskopischer Inhalte nur selten auf, sodass die Störungen bei Wahl der richtigen Inhalte geringer ausfallen können. Die Größe der maximalen Helligkeitsgradienten stellt jedoch gutes Maß dar, um die Qualität der Anzeige zu bewerten. Es wird daher der maximale Leuchtedichtegradient für das linke oder rechte Auge für jeden Betrachtungsabstand ermittelt (vgl. Abb. 5.43). Der Verlauf des

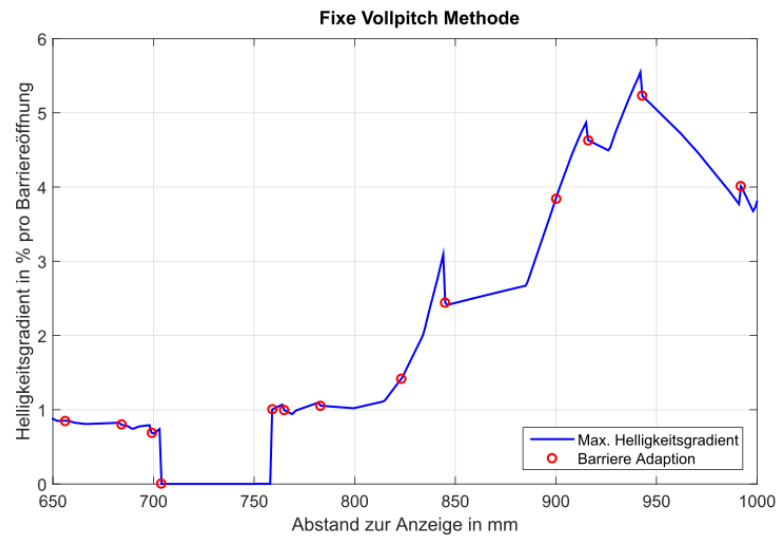


Abbildung 5.43: Maximaler Leuchtdichtegradient für das linke und rechte Auge über dem Betrachtungsabstand für die Fixe Voll-Pitch Methode

Helligkeitsgradienten über dem Betrachtungsabstand zeigt einen ähnlichen Verlauf wie die Winkelabweichung. Rund um den idealen Betrachtungsabstand treten keine Schaltstellen auf, wodurch auch keine sprunghaften Änderungen der Leuchtdichte zu beobachten sind. Bei größeren Abständen vom idealen Betrachtungsabstand steigen die Störungen an, fallen dann jedoch zum maximalen Abstand erneut ab. Der maximale Leuchtdichtegradient beträgt über 5% Helligkeitsabfall über eine Barriereöffnung. Diese Störung würde auf der Anzeige als deutliche Kante wahrgenommen werden.

Crosstalk auf Anzeige

Neben Helligkeitsschwankungen auf der Anzeige beeinflusst der Crosstalk maßgeblich die wahrgenommene Qualität. Wie in Kapitel 2 beschrieben, ist die Sichtbarkeit von Crosstalk stark von den dargestellten Inhalten abhängig. In der Simulation wird daher der Extremfall der Darstellung von WB und BW behandelt.

Der Crosstalkverlauf auf der Anzeige bestimmt sich über die Formel (5.40) aus den Helligkeitsverläufen für das linke und rechte Auge.

$$\begin{aligned}
 XT^L(\hat{y}, d_B) &= \frac{L_{BW}^L(\hat{y}, d_B) - L_{BB}^L(\hat{y}, d_B)}{L_{WB}^L(\hat{y}, d_B) - L_{BB}^L(\hat{y}, d_B)} \\
 XT^R(\hat{y}, d_B) &= \frac{L_{WB}^R(\hat{y}, d_B) - L_{BB}^R(\hat{y}, d_B)}{L_{BW}^R(\hat{y}, d_B) - L_{BB}^R(\hat{y}, d_B)}
 \end{aligned} \tag{5.40}$$

In Abbildung 5.44 sind die simulierten Crosstalkverläufe für den Betrachtungsbe-
reich dargestellt. Auch hier treten die größten Werte an den Schaltstellen auf, da

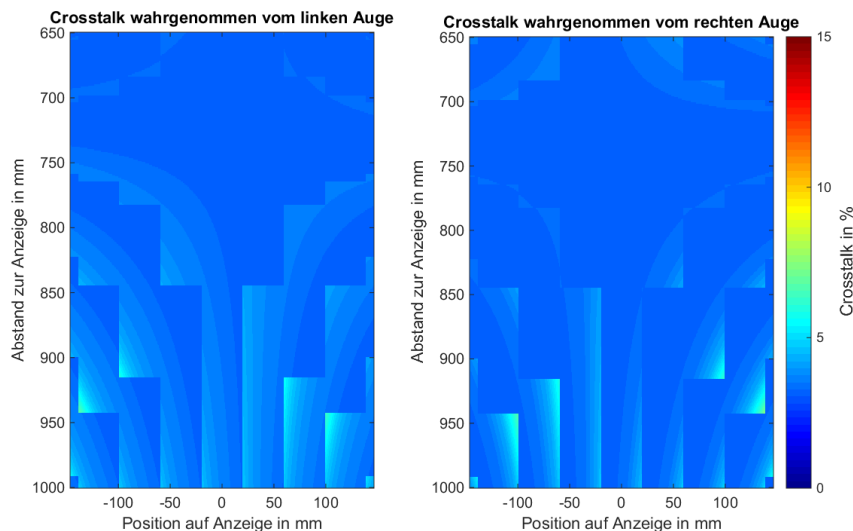


Abbildung 5.44: Simulierter Crosstalk auf der Anzeige wahrgenommen mit dem linken und rechten Auge

dort die größte Winkelabweichung auftritt. Für die Anzeige mit der Fixen Voll-Pitch Methode treten im Maximum Werte für den Crosstalk von ungefähr 6% auf.

In Abbildung 5.45 sind die maximalen Werte für jeden Betrachtungsabstand über dem Betrachtungsabstand dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der maximal wahrgenommene Crosstalk auf der Anzeige rund um den idealen Betrachtungsabstand für die Fixe Voll-Pitch Methode ungefähr 3% beträgt, was dem Wert der Prototypischen Anzeige 2 entspricht. Die Adaptionmethode erweitert dynamisch den Betrachtungsabstandsbereich, kann jedoch den Crosstalk nicht auf dem niedrigen Wert halten, sodass der wahrgenommene Crosstalk bis über 7% ansteigt. Aus der vorherigen Abbildung 5.44 ist abzulesen, dass dieses hohe Übersprechen auch nicht am Rand der Anzeige, sondern stärker mittig und somit im Wahrnehmungsbereich des Betrachters auftreten. Dies kann abhängig von der Gestaltung der Inhalte zu sichtbaren Störungen auf der Anzeige führen.

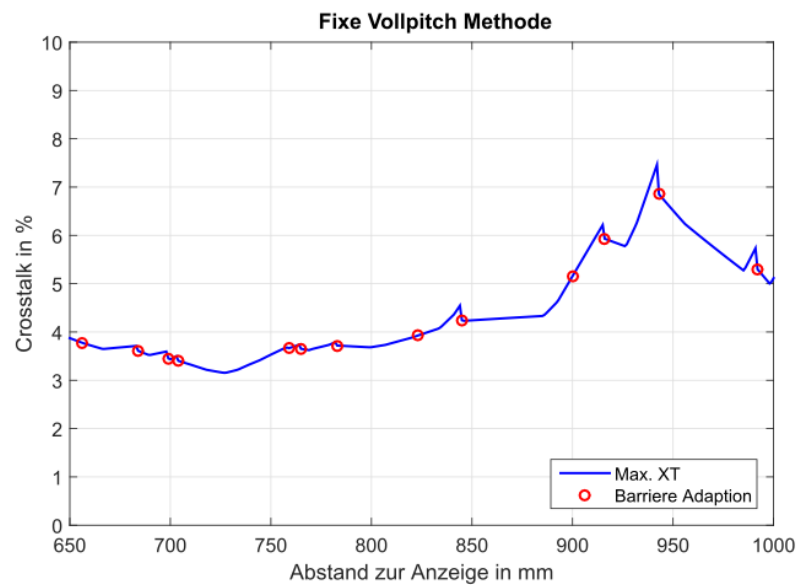


Abbildung 5.45: Simulierter, maximaler Crosstalk wahrgenommen mit dem linken oder rechten Auge für die Fixe Voll-Pitch Methode

5.4.4 Vergleich der Methoden zur Adaption auf den Betrachtungsabstand

Auf Basis der im vorherigen Abschnitt vorgestellten Simulation werden die drei Adaptionsmethoden mit dem Fall eines Verzichtes auf eine Abstandsadaption verglichen. Ziel ist es, die beste Methode für die 12,3" Zielanzeige mit der Abstrahlcharakteristik der Prototypischen Anzeige 2 zu finden.

Anzahl und Lage der Schaltstellen

Die drei Adaptionsmethoden unterscheiden sich in der Anzahl, der Lage und der Art der Schaltstellen.

Während bei der Voll-Pitch Methode die Schaltstellen (theoretisch) frei auf der Anzeige platziert werden können, sind die Schaltstellen bei den zwei anderen Methoden an festen Orten auf der Anzeige.

In Abbildung 5.46 ist das Verhalten der Schaltstellen bei Adaption auf den Betrachtungsabstand dargestellt. Die Darstellungen der Halb- und Fixen Voll-Pitch Methode zeigen, in welchem Betrachtungsabstand welche Zone adaptiert.

Die Voll-Pitch Methode kennt keine festen Zonen, es wird daher nur die Anzahl der

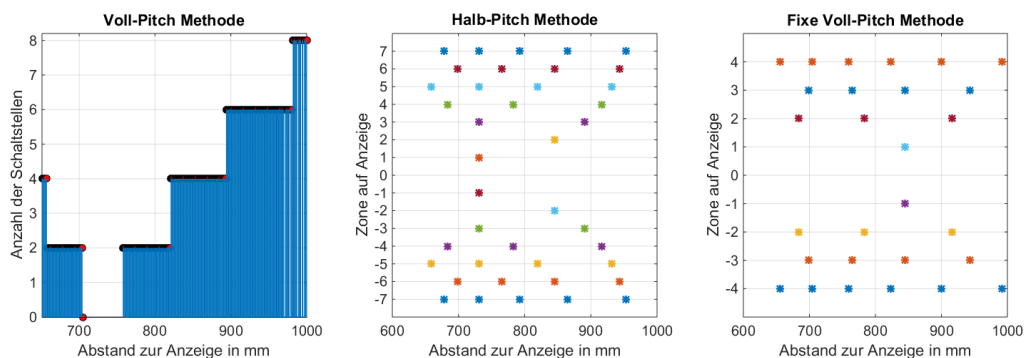


Abbildung 5.46: Vergleich der Anzahl der Schaltstellen und des Schaltverhaltens der drei Adaptionsmethoden

Schaltstellen über dem Betrachtungsabstand dargestellt.

Für die simulierte Anzeige werden für die Halb-Pitch Methode 14 Schaltstellen benötigt, während für die restlichen Methoden im Maximum nur 8 Schaltstellen auftreten. Im Schaltverhalten gilt, dass die Voll-Pitch Methode annähernd auf jede Änderung des Betrachtungsabstandes reagiert. Im Vergleich der Methoden mit festen Schaltstellen ist festzustellen, dass die Halb-Pitch Methode öfter auf eine Änderung der Betrachterposition adaptieren muss als die Fixe Voll-Pitch Methode. Dies kann störend sein, wenn schon bei kleinen Positionsänderungen, wie sie bei der Fahrt vorkommen, sichtbare Störungen auf Grund der Adaption wahrzunehmen sind.

Hervorzuheben ist, dass beide Voll-Pitch Methoden im idealen Betrachtungsabstand keine Schaltstellen besitzen und somit auch keine Störungen auftreten können. Bei der Halb-Pitch Methode dagegen, sind nicht nur Schaltstellen im idealen Betrachtungsabstand vorhanden, an diesen ändert sich auch bei Kopfpositionsänderungen die Schaltrichtung.

Die Anforderungen für die Nichtsichtbarkeit der Schaltstellen und des Schaltvorgangs sind daher für die Halb-Pitch-Methode höher, da im idealen Betrachtungsabstand auch die Mehrheit der Fahrer sitzen.

Die höchsten Anforderungen an die Genauigkeit eines Headtracking-Systems stellt die Voll-Pitch Methode, da diese schon auf Positionsänderungen von 1 mm reagiert. Bei der Fixen Voll-Pitch Methode liegen benachbarte Abstände, in denen geschaltet

wird im Minimum 6 mm auseinander, während sie bei der Fixen Voll-Pitch Methode 10 mm Abstand haben.

Winkelabweichung von der idealen Adaption

In Abbildung 5.47 sind die Abweichungen vom idealen Betrachtungswinkel für die drei Adaptionsmethoden im Vergleich mit dem Fall ohne Adaption dargestellt. Es

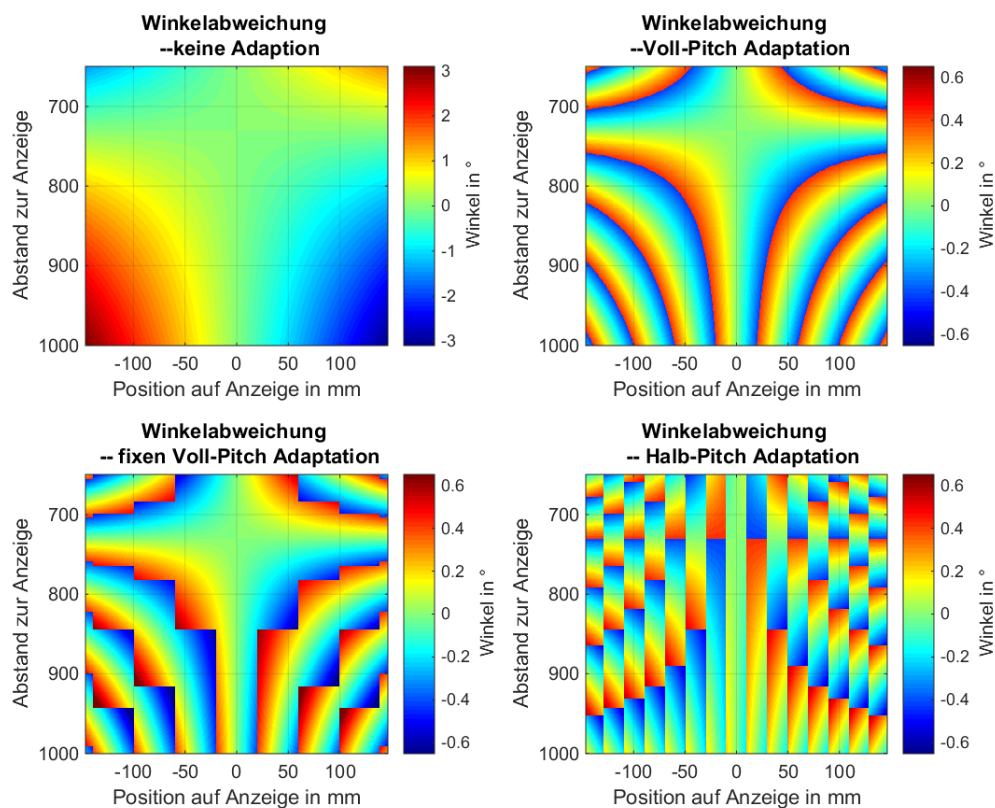


Abbildung 5.47: Darstellung der Winkelabweichung aller drei Adaptionsmethoden und für den Fall ohne Adaption auf den Betrachtungsabstand

sei angemerkt, dass der Plot ohne Adaption eine andere Skalierung als die restlichen drei aufweist.

Es wird deutlich, dass alle drei Methoden die Winkelabweichung gegenüber dem Fall ohne Adaption deutlich reduzieren.

Bei der Voll-Pitch Methode ist zu erkennen, dass die kontinuierliche Anpassung der Lage der Schaltstellen auf der Anzeige zu Übergängen führt, bei denen immer von der positiven maximalen Winkelabweichung des halben Verschiebungswinkels

($\frac{0,84^\circ}{2} = 0,42^\circ$) zur negativen Winkelabweichung geschaltet wird.

Die Fixe Voll-Pitch Methode basiert auf Schaltstellen an festen Orten der Anzeige. Aus der Abbildung sind die äquidistanten Abstände dieser gut zu erkennen. Da nur an diesen Schaltstellen der Barrierepitch angepasst werden kann und nicht wie bei der Voll-Pitch Methode am idealen Ort geschaltet wird, sind die Winkelabweichungen bei dieser Methode größer. Jedoch hat auch diese Methode den Vorteil, dass nur bei Bedarf an den Schaltstellen geschaltet wird, sodass im idealen Betrachtungsabstände ebenfalls keine Schaltstellen vorhanden sind.

Die Halb-Pitch Methode hat ebenfalls Schaltstellen an festen Orten auf der Anzeige, auf Grund der halbierten Sprungweite ist die Anzahl dieser jedoch doppelt so hoch. Darüber hinaus sind diese nicht ausschaltbar, wodurch in jedem Betrachtungsabstand aktive Schaltstellen vorhanden sind. Im Gegensatz zu den anderen Methoden muss auch im idealen Betrachtungsabstand geschaltet werden, obwohl es von der Winkelabweichung nicht notwendig wäre.

In Abbildung 5.48 sind die maximalen Winkelabweichungen für alle drei Methoden und ohne Adaption über dem Betrachtungsabstand dargestellt. Aus der Abbildung

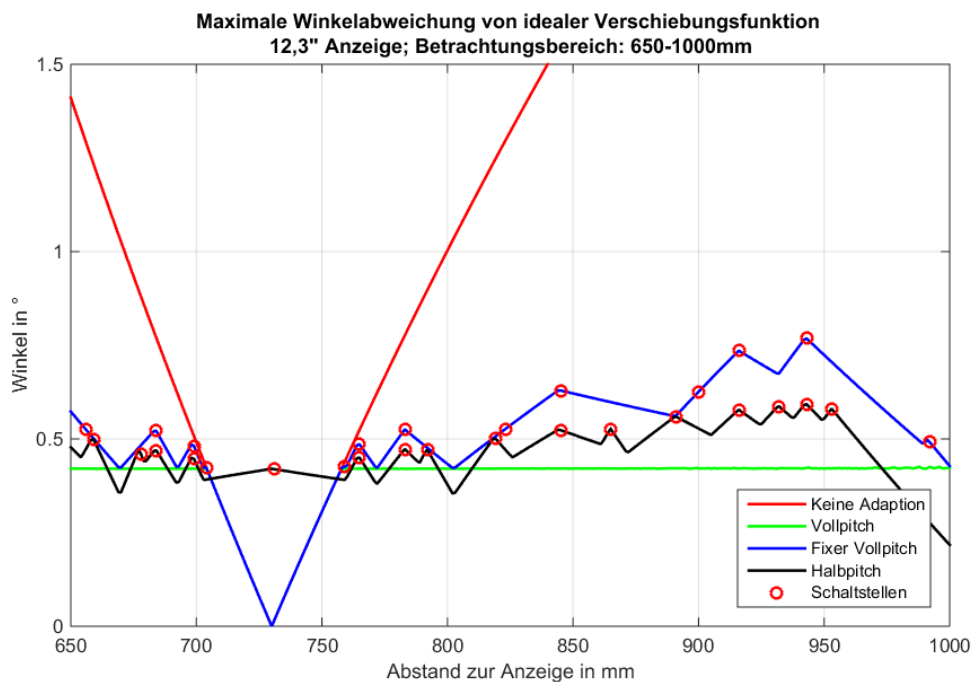


Abbildung 5.48: Vergleich der maximalen Winkelabweichungen der drei Adaptionmethoden (grün, blau, schwarz) mit der Referenz keine Adaption (rot)

ist zu erkennen, dass die Winkelabweichung ohne Adaption sehr schnell ansteigt. Alle drei Adaptionmethoden begrenzen die Abweichung effektiv. Die Voll-Pitch Methode hält die Abweichung außerhalb des Bereichs um den idealen Betrachtungsabstand konstant auf einen Wert. Die Fixe Voll-Pitch Methode nimmt immer Werte größer oder gleich der Voll-Pitch Methode an, da hierbei nicht immer an den idealen Orten geschaltet werden kann.

Etwas überraschend ist, dass auch bei der Halb-Pitch Methode in den meisten Betrachtungsabständen Winkelabweichungen auftreten, die größer als bei der Voll-Pitch Methode sind, obwohl die Sprungweite halbiert wurde. Der Grund hierfür liegt in den vorgegebenen Positionen der Schaltstellen, wodurch in den meisten Fällen nicht so adaptiert werden kann, dass die Verschiebungsfunktion der Verschiebungsgeraden ideal folgt. Dies ist nur für den maximalen Betrachtungsabstand der Fall, aus dem die Positionen der Schaltstellen auf der Anzeige abgeleitet wurden. Hier beträgt die Winkelabweichung gerade die halbe Abweichung der Voll-Pitch Methode.

Dynamischer Bewegungsbereich

In Abbildung 5.49 sind die Dynamischen 3D-Stereozonen mit Stereokontrast $> 10:1$ im Vergleich mit dem Fall einer Anzeige ohne Adaption dargestellt.

Die Dynamische 3D-Stereozone wird von allen drei Methoden gegenüber dem Fall ohne Adaption erweitert.

Bei allen Methoden ist zu erkennen, dass die laterale Ausdehnung der Stereozone mit größeren Betrachtungsabständen abnimmt. Am stärksten ist die Abnahme für die Fixe Voll-Pitch Methode, bei der die laterale Ausdehnung bei ungefähr 950 mm liegt und somit sogar unter die Mindestbreite von 10 mm fällt, danach jedoch wieder ansteigt.

In Abbildung 5.50 sind die Abstandsbereiche dargestellt, in denen die Mindestbreite der lateralen Stereozone erfüllt ist.

Hierbei zeigt sich, dass die Voll-Pitch Methode den größten Betrachtungsbereich abdeckt, gefolgt von der Fixen Voll-Pitch Methode. Den geforderten Betrachtungsbereich von 650-1000 mm deckt nur die Voll-Pitch Methode vollständig ab.

Wie stark der Stereokontrast bei der lateralen Adaption in Kombination mit der

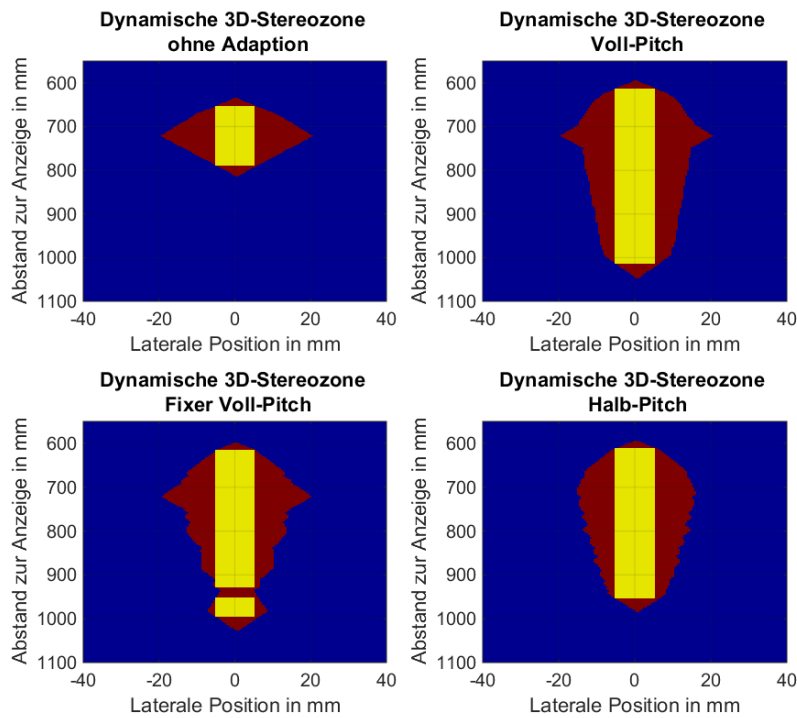


Abbildung 5.49

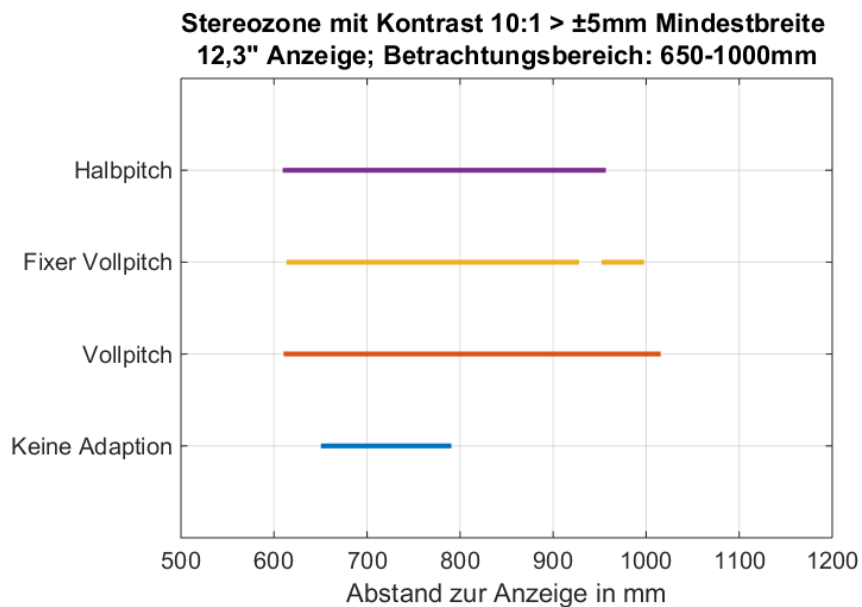


Abbildung 5.50: Vergleich die Betrachtungsabstandsbereiche mit einer Mindestbreite von 10 mm drei Adaptionsmethoden

Abstandsadaption abfällt, kann aus Abbildung 5.51 abgelesen werden. Es zeigt sich, dass bei allen Methoden die höchsten Stereokontraste im idealen Betrachtungsab-

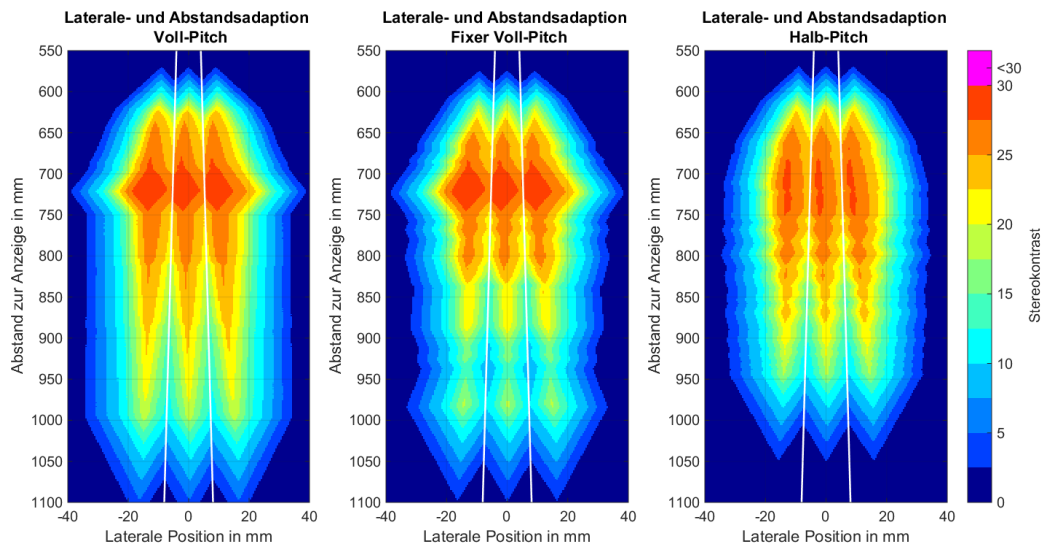


Abbildung 5.51: Stereokontrast innerhalb der dynamischen 3D-Stereozonen bei lateraler Adaption für die drei Adaptionsmethoden

stand erreicht werden. Für die beiden Voll-Pitch Methoden ist der Bereich des höchsten Kontrastes größer als für die Halb-Pitch Methode. Für größere Betrachtungsabstände fallen die maximalen Stereokontraste bei allen Methoden ab.

In Abbildung 5.52 sind die Stereokontraste dargestellt, die auftreten, wenn man entlang der weißen Linie für die drei Adaptionsmethoden ein Schnitt durch die Plots legt. Dies entspricht dem minimal wahrgenommenen Stereokontrast bei einer adiabatisch langsamen lateralen Bewegung.

Es wird ersichtlich, dass alle Adaptionsmethoden ungefähr ab einem Betrachtungsabstand größer als 610 mm minimale Stereokontraste von größer als der Schwellwert von 10:1 aufweisen. Bei der Obergrenze des Betrachtungsbereichs unterscheiden sich die Methoden. Bei der Fixen-Voll-Pitch Methode fällt der Stereokontrast schon bei einem Betrachtungsabstand von 900 mm unter den Schwellwert. Für die Halb-Pitch Methode liegt der minimal wahrgenommenen Stereokontrast erst bei Betrachtungsabständen über 950 mm und für die Voll-Pitch Methode ab 1000 mm unter dem Wert von 10:1. Somit ist die Voll-Pitch Methode die einzige, die im gesamten geforderten Betrachtungsbereich einen ausreichenden Stereokontrast bei lateraler Adaption aufweist.

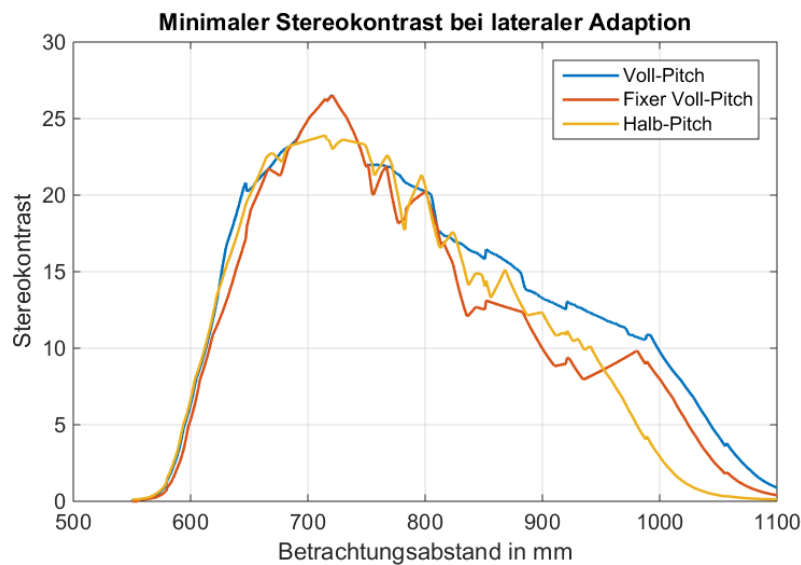


Abbildung 5.52: Vergleich des minimal wahrgenommenen Stereokontrasts bei lateraler Adaption im Betrachtungsabstandsbereich 500-1100 mm für die drei Adaptionmethoden

Crosstalk und Helligkeitsgradient

Wie zuvor in der Simulation beschrieben, können die Winkelabweichung und deren sprunghafte Änderung an den Schaltstellen zu gesteigertem Crosstalk und Helligkeitsvariationen führen.

In der Abbildung 5.53 ist der maximale Crosstalk in jedem Betrachtungsabstand für die drei Adaptionmethoden im Vergleich ohne Adaption dargestellt. Die Simulation basiert hierbei auf der gemessenen Abstrahlcharakteristik der Prototypischen Anzeige 2. Der minimale Crosstalk liegt selbst im idealen Betrachtungsbereich mit 3,5% etwas zu hoch und sollte in einer zukünftigen Anzeige minimiert werden. Wichtiger bei der Bewertung der Adaptionmethoden ist jedoch das Ansteigen des Crosstalks für Betrachtungsabstände größer als der ideale Betrachtungsabstand.

Für den Fall ohne Adaption nimmt der Crosstalk sehr schnell zu, sodass effektiv nur ein Betrachtungsbereich von $\approx 680 - 780$ mm nutzbar ist. Alle Adaptionmethoden erweitern den Betrachtungsbereich, hierbei steigt der Crosstalk erst ab 830 mm an. Am stärksten nimmt dieser bei der Fixen Voll-Pitch Methode zu. Mit Werten von über 7% ist die Wahrscheinlichkeit hoch in diesen Betrachtungsabständen Geisterbilder wahrzunehmen. Die Voll-Pitch Methode ist auch in diesem Fall die beste

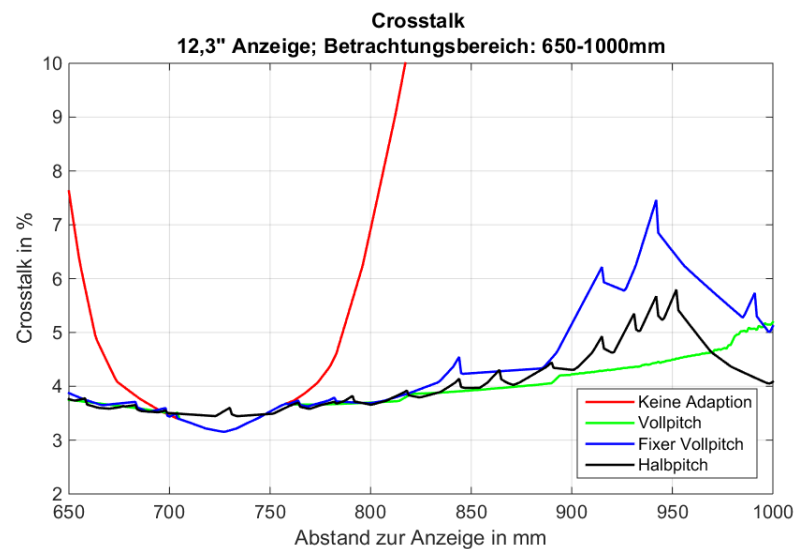


Abbildung 5.53: Vergleich des simulierten maximalen Crosstalks für die drei Adaptionsmethoden für ein 12,3Anzeige

Methode.

Eine weitere Bewertungsgröße ist der Helligkeitsgradient, also die sprunghafte Änderung der wahrgenommenen Leuchtdichte, die wie gezeigt, hauptsächlich an den Schaltstellen stattfindet. In Abbildung 5.54 sind die maximalen Helligkeitsgradient der Adaptionsmethoden im Vergleich dargestellt. Aus der Abbildung ist klar zu er-

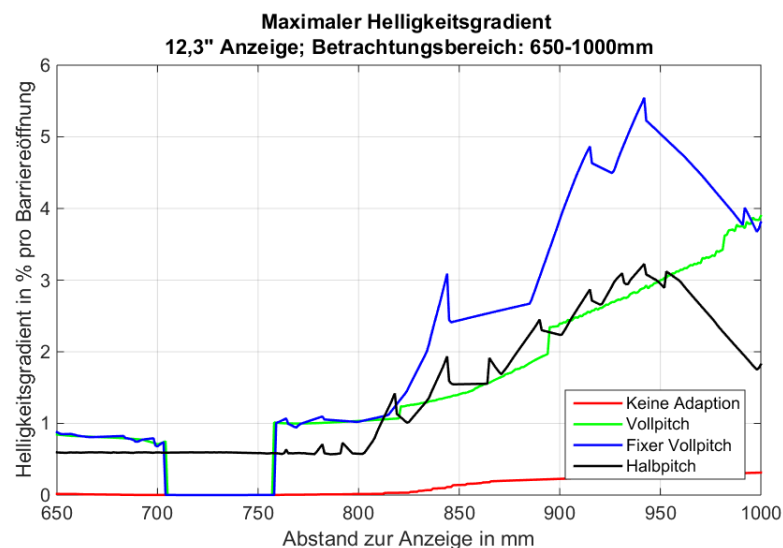


Abbildung 5.54: Vergleich des maximalen Leuchtdichtegradienten für die drei Adaptionsmethoden

kennen, dass im Fall ohne Adaption und damit verbunden der Abwesenheit von Schaltstellen kaum Helligkeitsänderungen auftreten.

Bei den Voll-Pitch Methoden, die in einem Bereich um den idealen Betrachtungsabstand keine Schaltstellen aufweisen, werden in diesem ebenfalls keine sprunghaften Änderungen der Leuchtdichte erwartet.

Die Halb-Pitch Methode zeigt für Betrachtungsabstände bis 800 mm sehr geringe Helligkeitsvariationen. Im Gegensatz zu den Helligkeitssprüngen bei der lateralen Adaption, bei denen es sich um eine zeitliche Störungen handelt und die verschwinden, sobald sich der Fahrer in Ruhe befindet, handelt es sich bei den Helligkeitsvariationen an den Schaltstellen um einen ortsabhängigen Effekt. Die Helligkeitsdifferenz ist auch vorhanden, wenn sich der Fahrer in Ruhe befindet. Das „Weber-Gesetz“ [77] besagt, dass Leuchtdichteunterschiede sichtbar sind, wenn sie größer als 1% des dominierenden Leuchtdichtereiz sind. Angewendet auf den vorliegenden Fall, wäre bei allen Adaptionmethoden bei Anzeige des maximalen Kontrasts WB und für Betrachtungsabstände größer als 800 mm die Wahrscheinlichkeit groß, dass die Schaltstellen als störende Kanten wahrgenommen werden.

Die größten Leuchtdichtevariationen treten bei der Fixen Voll-Pitch Methode auf. Die Halb-Pitch Methode ist über einen großen Betrachtungsbereich annähernd gleich der Voll-Pitch Methode. Für große Abstände nehmen der maximale Leuchtdichtegradient wieder ab. Hierbei zeigt sich, dass eine Reduzierung der Sprungweite an der Schaltstelle, wie sie für die Halb-Pitch Methode umgesetzt wurde, Helligkeitsvariationen reduziert.

5.4.5 Diskussion: Vergleich der Methoden zur Adaption auf den Betrachtungsabstand

Im Vergleich der Abstandsadaptionmethoden zeigt sich, dass alle Methoden Vorteile und Nachteile haben.

Bei der Voll-Pitch Methode sind die Winkelabweichungen auf Grund der annähernd kontinuierlichen Anpassung der Lage der Schaltstellen am geringsten. Dies führt zu einer großen Dynamischen 3D-Stereozone und damit der Möglichkeit, auch über größere Betrachtungsabstände störungsfrei lateral zu adaptieren und zu einem nur

geringen Anstieg des Übersprechens bei Vergrößerung des Betrachtungsabstandes. Ein weiterer Vorteil ist, dass im idealen Betrachtungsabstand, an dem sich die Mehrheit der Probanden befindet, keine Schaltstellen und somit auch keine potentiellen Störstellen vorhanden sind.

Als Nachteil stellt sich die hohe Anforderung an die Genauigkeit eines Headtracking-System dar. Die notwendige Positionsgenauigkeit von wenigen Millimetern stellt in einer Fahrzeugumgebung eine sehr hohe Herausforderung dar, deren Bestätigung noch aussteht. Das größte Problem dieser Methode stellt jedoch die notwendige individuelle Ansteuerung eines jeden Subpixels der Barriere, welche bisher für Anzeigen dieser Größe noch nicht möglich ist.

Die als Alternative entwickelte und simulierte Fixe Voll-Pitch Methode, basierend auf ortsfesten Schaltstellen, kann die erhofften Verbesserungen nicht bestätigen. Im Vergleich mit den anderen Methoden zeigt die Methode in allen simulierten Eigenschaften schlechtere Ergebnisse. Die festen Schaltstellen und die gegenüber der Halb-Pitch Methode größere Sprungweite führen zu erhöhten Winkelabweichungen, die wiederum zu einem Anstieg des Crosstalks und der Helligkeitssprünge an den Schaltstellen führen, die mit hoher Wahrscheinlichkeit als Störungen sichtbar sind. Die Halb-Pitch Methode basiert ebenfalls auf ortsfesten Schaltstellen, jedoch ist die Sprungweite bei der Adaption nur halb so groß wie bei den anderen Methoden. Dies führt zu einer dynamischen 3D-Stereozone, die groß genug ist, um den geforderten Betrachtungsbereich abzudecken und auch über diesen eine störungsfreie laterale Adaption bei langsamen Bewegungen zu ermöglichen. Das Ausmaß des Übersprechens liegt über dem der Voll-Pitch Methode. Um Störungen zu vermeiden, müssten die dargestellten Inhalte angepasst werden. Bei den Helligkeitssprüngen auf der Anzeige stellt sich die Halb-Pitch Methode als die Beste dar, da die Werte oftmals unterhalb derer der Voll-Pitch Methode liegen. Jedoch besitzt die Methode den Nachteil, dass zu jeder Zeit potentielle Störstellen auf der Anzeige vorhanden sind.

Bei allen drei Adaptionmethoden zeigt die Simulation, dass die erwarteten Helligkeitssprünge auf der Anzeige, zumindest in bestimmten Betrachtungsabständen, über der Wahrnehmungsschwelle von 1% liegen und somit mit hoher Wahrscheinlichkeit als Störungen wahrgenommen werden. Dies bestätigt auch die im vorher-

igen Abschnitt vorgestellten experimentellen Untersuchungen, bei denen ebenfalls Helligkeitssprünge an den Schaltstellen sichtbar waren, insbesondere bei schnellen Bewegungen. Eine Umsetzung in der jetzigen Form wäre daher nicht zielführend. Die Entstehung der Helligkeitssprünge an den Schaltstellen, kann mit Abbildung 5.55 erklärt werden.

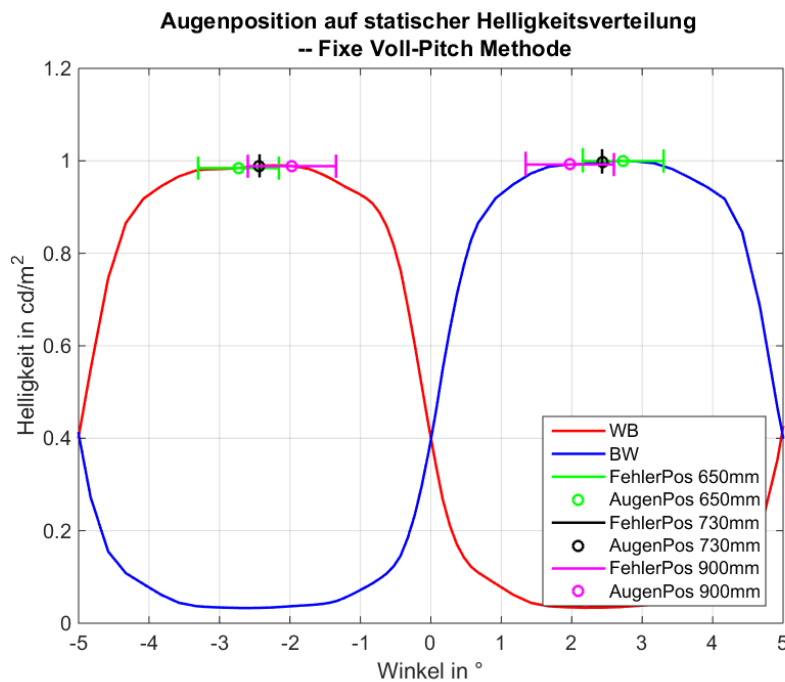


Abbildung 5.55: Darstellung der wahrgenommenen Helligkeiten für das linke und rechte Auge für drei Betrachtungsabstände (schwarz, grün, pink); Die Fehlerbalken geben die max. Winkelabweichung vom idealen Blickwinkel für die fixe Vollpitch-Methode an, welche in wahrgenommenen Helligkeitsvariationen resultiert.

Dargestellt ist die Abstrahlcharakteristik gemessen der Prototypischen Anzeige 2. Für die Betrachtungsabstände 650, 730 und 900 mm wurden jeweils die Augenpositionen auf der Helligkeitsverteilung bei idealer Adaption eingezeichnet (farbige Kreise). Für den idealen Betrachtungsabstand 730 mm schaut ein Betrachter mit seinem linken Auge unter $-2,4^\circ$ und mit seinem rechten Auge unter $2,4^\circ$ auf die Mitte der Anzeige. Bei idealer Adaption werden die Barriereöffnungen außerhalb der Mitte der Anzeige gerade soweit verschoben, dass der Betrachter die gleiche Leuchtdichte, nun abgestrahlt unter größeren/kleineren Winkel, wahrnimmt. Dies ist gleich bedeutend, dass der Betrachter in Abbildung 5.55 für jede Barriereöffnung auf den

gleichen Punkt auf der Helligkeitsverteilung blickt. Die wahrgenommene Helligkeit ist konstant über die gesamte Anzeige. Für kleinere Betrachtungsabstände schaut der Betrachter unter größeren Winkeln auf die Mitte der Anzeige und für größere Abstände unter kleineren Winkeln. Der ideale Augbetrachtungsabstand wurde für den Abstand 730 mm definiert, sodass sich die Augen des Betrachters in diesem mittig auf den Maxima der Helligkeitsverteilung befinden (schwarze Kreise). In anderen Abständen blicken die Augen unter anderen Winkeln auf die Helligkeitsverteilung (grüne und magenta Kreise). Bei idealer Adaption würde erneut eine konstante Helligkeit wahrgenommen werden, welche jedoch abhängig vom Verlauf der Abstrahlcharakteristik eventuell geringer ist.

Die Adaption ist allerdings nicht ideal, sondern erfolgt durch diskrete Sprünge. An bestimmten Stellen auf der Anzeige weicht der Blickwinkel vom Ideal ab. Die maximale Abweichung wurde als quantitatives Gütemaß definiert. Die eingezeichneten Fehlerbalken für die drei Betrachtungsabstände entsprechen der maximalen Winkelabweichung in den jeweiligen Abständen. Ein Betrachter kann auf der Anzeige alle Helligkeiten wahrnehmen, die innerhalb des Winkelbereichs des Fehlerbalkens liegen.

Im dargestellten Fall der Fixen Voll-Pitch Methode tritt im idealen Betrachtungsabstand keine Winkelabweichung auf. Im Betrachtungsabstand 900 mm hat der Fehlerbalken eine Breite von fast einem Grad und ragt auf die beginnende innere Flanke der Helligkeitsverteilung. Die Differenz der Leuchtdichten innerhalb des Fehlerbalkens entsprechen der Größe der wahrgenommenen Helligkeitssprünge auf der Anzeige. Aus dieser Betrachtung ist abzulesen, dass sowohl eine Reduzierung der maximalen Winkelabweichung als auch ein flacheres Helligkeitsplateau zu einer Reduzierung der Helligkeitssprünge auf der Anzeige führen.

Bei der Abstrahlcharakteristik handelt es sich schon um eine wellenoptisch optimierte Leuchtdichteverteilung (siehe nächstes Kapitel), was zum einen die Notwendigkeit und die Richtigkeit der Optimierung dieser hervorhebt, auf der anderen Seite bereits ein hohes Niveau erreicht, sodass eine weitere Optimierung des Verlaufs schwierig wird.

Weitere Untersuchungen auf der Basis der Simulation zeigen, dass die maximale

Winkelabweichung für die Adaptionmethoden mit festen Schaltstellen verbessert werden kann, indem die Anzahl der Schaltstellen erhöht wird. Die Lage der Schaltstellen nähert sich dadurch stärker der quasi-kontinuierlichen Anpassungsfähigkeit der Voll-Pitch Methode. Jedoch ist jede weitere Schaltstelle auch eine potentielle Störstelle. Unter die Schwelle des halben Verschiebungswinkels, der durch die Subpixelgröße der Barriere und dem Abstand des LCDs zur Barriere festgelegt wird, kann jedoch auch eine Erhöhung der Schaltstellen die maximale Winkelabweichung nicht drücken.

Es muss daher versucht werden, die Subpixelgröße der Barriere weiter zu verringern. Dies ist eine Frage des Herstellungsprozess und bedarf weiterer Forschung.

Im Vergleich der Adaptionmethoden würde zum aktuellen Zeitpunkt die Halb-Pitch Methode die geeignetste Lösung darstellen. Jedoch haben alle Adaptionmethoden, die auf einer Anpassung der Pixelpitches beruhen, das Problem, dass die laterale Ausdehnung der dynamischen 3D-Stereozone mit zunehmendem Betrachtungsabstand abnimmt. Eine Verringerung der Sprungweite bei der Adaption führt hierbei zu keiner Verbesserung. Für einen Einsatz im Fahrzeug muss daher der Betrachtungsbereich eingeschränkt werden, da spätestens für Betrachtungsabstände größer als ungefähr 850 mm bei schnellen Kopfbewegungen Störungen sichtbar werden.

Soll der Betrachtungsbereich nicht reduziert werden, muss eine neue Adaptionmethode entwickelt werden, die nicht auf einer Anpassung des Pixelpitches beruht. Denkbar wäre eine Adaption durch die Änderung des Abstandes der Barriere zum LCD. Diese könnte in Form von zwei bis drei transparent schaltbaren Barrieren in unterschiedlichen Abständen hinter dem LCD erfolgen.

5.5 Zusammenfassung Kapitel 5

Die Erfahrungen aus der Prototypischen Anzeige 1 zeigten, dass eine Vergrößerung der Stereozone in longitudinaler Richtung nur durch eine Adaption der Zone auf variable Betrachtungsabstände erfolgen kann. Einer der **Schwerpunkte** der Arbeit war daher die **Entwicklung einer Adaptionmethode, welche die Stereozone dynamisch verschieben kann**, um somit einen größeren Betrachtungsabstandsbereich abdecken zu können.

Aus den zuvor hergeleiteten Grundlagen zur Auslegung einer Barrieremaske folgte der Ansatz, den Betrachtungsabstand durch eine Variation des Pixelpitchs der Barriere anzupassen. Die gesamte Entwicklung unterlag der Prämisse, eine Lösung zu finden, die auch technisch in einer Anzeige umsetzen werden kann. Da eine kontinuierliche Anpassung des Pixelpitchs nicht möglich ist, wurden **diskrete Adaptionmethoden** entwickelt, bei denen der Pixelpitch an dezidierten Stellen auf der Anzeige sprunghafte geändert wird.

Hierzu wurden die mathematischen Grundlagen der Adaption aus den zuvor erarbeiteten Zusammenhängen der Barriereauslegung abgeleitet. Mit den **Voll-, Halb- und Fixer-Vollpitch Adaptionmethoden** wurden drei Konzepte erarbeitete, welche sich in der Art der Sprungstelle, an fester oder variabler Position, und der Sprungweite der Pixeländerung an der Schaltstelle unterscheiden. Hierbei wurde im ersten Schritt die Vollpitch Methode entwickelt und mit den erlangten Kenntnissen die weiteren Methoden fortentwickelt.

Die Methode der Vollpitch-Adaption wurde teilfunktional und die Methode der Halbpitch-Adaption vollfunktional in prototypischen Anzeigen umgesetzt. Die Qualität wurde messtechnisch durch Analyse der wahrgenommenen Helligkeitsverteilung auf der Anzeige und Messung des Crosstalks ermittelt. Die Messverfahren wurden hierzu eigens entwickelt.

Die Messungen zeigten, dass **alle entwickelten Methoden erfolgreich den longitudinalen Betrachtungsbereich erweitern**. An den diskreten Schaltstellen der Barriere, an denen der Pixelpitch geändert wird, traten jedoch Helligkeitssprünge auf, die abhängig von der Methode stärker oder schwächer ausgeprägt waren. Die Halb-Pitch Methode zeigte hierbei die geringsten Helligkeitssprünge, hat dafür je-

doch Nachteile in der lateralen Bewegungsfreiheit und im maximal abzudeckenden longitudinalen Betrachtungsabstandsbereich.

Um die geeignetste Methode für die angestrebte Anzeige zu finden, wurde eine **umfangreiche Simulation programmiert**, die es ermöglicht die durch die experimentellen Untersuchungen gefundenen, wesentlichen Parameter der Adaptionmethode, wie die Größe der dynamischen Stereozone, beobachtete Helligkeitsschwankungen bei lateraler Adaption und wahrgenommene Helligkeits- und Crosstalksprünge auf der Anzeige zu simulieren. Durch die parametrisierte Simulation ist es so möglich, das Verhalten der drei Adaptionmethoden für beliebige Anzeigen unterschiedlicher Größe und mit unterschiedlichen Abstrahlcharakteristika darzustellen. Es wird somit möglich, die aus den prototypischen Anzeigen, welche teilweise unterschiedlich groß waren und unterschiedliche Auflösungen hatten, gewonnenen Erkenntnisse auf einer gemeinsamen Basis zu vergleichen. Dank der Simulation konnte auch die dritte Adaptionmethode „Fixer-Vollpitch“ in kurzer Zeit und zu geringen Kosten untersucht werden.

Für die **angestrebte Anzeige in der Größe 12,3“** wurden die drei entwickelten Methoden mit gleichem Parametersatz simulativ verglichen. **Es zeigte sich, dass die Methoden unterschiedliche Vorteile, aber auch Nachteile besitzen.** Die Vollpitch-Methode weist durch eine angenommene quasi-kontinuierliche Anpassung der Lage der Schaltstellen auf der Anzeige die geringste Winkelabweichung von einer Parallaxebarriere mit idealen Pixelpitch in jedem Abstand auf. An den Schaltstellen treten jedoch durch die größere Sprungweite deutlich höhere Helligkeitsvariationen als bei der Halbpitch-Methode auf, welche nur die halbe Sprungweite aufweist. Dagegen zeigt die Halbpitch-Methode ein insgesamt höheres Übersprechen, da die Winkelabweichung größer als bei der Vollpitch-Methode ist. Die erhofften Verbesserungen bei der dritten Methode des fixen Vollpitch konnten nicht bestätigt werden, da die Nachteile einer größeren Winkelabweichung und hohen Helligkeitssprüngen überwogen.

Keine der Methoden konnte die gestellten Bedingungen vollständig erfüllen, insbesondere zeigte die Simulation, dass bei allen Methoden für Betrachtungsabstände größer als 850 mm bei schnellen Kopfbewegungen **Helligkeitsvariationen an**

den Schaltstellen sichtbar werden. Dies bedeutet, dass der Betrachtungsbereich begrenzt werden muss und nicht der ursprünglich geforderte gesamte Bereich abgedeckt werden kann. Gegenüber einer Anzeige ohne Adaptionmethode, welche bei einer Diagonale von $12,3^\circ$ einen longitudinalen Bereich von ungefähr 150 mm besitzt, kann der **longitudinale Betrachtungsbereich** jedoch **auf knapp 400 mm erweitert werden**.

In der **Bewertung der drei Methoden zeigt die Halbpitch-Methode das beste Ergebnis**, da bei dieser Methode die Helligkeitssprünge an den Schaltstellen am geringsten waren. Die Methode zeigt zwar ein höheres Übersprechen, als die Vollpitch-Methode, jedoch kann dieses leichter kompensiert werden, als die Helligkeitssprünge, welche als schwerwiegender eingestuft werden und zudem erst bei höheren Kopfgeschwindigkeiten sichtbar werden. **Mit der Entwicklung der Halbpitch-Methode und dem Nachweis ihrer Funktionalität wurde ein wichtiges Ziel der Arbeit erfolgreich erreicht**. Die Qualität der Adaptionmethode ist für normale Bewegungen und für große Bereiche des geforderten Betrachtungsabstandes bereits gut genug, um die gestellten Qualitätsanforderungen zu erfüllen.

Variationen der Eingangsparameter der Simulation zeigten, dass das größte Potenzial zur **Verbesserung der Methode** in der **Optimierung der Abstrahlcharakteristik** liegt, welche durch eine verbesserte Ausbildung eines Helligkeitsplateaus und Erhöhung der Barriereauflösung, die eine Reduzierung der Sprungweite zur Folge hat, erreicht wird. Diese Ziele sollen in der zukünftigen Entwicklung weiterverfolgt werden.

In allen Problemstellungen dieser Arbeit, wie der Auslegung von statischen und dynamischen Barrieren für eine laterale und longitudinale Adaption, zeigte sich, dass stets eine starke Abhängigkeit zum Verlauf der Abstrahlcharakteristik einer Barriereöffnung besteht. Je flacher der Helligkeitsverlauf der Abstrahlcharakteristik über einen großen Winkelbereich ist, desto geringer sind wahrgenommene Störungen und damit auch die Anforderungen an ein Headtrackingsystem.

6. Wellenoptische Optimierung von Parallaxebarrieren

In diesem Kapitel wird eine numerische Simulationemethode vorgestellt, welche es ermöglicht, die Abstrahlcharakteristik einer Parallaxebarriere wellenoptisch zu simulieren. Ausgehend von der Simulation wird gezeigt, wie durch die Implementierung von amplitudenmodulierenden und phasenschiebenden Elementen die Abstrahlcharakteristik der Anzeige optimiert werden kann, was zu einer Verbesserung des Stereokontrasts, der Senkung des Crosstalks und zu einer Vergrößerung der Stereozone führt.

Im Kapitel 4 wurde gezeigt, dass die geometrisch-optisch simulierte Abstrahlcharakteristik einer Parallaxebarriere deutlich von der gemessenen abweicht. Der Hauptgrund hierfür ist die Beugung an den Aperturöffnungen des LCDs (Farbfilter) und der Barriere [54]. Dies führt zu einer kleineren Stereozone und sichtbareren Helligkeitsschwankungen, welche geometrisch-optisch nicht vorhergesagt wurden.

Ein Ziel dieser Arbeit war daher ein mathematisches Modell zu entwickeln, welches die Abstrahlcharakteristik wellenoptisch korrekt voraussagt und im nächsten Abschnitt vorgestellt wird.

6.1 Wellenoptische Simulation einer Anzeige mit Parallaxebarriere

6.1.1 Der historische Weg zu Beugungsintegral

Als Beugung wird jede Abweichung von der gradlinigen Ausbreitung von Lichtstrahlen bezeichnet, die nicht auf Reflexion oder Brechung zurückzuführen ist [78].

Ersten experimentellen Untersuchungen durch Francesco Grimaldi (1665) folgte 1678 durch Christian Huygens der erste Schritt zur Formulierung einer Beugungstheorie. Huygens formulierte das nach ihm benannte Prinzip, wonach jeder Punkt einer Wellenfront Ausgangspunkt sogenannter kugelförmiger Sekundärwellen ist. Die Wellenfront zu einem späteren Zeitpunkt ergibt sich als Einhüllende durch Superposition

der Elementarwellen.

Weitere Experimente von Thomas Young(1804), welcher das Prinzip der Interferenz einführte und von Augustin Jean Fresnel (1818) bestätigten das Huygensche Prinzip von Elementarwellen.

Es dauerte jedoch noch bis 1882, als Gustav Kirchhoff auf der Grundlage der von James Maxwell (1860) eingeführten Beschreibung des Lichts als elektromagnetische Welle eine erste mathematisch fundierte Beugungstheorie vorstellte. Die *Fresnel-Kirchhoffsche Beugungstheorie* bestätigte die von Fresnel angenommenen Phasen und Amplituden der Sekundärwellen. Hierzu musste er jedoch Randbedingungen einführen, die sich nachträglich als inkonsistent erwiesen. Für viele optische Probleme ist die Fresnel-Kirchhoffsche Beugungstheorie jedoch bis heute eine gute Näherung.

Die erste widerspruchsfreie Beugungstheorie wurde 1896 von Arnold Sommerfeld eingeführt und wird *Rayleigh-Sommerfeld Beugungstheorie* genannt.

Auch diese Theorie ist nicht universell gültig. Es handelt sich um eine skalare Beugungstheorie, die den vektoriellen Charakter des Lichtes vernachlässigt. Es konnte jedoch gezeigt werden, dass die Theorie unter den folgenden zwei Bedingungen sehr genaue Ergebnisse voraussagt: die beugende Struktur muss größer als die Wellenlänge des Lichtes sein und die Untersuchungsebene darf nicht zu nah (in der Größenordnung der Wellenlänge) an der beugenden Struktur liegen. Für das zu simulierende Modell einer 3D-Anzeige treffen die Einschränkungen zu.

Unter Anwendung des Green'schen Theorem und dem Wissen, dass eine Lösung als elektro-magnetische Welle die Helmholtzgleichung erfüllen muss, ergibt sich nach Sommerfeld das folgende Beugungsintegral für einen Einzelspalt Σ , der von einer kohärenten monochromatischen Welle mit Wellenlänge λ beleuchtet wird.

$$U(x, y, z) = \frac{1}{i\lambda} \iint_{\Sigma} U(x, y, z = 0) \frac{\exp(i\vec{k}\vec{r})}{r} \cos(\vec{n}, \vec{r}) dS \quad (6.1)$$

Angewendet auf den konkreten Fall einer autostereoskopischen Anzeige würde die Gleichung (6.1) das Beugungsintegral für einen Einzelspalt, wie den Farbfilter beschreiben (siehe Abb. 6.1). Hierbei bezeichnet die komplexe Funktion $U(x, y, z)$ die zeitunabhängige Störung an dem Punkt $P = (x, y, z)$, welche dem Realteil eines

skalaren Feldes einer elektro-magnetischen Welle entspricht. $U(x, y, 0)$ bezeichnet die Störung direkt am, bzw. direkt vor dem Einzelspalt. $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ bezeichnet den Wellenvektor und \vec{r} den Vektor von einem Punkt im Spalt zum Punkt P . Der Faktor $\cos(\vec{n}, \vec{r}) = \cos(\theta)$ wird Neigungsfaktor genannt. Der Winkel wird zwischen der Normalen des Spaltes und dem Vektor \vec{r} bestimmt. Die Herkunft des Neigungsfaktors ist nicht intuitiv verständlich, seine Notwendigkeit ist jedoch leicht zu erfassen, da er verhindert, dass Sekundärwellen eine rücklaufende Welle bilden, welche der bekannten Vorwärtspropagation von Licht widersprechen würde. Das Oberflächenintegral wird über die Spaltöffnung Σ bestimmt, dS stellt ein infinitesimal kleines Flächenelement des Spaltes dar.

6.1.2 Geometrie des Modells

Für die wellenoptische Simulation der Abstrahlcharakteristik einer 3D-Anzeige wird ein vereinfachtes Modell einer LCD-Anzeige mit Parallaxebarriere verwendet.

Es besteht wie in Abbildung 6.1, dargestellt aus einer Hintergrundbeleuchtung, einer Barriere mit einer Aperturöffnung und einem LCD, welches auf die Aperturöffnungen der Farbfilter reduziert wird.

In der dargestellten Anordnung befindet sich die Barriere unterhalb des LCDs, was für die im zweiten Teil des Kapitels vorgestellte Optimierung notwendig ist. Die Simulation funktioniert jedoch sowohl für rück- als auch für frontseitige Barrieren.

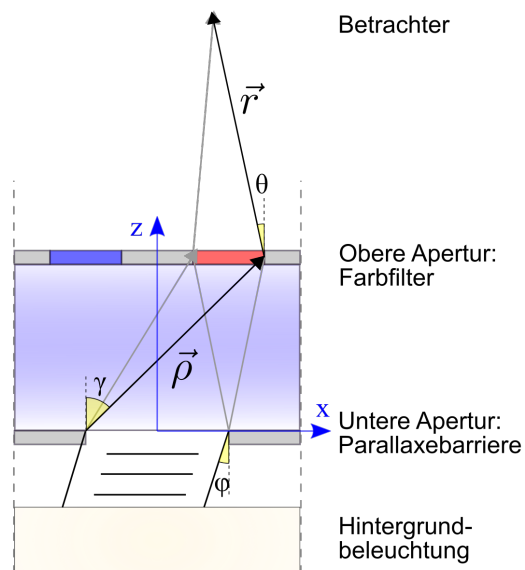


Abbildung 6.1: Modell einer Anzeige mit Parallaxebarriere

In diesem vereinfachten Modell wird die Flüssigkristallanzeige rein auf ihre Aperturen reduziert. Die optischen Eigenschaften des Flüssigkristalls werden vernachlässigt. Die folgenden Simulationen zeigen jedoch, dass der Einfluss für Anzeigen mit einer rückseitigen Barrieremaske gering sind.

6.1.3 Mathematische Beschreibung der Beugung einer Parallaxebarriere

Angewendet auf die Geometrie einer Anzeige mit Parallaxebarriere ergibt sich der Fall von zwei Aperturöffnungen, welche parallel in einem Abstand zueinander liegen. Das Beugungsintegral aus Gleichung (6.1) wird erweitert, sodass sich für den Fall einer monochromatischen, kohärenten Beleuchtung ein doppeltes Beugungsintegral ergibt.

$$U(x, y, z) = \frac{1}{i\lambda} \iint_{\Sigma_2} \frac{1}{i\lambda} \iint_{\Sigma_1} U(x, y, 0) \frac{\exp(i\vec{k}\vec{\rho})}{\rho} \frac{\exp(i\vec{k}\vec{r})}{r} \cos(\vec{n}_1, \vec{\rho}) \cos(\vec{n}_2, \vec{r}) dS_1 dS_2 \quad (6.2)$$

Hierbei bezeichnet der Index 1 den Spalt der unteren Apertur und der Index zwei die obere Apertur. Bei den oberen Aperturen handelt es sich in der folgenden Simulation um die Farbfilter der Anzeige. Dem Prinzip einer autostereoskopischen Anzeige nach sind den einzelnen Subpixeln (Farbfiltern) Ansichten für das linke und rechte Auge zugeordnet. In einem Durchlauf der Simulation wird immer nur eine obere Aperturöffnung angenommen.

Die physikalisch messbare Größe am Ort des Betrachters ist die Strahlungsintensität, welche sich aus der Störung wie folgt bestimmt:

$$I(x, y, z) = |U(x, y, z)|^2 \quad (6.3)$$

In der bisherigen Betrachtung wurde von einer monochromatischen Beleuchtung ausgegangen, die Hintergrundbeleuchtung einer Anzeige besteht jedoch in der Regel aus polychromatischen weißen LEDs. Dies kann als eine Superposition von monochromatischer Lichtwellen im sichtbaren Bereich (380-780nm) interpretiert werden. Wahrgenommen wird von einem Betrachter die Leuchtdichte, welche angibt, wie hell das von einer Spaltöffnung mit perspektivisch wahrgenommener Öffnungsgröße $A = A_0 \cos(\epsilon)$ in einen bestimmten Winkelbereich abgestrahlte Licht empfunden wird. Die Umrechnung der physikalischen Strahlungsgröße zu einer photometrischen Lichtgröße erfolgt durch das *spektrale photometrische Strahlungsäquivalent* $K_m V(\lambda)$.

Die sogenannte V-Lambda-Kurve $V(\lambda)$ beschreibt hierbei die relative spektrale Helligkeitsempfindlichkeit des menschlichen Auges.

$$I_{gesamt}(x, y, z) = K_m \int_{380}^{780} \frac{V(\lambda)}{A} \frac{dI(x, y, z, \lambda)}{d\lambda} d\lambda \quad (6.4)$$

Die Herausforderung der Simulation des Beugungsproblems ist die Bestimmung des Integrals aus Gleichung (6.2).

Ein mögliches Vorgehen wurde von [54] vorgeschlagen und basiert auf der Fresnel-Näherung. In dieser Arbeit wird ein eigenes Modell präsentiert, dass gegenüber dem Modell von [54] bezüglich Rechenzeit effizienter ist und mit weniger Näherungen auskommt, wodurch es universeller einsetzbar ist. Im Folgenden wird das schrittweise Vorgehen beschrieben!

Simulation der Hintergrundbeleuchtung

Eine klassische LED-Hintergrundbeleuchtung besteht aus weißen Leuchtdioden, die am Rand der Anzeige angebracht sind. Lichtleiter verteilen das Licht gleichmäßig über die gesamte Anzeigefläche, zusätzlich sorgt eine optische Diffusionsfolie für eine zusätzliche Homogenisierung der Beleuchtung. Eine solche Hintergrundbeleuchtung kann als ausgedehnter, räumlich inkohärenter Volumenstrahler mit Lambertscher Abstrahlcharakteristik modelliert werden.

Eine inkohärente Lichtquelle kann als Überlagerung von ebenen Wellen mit unterschiedlichen Ausbreitungsrichtungen aufgefasst werden. Es ist somit möglich, die Lichtquelle in ebene Wellen zu zerlegen und das Beugungsintegral (6.2) jeweils für eine ebene Welle unter einem Einfallswinkel zu lösen.

Die Gesamtintensität ergibt sich aus der Superposition aller Intensitäten unterschiedlicher Einfallswinkel. Hierbei gilt es zu beachten, dass auf Grund der inkohärenten Beleuchtung die Intensitäten $I(P, \lambda, \phi)$ summiert werden müssen und nicht die Störungen $U(x, y, z, \lambda, \phi)$, was bei einer kohärenten Beleuchtung der Fall wäre [79, S. 65].

Vereinfachend werden nur ebene Wellen mit unterschiedlichen Einfallswinkeln in einer Dimension angenommen, da sich für eine Streifenmaske das Beugungsproblem generell auf ein zweidimensionales Problem reduzieren lässt und die vertikale Begrenzung der Farbfilteröffnungen kaum die horizontale Abstrahlung beeinflusst. Der

Einfallswinkel der ebenen Wellen lässt sich somit durch den Winkel ϕ beschreiben. Die Intensität einer unter einem Winkel einfallenden Welle ergibt sich auf Grund der Lambertschen Charakteristik der Leuchtquelle zu Gleichung (6.5).

$$I(\lambda, \phi) = I_0(\lambda) \cos(\phi) \quad (6.5)$$

Hierbei ist $I_0(\lambda)$ die Intensität einer ebenen Welle mit Wellenlänge λ , die senkrecht auf den Spalt trifft. Die spektrale Intensitätsverteilung einer Hintergrundbeleuchtung ist abhängig von dem eingesetzten Leuchtmittel. In Abbildung 6.2 ist die relative spektrale Intensitätsverteilung einer Beleuchtung mit LEDs dargestellt.

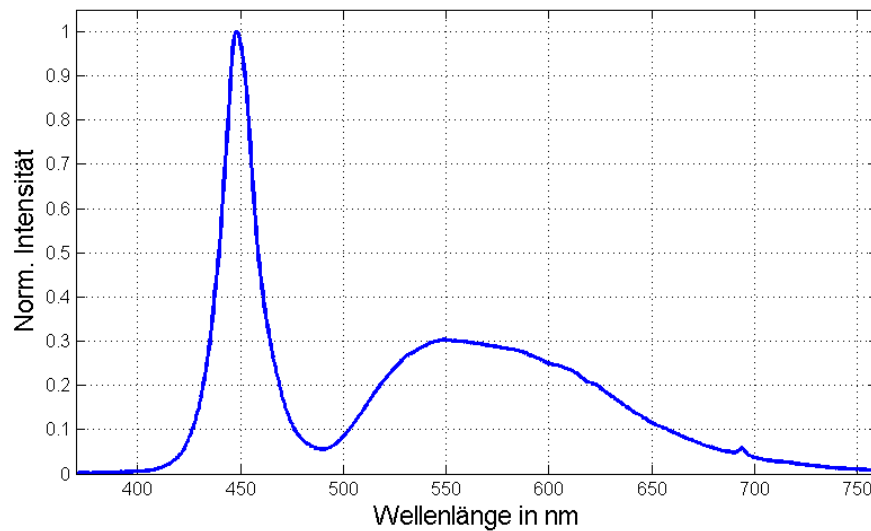


Abbildung 6.2: Gemessenes Spektrum einer Hintergrundbeleuchtung mit weißen LEDs

Das statische Feld (Störung) einer ebenen Welle mit dem Einfallswinkel ϕ direkt an/vor der unteren Apertur, die bei $z=0$ liegt, ergibt sich zu Formel (6.6).

$$U_0(x, y, 0, \phi, \lambda) = \sqrt{I(\lambda, \phi)} \exp\left(\frac{-2\pi i}{\lambda} x \sin(\phi)\right) \quad (6.6)$$

Hierbei beschreibt (x, y) die Position innerhalb des Spaltes. Für die Störung $U(P_0)$ aus Gleichung (6.2) gilt somit:

$$U(P_0) = U_0(x, y, \phi, \lambda) \quad (6.7)$$

Propagation zwischen den Aperturen

Zur Bestimmung der Feldverteilung in der oberen Apertur muss das innere Beugungsintegral aus Gleichung (6.2) gelöst werden.

In der Literatur finden sich hierzu eine Reihe von Lösungsmethoden [80–83], welche oftmals Näherungen erfordern oder nur in bestimmten Geometrien gültig sind.

Eine Methode, die gänzlich ohne Näherungen auskommt, ist die „*Angular Spectrum Wave Propagation Method*“ [ASWP] [84]. Es handelt sich hierbei um eine Methode der Fourier Optik. Sie basiert auf der Tatsache, dass eine komplexe Feldverteilung einer monochromatischen Störung in einer Ebene im Raum in ihre Fourier Komponenten zerlegt werden kann. Diese können als ebene Wellen angesehen werden, die sich in unterschiedliche Raumrichtungen ausbreiten. Die Feldverteilung in einer beliebigen Ebene parallel zur ersten ergibt sich durch die Summation aller propagierten ebenen Wellen. Es ergeben sich Phasenunterschiede zwischen den ebenen Wellen, da sich die effektive Propagationsstrecke auf Grund der unterschiedlichen Ausbreitungsrichtungen unterscheiden. Die folgenden Ausführungen orientieren sich an [79].

Zunächst wird die Feldverteilung hinter der ersten Apertur bestimmt. Es gilt:

$$U_t(x, y, 0) = \tau_1(x, y)U_i(x, y, z) \quad (6.8)$$

$U_i(x, y, z)$ bezeichnet das Feld vor dem Spalt und $U_t(x, y, 0)$. $\tau_1(x, y)$ bezeichnet die Amplitudentransmissionsfunktion der unteren Apertur, sie ist 1 für die Spaltöffnung und 0 an der undurchlässigen Aperturblende.

Die Fouriertransformierte des Feldes $U_t(x, y, 0)$ ergibt sich zu:

$$A_t(f_X, f_Y, 0) = \iint_{-\infty}^{\infty} U(x, y, 0)_t \exp[-i2\pi(f_X x + f_Y y)] dx dy \quad (6.9)$$

Nachdem (x, y) Ortsgrößen sind, können die Frequenzkomponenten (f_X, f_Y) als Wellenzahlen in x- und y-Richtung interpretiert werden. Der Wellenvektor \vec{k} besitzt eine Richtung, die über ihre Richtungskosinuse α, β, γ angegeben werden kann und den Betrag $|\vec{k}| = \frac{2\pi}{\lambda}$. Der Wellenvektor ergibt sich somit zu

$$\vec{k} = \frac{2\pi}{\lambda}(\alpha\hat{x} + \beta\hat{y} + \gamma\hat{z}) \quad (6.10)$$

,wobei \hat{x} , \hat{y} , \hat{z} Einheitsvektoren sind.

$$\begin{aligned}\alpha &= \lambda f_X \\ \beta &= \lambda f_Y \\ \gamma &= \sqrt{1 - (\lambda f_X)^2 - (\lambda f_Y)^2}\end{aligned}\quad (6.11)$$

Gleichung (6.9) kann somit umgeschrieben werden zu:

$$A_t \left(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}, 0 \right) = \iint_{-\infty}^{\infty} U(x, y, 0)_t \exp[-i2\pi(\frac{\alpha}{\lambda}x + \frac{\beta}{\lambda}y)] dx dy \quad (6.12)$$

Das resultierende Spektrum wird *Winkelspektrum* der Störung $U(x, y, 0)_t$ genannt. Es ist zu erkennen, dass die Feldverteilung in der unteren Apertur in kohärente ebene Wellen zerlegt werden kann, die in unterschiedliche Richtungen propagieren.

Die Feldverteilung in einer Ebene parallel zur Ausgangsebene kann durch Propagation der einzelnen ebenen Wellen und anschließender Superposition dieser bestimmt werden.

Für die Ebene der oberen Apertur bei $z = z_0$ ergibt sich das Winkelspektrum zu:

$$A \left(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}, z_0 \right) = A \left(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}, 0 \right) \exp \left(i \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{1 - \alpha^2 - \beta^2} z_0 \right) \quad (6.13)$$

Der zweite Faktor beschreibt hierbei die Propagation.

Es müssen hierbei die folgenden zwei Fälle unterschieden werden:

$$\begin{aligned}\alpha^2 + \beta^2 &< 1 \\ \alpha^2 + \beta^2 &> 1\end{aligned}\quad (6.14)$$

Beim ersten Fall bleibt der Propagationsfaktor komplex und führt zu einer Phasenänderung der Winkelspektrumkomponente.

Für den zweiten Fall nimmt der Exponent einen realen Wert an. Diese Anteile werden evaneszente Welle genannt und propagieren nicht. Bei der späteren Berechnung werden diese Anteile vernachlässigt.

Das finale Feld in der oberen Aperturöffnung ergibt sich somit aus der Superposition

der propagierten ebenen Wellen in Form der Fouriersynthese. Die Rücktransformation der Fouriertransformierten ergibt sich zu Formel (6.15).

$$U(x, y, z_0) = \iint_{-\infty}^{\infty} A\left(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}, 0\right) \exp\left(i\frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{1-\alpha^2-\beta^2}z_0\right) * \exp\left[-i2\pi\left(\frac{\alpha}{\lambda}x + \frac{\beta}{\lambda}y\right)\right] d\frac{\alpha}{\lambda}d\frac{\beta}{\lambda} \quad (6.15)$$

Es sei angemerkt, dass bisher keine Näherungen eingeführt wurden.

Propagation zum Betrachter

Analog zur Gleichung (6.8) ist es möglich die Feldverteilung an/vor der oberen Apertur zu bestimmen. Die Verteilung direkt hinter der oberen Apertur ergibt sich zu Gl. (6.16).

$$U_t(x, y, z_0) = \tau_2(x, y)U(x, y, z_0) \quad (6.16)$$

Hierbei ist τ_2 die Amplitudentransmissionsfunktion der oberen Apertur.

Der verbleibende Schritt ist die Propagation vom oberen Spalt zum Betrachter, bzw. zu einem Punkt im Raum. Es gilt daher das folgende Beugungsintegral zu lösen:

$$U(x, y, z) = \frac{z}{i\lambda} \iint_{\Sigma} U_t(x, y, z_0) \frac{\exp(ikr)}{r^2} dS \quad (6.17)$$

Hierbei wurde der Kosinusterm durch seine geometrische Beziehung $\cos(\vec{n}, \vec{r}) = \frac{z}{r}$ ersetzt.

Würde der obere Spalt durch eine ebene Welle beleuchtet werden, kann leicht gezeigt werden, dass für typische Betrachtungsentfernungen von $z > 600$ mm und typischen Spaltbreiten von $\xi_{max} < 70$ μm die Bedingung der Fraunhofer-Näherung in Gl. (6.18) erfüllt ist.

$$z \gg \frac{k\xi_{max}^2}{2} \quad (6.18)$$

Im nächsten Abschnitt wird gezeigt, dass die Näherung auch für den hier untersuchten Fall gültig ist. Das Feld am Ort des Betrachters kann somit leicht als Fouriertransformierte der Feldverteilung nach der oberen Apertur bestimmt werden.

$$U(x, y, z_{\text{Betrachter}}) \propto \frac{1}{i\lambda z} \iint_{-\infty}^{\infty} U_t(x, y, z_0) \exp\left[i\frac{2\pi}{\lambda z}(x\xi + y\eta)\right] d\xi d\eta \quad (6.19)$$

Hierbei sind ξ und η die Koordinaten in x- und y- Richtung in der Ebene des Spaltes. Konstante Vorfaktoren wurden vernachlässigt, da letztendlich nur der relative Verlauf der Helligkeitskurve von Interesse ist.

6.1.4 Eindimensionale Numerische Simulation der Abstrahlcharakteristik

Die Simulation des im vorherigen Abschnitt vorgestellten Simulationsmodells erfolgt numerisch in Matlab¹. Hierzu wird die zu simulierende Feldverteilung diskretisiert. Die Berechnungen erfolgen durch „Diskrete Fouriertransformation“ (DFT).

Auf Grund der Tatsache, dass für die stereoskopische Wahrnehmung nur die horizontale Abstrahlcharakteristik relevant ist und zudem bei Streifenbarrieren die Beugungseffekte in y-Richtung kaum einen Einfluss haben, wird die numerische Simulation auf eine Dimension (x-Richtung) beschränkt.

Bei der Diskretisierung des Modells müssen zwei Dinge beachtet werden:

- Die Auflösung Δx und Δy im Ortsraum müssen das Nyquist-Shannon-Abtasttheorem erfüllen, nach dem die Abtastfrequenz im Frequenzraum doppelt so groß wie die größte auftretende Frequenz sein muss, um sogenannte *Aliasing-Effekte* zu vermeiden. Die Ortsauflösung wird daher zu

$$\Delta x = \Delta y = \frac{\lambda_{min}}{2} = \frac{370\text{nm}}{2} = 185\text{nm} \quad (6.20)$$

gewählt. Dies ist zudem gleichbedeutend damit, dass bei der ASWP alle in Vorwärtsrichtung propagierende ebene Wellen über den gesamten Winkelbereich berücksichtigt werden.

- Des Weiteren ist zu beachten, dass es bei zeitbegrenzten bzw. ortsbegrenzten Funktionen, wie sie die zu untersuchende Spaltebene mit endlicher Größe darstellt, beim Übergang von der kontinuierlichen zur diskreten Fouriertransformation zu Problemen kommen kann. Da die Funktion von der DFT periodisch fortgesetzt wird, kann es passieren, dass kohärente Anteile aus vermeintlichen Nachbarspalten die Simulation verfälschen. Dieser Effekt kann durch das

¹ ©MathWorks Inc.

sogenannte *Zeropadding* abgemildert werden. Hierbei wird die Amplitudentransmissionsfunktion im Ortsraum mit Nullen fortgesetzt.

Dies garantiert zudem, dass die resultierende Funktion auch im Ortsraum periodisch fortsetzbar ist, wodurch der sogenannte Leck-Effekt vermieden wird, der zu physikalisch nicht vorhandenen Ortsfrequenzen führt.

Das *Zeropadding* wird zudem eingesetzt, um die Anzahl der Simulationspunkte auf einen Wert 2^p zu erweitern, da dadurch effizientere Algorithmen der *Fast Fourier Transformation [FFT]* angewendet werden können.

Im folgenden wird exemplarisch die numerische Simulation anhand der Prototypischen Anzeige 1 mit rückseitiger Barriere aus Kapitel 4 demonstriert. Die wesentlichen Simulationsdaten sind in Tabelle 6.1 dargestellt. Alle Angaben beziehen sich auf die x-Richtung.

Die geometrische Anordnung ist in Abb. 6.1 dargestellt. Die Barriereöffnung und die Farbfilteröffnungen definieren die Größe der Öffnungen der unteren und oberen Apertur. Die Verschiebung s_x der oberen Apertur beschreibt den Abstand des Farbfilters zur Mitte der Barriereöffnung, wie sie für eine Barriereöffnung mittig auf der Anzeige gültig ist.

Der Wellenlängenbereich der Simulation wird von 370-780 nm gewählt, wobei die Schrittweite mit 25 nm für ausreichend befunden wurde. Eine kleinere Schrittweite führte zu keinen weiteren Verbesserungen der Simulation, verlängerte jedoch die Simulationsdauer.

Als Beleuchtungswinkel wird der Winkel bezeichnet, unter dem die untere Apertur durch die Hintergrundbeleuchtung beleuchtet wird. Diese wird unter $[\pm 90^\circ]$ beleuchtet, jedoch führt die Anordnung der Aperturen zueinander dazu, dass der Lichteinfall unter großen Winkeln nur einen vernachlässigbar geringen Beitrag zur Helligkeitsverteilung im Fernfeld liefert. Die Schrittweite der Simulation wurde zu $0,25^\circ$ gewählt, da auch hierbei eine Verringerung zu keiner signifikanten Verbesserung der Simulation führt.

Der Fernfeldwinkelbereich gibt an, in welchem Bereich und mit welcher Genauigkeit die resultierende Helligkeitsverteilung simuliert werden soll. Analog hätte eine Ebene mit einer gewissen Breite und Entfernung zur Anzeige definiert werden können.

Anzeige:	10,26" mit rückseitiger Barriere	
<hr/>		
Untere Apertur:		
	Barriereöffnung w_b :	93,8 μm
Obere Apertur:		
	Farbfilteröffnung w_{cf} :	46,9 μm
	Verschiebung s_x :	46,9 μm
Abstand Barriere-LCD:		1,68 mm
Brechungsindex Material zw. LCD-Barriere:		1,52
<hr/>		
Simulationsparameter:		
	Ortsauflösung Δx :	185 nm
	Anzahl der Ortspunkte N:	4096
	Wellenlängenbereich:	[370nm,395nm,...,780nm]
	Beleuchtungswinkelbereich:	[-20°, -19,75°, ... 20°]
	Fernfeldwinkelbereich:	[-20°, 19,95°, ... 20°]

Tabelle 6.1: Geometrie und Simulationsparameter

Da sich im Fernfeld die Winkelverteilung der Intensität jedoch nicht mehr mit dem Abstand ändert und die Abstrahlcharakteristik ebenfalls über den Winkel gemessen wird, wird diese Darstellung bevorzugt.

Simulation für einen Beleuchtungswinkel und eine Wellenlänge

Wie zuvor beschrieben werden die Intensitäten aller Beleuchtungswinkel und Wellenlängen inkohärent aufsummiert. Im Folgenden wird daher zunächst nur der exemplarische Fall für **einen** Einfallswinkel von $\phi = 1^\circ$ und **einer** Wellenlänge von $\lambda = 370 \text{ nm}$ demonstriert. Im Anschluss wird dieses Vorgehen auf alle Wellenlängen und Einfallswinkel angewendet und die resultierenden Intensitäten aufsummiert.

Die Feldverteilung welche den unteren Spalt beleuchtet ergibt sich zu:

$$U(x, z = 0, \phi, \lambda) = \sqrt{I(\lambda, \phi)} \exp\left(\frac{-2\pi i}{\lambda} x \sin(\phi)\right) \quad (6.21)$$

$$x = n\Delta x \quad \text{mit} \quad n = \left[-\frac{N}{2}, \frac{N}{2} - 1\right]$$

Für die untere Amplitudentransmissionsfunktion $\tau_1(x)$ gilt:

$$\tau_1(x) = \begin{cases} 1, & \text{falls } -\frac{w_b}{2} \leq x \leq \frac{w_b}{2} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (6.22)$$

Die Intensität und die Phase direkt an/hinter der unteren Apertur ergibt sich zu:

$$U_t(x, z = 0, \phi, \lambda) = \tau_1(x) U(x, z = 0, \phi, \lambda) \quad (6.23)$$

und ist in Abb. 6.3 dargestellt. Es resultiert die einfache Abbildung der unteren Apertur bei homogener Beleuchtung. Da letztendlich nur der relative Intensitätsverlauf von Bedeutung ist, wurde die Eingangsintensität zufällig gewählt. Die Achsenbeschriftung wurde demnach angepasst.

Um das Feld vor der oberen Apertur zu bestimmen, wird die ASWP-Methode angewendet. Hierzu wird die Feldverteilung fouriertransformiert und mit dem Propagationsterm der ASWP multipliziert.

Der Propagationsterm (H) ergibt sich zu

$$H(z_0) = \exp(ik_z z_0) \quad (6.24)$$

mit $k_z = \sqrt{(k^2 - k_x^2)}$

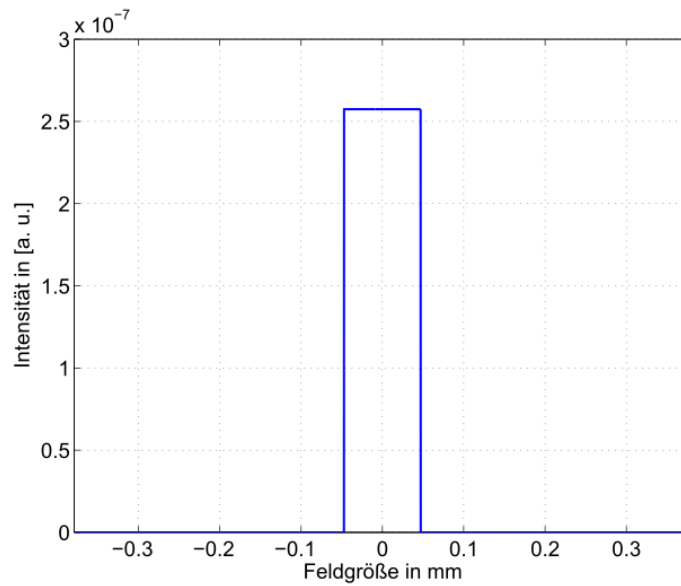


Abbildung 6.3: Intensitätsverteilung an/nach der unteren Apertur

Hierbei ist z_0 der senkrechte Abstand zwischen der Ebene der unteren und oberen Apertur und k_z der Wellenvektor in Richtung z . Für k und k_x gilt:

$$\begin{aligned} k &= \frac{2\pi n}{\lambda} \\ k_x &= \frac{2\pi}{N\Delta x} \left[-\frac{N}{2}, \dots, \frac{N}{2} \right] \end{aligned} \quad (6.25)$$

Hierbei ist n der Brechungsindex des Materials zwischen den Ebenen und N und Δx die Simulationsparameter der Ortsauflösung und der Anzahl der Ortspunkte. Die Fouriertransformation der diskretisierten Feldverteilung $U_t(x, z = 0, \phi, \lambda)$ erfolgt durch FFT.

$$A_t(k_x, z = 0, \phi, \lambda) = \text{SHIFTFFT}(\text{FFT}(U_t(x, z = 0, \phi, \lambda))) \quad (6.26)$$

wobei die numerische FFT ² definiert ist als

$$\text{FFT: } A(k) = \sum_{j=1}^N x(j) \omega_N^{(j-1)(k-1)} \quad (6.27)$$

und SHIFTFEFT eine Funktion beschreibt, welche die das resultierende Winkelspektrum um Null zentriert.

In Abb. 6.4 ist die Amplitudenverteilung des Winkelspektrums nach der unteren

²Funktion `fft` – Matlab 2014a

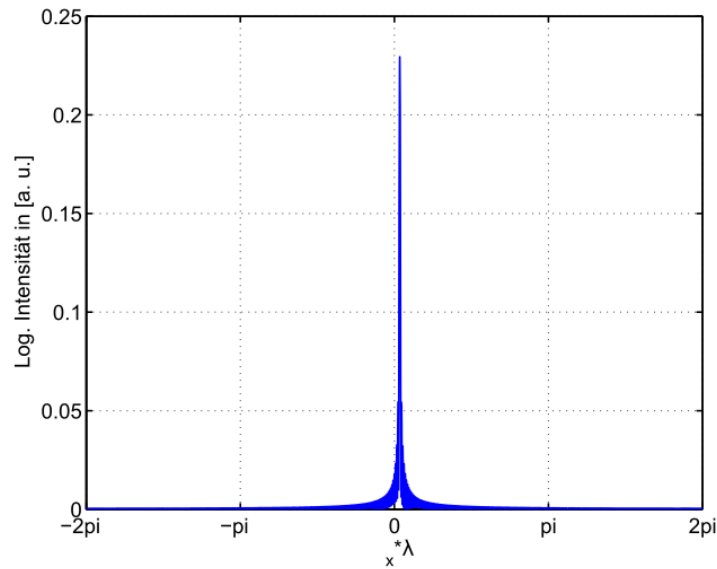


Abbildung 6.4: Amplitudenverteilung des Winkelspektrums nach unterer Apertur bei $z=0$

Apertur dargestellt. Auf der x -Achse ist der Anteil des Wellenvektors in x -Richtung k_x multipliziert mit der Wellenlänge aufgetragen, um eine Wellenlängenunabhängige Darstellung zu erhalten. Die Amplituden der Wellenvektoren sind zur besseren Darstellung logarithmisch aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass die einfallende ebene Welle an der unteren Apertur gebeugt wird und nach dieser in unterschiedliche Richtungen propagiert. Die größte Lichtintensität tritt jedoch weiterhin in Ausbreitungsrichtung der einfallenden Welle auf.

Evaneszente Wellen können nicht propagieren und werden daher vernachlässigt! Es gilt:

$$A_t(k_x, z = 0, \phi, \lambda) = 0 \quad \text{falls: } \Im(k_z) \neq 0 \quad (6.28)$$

Das Winkelspektrum vor der oberen Apertur wird als Produkt des Winkelspektrums der unteren Apertur und dem Propagationsterm beschrieben.

$$\begin{aligned} A(k_x, z_0, \phi, \lambda) &= A_t(k_x, z = 0, \phi, \lambda) H(k_x, z) \\ &= A_t(k_x, z = 0, \phi, \lambda) \exp(ik_z z_0) \end{aligned} \quad (6.29)$$

Die Intensitäts- und Phasenverteilung vor der oberen Apertur erfolgt aus der Rückverschiebung des zentrierten Winkelspektrums und anschließender Fourierrücktransformation.

$$U(x, z_0, \phi, \lambda) = \text{IFFT}(\text{ISHIFTFFT}(A(k_x, z_0, \phi, \lambda))) \quad (6.30)$$

mit

$$\text{IFFT: } x(j) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N A(k) \omega_N^{-(j-1)(k-1)} \quad (6.31)$$

In Abb. 6.5 ist die Intensitätsverteilung vor dem oberen Spalt abgebildet.

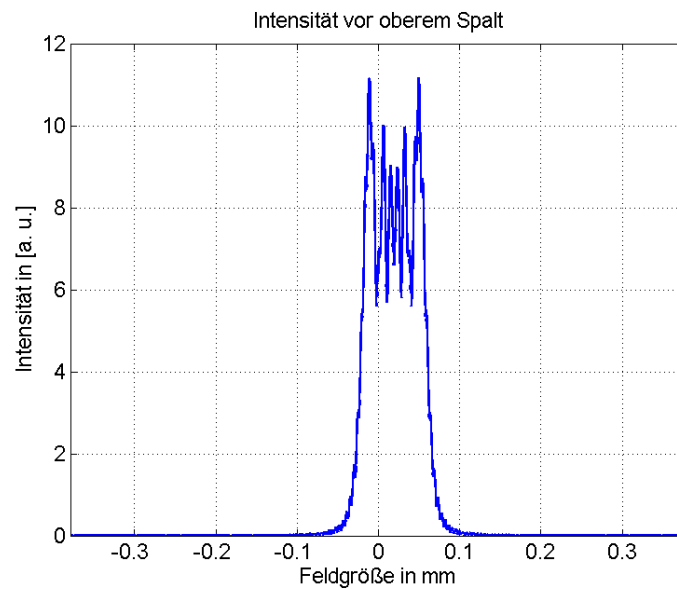


Abbildung 6.5: Intensitätsverteilung vor der oberen Apertur

Im Vergleich zur Intensitätsverteilung nach der unteren Barriereöffnung zeigt die Intensität nun einen deutlichen inhomogenen Verlauf, der einem typischen Interferenzmuster eines Einzelspalts bei Fresnel-Beugung entspricht.

Die Intensitätsverteilung hinter der oberen Apertur berechnet sich analog zur unteren Apertur durch Multiplikation der Feldverteilung mit der Amplitudentransmissionsfunktion der oberen Apertur τ_2 .

$$U_t(x, z_0, \phi, \lambda) = \tau_2(x) U(x, z_0, \phi, \lambda) \quad (6.32)$$

mit

$$\tau_2(x) = \begin{cases} 1, & \text{falls } -\frac{w_{cf}}{2} \leq x \leq \frac{w_{cf}}{2} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (6.33)$$

Der verbleibende Schritt ist die Bestimmung der Helligkeitsverteilung am Ort des Betrachters. Wie im vorherigen Abschnitt erwähnt, geschieht dies durch einfache Fouriertransformation, da die Fraunhofer Näherung erfüllt wird. Dies soll kurz näher begründet werden.

Die Bestimmung der Intensitätsverteilung im Fernfeld kann potentiell ebenfalls über die ASWP-Methode bestimmt werden, jedoch würde eine riesige Anzahl von Ortspunkten benötigt werden, was die Rechenzeit enorm ansteigen lassen würde.

Der potentielle Propagationsfaktor kann mit Gl. (6.29) und der eindimensionalen Form von Gl. (6.13) in Bezug gesetzt werden.

$$H(k_x, z_v) = \exp(ik_z z_v) = \exp\left(i\frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{1 - \alpha^2} z_v\right) \quad (6.34)$$

Hierbei ist z_v der Abstand von der oberen Apertur zum Betrachter. α beschreibt den Richtungskosinus in x-Richtung. Es ist erneut ersichtlich, dass sich die ebenen Wellen mit Wellenvektoren \vec{k} in unterschiedliche Raumrichtungen ausbreiten. Nach [79, S. 73] gilt für die Fresnelnäherung, dass der Propagationsfaktor wie folgt approximiert werden kann.

$$H(k_x, z_v) = \exp\left(i\frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{1 - \alpha^2} \cdot z_v\right) \approx \exp\left(i\frac{2\pi}{\lambda}\left[1 - \frac{\alpha^2}{2}\right] \cdot z_v\right) \quad (6.35)$$

Diese Näherung ist gültig, wenn gilt $\alpha \ll 1$. Dies ist gleichbedeutend mit einer Beschränkung auf kleine Winkel. Betrachtet man sich das Winkelspektrum des Feldes hinter der oberen Apertur, wie in Abb. 6.6 dargestellt, ist zu erkennen, dass fast keine Anteile unter Winkeln größer als $\pm\frac{\pi}{2}$ existieren. Die Näherung ist somit gültig. Für größere Einfallswinkel behält die Näherung ebenfalls ihre Gültigkeit, da auf Grund der geometrischen Anordnung der oberen und unteren Apertur, Licht von größeren Einfallswinkeln kaum noch zur Intensität im Fernfeld beiträgt.

Gilt zusätzlich zu der nachgewiesenen Fresnelnäherung die Bedingung der Fraunhofernäherung, dass der Betrachtungsabstand groß gegenüber der Spaltöffnung ist (6.18), was bei typischen Spaltbreiten und Betrachtungsabständen von Anzeigen im-

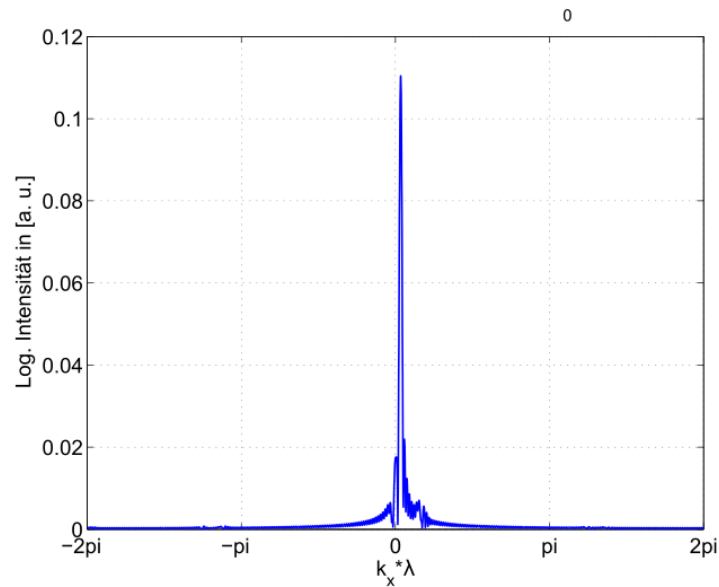


Abbildung 6.6: Amplitudenverteilung des Winkelspektrums nach oberer Apertur

mer der Fall ist, kann die Fraunhofernäherung angewendet werden. Die Intensität im Fernfeld ergibt sich somit zu:

$$I_v(\theta, \phi, \lambda) \propto \frac{1}{\lambda} |A(k_x, z_v, \phi, \lambda)|^2$$

$$\text{mit } \theta = \arctan\left(\frac{x}{z_v}\right) \quad (6.36)$$

$$\text{und } A(k_x, \phi, \lambda) = \text{SHIFTFFT}(\text{FFT}(U_t(x, z_0, \phi, \lambda)))$$

Die Intensitätsverteilung im Fernfeld wird über den Winkel aufgetragen, wodurch eine vom Betrachtungsabstand unabhängige Darstellung erreicht wird. Der Winkelausschnitt wird auf den Fernfeldwinkelbereich begrenzt, fehlende Zwischenwerte werden interpoliert. Die resultierende Intensitätsverteilung für die Anzeige bei Beleuchtung mit einer ebenen Welle unter 1° und einer Wellenlänge von 370nm ist in Abb. 6.7 dargestellt. Die Ausrichtung des Koordinatensystems wurde hierbei an die Fahrzeuggeometrie angepasst. Bei der Intensitätsverteilung ist noch deutlich die Nähe zu einer Verteilung zu erkennen, die sich ergeben würde, wenn ein Einzelspalt mit einer schrägen ebenen Welle beleuchtet wird. Es zeigen sich jedoch bereits Abweichungen, die auf die Anordnung der zwei Spalte zueinander zurück zu führen sind.

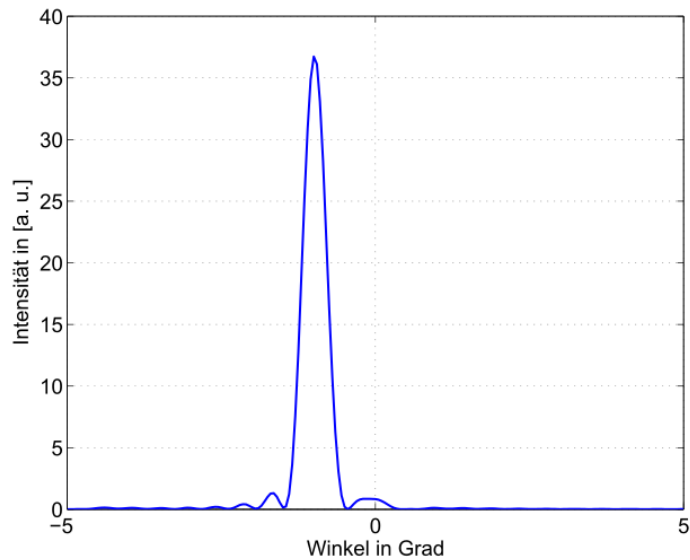


Abbildung 6.7: Intensitätsverteilung der Anzeige im Fernfeld bei Beleuchtung mit einer ebenen Welle unter Einfallswinkel 1° und Wellenlänge 370 nm

Leuchtdichtevertellung für mehrere Einfallswinkel und Wellenlängen

Zur Bestimmung der Abstrahlcharakteristik der Anzeige wird der vorangegangene Simulationsschritt für alle Einfallswinkel und Wellenlängen, wie in Tabelle 6.1 angegeben, wiederholt.

In Abbildung 6.8 sind auf der linken Seite die Intensitätsverteilungen für den ge-

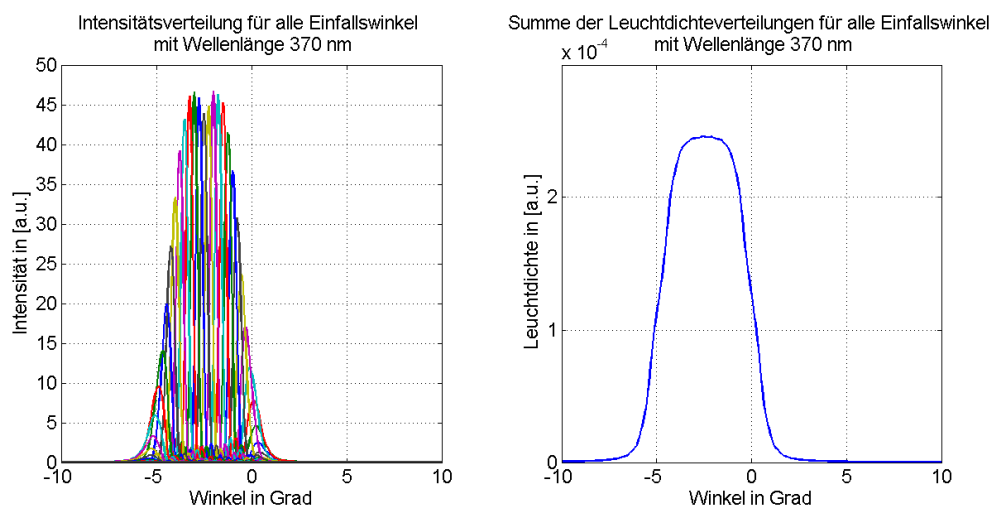


Abbildung 6.8: Intensitäts- und Summe der Leuchtdichtevertellungen für die Wellenlänge 370 nm und den gesamten Einfallswinkelbereich

samtem Einfallswinkelbereich von $\pm 20^\circ$ für die Wellenlänge 370 nm dargestellt. Auf der rechten Seite ist Leuchtdichteverteilung dargestellt, die sich aus der Summe der Intensitäten, umgerechnet auf die Leuchtdichte ergibt (siehe Gl. (6.4)).

Der verbleibende Schritt ist die Summation über alle diskreten Wellenlängen des Bereichs [370nm - 780nm].

In Abbildung 6.9 sind auf der linken Seite die Leuchtdichteverteilungen für den gesamten Wellenlängenbereich dargestellt. Auf Grund der $V(\lambda)$ -Kurve tragen Wel-

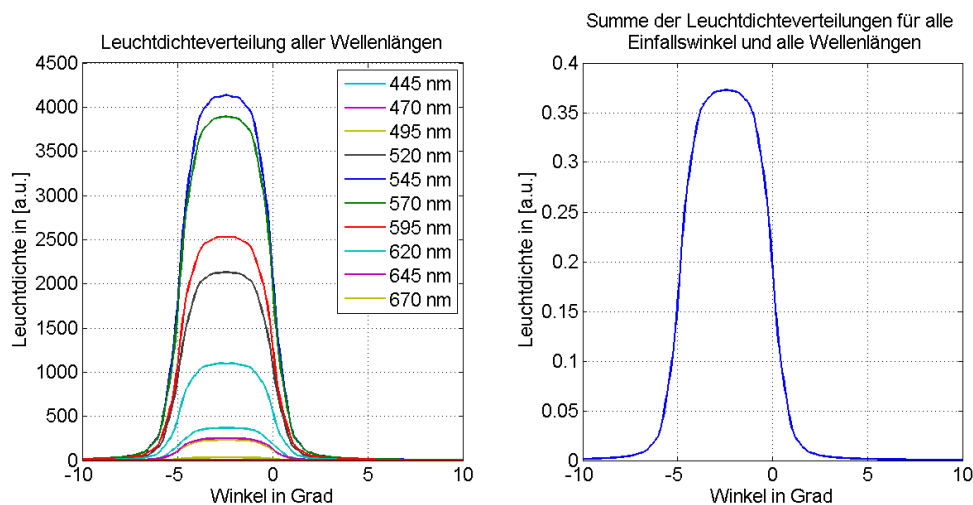


Abbildung 6.9: Leuchtdichteverteilungen und Summe dieser für alle Wellenlängen und den gesamten Einfallswinkelbereich

lenlängen in der Nähe des Maximums der $V(\lambda)$ -Kurve von 555nm überproportional stark zur wahrgenommenen Helligkeit bei. Das finale Ergebnis der Simulation (siehe Abb. 6.9 rechten Seite) beschreibt die Winkelverteilung der abgestrahlten Helligkeit einer Barriereöffnung für eine Subpixelapertur (gleichbedeutend mit einer stereoskopischen Ansicht). Ziel der Simulation war, den relativen Verlauf der Helligkeit zu bestimmen, weshalb das Ergebnis in zufälligen Einheiten angegeben wird.

6.1.5 Vergleich und Diskussion der Simulation mit der Messung

Die vorgestellte numerische Simulation soll nun anhand von Messergebnissen für die 10.26"-Anzeige evaluiert werden.

Um die Abstrahlcharakteristik der Anzeige zu erhalten, werden nicht nur eine Aper-

tur des Farbfilters der linken Ansicht, sondern auch ein Farbfilter der rechten Ansicht separat simuliert. Des Weiteren werden benachbarte Farbfilteröffnungen simuliert, um der Periodizität der Subpixel Rechnung zu tragen. Die Simulation muss somit sechs Mal mit unterschiedlichen Werten für den Parameter der Verschiebung der oberen Apertur s_x durchlaufen werden.

Die resultierenden Helligkeitsverläufe werden anschließend aufsummiert, da Licht aus benachbarten Farbfilteröffnungen als räumlich inkohärent angesehen wird. In Abbildung 6.10 ist die simulierte Abstrahlcharakteristik zusammen mit Messwerten aus Kapitel 4 dargestellt. Die Leuchtdichten wurden hierfür jeweils auf ihr Maximum

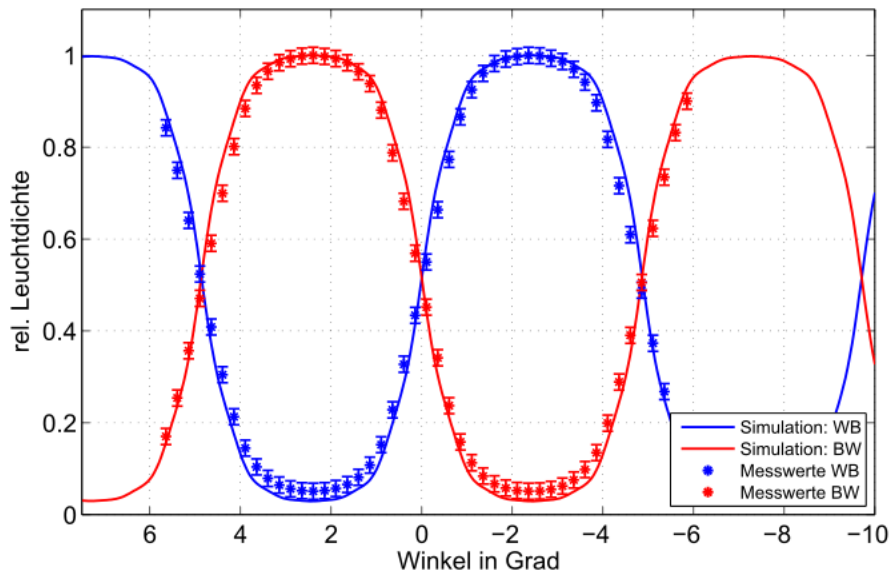


Abbildung 6.10: Vergleich Messergebnisse Prototypische Anzeige 1 mit wellenoptischer Simulation

normiert.

Aus der Abbildung ist deutlich zu erkennen, dass die numerische Simulation funktioniert und im Gegensatz zu einer geometrisch optischen Simulation deutlich näher an den Messdaten liegt.

Im genauen Vergleich fällt jedoch auf, dass die Simulation deutlich geringere minimale Werte annimmt. Dies lässt sich damit erklären, dass in der Simulation beide Aperturen als ideal angenommen wurde, sodass sie binäres Transmissionsverhalten aufweisen. In der Realität zeigt vor allem die Flüssigkristallbarriere eine endliche

Absorption. Aber auch Streuung und Reflexionen im Inneren des LCDs führen zu einem endlichen Schwarzwert.

Addiert man einen künstlichen Schwarzwert von 2.3% auf die simulierte Verteilung und normiert dies anschließend erneut, ergibt sich der Kurvenverlauf in Abb. 6.11. Die 2.3% Leuchtdichte stammen somit nicht von Beugungseffekten, sondern sind auf andere Streu- oder Reflektionsprozesse in der Anzeige zurückzuführen. Zusätzlich zu

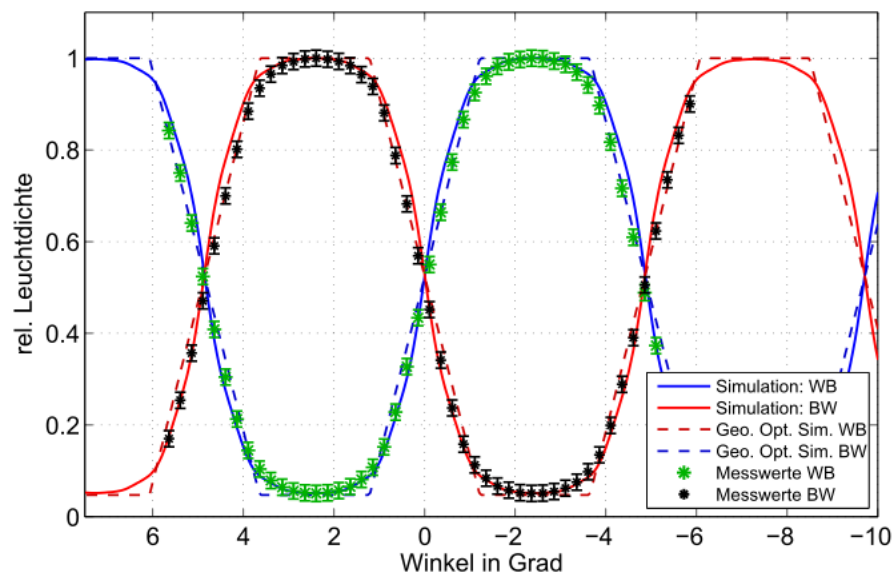


Abbildung 6.11: Vergleich Messergebnisse 10.26'' Anzeige mit geometrisch-optisch und wellenoptischer Simulation

den Messdaten, wurde der Kurvenverlauf für WB und BW bei geometrisch-optischer Simulation hinzugefügt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die wellenoptische Simulation den gemessenen Kurvenverlauf deutlich präziser voraussagt. Dies gilt insbesondere für den Helligkeitsverlauf in Bereich der Plateaus der geometrisch optischen Simulation.

Es kommt jedoch noch zu Abweichungen bei der Simulation der Steilheit der Flanken, insbesondere im oberen Teil des Verlaufs. Die Gründe hierfür sind noch nicht geklärt. Es besteht die Möglichkeit, dass die ITO-Struktur der Elektroden, sowohl im LCD und in der Barriere Einfluss auf die Ausrichtung der Flüssigkristalle hat. Es würde zu einer Brechungsindexvariation kommen, die wie eine schwache Linse an der Apertur wirken kann und der Beugung entgegenwirkt. Ein solcher Effekt kann

nicht mit einer vereinfachten Darstellung einer Aperturöffnung mit harten Kanten simuliert werden. Ebenfalls gilt es die Messdaten zu hinterfragen, da auch innerhalb der Messgeräte Streulicht auftreten kann, welches die Winkelauflösung der Messung negativ beeinflusst.

Insgesamt demonstriert die Darstellung in Abb. 6.11 jedoch, dass es mit der entwickelten Simulation möglich ist, die Abstrahlcharakteristik einer Anzeige bis auf einen unbekanntem Faktor des Schwarzwertes in guter Genauigkeit zu simulieren. Die Simulation stellt somit ein gutes Hilfsmittel dar, die erwartete Stereoqualität bereits vor der Herstellung zu simulieren, ohne teure Anzeigen aufbauen zu müssen. Im Folgenden wird darüber hinaus gezeigt, wie die Simulation verwendet werden kann, um das Verhalten zusätzlicher die Beugung beeinflussender Elemente zu untersuchen und dadurch die Abstrahlung weiter zu verbessern.

6.2 Wellenoptische Optimierung von Parallaxebarrieren

Mit Hilfe des wellenoptischen Simulationsmodells soll untersucht werden, wie die Abstrahlcharakteristik einer Parallaxebarriere optimiert werden kann. Ziel ist die Vergrößerung der lateralen Ausdehnung der monokularen Stereozone, Verringerung des Crosstalks und eine Reduzierung von Helligkeitsschwankungen bei Adaption auf geänderte Kopfpositionen.

Hierfür soll die Abstrahlcharakteristik stärker der idealisierten, optischen Zielfunktion angenähert werden.

Die Optimierung wurde in der Prototypischen Anzeige 2 (vgl. Kapitel 5) angewendet. Die folgenden Ausführungen beziehen sich von jetzt an auf diese Anzeige. Die geometrischen Daten und Beschreibung der Pixelstruktur erfolgte bereits im vorangegangenen Kapitel.

6.2.1 Optimierungsproblem

Zur Optimierung der Abstrahlcharakteristik muss der Anteil des Lichts, der sich nach der oberen Apertur in eine bestimmte Raumrichtung ausbreitet, manipuliert werden. Den größten Einfluss hierauf hat die auftretende Beugung in der oberen

Apertur. Die Multiplikation der Feldverteilung vor der oberen Apertur mit Amplitudentransmissionsfunktion ist identisch zu der Faltung des Winkelspektrums vor der oberen Apertur mit der Fouriertransformierten der Amplitudentransmissionsfunktion des Spaltes. Eine Manipulation der Phasen- oder Amplitudenverteilung in der unteren Apertur würde nur einen geringen Einfluss auf die Beugung nach der oberen Apertur haben. Die folgenden Optimierungsansätze beziehen sich daher ausschließlich auf die obere Apertur.

Die Öffnungsbreite der oberen Apertur wurde durch den geometrisch-optischen Barriereentwurf in Kapitel 4 festgelegt und soll nicht verändert werden. Es besteht somit nur die Möglichkeit die Abstrahlcharakteristik durch Manipulation der Amplituden oder der Phasen in der Aperturen zu beeinflussen.

Die Problemstellung, den Kurvenverlauf der Abstrahlcharakteristik stärker der optischen Zielfunktion anzunähern, kann als ein Optimierungsproblem wie folgt mathematisch beschrieben werden.

$$f(o) = \min \left\{ \sum_k |(L_{ziel}(\phi_k) - L(\phi_k, \tau))| \quad |\tau \in \Omega \right\} \quad (6.37)$$

Hierbei ist Ω eine Menge von komplexen Transmissionsfunktionen τ der oberen Apertur. $o \in \Omega$ und beschreibt die optimale Transmissionsfunktion, welche die Differenz zwischen der optischen Zielfunktion $L_{ziel}(\phi_k)$ und der simulierten Abstrahlcharakteristik $L(\phi_k, \tau) = L_{WB}$ oder L_{BW} minimiert.

In Abbildung 6.12 ist der simulierte Kurvenverlauf ohne Optimierung der **Prototypischen Anzeige 2** dargestellt.

Die ebenfalls abgebildete opt. Zielfunktion folgt der Beschreibung aus Kapitel 2. Im idealen Betrachtungsabstand von 730 mm besitzt das Helligkeitsplateau eine Breite von 47 mm. Die Flankensteilheit wurde so gewählt, dass die Helligkeitsverteilung bis zum Beginn des Helligkeitsplateaus der benachbarten Ansicht vollkommen abgefallen ist.

Ziel ist es, eine Transmissionsfunktion der oberen Apertur zu finden, welche die Funktion minimiert und produktionstechnisch umzusetzen ist.

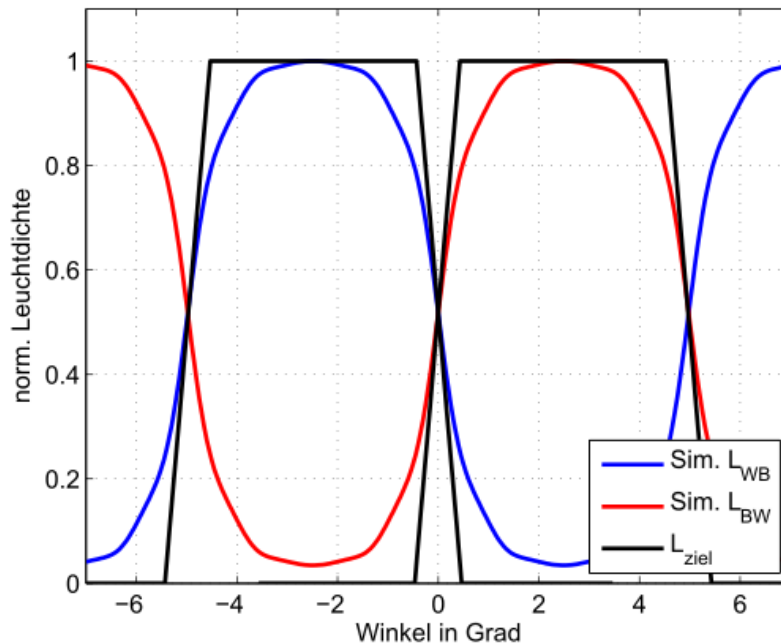


Abbildung 6.12: Simulierte Abstrahlcharakteristik ohne Optimierung (rot und blau) und Zielverteilung (schwarz)

6.2.2 Möglichkeiten der Optimierung

Die komplexe Transmissionsfunktion setzt sich aus einem realen Anteil zusammen, der eine Amplitudenmaske beschreibt und einen imaginären Teil, welcher eine Phasenmaske der oberen Apertur entspricht.

$$\tau(x) = T(x) \exp(i\varphi(x)) \quad (6.38)$$

Hierbei ist x die Position in der oberen Apertur.

Manipulation der Amplitudentransmissionsfunktion

In den bisherigen Betrachtungen wurde eine Apertur durch eine binäre Amplitudentransmissionsfunktion charakterisiert, die entweder volltransparent oder vollkommen absorbierend ist. Es besteht jedoch auch die Möglichkeit, dass die Apertur einen Transmissionsverlauf mit Werten zwischen 0 und 1 besitzt.

Der in Abbildung 6.12 dargestellte Helligkeitsverlauf (L_{WB} und L_{BW}) zeigt im Vergleich mit der optischen Zielfunktion eine flachere Flanke und mehr Lichtanteile, die zu großen Winkeln gebeugt werden. Diese Anteile sind maßgeblich für die Verschlechterung des Crosstalks verantwortlich. Der Anteil des Lichtes unter großen

Beugungswinkeln ist abhängig vom Transmissionsverlauf innerhalb des Spaltes. In

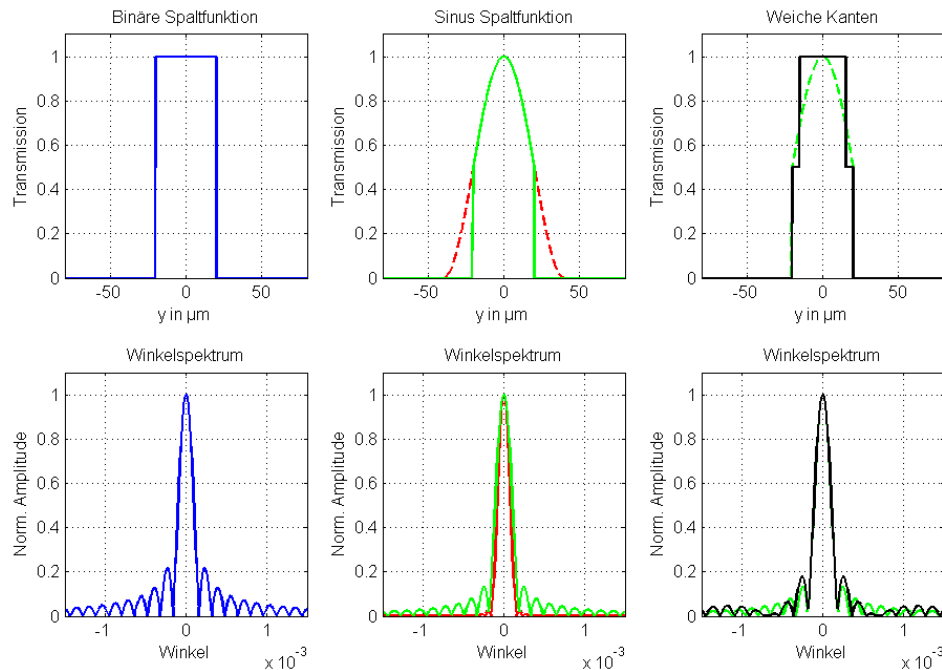


Abbildung 6.13: Amplitudenfunktionen eines einfachen Einzelspaltes und ihre Winkelspektren bei Beleuchtung mit einer ebenen Welle

Abbildung 6.13 sind verschiedene Transmissionsprofile eines zufällig gewählten Einzelspaltes dargestellt. In der unteren Reihe sind die Winkelspektren dargestellt, die sich bei Beleuchtung mit einer ebenen Welle bei senkrechtem Einfall aus der Fouriertransformation der Spaltfunktion ergeben. Diese sind jeweils auf ihr Maximum normiert, da nur der Verlauf der Kurve verglichen werden soll und keine Absolutwerte relevant sind. Es ist deutlich erkennbar, dass das Winkelspektrum nach einer binären Apertur (linke Abbildung unten, blaue Kurve) Lichtanteile beinhaltet, die sich in unterschiedliche vom Einfallswinkel abweichende Richtungen ausbreiten. Betrachtet man hingegen eine einzelne Öffnung eines Sinus-Gitters (Abb. Mitte oben, roter Kurvenverlauf) mit gleicher Periodizität, die eine sinusförmige Transmissionsfunktion aufweist, so sind im Winkelspektrum kaum Lichtanteile unter höheren Winkeln zu erkennen. Das Licht breitet sich vorrangig in Vorwärtsrichtung aus. Da die Spaltöffnung nicht vergrößert werden soll, ist zusätzlich (grün) die Transmissionsfunktion dargestellt, die innerhalb der Öffnung ein Sinusverlauf annimmt und

außerhalb Null ist. Durch die „harten“ Kanten entstehen erneut Lichtanteile im Winkelspektrum unter größeren Winkel, jedoch sind die Anteile im Vergleich zu einer rein binären Apertur deutlich reduziert. Durch die Verringerung der Transmission innerhalb des Spaltes nimmt die transmittierte Lichtmenge jedoch leicht ab.

In der Abbildung 6.13 (rechts) ist ein Transmissionsverlauf mit einer Stufenfunktion dargestellt, bei dem die Transmission an den Spalträndern auf 50% fällt (schwarz). Im Vergleich mit dem sinusförmigen Verlauf zeigt das normierte Winkelspektrum höhere Werte in der ersten Beugungsordnung, fällt jedoch in der näheren Umgebung deutlich ab. Im Vergleich zu der binären Spaltfunktion wird deutlich weniger Licht in höhere Ordnungen gebeugt.

Aus dieser einfachen Betrachtung eines Einzelspaltes bei Beleuchtung mit einer ebenen Welle ist zu erkennen, dass ein einfacher Stufenverlauf der Transmission die Lichtabstrahlung in bestimmte Winkelbereiche unterdrücken kann. Einfache Stufenfunktionen haben den Vorteil, dass sie im Vergleich zu komplexeren Transmissionsverläufen wie die gezeigte Sinusform, leichter in bestehende Anzeigegerstellungsprozesse integriert werden können. Ein Ansatz zur Optimierung der Abstrahlcharakteristik sind daher Aperturen mit „weichen“ Kanten.

Manipulation der Phasenfunktion der oberen Apertur

Im Vergleich der optischen Zielfunktion mit der gemessenen Leuchtdichtevertelung in Abbildung 6.12 ist zu erkennen, dass ein weiterer notwendiger Schritt zur Angleichung die Ausbildung eines flacheren Plateaus des Lichtverlaufs ist.

In der Simulation wurde gezeigt, dass sich der Leuchtdichteverlauf für eine Wellenlänge als Summe aus den Intensitätsverteilungen unterschiedlicher Einfallswinkel ergibt. Um ein breiteres Leuchtdichteplateau zu erreichen, muss somit die Intensitätsverteilung für einen einzelnen einfallenden Winkel „breiter“ werden.

Eine Möglichkeit hierfür ist die Einführung von Phasenmasken, welche die Phasenverteilung des Feldes in der oberen Apertur manipuliert. In Abbildung 6.14 ist erneut der vereinfachte Fall eines Einzelspaltes bei Beleuchtung mit einer senkrecht einfallenden ebenen Welle dargestellt. In der oberen Reihe der Abbildungen sind jeweils die Spaltöffnung (schwarz) und die Phasenmasken dargestellt. Der Bereich der Phasenverschiebung deckt gerade die Hälfte der Spaltöffnung ab.

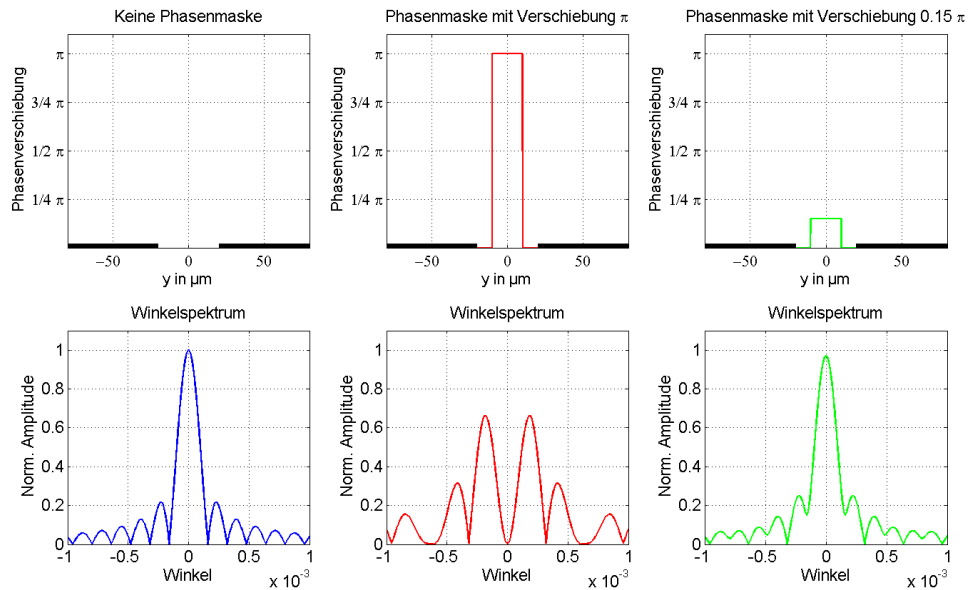


Abbildung 6.14: Phasenmasken eines einfachen Einzelspaltes und ihre Winkelspektren bei Beleuchtung mit einer ebenen Welle

In der linken Darstellung ist eine normale Spaltöffnung ohne Phasenmaske dargestellt, das Winkelspektrum ergibt die bekannte Verteilung eines Einzelspaltes. Die Lichtverteilung weist periodische lokale Maxima in den $\pm 1, 2, 3 \dots$ Ordnungen auf, mit einem Maximum in der 0. Ordnung.

In der mittleren Darstellung wird eine zusätzliche Phasenverschiebung von π eingeführt. Licht, das durch den mittleren Teil des Spaltes propagiert, wird gegenüber dem Licht an den Rändern der Spaltöffnung um π verzögert. Dies führt im Winkelspektrum zu einer vollständigen Unterdrückung des Lichtanteils der nullten Ordnung und einer Umverteilung des Lichts in höhere Ordnungen. Hinter dem Spalt würde sich kein Licht mehr in Vorwärtsrichtung ausbreiten. Im Fernfeld ergeben zwei deutliche Lichtpunkte in der ± 1 . Ordnung. Dieser Fall stellt den Extremfall der Umverteilung von Licht auf höhere Ordnungen dar und ist nur zur Prinzipdarstellung gewählt.

Im rechten Teil der Abbildung ist daher eine Phasenverschiebung von $0,15 \pi$ dargestellt. Es ist zu erkennen, dass selbst eine solche geringe Phasenverschiebung zu einer gewissen Verbreiterung der Lichtverteilung im Fernfeld führt. Für den willkürlich gewählten Fall einer Phasenverschiebung von $0,15 \pi$ wird hauptsächlich der Lichtanteil in der ± 1 . Ordnung angehoben. In höheren Ordnungen wird nur gering-

fällig mehr Licht gebeugt.

Die Einführung einer Phasenmaske ermöglicht somit, mehr Lichtanteile auf höhere Ordnungen zu verteilen, um dadurch die Intensitätsverteilung im Fernfeld zu verbreitern.

Die Kombination von Phasenmasken und Amplitudentransmissionsfunktionen mit weichen Kanten ermöglicht im Zusammenspiel, die Intensitätsverteilung im Fernfeld in ihrem Aussehen anzupassen.

6.2.3 Optimierung einer Anzeige mit Parallaxebarriere

In der bisherigen Betrachtung wurden die Werkzeuge der Optimierung in Form von Phasen- und Amplitudenmasken anhand des vereinfachten Beispiels eines Einzelspaltes eingeführt. Dies gilt es nun auf eine Anzeige mit Parallaxebarriere zu übertragen.

Hierzu wird die bisher binäre Amplitudentransmissionsfunktion der oberen Apertur (6.33) durch eine Maskenfunktion mit stufenförmigen Transmissionsverlauf und stufenförmiger Phasenfunktion ersetzt.

$$\tau_{2,opt} = T_{opt}(x) \exp(i\varphi_{opt}(x)) \quad (6.39)$$

mit

$$T_{opt}(x) = \begin{cases} 1, & \text{falls } -\frac{w_{cf}}{2} + w_t \leq x \leq \frac{w_{cf}}{2} - w_t \\ 0,5, & \text{falls } -\frac{w_{cf}}{2} \leq x \leq -w_t \text{ und } w_t \leq x \leq \frac{w_{cf}}{2} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (6.40)$$

Der Parameter w_t gibt die Breite der Randbereiche mit Transmission 0,5 an.

Die stufenförmige Phasenfunktion des oberen Spalts bewirkt eine Phasenverschiebung der Lichtstrahlen des mittleren Bereichs der Spaltöffnung gegenüber den Strahlen am Rand der Spaltöffnung. Dies wird in der Praxis durch einen Brechungsindexunterschied der Bereiche realisiert (siehe nächster Abschnitt). Die Phasenverschiebung entspricht dem Gangunterschied der Lichtstrahlen nach Transmission durch Elemen-

te mit unterschiedlichen Brechungsindices. Die Dicke dieser Elemente bestimmt die Phasenverschiebung.

$$\varphi_{opt}(x) = \begin{cases} \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta n \cdot d_{ph}, & \text{falls } -\frac{w_{cf}}{4} \leq x \leq \frac{w_{cf}}{4} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (6.41)$$

Hierbei ist Δn die Brechungsindexdifferenz der Materialien und d_{ph} die Dicke der phasenschiebenden Elemente. Die Phasenverschiebung ist somit nicht konstant für verschiedene Wellenlängen. Final wird jedoch die Leuchtdichte betrachtet, welche sich durch die Multiplikation der Intensität mit der spektralen Empfindlichkeitskurve des Auges $V(\lambda)$ ergibt. Die Lambdakurve hat ihr Maximum bei der Wellenlänge 555 nm. Die Festlegung der Phasendifferenz für eine Wellenlänge führt somit nicht im gleichen Maße zu einer Verschlechterung durch eine nicht passende Phasendifferenz bei einer anderen Wellenlänge.

Ist die Brechungsindexdifferenz Δn bekannt, ergibt sich aus den obigen Definitionen der Amplituden- und Phasenmaske ein Optimierungsproblem mit den zwei unbekannt Parametern, nämlich der Dicke des phasenschiebenden Elements und der Breite des Transmissionsbereiches mit Transmission 0,5 (weiche Kanten). Es gilt Werte für d_{ph} und w_t zu finden unter denen die Optimierungsfunktion (6.37) ihr Minimum annimmt.

$$f(o) = \min \left\{ \sum_k |(L_{ziel}(\phi_k) - L(\phi_k, \tau))| \mid \tau(d_{ph}, w_t) \in \Omega \right\} \quad (6.42)$$

Hierzu wird die Helligkeitsverteilung $L(\phi_k, \tau)$ für unterschiedliche Werte von d_{ph} und w_t simuliert und der Wert der Optimierungsfunktion $f(o)$ bestimmt. Die Brechungsindexdifferenz wird mit $\Delta n = 0,9$ festgelegt, was sich aus den Materialeigenschaften des verwendeten Phasenelements ergibt (siehe nächster Abschnitt). In Abbildung 6.15 (links) ist der Verlauf der Optimierungsfunktion dargestellt, wenn nur der Parameter der Breite des Transmissionsbereichs (w_t) mit Transmission 0,5 variiert wird und keine Phasenmaske simuliert wird. Der Wert der Optimierungsfunktion entspricht einer Leuchtdichte, ist jedoch nicht von Relevanz, da nur der Kurvenverlauf im Speziellen die Lage des Minimums interessiert.

Der Parameter w_t wird hierbei von 0,5-16 μm in Schritten von 0,5 μm variiert.

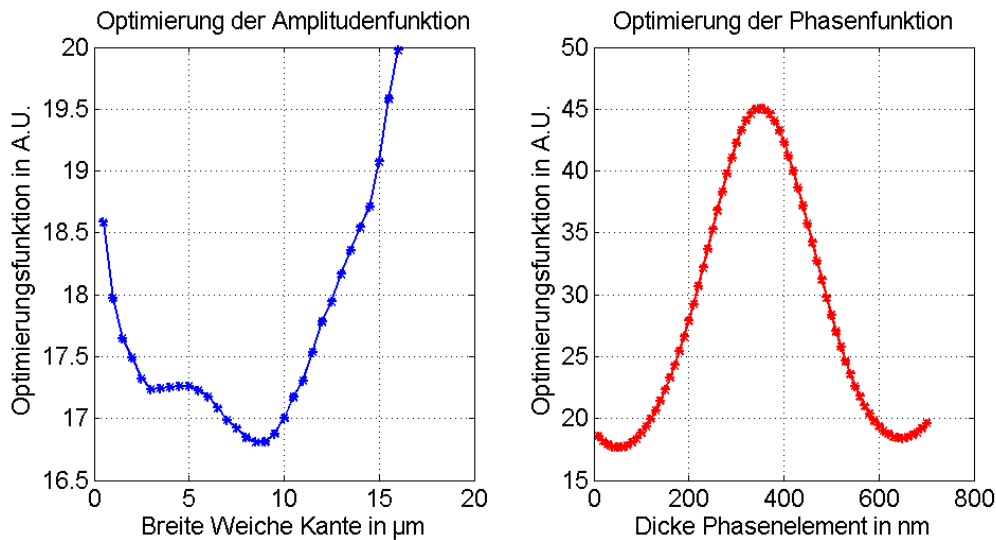


Abbildung 6.15: Parameteroptimierung der Amplituden- (links) und Phasenmaske (rechts) der oberen Apertur der Prototypischen Anzeige 2

Es ist zu erkennen, dass die Funktion bei $9\ \mu\text{m}$ ihr Minimum annimmt. Würde die Optimierung nur über die Amplitudenmaske erfolgen, sollten die weichen Kanten der oberen Apertur jeweils $9\ \mu\text{m}$ breit sein, da bei diesem Wert die Helligkeitsverteilung am besten mit der Zielfunktion übereinstimmt.

In Abbildung 6.15 (rechts) ist die Optimierungsfunktion für eine reine Optimierung der Phasenmaske der oberen Apertur dargestellt. Die Spaltöffnung hat volle Transmission über die gesamte Breite. Der Optimierungsparameter der Dicke des phasenschiebenden Elements wird von $10\text{-}700\ \text{nm}$ mit Schrittweite $10\ \text{nm}$ variiert.

Es ist zu erkennen, dass sich die Optimierungsfunktion periodisch verhält, mit einer Periodenlänge von ungefähr $500\ \text{nm}$. Dies bestätigt die Annahme, dass Licht im Wellenlängenbereich von $\approx 500\ \text{nm}$ am stärksten zur Optimierung beiträgt. Die Minima der Optimierungsfunktion liegen bei $50\ \text{nm} + k \cdot 500\ \text{nm}$, mit $k = 0, 1, 2, \dots$

Soll die Helligkeitsverteilung der *Prototypischen Anzeige 2* nur durch die Phasenmaske optimiert werden, müsste die Dicke des phasenschiebenden Elements zu $50\ \text{nm} + k \cdot 500\ \text{nm}$ gewählt werden. Die besten Ergebnisse werden erzielt, wenn die Optimierung durch Phasen- und Amplitudenmasken simultan angewendet wird. Hierzu wurden sämtliche Kombinationen der Parameter w_t und d_{ph} simuliert und die Optimierungsfunktion ausgewertet. In Abbildung 6.16 ist ein Ausschnitt der zweidimensionalen

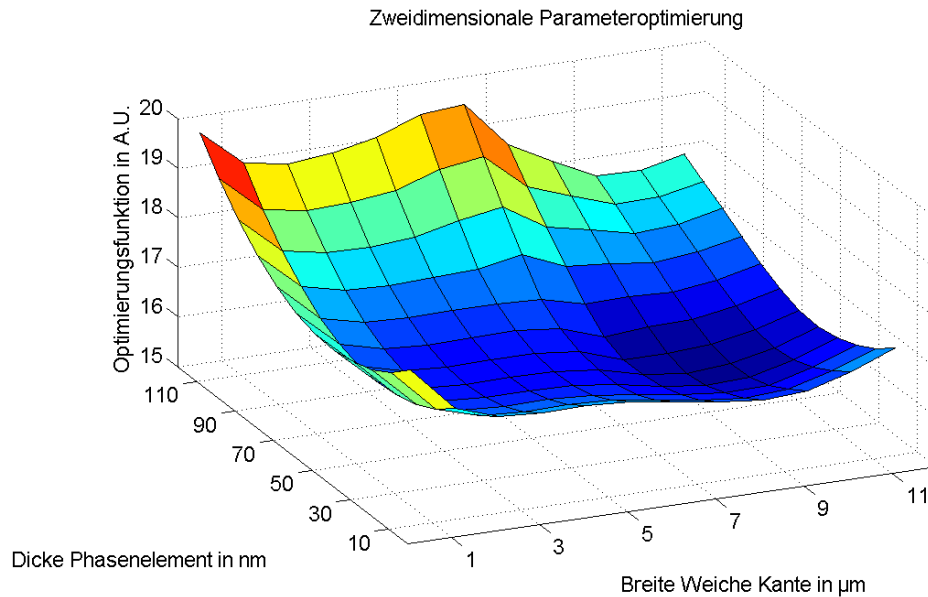


Abbildung 6.16: Zweidimensionale Parameteroptimierung der komplexen Spaltfunktion der oberen Apertur

Optimierungsfunktion dargestellt.

Das Minimum liegt auch in diesem Fall bei einer Dicke von 50 nm und einer Breite der weichen Kanten von 9 μm .

Der minimale Wert der Optimierungsfunktion beträgt $15,92 \text{ cd/m}^2$ und ist daher geringer als die Werte der Einzeloptimierung der Amplitudenmaske ($17,74 \text{ cd/m}^2$) und der Phasenmaske ($16,81 \text{ cd/m}^2$). Die Anwendung beider Methoden führt somit zum besten Ergebnis. In Abbildung 6.17 sind die simulierten Helligkeitsverläufe mit und ohne optimierter Apertur dargestellt. Die Dicke des Phaselements wurde mit 50 nm angenommen und die Breite der weichen Kante mit 3 μm .

Es ist deutlich zu erkennen, dass die optimierte Apertur besser der Zielfunktion folgt. Es wird ein breiteres Helligkeitsplateau ausgebildet und auch bei niedrigeren Leuchtdichten ist ein flacheres Plateau zu erkennen, was in steilere Flanken übergeht. In Abbildung 6.18 wurde die Amplituden- und Phasenoptimierung für den Helligkeitsverlauf WB separat simuliert und zur besseren Darstellung halblogarithmisch aufgetragen. Dargestellt ist ein Ausschnitt einer Flanke.

Aus der Abbildung ist gut zu erkennen, welchen Einfluss die Amplituden- und die Phasenoptimierung auf den Helligkeitsverlauf haben. Die Amplitudenoptimierung

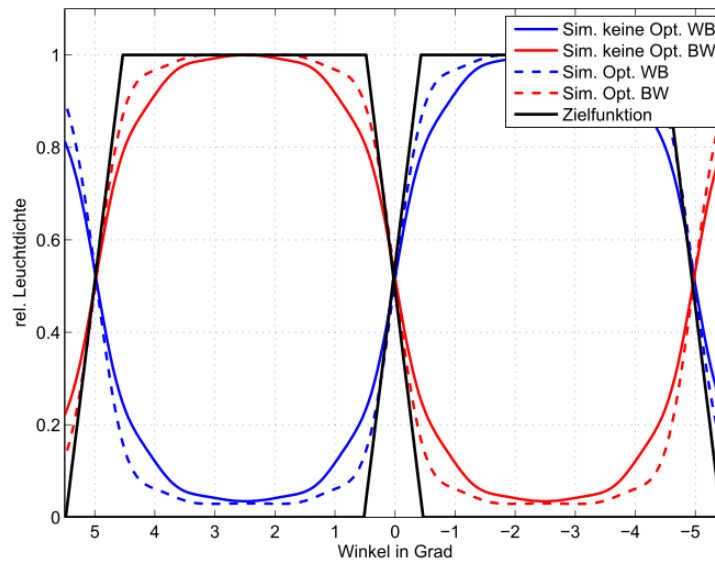


Abbildung 6.17: Simulation der Abstrahlcharakteristik der Prototypischen Anzeige 2 mit (gestrichelte Linien) und ohne (durchgängige Linien) Optimierung mit der angestrebten Zielfunktion (schwarz)

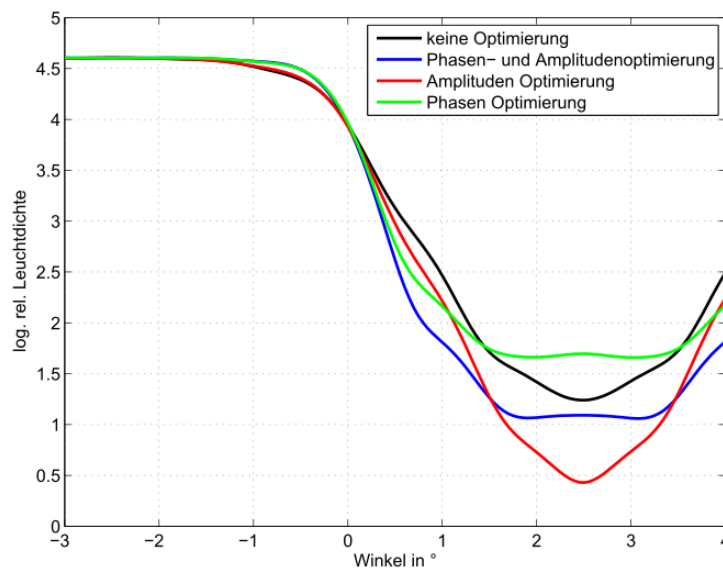


Abbildung 6.18: Simulation der reinen Amplituden- (rot) und Phasenmaskenoptimierung (grün) und der Kombination beider (blau) im Vergleich zu keiner Optimierung (schwarz)

(rot) reduziert deutlich die Helligkeitsanteile unter großen Winkeln. Dies führt zu einem besseren Crosstalk, da weniger Licht in die andere Ansicht (nicht dargestellt) überspricht. Jedoch trägt die Amplitudenmaske fast gar nicht zur Ausbildung eines Helligkeitsplateaus bei.

Eine Phasenmaske für sich genommen (grün) optimiert den Helligkeitsverlauf im Bereich hoher Leuchtdichten und der Flanke. Es wird ein breiteres Helligkeitsplateau ausgebildet und die Helligkeitsflanke fällt steiler ab. Jedoch wird mehr Licht in größere Winkel gebeugt, wodurch der Crosstalk deutlich ansteigen würde.

Wird die Phasen- und Amplitudenmaskenoptimierung kombiniert (blau) ist es möglich, ein breiteres Helligkeitsplateau zu erreichen und zugleich die Leuchtdichteanteile für größere Winkel unter den Wert für den Fall ohne Optimierung zu drücken. Durch die Kombination beider Optimierungen können somit Nachteile der Einzeloptimierungen erfolgreich ausgeglichen werden.

6.2.4 Herstellung der Phasen- und Amplitudenmasken

Zur Implementierung von Phasen- und Amplitudenmasken mit den oben beschriebenen Eigenschaften galt es Materialien und Prozesse zu finden und diese in einen Anzeigerstellungsprozess zu integrieren.

Amplitudenmasken

Die Öffnungsbreite der oberen Apertur der Prototypischen Anzeige 2 beträgt 35 μm . Die Öffnung wird durch die sogenannte „black mask“ begrenzt. Diese entsteht in der Regel durch Beschichten von Glassubstraten und anschließendem Freiätzen der Aperturöffnungen. Hierbei entstehen vollständig binäre Amplitudenmasken, mit hart begrenzten Kanten der Apertur. Zur Erzeugung eines halbtransparenten Bereichs müsste entweder der Ätzprozess kontrolliert abgebrochen werden, wenn der Transmissionswert erreicht wäre oder halbtransparente Mikrostrukturen, welche in einem anderen Herstellungsprozess angefertigt wurden, exakt eingebracht werden. Beide dieser Vorgehen sind nur mit viel Aufwand umzusetzen.

In dieser Arbeit werden die halbtransparenten Bereiche durch Mikrostrukturierung der Aperturkante erzeugt. Das Verfahren wurde in Kooperation mit einem japanischen Anzeigerhersteller umgesetzt. Hierzu wird die Aperturkante mit einem sinusförmigen Verlauf versehen (vgl. Abb. 6.19 (rechts)).

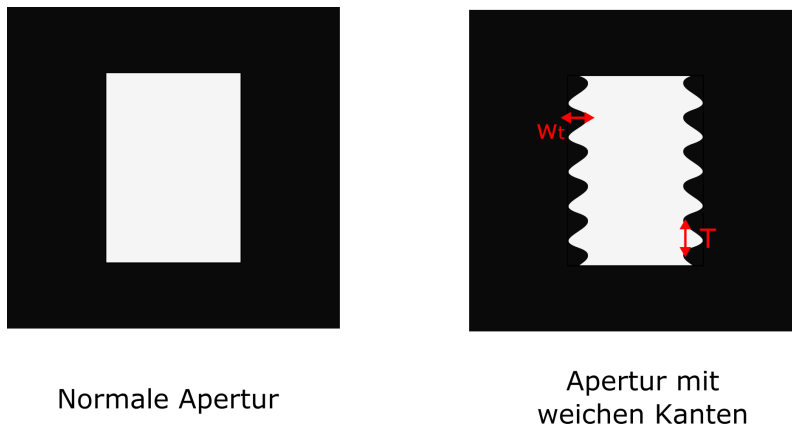


Abbildung 6.19: Apertur Öffnung mit hart (links) und weicher Kante (rechts)

Die Amplitude des Sinusverlaufs entspricht $\frac{w_t}{2}$, wodurch sich eine mittlere Transmission von 50% für die Randbereiche ergibt.

Die Periodenlänge beträgt $T \approx 7 \mu\text{m}$. Die so entstandene Struktur kann im gängigen Herstellungsprozess einer „black mask“ erzeugt werden und erfüllt die gleichen Eigenschaften wie ein halbtransparentes Element.

Phasenmasken

Ziel der Phasenmaske ist die Erzeugung einer exakten Phasenverzögerung in einem bestimmten Bereich der Spaltöffnung. Ein gängige Methode hierfür ist die Einführung einer Brechungsindexdifferenz zwischen den Bereichen. In Abbildung 6.20 ist

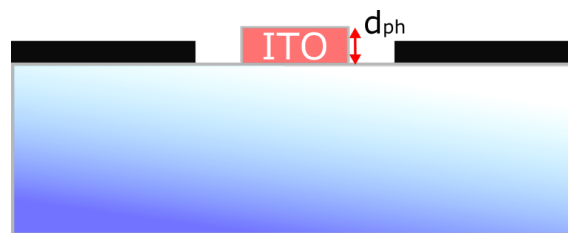


Abbildung 6.20: Herstellung der Phasenmaske für eine Anzeige mit Parallaxebarriere

ein seitlicher Schnitt einer Aperturöffnung dargestellt, die auf ein Glassubstrat aufgebracht wurde. Bei dem phasenschiebenden Element handelt es sich um eine Schicht Indiumzinnoxid (engl. *indium tin oxide* [ITO]), mit Dicke d_{ph} . Bei Indiumzinnoxid handelt es sich um einen elektrisch leitfähigen Stoff, der bei Schichtdicken von typischerweise 200 nm im sichtbaren Bereich vollständig transparent ist. In Flüssigkristallanzeigen werden ITOs als Elektroden der Flüssigkristallzelle verwendet. Hierzu

wird eine ITO-Schicht auf das Glassubstrat durch Sputtering-Prozesse aufgebracht und durch Freiätzen strukturiert. Der Sputteringprozess ermöglicht eine gute Kontrolle über die Schichtdicke, wodurch es möglich ist, Schichtdicken mit Genauigkeiten von einigen Nanometern zu erreichen.

Indiumzinnoxid besitzt einen Brechungsindex von typischerweise ≈ 1.9 (abhängig von der Dotierung). Die Phasenmaske wird zusätzlich auf das Glas aufgebracht, sodass die Brechungsindexdifferenz zwischen ITO und Luft zu $\Delta n = 1.9 - 1 = 0.9$ ergibt. Wird das Glas in einem Displayverbund mit einem zusätzlichen Deckglass gebondet (verklebt), muss abhängig vom Brechungsindex des verwendeten Klebers die Schichtdicke angepasst werden. Die geforderte Schichtdicke von mindestens 50 nm kann kontrolliert durch in der Anzeigenherstellung bereits etablierte Prozesse umgesetzt werden.

Wahl der Optimierungsparameter für die Prototypische Anzeige 2

Aus der zweidimensionalen Parameteroptimierung geht hervor, dass für die Parameter $w_t = 9 \mu\text{m}$ und $d_{ph} = 50 \text{ nm} + k \cdot 500 \text{ nm}$ die Optimierungsfunktion ihr Minimum annimmt.

Als Schichtdicke für die ITO Struktur wird für die **Prototypische Anzeige 2** ein Wert von 50 nm gewählt, da hierbei ITO-Struktur annähernd vollständig transparent ist diese Dicke in Herstellungsprozessen realisiert werden kann.

Die Breite der weichen Kante wurde nicht mit $9 \mu\text{m}$, sondern mit $3 \mu\text{m}$ gewählt. Der Grund hierfür ist die Vermeidung einer zu starken Abnahme der Gesamttransmission. Die Apertur besitzt eine Öffnungsbreite von $35 \mu\text{m}$, sollten an beiden Rändern Bereich mit $9 \mu\text{m}$ Breite eine Transmission von 50% aufweisen, würde die Gesamttransmission auf $\approx 75\%$ gegenüber einer nicht-optimierten Öffnung abfallen. Aus Abbildung 6.16 geht jedoch hervor, dass bereits aber einer Breite von $3 \mu\text{m}$ eine Verbesserung zu erkennen ist. Die Gesamttransmission fällt für diesen Wert nur auf 91% ab. Die Breite der weichen Kanten wurde daher mit $3 \mu\text{m}$ festgelegt.

6.2.5 Vorversuch zur wellenoptischen Optimierung

Zur experimentellen Überprüfung der vorhergesagten Optimierung und Testen der Herstellbarkeit der Phasen- und Amplitudenmasken wurde ein Vorversuch durchgeführt.

In diesem wurde ein Glasplättchen mit Dicke $d_{glas} = 1.3mm$ hergestellt, welches

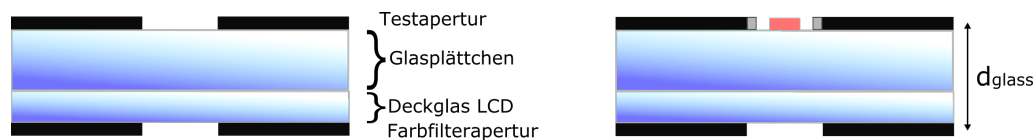


Abbildung 6.21: Vorversuch: Glassubstrat mit optimierter und nicht optimierter Apertur

mit einer „black mask“ beschichtet wurde. Auf der einen Hälfte wurden „klassische“ Aperturöffnungen ohne Optimierungen frei geätzt (vgl. 6.21 (links)) und auf der anderen Hälfte (Abb. rechts) wurden Aperturen mit der Optimierung in Form der Phasen- (rot) und Amplitudenmasken (grau) mit den oben bestimmten Parametern umgesetzt.

Das Glasplättchen wurde anschließend auf die Flüssigkristallanzeige gelegt, welche die bildgebende Einheit der Prototypischen Anzeige 2 bildet. Somit liegen im Fall der nichtoptimierten Aperturen zwei identische Öffnungen übereinander. Die Anordnung entspricht folglich nicht dem finalen Aufbau der Anzeige, bei dem unterhalb der Aperturöffnungen die Barriere mit größerer Öffnungsbreite liegt, sondern dient nur zur Überprüfung des Prinzips der Optimierung.

Es wurde anschließend mit dem Spektrometer im Goniometeraufbau die Abstrahlcharakteristik mit und ohne Optimierung gemessen. Der Fehler der Messdaten liegt, wie in Kapitel 3 beschrieben, bei $\pm 1.75\%$

In Abbildung 6.22 sind die Messdaten der optimierten und nicht optimierten Apertur im Vergleich mit der wellenoptischen und geometrisch optischen Simulation dargestellt. Auf die simulierten Werte wurde ein künstlicher Schwarzwert von 10% addiert.

Es ist zunächst zu erkennen, dass die geometrisch-optische Vorhersage deutlich von der Realität abweicht. Da die obere und die untere Spaltöffnung gleich groß sind

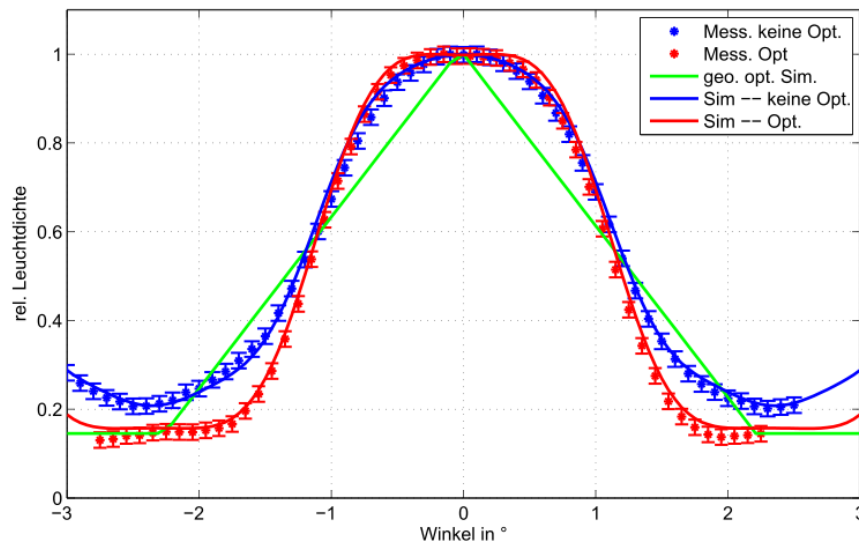


Abbildung 6.22: Vergleich der geometrisch-optisch (grün) und wellen-optisch simulierten Verteilung mit optimierter (rot) und nicht optimierter Aperturöffnung (blau) mit Messwerten optimiert (rot Stern) und nicht optimiert (blau Stern)

entsteht in der geometrisch-optischen Simulation kein Helligkeitsplateau, sondern ein dreiecksförmiger Helligkeitsverlauf. Der gemessene Verlauf weicht hiervon jedoch deutlich ab.

Die roten und blauen Punkte sind die gemessenen Abstrahlcharakteristiken für Aperturöffnungen mit Phasen- und Amplitudenmasken (rot) und ohne Optimierung (blau). Die durchgezogenen Linien in gleicher Farbe stellen die wellenoptische Simulation der Abstrahlcharakteristik dar.

Es ist zu erkennen, dass sowohl die Vorhersage der optimierten als auch der Apertur ohne Phasen- und optimierter Amplitudenmaske gut mit den Messdaten übereinstimmt. Die Übereinstimmung ist im unteren Teil der Flanke und den Ausläufern am größten. Im Bereich des Maximums treten sowohl bei dem optimierten und nicht optimierten Verlauf leichte Abweichungen zwischen Messdaten und Simulation auf, wie sie auch im vorherigen Abschnitt der Erläuterung der Simulationsmethode zu beobachten waren.

Bereits in diesem Vorversuch mit abweichender Geometrie ist gegenüber der finalen Anzeige ein deutlicher Einfluss der optimierten Apertur auf die Abstrahlcharakte-

ristik zu erkennen.

Der Vorversuch bestätigte, dass die Umsetzung der Phasen- und Amplitudenmaske in Übereinstimmung mit der Simulation ist. Die gemessene Abstrahlcharakteristik verhält sich wie erwartet.

6.2.6 Optimierung der Abstrahlcharakteristik der Prototypischen Anzeige 2

Nachdem die Herstellbarkeit der Phasen- und Amplitudenmasken im Vorversuch erfolgreich getestet wurden, folgte die Implementierung in die *Prototypische Anzeige 2*. Die Parameter der Dicke des ITO-Elements und die Breite der weichen Kanten entsprechen den zuvor bestimmten. Der schematische Aufbau der Anzeige ist

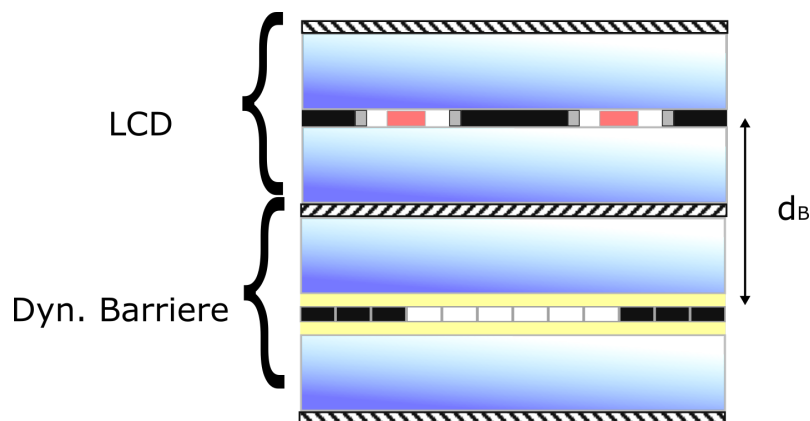


Abbildung 6.23: Schematischer Aufbau der Prototypischen Anzeige 2

in Abbildung 6.23 dargestellt. Die dynamische Barriere liegt unterhalb der Flüssigkristallanzeige (LCD). In die Farbfilteröffnungen (Apertur) der Flüssigkristallanzeige wurden die Phasen- und die optimierte Amplitudenmaske implementiert. Somit stellt die optimierte Apertur die letzte Öffnung dar, bevor die Helligkeitsverteilung im Fernfeld wahrgenommen wird. Gleichzeitig kann die Parallaxebarriere weiterhin dynamisch angepasst werden, da alle Optimierungen nur an den statischen Aperturen des LCDs und nicht der Barriereöffnung selbst stattfinden.

Die geometrischen Daten der Anordnung sind in Tabelle 5.2 zu finden.

6.2.7 Messung der Abstrahlcharakteristik

Die Abstrahlcharakteristik der *Prototypischen Anzeige 2* wurde mit dem Spektrometer im Goniometeraufbau vermessen. In Abbildung 6.24 ist die gemessene Ab-

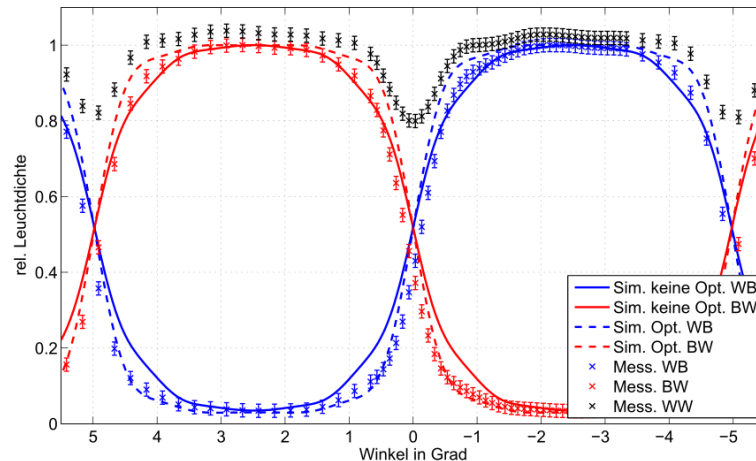


Abbildung 6.24: Nachweis der Funktionsfähigkeit der Optimierung durch Vergleich der Messung der Abstrahlcharakteristik der Prototypischen Anzeige 2 mit Optimierung (stern blau und rot) mit den simulierten Abstrahlcharakteristika optimiert (gestrichelte Linien) und nicht optimiert (durchgängige Linien)

strahlcharakteristik der optimierten Anzeige zusammen mit der wellenoptischen Simulation der Anzeige mit und ohne Adaption dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass die Messung des Verlaufs der Abstrahlcharakteristik für niedrige Leuchtdichten in guter Übereinstimmung mit dem simulierten Helligkeitsverlauf der optimierten Anzeige ist. Auf die simulierten Messdaten wurde kein künstlicher Schwarzwert addiert. Dies bedeutet, dass die gemessene Leuchtdichte in den vermeintlichen Schwarzbereichen fast vollständig durch das Übersprechen benachbarter Barriereöffnungen zu erklären ist.

Im Bereich der Flanke und der maximalen Leuchtdichte treten stärkere Abweichungen zwischen den Messdaten und der Simulation auf, die sich nicht durch Messfehler erklären lassen. Da im Vorversuch mit seiner einfacheren Geometrie keine Abweichungen beobachtet werden konnten, ist zu vermuten, dass der komplexere Aufbau der funktionalen Anzeige zu zusätzlichem Streulicht durch innere Reflexionen führt. Dieser Effekt würde in Bereichen großer Helligkeit, bei denen sich der Verlauf stark

ändert, vermehrt sichtbar, da das nicht gerichtete Streulicht zu einer Glättung des Kurvenverlaufs führt. Ein solches Verhalten ist in der Messung erkennbar, die Vermutung daher plausibel.

Der Leuchtdichteverlauf bei Anzeige von WW zeigt im Vergleich mit der Prototypischen Anzeige 1 mit maximal 20% Helligkeitsvariation einen stärkeren Abfall. Sowohl aus der geometrischen, als auch aus der wellenoptischen Simulation wird diese Variation nicht vorhergesagt. Sie müssen daher Folge von Abweichungen bei der Herstellung sein, z.B. durch gesteigertes Streulicht sein. Die Auswirkungen werden im nächsten Abschnitt behandelt.

Die Messung bestätigt in weiten Teilen die simulierten Verläufe. Mit Hilfe der wellenoptischen Optimierung konnte ein breiteres Helligkeitsplateau geschaffen werden und somit der Helligkeitsverlauf stärker an die optische Zielfunktion angenähert werden.

6.2.8 Ergebnis der wellenoptischen Optimierung

Ziel der wellenoptischen Optimierung war die Verbesserung der Anzeige gegenüber einer Anzeige mit klassischer Apertur und der Prototypischen Anzeige 1.

Die Verbesserung der optimierten Anzeige gegenüber der Anzeige mit klassischer Aperturöffnung zeigt Tabelle 6.2, in der sowohl statische als auch dynamische Größen der Anzeige sowohl für die Simulation mit und ohne Optimierung, ergänzt durch die gemessenen Parameter verglichen werden. In der letzten Spalte sind zum Vergleich die Werte der Prototypischen Anzeige 1 dargestellt.

	Prot. Anzeige 2 Simulation ohne Opt.	Prot. Anzeige 2 Simulation mit Opt.	Prot. Anzeige 2 Messung mit Opt.	Prot. Anzeige 1 Messung
Min. Crosstalk:	3,4%	2,8%	3,1%	4,8%
Max. Stereo- kontrast:	29:1	35:1	30:1	20:1
Breite der Stereozone im idealen Abstand:	34,6 mm	46,9 mm	42,6 mm	29,5 mm
Max. Helligkeits- variation L_{WW} :	-	-	23%	4%
Größe 3D-Stereo- zone ($C_{stereo} > 10 : 1$):		lateral:	± 13 mm (26 mm)*	± 13 mm (26 mm)
		longitudinal:	680-830 mm	660-820 mm
Grenzgeschwindigkeit der lateralen Adaption (Latenz 42 ms)	-	-	200 mm/s	180 mm/s

Max. Helligkeits- sprünge bei lat. Adaption (Simulation)	Kopf- geschwindigkeit in mm/s				
WB	0	0,6%	0,04%	0,1%	0,6%
	100	1,4%	0,2%	1,1%	1,7%
	200	3,1%	1,3%	3,5%	4,7%
	300	7,8%	3,1%	6,3%	10,1%
WW	0	0,2%	0,2%	1,8%	0,15%
	100	0,2%	0,2%	1,8%	0,37%
	200	0,2%	0,2%	2,3%	0,77%
	300	0,2%	0,2%	2,8%	1,8%

Tabelle 6.2: Simulierte und gemessene stereoskopische Parameter der Prototypischen Anzeige 2 im Vergleich mit Prot. Anzeige 1; (*)Barriere adaptiert auf 750 mm Betrachtungsabstand

Der minimale Crosstalk konnte im Vergleich zur Anzeige 1 deutlich auf 3,1% (Messwert) reduziert werden. Der Wert liegt leicht höher als aus der Simulation erwartet wurde, jedoch immer noch niedriger als für eine Anzeige ohne wellenoptische Optimierung. Der Crosstalk für die simulierten Leuchtdichteverteilungen wird ohne eine künstliches Schwarzlevel (L_{BB}) berechnet.

Der maximale Stereokontrast konnte auf 30:1 erhöht werden.

Sehr deutlich wird der Einfluss der Optimierung auf die Breite der Stereozone im idealen Betrachtungsabstand. Diese konnte mit 42,6 mm deutlich gegenüber der Anzeige 1, aber auch der Anzeige 2 ohne Optimierung vergrößert werden. Der Wert wird

wie in Kapitel 3 beschrieben nur aus der Abstrahlcharakteristik bestimmt, gemessen an einem zentralen Punkt auf der Anzeige und bezieht sich somit auf eine Anzeige ohne Abstandsadaption.

Eine Verschlechterung tritt bei der bereits zuvor beschriebenen Darstellung von WW auf. Aus der wellenoptischen Simulation ergeben sich sowohl für die Anzeige mit als auch ohne Optimierung keine Variationen der Helligkeit. Die gemessene Helligkeitsvariation bei Anzeige von WW ist jedoch mit 23% größer als bei der Prototypischen Anzeige 1. Der Grund hierfür muss in Abweichungen bei der Herstellung liegen und bedarf weiterer Untersuchungen.

Die laterale Ausdehnung der 3D-Stereozone ist mit 26 mm unverändert gegenüber der Prot. Anzeige 1, was ein sehr gutes Ergebnis ist, da gegenüber dieser die Anzeigenbreite von 240 mm deutlich über 300 mm vergrößert wurde. Der Wert wurde für eine Adaption der Barriere auf den Betrachtungsabstand von 750 mm bestimmt. Die Diskrepanz zwischen dem Wert der Breite der Stereozone im idealen Betrachtungsabstand und der Größe der 3D-Stereozone lässt sich auf die Abstandsadaptionmethode zurückführen. Während bei der Bestimmung der Breite der Stereozone im idealen Betrachtungsabstand nur ein Messpunkt in die Berechnung eingeht, werden bei der 3D-Stereozone mehrere Messpunkte (mind. 3), verteilt über die gesamte Anzeigenbreite, berücksichtigt. Auf Grund der festen Sprungstellen der Adaptionmethode Halb-Pitch, die auch im idealen Betrachtungsabstand vorhanden sind, kommt es zu Winkelabweichungen an den Schaltstellen, die zu einer Verkleinerung der 3D-Stereozone führen. Würde die Prototypischen Anzeige 2 ohne Adaption auf den Betrachtungsabstand oder mit der Voll-Pitch Methode aufgebaut werden, wäre die laterale Ausdehnung der statischen 3D-Stereozone größer.

Die longitudinale Ausdehnung der statischen 3D-Stereozone ist ungefähr gleich der Prot. Anzeige 1. Bei der Anzeige 2 besteht jedoch, wie im vorherigen Kapitel ausgeführt, die Möglichkeit, die 3D-Stereozone longitudinal zu verschieben.

Bei den dynamischen Anzeigeeigenschaften zeigt sich, dass die Grenzggeschwindigkeit der lateralen Adaption leicht auf 200 m/s erhöht werden konnte. Auch hier gilt anzumerken, dass dies bei einer deutlichen breiteren Anzeige geschehen ist.

Die maximalen Helligkeitssprünge wurden auf Grundlage der gemessenen und simu-

lierten Abstrahlcharakteristika mit dem in Kapitel 4 vorgestellten Modell berechnet. Es zeigt sich hierbei, dass insbesondere die wellenoptische Optimierung zu einem flacheren Helligkeitsplateau führt, wodurch im Vergleich zwischen den simulierten Abstrahlcharakteristika mit und ohne Optimierung bei Anzeige von WB eine deutliche Verbesserung festzustellen ist. Die berechneten Helligkeitssprünge auf Basis der gemessenen Abstrahlcharakteristik fällt höher als die simulierte aus, jedoch niedriger als ohne Optimierung und gegenüber der Prot. Anzeige 1 deutlich reduziert. Dies gilt insbesondere für hohe Kopfgeschwindigkeiten.

Bei der Anzeige von WW werden simulativ sehr niedrige Werte erwartet. Jedoch führt die gemessene Variation des Verlaufs L_{WW} zur höheren Helligkeitssprüngen als bei der Prototypischen Anzeige 1.

Insgesamt zeigt die Auswertung, dass die wellenoptische Optimierung annähernd alle stereoskopischen Parameter deutlich verbessert hat.

6.2.9 Diskussion der wellenoptischen Optimierung

In diesem Kapitel wurde erfolgreich ein Modell präsentiert, das es ermöglicht die Abstrahlcharakteristik einer Anzeige mit Parallaxebarriere wellenoptisch zu simulieren. Die gemessenen Leuchtdichteverläufe zeigen hierbei eine gute Übereinstimmung mit der Simulation.

Das Modell bildet die Grundlage zur Entwicklung einer Methode zur wellenoptischen Optimierung der Abstrahlcharakteristik der Anzeige. Es wurde gezeigt, dass es möglich ist, mit einfachen Strukturen von Phasenelementen und Amplitudenmasken, die in Anzeigeherstellungsprozessen umgesetzt werden können, eine Verbesserung der stereoskopischen Eigenschaften der Anzeige zu erreichen, ohne die Geometrie der Barriere oder der Anzeige ändern zu müssen.

Gegenüber alternativen Modellen [54] kommt das erarbeitete Modell mit weniger Näherungen aus und kann daher individueller eingesetzt werden. Einzig die Fraunhofer-Näherung zur Transformation in das Fernfeld muss bei einer Änderung der Geometrie der Anzeige, z.B. bei Simulation einer neuen Anzeige, kritisch hinterfragt werden, da diese nur für kleine Winkel und somit für paraxiale Strahlen gültig ist.

Bei der Optimierung der Abstrahlcharakteristik beschränkte sich die Auswahl der möglichen Optimierungsstrukturen zunächst auf Elemente mit einfachen Geometri-

en, die in heutigen Herstellungsprozessen leicht umgesetzt werden können. Eine weitere Verbesserung der Abstrahlcharakteristik kann vermutlich erreicht werden, wenn komplexere Strukturen mit beliebiger Transmission und variablen Phasenverschiebungen angewendet werden. Die größten Herausforderungen solcher Strukturen sind hierbei die Herstellung und Implementierung in eine Anzeige.

Die umgesetzte Optimierung in der Prototypischen Anzeige 2 zeigt Verbesserungen aller stereoskopischen Parameter. Der Vergleich der simulierten und der gemessenen Daten zeigt, dass die Verbesserungen sogar noch größer ausfallen könnten, wenn eine andere Adaptionmethode auf den Betrachtungsabstand gewählt würde.

Als einziger Wert hat sich die Helligkeitsvariation bei Anzeige von WW und damit verbunden die Helligkeitssprünge bei WW verschlechtert. Da die Simulation der optimierten und nicht optimierten Helligkeitsverläufe diese Variation nicht zeigen, handelt es sich hierbei nicht um einen Effekt der wellenoptischen Optimierung, sondern um Sekundäreffekte wie Streuung. In einer zukünftigen Entwicklung ist anzustreben diese weiter zu optimieren.

Im weiteren Vorgehen der Entwicklung eines 3D-Kombiinstrumentes gilt es, die in der Prototypischen Anzeige 2 erarbeiteten Verbesserungen in einer neuen Anzeige mit Zielgröße 12,3" umzusetzen. Mit dieser Anzeige müsste im nächsten Schritt die Zielerreichung und Akzeptanz als 3D-Kombiinstrument erneut in einer subjektiven Befragung, zum Beispiel durch einen erneuten Probandenversuch untersucht werden.

6.3 Zusammenfassung Kapitel 6

Der letzte Teil der Arbeit beschäftigte sich mit der **Berechnung der Abstrahlcharakteristik und den Möglichkeiten ihrer Optimierung**.

Bereits die ersten Untersuchungen dieser Arbeit zur Auslegung einer Barrieremaske ergaben, dass die geometrisch-optisch berechnete und die gemessene Leuchtdichteabstrahlung über den Winkel deutlich voneinander abweichen. Es wurde daher ein **wellen-optisches Simulationsmodell** entwickelt, welches es ermöglicht die Abstrahlcharakteristik zu berechnen.

Die vereinfachte Darstellung einer autostereoskopischen Anzeige mit Barrieremaske ist ein System aus zwei Aperturen mit Öffnungsbreiten im Bereich von 20-100 μm

in einem festen Abstand von ungefähr einem Millimeter. Dieses System wird von einer Hintergrundbeleuchtung auf Basis weißer LEDs angestrahlt. Die Hintergrundbeleuchtung stellt physikalisch somit eine polychromare, räumlich inkohärente Leuchtquelle dar. Durch Dekomposition in ebene monochromare Wellen wurde das **Problem auf ein doppeltes Rayleigh-Sommerfeld-Integral zurückgeführt**, welches es zu lösen galt.

Die entwickelte Simulation verwendet zur Lösung des Integrals eine Kombination aus numerischen Methoden der **Fourieroptik**, wie die sogenannte „Angular Wave Spectrum Propagation“ Methode als auch aus analytischen Lösungsmethoden im Fall der Fraunhofer-Näherung. Die resultierende Simulation wurde in Matlab programmiert. Sie hat den Vorteil, dass sie mit wenig Näherungen auskommt, wodurch sie universeller einsetzbar ist, da Änderungen von Simulationsparametern keine Neubewertung der Gültigkeit einer Näherung zur Folge haben.

Der **Vergleich der Simulationsergebnisse** mit Messungen von Anzeigen mit Barrieremasken wies eine sehr gute Übereinstimmung der Leuchtdichteverläufe auf, wodurch bestätigt wurde, dass die Beugung den größten Einfluss auf die Abstrahlcharakteristik hat. **Mit der entwickelten Simulation ist es erstmalig möglich, bereits in einer Frühphase der Entwicklung von autostereoskopischen Anzeigen auf Basis von Barrieremasken auf die spätere Qualität zu schließen, was zuvor nur durch prototypische Anzeigen möglich war.**

Insbesondere bildet die Simulation den Ausgangspunkt der wellenoptischen Optimierung der Abstrahlcharakteristik, welche den letzten Teil der Arbeit bildet. Mit der gewonnenen Erkenntnis, dass der Unterschied zwischen dem geometrisch-optisch simuliertem und gemessenem Verlauf der Abstrahlcharakteristik im Wesentlichen auf die Beugung zurück zu führen ist und dass dieser maßgeblich die Qualität sowohl bei lateraler und longitudinaler Adaption beeinflusst, galt es Möglichkeiten zu Optimierung zu finden.

Durch Einbringen von **phasenverschiebenden und amplitudenverändernden Elementen** in die Anzeige konnte die Abstrahlcharakteristik hin zu einem flacheren Helligkeitsplateau verändert werden. Die Auslegung der eingebrachten Elemente folgte von Anfang der Bedingung, dass eine solche Anzeige auch technisch herge-

stellt werden kann. Es ergaben sich mehrere festzulegenden Parameter der Elemente, welche die Basis eines mehrdimensionalen Optimierungsproblems bildeten. Hierbei wurde eine möglichst flache Abstrahlcharakteristik als Zielvorgabe definiert und die Simulation so oft mit verschiedenen Parametersätzen durchlaufen, bis ein lokales Minimum gefunden wurde. Ein solches Vorgehen ist für Probleme, wie dem „Beamshaping“ mit monochromarer, kohärenter Beleuchtung bekannt. Das **Ergebnis der Simulation** zeigte jedoch, dass die resultierenden Phasen- und Amplitudenmasken auch im vorliegenden Fall einer autostereoskopischen Anzeige mit polychromarer, inkohärenter Beleuchtungsquelle zu einer **Verbesserung der Abstrahlcharakteristik** führen.

Die simulierten Optimierungen wurden in der „**Prototypischen Anzeige 2**“ umgesetzt, welche eine rückwertige Barrieremaske besitzt. Die Phasen- und Amplitudenmasken wurden direkt in die statischen Farbfilter der Flüssigkristallanzeige implementiert, welche die dem Betrachter zugewandte Apertur darstellen. Zudem wurden die zuvor beschriebene „Halbpitch-Methode“ zur Adaption auf variable Betrachtungsabstände in der Anzeige umgesetzt.

Die messtechnischen Untersuchungen bestätigen den **Erfolg der wellen-optischen Optimierung** der Anzeige. Die Leuchtdichte der Abstrahlcharakteristik fällt erst bei höheren Winkeln ab, wodurch ein größerer Winkelbereich entsteht, in dem die Leuchtdichte nur gering variiert. Dies führt zu einer Steigerung der Breite der Stereozone der Anzeige um mehr als ein Drittel, was die Fehlertoleranz eines Headtrackingsystems verbessert. Die Grenzggeschwindigkeit, ab der bei lateraler Adaption Störungen sichtbar sind, konnte zu höheren Geschwindigkeiten verschoben werden und liegt mit 200 mm/s in einem Bereich, der im Fahrzeug selten auftritt. **Durch die Implementierung der Abstandsadaptionsmethode „Halbpitch“ in die Prototypische Anzeige 2 konnte erfolgreich ein Betrachtungsabstandsreich von 610-950 mm realisiert werden** und dies bei einer Steigerung der Anzeigenbreite auf die Zielgröße von rund 300 mm. Möglich wurde dieses, da die wellen-optische Optimierung die Helligkeitssprünge an den Schaltstellen im Betrachtungsabstandsbereich für typische Kopfgeschwindigkeiten auf Werte unterhalb von 1% der Leuchtdichte reduzierte und so diese vom Betrachter nicht mehr wahrgenom-

men werden.

Die „**Prototypische Anzeige 2**“ bildet den **Höhepunkt der Arbeit**, da sie alle zuvor entwickelten Methoden und Erkenntnisse beinhaltet. Zwar behilft sich die Anzeige noch durch einen Hilfsaufbau, der mehrere kleinere Anzeigen zu einer Großen kombiniert, dennoch stellt sie den Nachweis dar, dass es möglich ist, mit Methoden der lateralen Adaption, der Adaption auf den Betrachtungsabstand und der wellen-optischen Optimierung, eine Anzeige in Zielgröße herzustellen, welche die anfangs gestellten Anforderungen zu einem großen Teil erfüllen kann.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Ausgangspunkt dieser Arbeit war das erklärte Ziel die **autostereoskopische Anzeigetechnologie** so weiterzuentwickeln, dass erstmalig ein Einsatz **im Automobil** möglich wird. Bisher bestehende Ansätze für autostereoskopische Anzeigen hatten weder dieses Ziel, noch erfüllten sie die notwendigen Anforderungen, sodass keine bekannte Literatur oder dokumentierte Erfahrungen existierten, welche als Orientierung hätten dienen können. Von Anfang an stand dabei fest, dass auf Grund der individuellen Wahrnehmung das Erreichen des Ziels einer hochwertigen Anzeige nicht ausschließlich objektiv gemessen werden kann, sondern auch immer unter Berücksichtigung der menschlichen Wahrnehmung subjektiv bewertet werden muss.

Das Vorgehen wurde im Modell einer autostereoskopischen Anzeige und deren Entwicklungsprozess beschrieben und bildete den roten Faden der Arbeit. Dem Modell folgend wurden zunächst die qualitativen Anforderungen definiert und passende Technologien begutachtet. Als geeignetster Ansatz für die Zielsetzung einer Anzeige im Automobil wurden **dynamische Parallaxebarrieren** gewählt.

Im Anschluss wurde die **optische Zielfunktion** aufgestellt, welche die optischen Eigenschaften beschreibt die erfüllt werden müssen, um eine ungestörte Wahrnehmung im Falle eines Betrachters in Ruhe und in Bewegung zu garantieren. Mit der Definition der **Anzeigefunktion** durch das Pixellayout der Anzeige ergab sich das zu lösende inverse optische Problem, wie eine **Abbildungsfunktion** aussehen muss, um am Ort des Betrachters die optische Zielfunktion zu erfüllen.

Um das Problem zu lösen, wurde im ersten Schritt die Zusammenhänge zwischen der Öffnung der Barrieremaske und dem Helligkeitsverlauf in der Ebene des Betrachters in geometrisch-optischer Näherung hergeleitet. Angewendet auf die zuvor definierte optische Zielfunktion zeigte es sich, dass keine Lösung zur Auslegung der Barriere existiert, bei der die Pixelgröße und somit die Gesamthelligkeit nicht deutlich eingeschränkt werden muss. Es wurde daher ein Kompromiss getroffen, bei der das resultierende Helligkeitsplateau in seiner horizontalen Ausdehnung geringer als die optische Zielfunktion ist. Dieser wurde in der „**Prototypischen Anzeige 1**“ exem-

paralisch umgesetzt und im Anschluss messtechnisch untersucht. Die Messmethoden insbesondere zum dynamischen Verhalten, wurden hierfür erstmalig vom Autor erarbeitet. Die wichtigste Erkenntnis aus den Ergebnissen war, dass der gemessene Helligkeitsverlauf auf Grund von Beugungseffekten deutlich vom geometrisch-optisch simulierten abweicht. Die Ausdehnung der Stereozone lag sowohl in lateraler als auch in longitudinaler Richtung unter der Zielvorgabe, wodurch bei schnellen Kopfbewegungen messbare Helligkeitsschwankungen auftraten.

Um die quantitativen Messergebnisse in Bezug zur qualitativen menschlichen Wahrnehmung zu setzen wurde ein **Probandenversuch** in einem dynamischen Fahr-simulator durchgeführt. Hierbei bewerteten 78% der Probanden die Prototypische Anzeige 1 mit gut oder sehr gut und bestätigten damit die Wahl des Technologieansatzes, jedoch wurden von 21% der Probanden Störungen in Form von Unschärfen und Helligkeitsschwankungen beobachtet. Am stärksten wurden Helligkeitsschwankungen als „nicht akzeptabel“ bewertet. Mit dem Probandenversuch konnte erfolgreich ein Bezug von objektiven, quantitativen Messergebnissen mit der subjektiven Bewertung hergestellt werden. Als ein weiterer, wichtiger Verbesserungspunkt wurde die Vergrößerung der **3D-Stereozone** in longitudinaler Ausdehnung identifiziert.

Einen Schwerpunkt der Arbeit bildete daher die Entwicklung von **Methoden zur Erweiterung des longitudinalen Betrachtungsbereichs**. Bei dynamischen Parallaxebarrieren ist die initiale Ausdehnung durch die Größe der Anzeige und den Barriereparametern vorgegeben, welche nicht verändert werden können. Eine größere Abdeckung ist daher nur durch eine Adaption auf den Betrachtungsabstand möglich. Es wurden drei Methoden entwickelt, welche die 3D-Stereozone auf den Betrachtungsabstand anpassen, in dem sie den Pitch der Barrieremaske an sogenannten Schaltstellen diskret anpassen. Die drei **Methoden Voll-, Halb- und fixer Vollpitch** unterscheiden sich in der Lage der Schaltstellen und der Sprungweite der Winkeländerung der Abstrahlcharakteristik an dieser. Die zwei erstgenannten Methoden wurden teil- und vollfunktional in prototypischen Anzeigen umgesetzt, die letzte Methode nur simulativ untersucht.

Es wurde hierfür eine umfangreiche **Simulation** in Matlab programmiert, welche es ermöglicht die zu erwartende optische Qualität und mögliche Störungen für die drei

Methoden zu simulieren und die zuvor gemachten Messungen der Prototypen auf der gemeinsamen Basis einer Anzeige in Zielgröße und Auflösung zu vergleichen.

Die Ergebnisse zeigten klar, dass alle drei Methoden erfolgreich den Betrachtungsbereich in longitudinaler Richtung erweitern. Bei allen Methoden können jedoch Störungen in Form von Helligkeitssprüngen an den Schaltstellen oder einem gesteigerten Übersprechen auftreten. Der Grad der Ausprägung der Störungen unterschied sich jedoch zwischen den Methoden. Für die angestrebte Anzeigengröße zeigte die Halb-Pitch Methode in der Gesamtbewertung das beste Ergebnis. Die Helligkeitsvariationen an den Schaltstellen sind bei dieser Methode am geringsten und treten erst bei schnelleren Kopfbewegungen auf. Ein leicht höheres Übersprechen gegenüber der Voll-Pitch Methode kann durch angepasste Inhalte kompensiert werden, sodass es nicht mehr als störend wahrgenommen wird. Die longitudinale Ausdehnung des Betrachtungsbereich konnte von 150 mm ohne Adaption auf 400 mm mit Betrachtungsabstandsadaption erweitert werden. Damit wurde ein wichtiges Ziel der Arbeit erreicht. Als Verbesserungspotenzial ergab sich, dass eine Optimierung der Abstrahlcharakteristik durch eine verstärkte Ausprägung eines Helligkeitsplateaus die Helligkeitsvariationen weiter minimieren kann.

Zu Beginn der Arbeit wurde bereits festgestellt, dass die Abstrahlcharakteristik auf Grund von **Beugungseffekten** von der geometrisch-optisch berechneten Charakteristik abweicht. Der letzte Teil der Arbeit beschäftigte sich daher mit der **Berechnung der wellen-optischen Abstrahlcharakteristik und deren Optimierung** hin zur Ausbildung eines breiteren Helligkeitsplateaus.

Hierzu wurde ein Simulationsmodell einer autostereoskopischen Anzeige erstellt, bei dem die Barrieremaske und die Farbfilter auf zwei Aperturen in einem definierten Abstand reduziert werden, welche durch eine polychromare, räumlich inkohärente Lichtquelle beleuchtet werden. Um die Lichtpropagation durch die zwei hintereinanderliegenden Aperturen zu berechnen, muss ein doppeltes Rayleigh-Sommerfeld-Integral gelöst werden. Die entwickelte Simulation verwendet hierfür eine Kombination aus Methoden der Fourieroptik und die Vereinfachung der Fraunhofernäherung, wodurch das Modell insgesamt mit sehr wenigen Näherungen auskommt und dennoch effizient berechnet werden kann. Der Vergleich der Simulation mit Messergebnissen

zeigte, dass die Methode die gemessenen Helligkeitsverläufe sehr genau vorhersagen konnte. Verbleibende geringe Abweichungen werden auf Sekundäreffekte, wie Streuung zugeführt.

Mit der erfolgreichen Entwicklung einer Methode zur Vorhersage der optischen Eigenschaften einer autostereoskopischen Anzeige wurde die Möglichkeit geschaffen die Abstrahlcharakteristik zu optimieren, in dem die Auswirkungen von amplitudenveränderten und phasen-schiebenden Elementen in der oberen Apertur (Farbfilter) effizient untersucht werden konnten.

Ziel der **Optimierung** war die Abstrahlcharakteristik der optischen Zielfunktion möglichst anzunähern, mit der Nebenbedingung, dass die eingebrachten Elemente in einem Anzeigenherstellungsprozess auch produktionstechnisch umgesetzt werden können. Durch Parametervariation der Phasenverschiebung, der Transmission und der Breite der Elemente wurde ein Optimum bestimmt. Die Optimierung wurde final in der „Prototypischen Anzeige 2“ exemplarisch umgesetzt.

Der Vergleich der Simulations- und Messergebnisse zeigte, dass gegenüber einer Anzeige ohne Optimierung die optische Qualität in Form des Crosstalks, der Breite der Stereozone und der Helligkeitsvariationen bei Adaption deutlich verbessert werden konnte. Die entwickelte **wellenoptische Optimierung** ist somit ein erfolgreiches Werkzeug zur Verbesserung der Abstrahlcharakteristik, was wiederum die Qualität bei den zuvor beschriebenen Methoden der lateralen- und longitudinalen Adaption auf den Betrachter verbessert. Die „**Prototypische Anzeige 2**“ stellt als Ergebnis den Kernpunkt der Arbeit dar, da diese alle entwickelten Methoden der Abstands-adaption und der wellenoptischen Optimierung beinhaltet. Sie bildet den Nachweis, dass das gesetzte Ziel der Entwicklung einer autostereoskopischen Anzeige für den Einsatz im Automobil von der Idee bis zum Prototyp erfolgreich erfüllt wurde. Die dabei entwickelten Messmethoden und Simulationen sind bis heute im Einsatz.

Der Autor ist sehr erfreut an dieser Stelle mitteilen zu können, dass die in dieser Arbeit gemachten Fortschritte zu der abschließenden internen Bewertung führte, dass nun ein Ansatz existiert, der es realistisch ermöglicht eine autostereoskopische Anzeige ins Automobil zu bringen und die Verantwortung für dieses Projekt dem Autor übertragen wurde.

8. Glossar

Formelzeichen	Bedeutung
L_{WB}	Eindimensionaler, horizontaler Verlauf der Leuchtdichte in einer Ebene parallel zum Betrachter bei Anzeige eines weißen Bildes für die linke Ansicht und eines schwarzen Bildes für die rechte Ansicht.
L_{BW}	wie Definition von L_{WB} , nur bei Anzeige eines schwarzen Bildes für die linke Ansicht und eines weißen Bildes für die rechte Ansicht.
L_{BB}	wie Definition von L_{WB} , nur bei Anzeige eines schwarzen Bildes für die linke Ansicht und eines schwarzen Bildes für die rechte Ansicht.
L_{WW}	wie Definition von L_{WB} , nur bei Anzeige eines weißen Bildes für die linke Ansicht und eines weißen Bildes für die rechte Ansicht.
$XT_L(\varphi)$	Crosstalk der linken Ansicht wahrgenommen unter dem Winkel φ
$XT_R(\varphi)$	Crosstalk der rechten Ansicht wahrgenommen unter dem Winkel φ
$C_L(\varphi)$	Stereokontrast der linken Ansicht wahrgenommen unter dem Winkel φ
$C_R(\varphi)$	Stereokontrast der rechten Ansicht wahrgenommen unter dem Winkel φ
w_D	Breite eines Subpixels der Anzeige
p_D	Pixelpitch der Anzeige
p_B	Pixelpitch der Barrieremaske
w_S	Breite des Schwarzbereichs zwischen zwei Subpixeln eines Pixels

w_B	Breite der Barriereöffnung
d_B	Abstand der Barriere zur Anzeige
d_A	Mittlerer Interokularer Augenabstand mit Wert 62 mm
z_i	Idealer Betrachtungsabstand
$p_{D,sub}$	Subpixelpitch der Anzeige
$s_z(k)$	Verschiebung des Zentrum der Barriereöffnung gegenüber dem darunterliegenden Subpixelpaars an der Barriereöffnung k , im Abstand z
g_m	Verschiebungsgeraden, welche mögliche Verschiebungen bei der Abstandsadaption beschreiben
h_z	Verschiebungsfunktionen der Abstandsadaptionmethode für den Betrachtungsabstand z

Literaturverzeichnis

- [1] K. Krüger, *Nutzen und Grenzen von 3D-Anzeigen in Fahrzeugen: Dissertation*, 2007.
- [2] Nora Broy, *STEREOSCOPIIC 3D USER INTERFACES: Exploring the Potentials and Risks of 3D Displays in Cars: Dissertation*, 2016.
- [3] “Nintendo 3DS-Familie,” 09.05.2015. [Online]. Available: <https://www.nintendo.de/Nintendo-3DS-Familie/Nintendo-3DS-Familie-94560.html>
- [4] D. Geldner, *Untersuchung von stereoskopischen Displaytechnologien für das Rear-Seat-Entertainment in Fahrzeugen: Bachelorthesis*, 2011.
- [5] Mercedes Benz, “Concept F 125! Der Mercedes-Benz F 125!” [Online]. Available: <https://www.mercedes-benz.com/de/mercedes-benz/innovation/concept-f-125-video/>
- [6] ISO, “Straßenfahrzeuge - Funktionale Sicherheit,” 2011-11. [Online]. Available: <http://www.beuth.de/de/norm/iso-26262-1/148146179>
- [7] —, “Straßenfahrzeuge - Ergonomische Aspekte von Fahrerinformations- und Assistenzsystemen - Anforderungen und Bewertungsmethoden der visuellen Informationsdarstellung im Fahrzeug (ISO 15008:2009),” 2011-06. [Online]. Available: <http://www.beuth.de/de/norm/din-en-iso-15008/124749019>
- [8] Society of Automotive Engineers, “Standard Metrology for Vehicular Displays,” 2007-04-23. [Online]. Available: <http://www.beuth.de/de/norm/sae-j-1757-1/99843044>
- [9] —, “Motor Vehicles Drivers’ Eye Locations,” 1965-11. [Online]. Available: http://standards.sae.org/j941_201003/
- [10] Eyecare trust, “3D Vision,” 2012. [Online]. Available: http://www.eyecaretrust.org.uk/view.php?item_id=566

- [11] B. Epping, Fischer, Ernst Peter Fischer, J. Rauch, H. Wahl, and S. Wedlich, “Die Erforschung der menschlichen Sinne: Funktionen und Leistungen, Störungen und Therapien,” Bonn, Berlin. [Online]. Available: http://www.gesundheitsforschung-bmbf.de/_media/Sinnesforschung-doppelseitig.pdf
- [12] H. Tauer, *Stereo 3D: Grundlagen, Technik und Bildgestaltung*, 1st ed. Berlin: Schiele & Schön, 2010.
- [13] W. Graumann, Ed., *Sinnessysteme, Haut, ZNS, periphere Leitungsbahnen: Mit 38 Tabellen*, ser. CompactLehrbuch Anatomie. Stuttgart [u.a.]: Schattauer, 2005, vol. 4.
- [14] C. Tyler, “The Horopter and Binocular Fusion,” in *Binocular Vision*.
- [15] C. R. Ponce and R. T. Born, “Stereopsis,” *Current biology : CB*, vol. 18, no. 18, pp. R845–50, 2008.
- [16] U.S. Department of the Interior - U.S. Geological Survey - Geology Discipline, “Anaglyph of Saguaro National Park at dusk; Kit Peak in the distance, behind Avra Valley. Numerous cacti present in the foreground.” [Online]. Available: <http://3dparks.wr.usgs.gov/saguaro/html/w51.html>
- [17] S. S. Bhattacharyya, *Handbook of signal processing systems*. New York, NY: Springer, 2013.
- [18] O. Schreer, P. Kauff, and T. Sikora, *3D videocommunication: Algorithms, concepts, and real-time systems in human centred communication*. Chichester, England and Hoboken, NJ: Wiley, 2005.
- [19] J. Geng, “Three-dimensional display technologies,” *Advances in optics and photonics*, vol. 5, no. 4, pp. 456–535, 2013.
- [20] S. Reichelt, R. Häussler, G. Fütterer, N. Leister, B. Javidi, J.-Y. Son, J. T. Thomas, and D. D. Desjardins, “<title>Depth cues in human visual perception and their realization in 3D displays</title>,” in *SPIE Defense, Security, and Sensing*, ser. SPIE Proceedings. SPIE, 2010, pp. 76 900B–76 900B–12.

- [21] E. Hecht, *Optik*, 3rd ed. München [u.a.]: Oldenbourg, 2001.
- [22] S. Reichelt, R. Häussler, G. Fütterer, N. Leister, H. Kato, N. Usukura, and Y. Kanbayashi, “Full-range, complex spatial light modulator for real-time holography,” *Optics letters*, vol. 37, no. 11, pp. 1955–1957, 2012.
- [23] K. Maeno, N. Fukaya, O. Nishikawa, K. Sato, T. Honda, and S. A. Benton, “<title>Electro-holographic display using 15mega pixels LCD</title>,” in *Electronic Imaging: Science & Technology*, ser. SPIE Proceedings. SPIE, 1996, pp. 15–23.
- [24] C. W. Slinger, C. D. Cameron, S. D. Coomber, R. J. Miller, D. A. Payne, A. P. Smith, M. G. Smith, M. Stanley, P. J. Watson, T. H. Jeong, and H. I. Bjelkhagen, “<title>Recent developments in computer-generated holography: toward a practical electroholography system for interactive 3D visualization</title>,” in *Electronic Imaging 2004*, ser. SPIE Proceedings. SPIE, 2004, pp. 27–41.
- [25] A. Schwerdtner, R. Häussler, N. Leister, H. I. Bjelkhagen, and R. K. Kostuk, “<title>Large holographic displays for real-time applications</title>,” in *Integrated Optoelectronic Devices 2008*, ser. SPIE Proceedings. SPIE, 2008, pp. 69 120T–69 120T–8.
- [26] S. Shimada, T. Kimura, M. Kakehata, and F. Sasaki, “Three Dimensional Images in the Air: Visualization of ”real 3D images” using laser plasma: Translation of AIST press release on February 7, 2006,” 2006. [Online]. Available: http://www.aist.go.jp/aist_e/latest_research/2006/20060210/20060210.html
- [27] F. Teubl, C. S. Kurashima, M. C. Cabral, R. D. Lopes, J. C. Anacleto, M. K. Zuffo, and S. Fels, “Spheree: An interactive perspective-corrected spherical 3D display,” in *2014 3DTV-Conference: The True Vision - Capture, Transmission and Display of 3D Video (3DTV-CON 2014)*, pp. 1–4.
- [28] “Holus: An Interactive, Holographic System,” 2014. [Online]. Available: <http://www.hplustech.com/#home>

- [29] R. Hartwig, "Vorrichtung zur dreidimensionalen Abbildung in einem zylindersymmetrischen Abbildungsraum," Patent DE patent2 622 802 C2, 1983.
- [30] "PureDepth® | PureDepth.com." [Online]. Available: <http://www.puredepth.com/>
- [31] G. Lippmann, "La Photographie integrale," *Comptes Rendus, Academies des Sciences*, no. 146, pp. 446–451, 1908.
- [32] H. Arimoto and B. Javidi, "Integral three-dimensional imaging with digital reconstruction," *Optics Letters*, vol. 26, no. 3, p. 157, 2001.
- [33] H. E. Ives, "Optical properties of a Lippman lenticulated sheet," *Journal of the Optical Society of America*, vol. 21, no. 3, p. 171, 1931.
- [34] "55ZL2G: Produktinformation." [Online]. Available: <http://www.toshiba.de/discontinued-products/55zl2g/>
- [35] C. Wheatstone, "Contributions to the Physiology of Vision.—Part the First. On some remarkable, and hitherto unobserved, Phenomena of Binocular Vision," in *The Scientific Papers of Sir Charles Wheatstone*, C. Wheatstone, Ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2011, pp. 225–283.
- [36] "INFITEC-Excellence in 3D." [Online]. Available: <http://www.infitec.net/index.php/de/>
- [37] D. E. Roberts, "History of lenticular and related autostereoscopic methods," 2003.
- [38] D. K. G. de Boer, M. G. H. Hiddink, M. Sluijter, O. H. Willemsen, and S. T. de Zwart, "<title>Switchable lenticular based 2D/3D displays</title>," in *Electronic Imaging 2007*, ser. SPIE Proceedings, A. J. Woods, N. A. Dodgson, J. O. Merritt, M. T. Bolas, and I. E. McDowall, Eds. SPIE, 2007, pp. 64 900R–64 900R–8.

- [39] Krijn, Marcel P. C. M., de Zwart, Siebe T., de Boer, Dick K. G., O. H. Willemssen, and M. Sluijter, “2-D/3-D displays based on switchable lenticulars,” *Journal of the Society for Information Display*, vol. 16, no. 8, p. 847, 2008.
- [40] D. Fattal, Z. Peng, T. Tran, S. Vo, M. Fiorentino, J. Brug, and R. G. Beausoleil, “A multi-directional backlight for a wide-angle, glasses-free three-dimensional display,” *Nature*, vol. 495, no. 7441, pp. 348–351, 2013.
- [41] S. E. Brigham and J. Schultz, “16.5: Directional Backlight Timing Requirements for Full Resolution Autostereoscopic 3D Displays,” *SID Symposium Digest of Technical Papers*, vol. 41, no. 1, p. 226, 2010.
- [42] N. A. Dodgson, A. J. Woods, J. O. Merritt, S. A. Benton, and M. T. Bolas, “<title>Analysis of the viewing zone of multiview autostereoscopic displays</title>,” in *Electronic Imaging 2002*, ser. SPIE Proceedings. SPIE, 2002, pp. 254–265.
- [43] Y. Takaki and N. Nago, “Multi-projection of lenticular displays to construct a 256-view super multi-view display,” *Optics express*, vol. 18, no. 9, pp. 8824–8835, 2010.
- [44] M. Salmimaa and T. Järvenpää, “3-D crosstalk and luminance uniformity from angular luminance profiles of multiview autostereoscopic 3-D displays,” *Journal of the Society for Information Display*, vol. 16, no. 10, p. 1033, 2008.
- [45] P. Surman, R. S. Brar, I. Sexton, and K. Hopf, “MUTED and HELIUM3D autostereoscopic displays,” in *2010 IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME)*, pp. 1594–1599.
- [46] International Committee for Display Meterology, “Information Display Measurement Standard,” 01.06.2012. [Online]. Available: <http://www.icdm-sid.org/>
- [47] A. J. Woods, “How are Crosstalk and Ghosting defined in the Stereoscopic Literature?” in *IS&T/SPIE Electronic Imaging*, ser. SPIE Proceedings. SPIE, 2011, pp. 78 630Z–78 630Z–12.

- [48] —, “Understanding Crosstalk in Stereoscopic Displays: Keynote Presentation at 3DSA (Three-Dimensional Systems and Applications) conference, Tokyo, Japan 19-12 Mai 2010,” 2010.
- [49] A. J. Woods, C. R. Harris, N. S. Holliman, and N. A. Dodgson, “<title>Comparing levels of crosstalk with red/cyan, blue/yellow, and green/magenta anaglyph 3D glasses</title>,” in *IS&T/SPIE Electronic Imaging*, ser. SPIE Proceedings. SPIE, 2010, pp. 75 240Q–75 240Q–12.
- [50] Y.-M. Chu, K.-W. Chien, H.-P. D. Shieh, J.-M. Chang, A. Hu, Y.-C. Shiu, and V. Yang, “3-D mobile display based on dual-directional light guides with a fast-switching liquid-crystal panel,” *Journal of the Society for Information Display*, vol. 13, no. 10, p. 875, 2005.
- [51] H. Hong, J. Jang, D. Lee, M. Lim, and H. Shin, “Analysis of angular dependence of 3-D technology using polarized eyeglasses,” *Journal of the Society for Information Display*, vol. 18, no. 1, p. 8, 2010.
- [52] S. Pala, R. Stevens, P. Surman, A. J. Woods, N. A. Dodgson, J. O. Merritt, M. T. Bolas, and I. E. McDowall, “<title>Optical cross-talk and visual comfort of a stereoscopic display used in a real-time application</title>,” in *Electronic Imaging 2007*, ser. SPIE Proceedings. SPIE, 2007, pp. 649 011–649 011–12.
- [53] J.-C. Liou, K. Lee, F.-G. Tseng, J.-F. Huang, W.-T. Yen, W.-L. Hsu, A. J. Woods, N. S. Holliman, and J. O. Merritt, “<title>Shutter glasses stereo LCD with a dynamic backlight</title>,” in *IS&T/SPIE Electronic Imaging*, ser. SPIE Proceedings. SPIE, 2009, pp. 72 370X–72 370X–8.
- [54] D. J. Montgomery, G. J. Woodgate, A. M. S. Jacobs, J. Harrold, D. Ezra, A. J. Woods, M. T. Bolas, J. O. Merritt, and S. A. Benton, “Analysis of the performance of a flat panel display system convertible between 2D and autostereoscopic 3D modes,” in *Photonics West 2001*, pp. 148–159.
- [55] L. Lipton, D. F. McAllister, and W. E. Robbins, “<title>Factors Affecting “Ghosting” In Time-Multiplexed Piano-Stereoscopic Crt Display Sys-

- tems</title>,” in *OE LASE’87 and EO Imaging Symp (January 1987, Los Angeles)*, ser. SPIE Proceedings. SPIE, 1987, pp. 75–78.
- [56] R. Kaptein and I. Heynderickx, “32.2: Effect of Crosstalk in Multi-View Autostereoscopic 3D Displays on Perceived Image Quality,” *SID Symposium Digest of Technical Papers*, vol. 38, no. 1, pp. 1220–1223, 2007.
- [57] K. Ukai and P. A. Howarth, “Visual fatigue caused by viewing stereoscopic motion images: Background, theories, and observations,” *Displays*, vol. 29, no. 2, pp. 106–116, 2008.
- [58] L. Chen, Y. Tu, W. Liu, Q. Li, K. Teunissen, and I. Heynderickx, “73.4: Investigation of Crosstalk in a 2-View 3D Display,” *SID Symposium Digest of Technical Papers*, vol. 39, no. 1, p. 1138, 2008.
- [59] L. Wang, K. Teunissen, Y. Tu, L. Chen, P. Zhang, T. Zhang, and I. Heynderickx, “Crosstalk Evaluation in Stereoscopic Displays,” *Journal of Display Technology*, vol. 7, no. 4, pp. 208–214, 2011.
- [60] S. Pastoor, “Human factors of 3D imaging: results of recent research at Heinrich-Hertz-Institut Berlin,” in *Proc. IDW*, vol. 95, 1995, pp. 69–72.
- [61] J. S. Lipscomb and W. L. Wooten, “<title>Reducing crosstalk between stereoscopic views</title>,” in *IS&T/SPIE 1994 International Symposium on Electronic Imaging: Science and Technology*, ser. SPIE Proceedings, S. S. Fisher, J. O. Merritt, and M. T. Bolas, Eds. SPIE, 1994, pp. 92–96.
- [62] J. Konrad, B. Lacotte, and E. Dubois, “Cancellation of image crosstalk in time-sequential displays of stereoscopic video,” *IEEE transactions on image processing : a publication of the IEEE Signal Processing Society*, vol. 9, no. 5, pp. 897–908, 2000.
- [63] N. A. Dodgson, “<title>Variation and extrema of human interpupillary distance</title>,” in *Electronic Imaging 2004*, ser. SPIE Proceedings, A. J. Woods, J. O. Merritt, S. A. Benton, and M. T. Bolas, Eds. SPIE, 2004, pp. 36–46.

- [64] G. J. Woodgate, D. Ezra, J. Harrold, N. S. Holliman, G. R. Jones, and R. R. Moseley, "Autostereoscopic 3D display systems with observer tracking," *Signal Processing: Image Communication*, vol. 14, no. 1-2, pp. 131–145, 1998.
- [65] "Geschichte der LCDs - M - Das Entdeckermagazin," online, 11.05.2009. [Online]. Available: <http://www.magazin.emerck/de/Kultur/LCD/Fluessigkristalle1.html>
- [66] "SPLITVIEW - Mercedes-Benz Deutschland." [Online]. Available: http://m.mercedes-benz.de/de_DE/splitview/detail.html
- [67] G. Goos, J. Hartmanis, J. van Leeuwen, A. Heyden, G. Sparr, M. Nielsen, and P. Johansen, Eds., *Computer Vision — ECCV 2002*, ser. Lecture Notes in Computer Science. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2002.
- [68] R. Hartley and A. Zisserman, *Multiple view geometry in computer vision*, 2nd ed. Cambridge, UK and New York: Cambridge University Press, 2003.
- [69] D. G. Lowe, "Object recognition from local scale-invariant features," in *Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision*, pp. 1150–1157 vol.2.
- [70] P. V. C. Hough, "Method and means for recognizing complex patterns," Patent, 1962.
- [71] Seeing Machines, "FaceAPI Technical Specification."
- [72] G. T. Fechner, *Elemente der Psychophysik*. Leipzig: Breitkopf und Härtel, 1860.
- [73] P. Boher, T. Leroux, T. Bignon, and V. Collomb-Patton, "<title>A new way to characterize autostereoscopic 3D displays using Fourier optics instrument</title>," in *IS&T/SPIE Electronic Imaging*, ser. SPIE Proceedings, A. J. Woods, N. S. Holliman, and J. O. Merritt, Eds. SPIE, 2009, pp. 72370Z–72370Z–12.

- [74] A. J. Woods, N. S. Holliman, G. E. Favalora, S. Jurk, B. Duckstein, S. Renault, M. Kuhlmeier, R. de La Barré, and T. Ebner, “Enhancing multi-view autostereoscopic displays by viewing distance control (VDC),” in *IS&T/SPIE Electronic Imaging*, ser. SPIE Proceedings. SPIE, 2014, p. 90111C.
- [75] D. Demus, *Handbook of liquid crystals*. Weinheim and New York: Wiley-VCH, 1998.
- [76] A. Gittel, “Abstandsproblematik bei autostereoskopischen Displays im Automotiv-Bereich,” Masterarbeit, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, Münster, 7.03.2013.
- [77] A. Valberg, *Light vision color*. Hoboken, N.J.: John Wiley & Sons, 2005.
- [78] A. Sommerfeld, *Lectures on theoretical physics*. New York: Academic Press, 1954.
- [79] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier optics*, 3rd ed. Englewood, Colo.: Roberts & Co, 2005.
- [80] Veerman, Jan A. C., J. J. Rusch, and H. P. Urbach, “Calculation of the Rayleigh-Sommerfeld diffraction integral by exact integration of the fast oscillating factor,” *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 22, no. 4, p. 636, 2005.
- [81] F. Shen and A. Wang, “Fast-Fourier-transform based numerical integration method for the Rayleigh-Sommerfeld diffraction formula,” *Applied Optics*, vol. 45, no. 6, p. 1102, 2006. [Online]. Available: http://www.opticsinfobase.org/DirectPDFAccess/CCA8A073-CF14-CCF4-CEC0D8598A83CA70_87971/ao-45-6-1102.pdf?da=1&id=87971&seq=0&mobile=no
- [82] D. Mas, J. Garcia, C. Ferreira, L. M. Bernardo, and F. Marinho, “Fast algorithms for free-space diffraction patterns calculation,” *Optics Communications*, vol. 164, no. 4-6, pp. 233–245, 1999.
- [83] OEM, “Numerical calculation of near field scalar diffraction using angular spectrum of plane waves theory and FFT,” 12.08.2009. [Online]. Available: <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1002/1002.1999.pdf>

- [84] J. A. Ratcliffe, "Some Aspects of Diffraction Theory and their Application to the Ionosphere," *Reports on Progress in Physics*, vol. 19, no. 1, p. 188, 1956. [Online]. Available: <http://stacks.iop.org/0034-4885/19/i=1/a=306>

Abbildungsverzeichnis

1.1	Systematische Darstellung einer autostereoskopischen Anzeige (rechts im Bild) und deren Entwicklungsprozess (links im Bild)	15
1.2	Interieur einer Mercedes S-Klasse (BR222) mit Kombiinstrument (links) und Zentraldisplay (rechts)	17
1.3	Technische Limitation bei der Realisierung der Abbildungsfunktion führen zu der Notwendigkeit die Anzeige- und Abbildungsfunktion zu modifizieren	22
2.1	Anzeigekonzept Forschungsfahrzeug F125! mit 3D-Kombiinstrument, Zentraldisplay mit gekrümmter Oberfläche und Entertainment Anzeige	26
2.2	Schematische Darstellung des stereoskopischer Betrachtungsbereich im Fahrzeug und der SAE Augellipse. Die Augellipse wurde auf den Augenmittelpunkt umgerechnet.	29
2.3	Prinzip der räumlichen Wahrnehmung	32
2.4	Erzeugung künstlicher Tiefe; (links) Halbbilder mit positiver Disparität; (mitte) Halbbilder ohne Disparität; (rechts) Halbbilder mit negativer Disparität	35
2.5	Die Disparität im linken und rechten Halbbild mit nimmt kontinuierlich mit der Entfernung der dargestellten Objekte zu [16]	36
2.6	Konzept 1 (links) und Konzept 2 (rechts) von erstellten Inhalten für ein 3D-Kombiinstrument	37
2.7	Klassifikation räumlicher Anzeigen	39
2.8	(links) Wahrnehmung einer Parallaxebarriere; (rechts) Abstrahlung einer Parallaxebarriere	48
2.9	(links) Wahrnehmung einer Linsenmaske; (rechts) Abstrahlung einer Linsenmaske	52

2.10	Goniometermessung der Leuchtdichtevertelung über den Winkel; mit L_{WW} = Leuchtdichteverlauf bei Anzeige von vollflächig Weiß auf der rechten und linken Ansicht, L_{WB} und L_{BW} jeweils eine Ansicht Schwarz und Weiß und L_{BB} beide Ansichten Schwarz	60
2.11	Entstehung der monokularen Stereozonen: Für drei Barriereöffnungen ist die Abstrahlcharakteristik der linken(rot) und rechten (blau) Ansicht dargestellt.	65
2.12	Horizontaler Helligkeitsverlauf im idealen Betrachtungsabstand bei Anzeige von L_{WB} und L_{BW} ; gestrichelt dargestellt sind die geometrisch-optischen Helligkeitsverläufe; ungebrochen dargestellt sind die in der Realität auftretenden wellenoptischen Verläufe	66
3.1	Aufbau einer Flüssigkristallanzeige (TN-Zelle), Quelle:[65]	72
3.2	Darstellung verschiedener Pixellayouts für monoskopische und stereoskopische Anzeigen, wie die Anzeige mit einem Auge wahrgenommen wird bei ausgeschalteter Barriere (links) und eingeschalteter Barriere (rechts)	75
3.3	Prinzip der Adaption auf laterale Kopfbewegungen; in rot und blau sind schematisch die monokularen Stereozonen der linken und rechten Ansicht dargestellt, nur in denen ein ungestörtes Bild wahrgenommen werden kann.	79
3.4	Prinzip der Adaption auf unterschiedliche Betrachtungsabstände durch Verschiebung der monokularen Stereozonen	80
4.1	Der ideale Betrachtungsabstand ist definiert über die Ebene in der sich die Strahlengänge aller Barriereöffnungen schneiden (in der Abbildung vereinfacht nur drei Strahlengänge dargestellt)	83
4.2	. . . . .	85
4.3	Simulierte Abstrahlcharakteristika $L_L(\varphi_a)$ und $L_R(\varphi_a)$ für drei verschiedene Breiten der Barriereöffnung	87

4.4	Änderung des Abstandes Barriere-Bildgeber d_B beeinflussen die Größe des abgestrahlten Winkelbereichs der linken (blau) und rechten (rot) Ansicht. Im idealen Betrachtungsabstand konvergieren die Lichtstrahlen mehrerer Barriereöffnungen und bilden dort die breiteste Ausdehnung der monokularen Stereozonen	88
4.5	Verschiebung der monokularen Stereozonen durch Änderung des Barrierepitchs	90
4.6	Strahlengang ausgewählter Strahlen vom Bildgeber, durch die Barriere bis zum Ort des Betrachters im idealen Betrachtungsabstand z_i ; Oben dargestellt: der schematische horz. Helligkeitsverlauf der optischen Zielfunktion	92
4.7	Helligkeitsverteilung im idealen Betrachtungsabstand mit einem Helligkeitsplateau der Breite der optischen Zielfunktion.	94
4.8	Die Geometrisch Optische Helligkeitsverteilung der Prototypischen Anzeige 1 ergibt aus einem Kompromiss aus einem kleinerem Helligkeitsplateaus und einem größerem Bereich des Übersprechens	95
4.9	Prinzip der lateralen Adaption	99
4.10	Aufbau des Gesamtsystems Prototypische Anzeige 1	101
4.11	Querschnitt durch die Prototypischen Anzeige 1	102
4.12	Messpunkte auf der Prototypischen Anzeige 1	109
4.13	Abstrahlcharakteristik der Prototypischen Anzeige 1	111
4.14	Konoskopmessung der Abstrahlcharakteristik der Prototypischen Anzeige bei Darstellung von WB (links) und BW (rechts)	112
4.15	Gemessener, horizontaler Crosstalkverlauf im idealen Betrachtungsabstand der Prototypischen Anzeige 1; In rot ist der Crosstalk der linken Ansicht (XT_L) und in blau der Crosstalk der rechten Ansicht (XT_R) dargestellt.	116
4.16	Im idealen Betrachtungsabstand gemessener Monokularer Stereokontrast der Prototypischen Anzeige 1	117

4.17 Helligkeitsverlauf L_{WB} (rot) und L_{BW} (blau) innerhalb des Bereichs der optischen Zielfunktion (schwarz), gemessen im idealen Betrachtungsabstand	119
4.18 Monokularen Stereozonen der linken und rechten Ansicht der Prototypischen Anzeige 1	122
4.19 Monokularen Stereozonen der linken und rechten Ansicht mit Stereokontrast $> 10:1$	123
4.20 3D-Stereokontrast der Prototypischen Anzeige 1 für einen Betrachter mit Augenabstand 62 mm	124
4.21 3D-Stereo- und Pseudostereozone der Prototypischen Anzeige 1 . . .	125
4.22 Aufbau zur Messung der Latenzzeit des Gesamtsystems	127
4.23 Target zur Latenzmessung bei Anzeige von WB	128
4.24 Horizontaler Helligkeitsverlauf aus einem Kameraframe der Messkamera; in grün ist die durch Bildverarbeitung erkannte Kante des Targets dargestellt; in rot die Position des Schwellwertes der Helligkeitsverteilung	129
4.25 Latenzmessung: Verlauf der Targetposition (blau) und der Helligkeitsverteilungsposition (schwarz) im Kamerabild dargestellt über die Zeit	130
4.26 Gemessene Abstrahlcharakteristik für drei verschiedene Barriereeinstellungen der Prototypischen Anzeige 1	132
4.27 3D-Stereozonen für die drei Barriereeinstellungen	133
4.28 Wahrgenommener Stereokontrast bei adiabatischer Bewegung beim Übergang von der zentralen Position nach links (links) und bei Bewegung nach rechts (rechts)	134
4.29 3D-Stereozonen der drei Barriereeinstellungen mit Stereokontrast größer als $10:1$; Überlappung von zwei Zonen sind gelb, drei Zonen rot dargestellt; Die roten Linien beschrieben jeweils von innen nach außen, die Orte an denen sich ein Betrachter zum Zeitpunkt der Adaption befindet, wenn er sich mit der jeweiligen Kopfgeschwindigkeit bewegt	135

-
- 4.30 Entstehung von wahrgenommenen Helligkeitssprüngen bei unterschiedlichen Kopfgeschwindigkeiten und lateraler Adaption 138
- 4.31 Helligkeitssprünge bei lateraler Adaption für variable Betrachtungsabstände 140
- 4.32 Simulierte Helligkeitssprünge für die Prototypischen Anzeige 1 für Kopfgeschwindigkeiten von 0, 50, 150, 250 mm/s in den Betrachtungsabständen 650 mm (oben), 730 mm (mittig) und 850 mm (unten); die durchgezogenen Linien beschreiben die Helligkeitsschwankungen für unterschiedliche Latenzen bei Anzeige von WB, wahrgenommen mit dem linken Auge; die gestrichelten Linien beschreiben die Helligkeitsschwankungen, wahrgenommen vom rechten Auge bei Darstellung von BW 142
- 4.33 Simulierte Helligkeitssprünge der Prototypischen Anzeige 1 mit einer Latenzzeit von 44 ms bei Anzeige von WB (links) und WW(rechts) . 143
- 4.34 Simulierte Frequenz der Helligkeitssprünge als Funktion der Kopfgeschwindigkeit für verschiedene Betrachtungsabstände 144
- 4.35 Aufbau zur Messung der Helligkeitssprünge auf der Anzeige bei lateraler Adaption 145
- 4.36 Gemessener Leuchtdichteverlauf (blau) bei lateraler Bewegung vor der Anzeige im Abstand 650 mm und einer Geschwindigkeit von 250 mm/s; in rot geglätteter Kurvenverlauf; dargestellt ist ein Periode der Bewegung, bis 4,7 s bewegt sich das Target nach links, im Anschluss wieder zurück auf die Ausgangsposition 146
- 4.37 Helligkeitsschwankungen bei lateraler Adaption für die Geschwindigkeiten 50, 100, 200, 250 und 300 mm/s im Betrachtungsabstand 650 mm bei Anzeige von WB; die roten Linien markieren das Intervall der Standardabweichung und sind Ausdruck für die Stärkere der mittleren Helligkeitsschwankungen; die grüne Linie markieren die maximalen Helligkeitsschwankungen 148

4.38	Amplituden der mittleren (obere Zeile) und maximalen (untere Zeile) Helligkeitsschwankungen bei lateraler Adaption für die Geschwindigkeiten 50, 100, 200, 250 und 300 mm/s für die Betrachtungsabstände 650, 750 und 850 mm bei Anzeige von WB (linke Spalte) und WW (rechte Spalte)	149
4.39	Frequenzanalyse der gemessenen Helligkeitsschwankungen dargestellt an der Messung im Abstand 750 mm und einer Kopfgeschwindigkeit von 200 mm/s bei Darstellung von WB; in rot ist die Frequenz mit der größten Amplitude dargestellt	150
4.40	Gemessene Frequenzen der Helligkeitssprünge als Funktion der Kopfgeschwindigkeit bei Anzeige von WB	151
4.41	. . . . .	160
4.42	. . . . .	160
4.43	. . . . .	161
4.44	Im Probandenversuch wurden bedienbare Inhalte mit zwei unterschiedlichen Hintergründen verwendet	162
4.45	Bewertung der Anzeige vor Beginn der Versuchsfahrt und nach der Instruktion durch den Versuchsleiter	166
4.46	Bewertung der Anzeige während der Fahrt	167
4.47	Wahrgenommene Störungen während der Fahrt	168
4.48	Akzeptanz der Innovation 3D-Kombiinstrument	169
4.49	Vergleich der Erwartung und der Bewertung nach der Fahrt	170
4.50	Vergleich 2D/3D-Darstellung	170
4.51	Kopfposition aller Probanden vor der Anzeige während einer Landstraßenfahrt	171
4.52	Verteilung der Kopfgeschwindigkeiten aller Probanden während der gesamten Testfahrt; Mittelwert rot eingezeichnet	173
4.53	Kummulierte Anzahl der Kopfgeschwindigkeiten; 95% Perzentil in rot eingezeichnet	173

-
- 5.1 Die Verschiebung beschreibt den Versatz der Barriereöffnung gegenüber dem Pixelpaar unter der Öffnung. Da der Barrierepitch geringer als der Pixelpitch der Anzeige ist nimmt die Verschiebung zu den Rändern der Anzeige kontinuierlich zu. 186
- 5.2 Ideale Verschiebungsfunktionen für die drei Betrachtungsabstände 650, 780 und 1100 mm. Die Gerade beschreibt die Verschiebung der Barriereöffnungen gegenüber dem jeweils darunterliegenden Pixelpaar über die gesamte Breite der Anzeige. 187
- 5.3 Simulierte Monokulare Stereozonen bei Änderung des Barrierepitchs für drei unterschiedliche Barrierepitchs; die rote Kreise entsprechen der Augenposition mit Abstand 62 mm 188
- 5.4 Die blauen und gelben Geraden zeigen Verschiebungsfunktionen für die Betrachtungsabstände 650 und 1100 mm. In schwarz ist die Verschiebungsfunktion für den idealen Betrachtungsabstand dargestellt, auf welchen die Barriere angepasst wurde. Die in magenta dargestellten Linien stellen die Verschiebungsgeraden dar, wenn die Barriere über die gesamte Breite der Anzeige um ein Vielfaches eines Barriere-subpixels verschoben wird. 191
- 5.5 Änderung des Pixelpitch durch diskrete Schaltstellen 192
- 5.6 Die schwarzen und roten Linien beschreiben die diskrete Verschiebungsfunktionen der Adaptionmethode Voll-Pitch, welche sich für die Betrachtungsabstände 650 und 1100 mm ergeben. Auf Grund der diskreten Subpixelöffnungen der Barriere, verlaufen die Verschiebungsfunktionen nur auf magenta farbigen Linien 194
- 5.7 Anordnung der Barriereöffnungen auf der 10,4"-Anzeige des Vorversuchs (links); Pixellayout der Anzeige (mittig); Kombination der Barriereöffnungen mit dem Pixellayout (rechts) 195
- 5.8 Aufteilung der Anzeige in Bereiche mit unterschiedlichen Betrachtungsabständen, an der Grenze der farbigen Flächen liegen die Schaltstellen – Quelle:[76] 197

-
- 5.9 Bestimmung der Lage der Schaltstellen für die vier Bereiche der Anzeige des Vorversuchs 198
- 5.10 Konoskopmessung der Anzeige des Vorversuchs mit Schachbrettbarriere 199
- 5.11 Mit dem goniometrischen Aufbau gemessene Abstrahlcharakteristik am Messpunkt 20 der Anzeige des Vorversuchs 200
- 5.12 Darstellung der monokularen Stereozonen C_L und C_R im Raum vor der Anzeige für den Fall einer Voll-Pitch Adaption auf den Betrachtungsabstand 750 mm für die Anzeige des Vorversuchs; Farblich dargestellt ist der Stereokontrast 202
- 5.13 Gemessene Monokulare Stereozonen für die 5 Betrachtungsbereiche der Anzeige des Vorversuchs 203
- 5.14 Die dynamische 3D-Stereozone ergibt sich aus den überlappenden 3D-Stereozonen der vier (für den Betrachtungsabstand 1100 mm ergibt sich keine 3D-Stereozone mehr) Betrachtungsbereiche der Anzeige des Vorversuchs 205
- 5.15 Der Verschiebungswinkel (roter Kreis) beschreibt den Winkel zwischen Nasenwurzelfunkt eines Betrachters zentral vor der Anzeige und dem Messpunkt auf der Anzeige. An dem Punkt schneiden sich die Helligkeitsverteilungen L_{WB} und L_{BW} . Da sich der Messpunkt 12 (linke Darstellung) weiter am Rand der Anzeige befindet, als Punkt 13 (rechte Darstellung) ist dieser größer. 207
- 5.16 Simulierte Leuchtdichteverläufe und gemessene Leuchtdichten für L_{WB} dargestellt über die Anzeigenbreite. Links oben befindet sich der Betrachter zentral im Abstand von 600 mm vor der Anzeige. Die farblichen Verläufe beschreiben die berechneten Helligkeiten, die ein Betrachter in den vier Bereichen auf der Anzeige mit dem linken Auge wahr nimmt. Die weiteren Grafiken zeigen die gleiche Darstellung für Betrachtungsabstände 650 mm, 750 mm und 900 mm. 208

- 5.17 Simulierte Leuchtdichteverläufe und gemessene Leuchtdichten für L_{BW} dargestellt über die Anzeigenbreite. Links oben befindet sich der Betrachter zentral im Abstand von 600 mm vor der Anzeige. Die farblichen Verläufe beschreiben die berechneten Helligkeiten, die ein Betrachter in den vier Bereichen auf der Anzeige mit dem rechten Auge wahr nimmt. Die weiteren Grafiken zeigen die gleiche Darstellung für Betrachtungsabstände 650 mm, 750 mm und 900 mm. 209
- 5.18 Simulierte Crosstalkverläufe und gemessene Werte für XT_L dargestellt über die Breite der Anzeige. Links oben befindet sich der Betrachter zentral vor der Anzeige im Abstand 600 mm. Die farblich unterschiedlich dargestellten Verläufe beschreiben die simulierten Crosstalkwerte, die ein Betrachter in den vier Bereichen auf der Anzeige mit dem linken Auge wahrnehmen würde. Die weiteren Grafiken zeigen die gleichen Darstellungen für einen Betrachter in den Abständen 650 mm, 750 mm und 900 mm. 211
- 5.19 Simulierte Crosstalkverläufe und gemessene Werte für XT_R dargestellt über die Breite der Anzeige. Links oben befindet sich der Betrachter zentral vor der Anzeige im Abstand 600 mm. Die farblich unterschiedlich dargestellten Verläufe beschreiben die simulierten Crosstalkwerte, die ein Betrachter in den vier Bereichen auf der Anzeige mit dem rechten Auge wahrnehmen würde. Die weiteren Grafiken zeigen die gleichen Darstellungen für einen Betrachter in den Abständen 650 mm, 750 mm und 900 mm. 212
- 5.20 Die wahrgenommenen Helligkeitssprünge (grün) an den Schaltstellen sind abhängig von der Abstrahlcharakteristik und der Subpixelgröße der Barriere 214
- 5.21 Prinzip der Halb-Pitch Adaption mit örtlich festen Schaltstellen; In gelb sind die Schaltstellen mit einer Größe des 1.5-fachen der Barriere-subpixelgröße dargestellt, für den Fall einer Barrierepixelpitchverkleinerung (oben) und einer Vergrößerung (unten) dargestellt. 217

5.22	Berechnete Halb-Pitch Verschiebungsfunktionen (blau) für die Adaption auf die Betrachtungsabstände 650 (oben), 730 (mittig) und 950 mm (unten)	219
5.23	Kombination dreier Anzeigen zu einer Anzeigenfläche durch einen halbdurchlässigen Spiegel	223
5.24	Der Tischaufbau der Prototypischen Anzeige 2 besteht aus der prototypischen Anzeige und einem Steuerungsrechner auf dem das Headtracking läuft und die anzuzeigenden Inhalte generiert werden	224
5.25	Foto des der Sitzkiste zum Testen der Prototypischen Anzeige 2	225
5.26	Streifenbarriere der Prototypischen Anzeige 2 (links); Pixellayout mit vier Subpixelarten [RGBW] (mittig); Kombination der Barriere und dem Pixellayout (rechts)	227
5.27	Schematischer Aufbau der Flüssigkristallanzeige mit Barriere der Prototypischen Anzeige 2	229
5.28	Mit dem goniometrischen Aufbau gemessene Abstrahlcharakteristik der Prototypischen Anzeige 2	230
5.29	Messpunkte (rot) der Prototypischen Anzeige 2	231
5.30	Messung der monokularen Stereozonen mit Kontrast größer als 10:1 der Prototypischen Anzeige 2 bei Adaption auf verschiedene Betrachtungsabstände durch die Halb-Pitch Methode	232
5.31	Messung der 3D-Stereozone bei Adaption auf verschiedene Betrachtungsabstand durch die Halb-Pitch Methode der Prototypischen Anzeige 2	233
5.32	Die dynamische 3D-Stereozone der Prototypischen Anzeige 2 ergibt sich durch die Überlagerung aller 3D-Stereozonen, welche mit der Halb-Pitch Methode auf unterschiedliche Betrachtungsabstände adaptieren.	234
5.33	Exemplarische Darstellung der gemessenen Leuchtdichte auf der Prototypischen Anzeige 2, hier dargestellt für den Fall, dass die Barriere nicht auf den richtigen Abstand der Messkamera (Betrachter) adaptiert.	236

- 5.34 Gemessene Leuchtdichteverläufe, welche von einem Betrachter mit seinem linkem Auge bei einer Darstellung von L_{WB} wahrgenommen würden, dargestellt über die Anzeigenbreite für die vier verschiedene Betrachtungsabstände 650 mm (links oben), 750 mm (rechts oben), 850 mm (links unten) und 950 mm (rechts unten). Die verschiedenfarbigen Verläufe beschreiben jeweils Barriereadaptionen der Halbpitchmethode, bei welcher auf die Abstände 650 mm (blau), 750 mm (rot), 850 mm (gelb) und 950 mm (violett) adaptiert wird. 237
- 5.35 Schaltverhalten der Fixen Voll-Pitch Methode; Jeder Punkt markiert einen Betrachtungsabstand in dem eine Zone adaptiert. 247
- 5.36 Simulierte Lage der monokularen Stereozonen mit Kontrast 10:1 der Fixen Voll-Pitch Methode 249
- 5.37 Vergleich der dynamischen Stereozone ohne (links) und mit Fixer Voll-Pitch Adaption (rechts); in rot ist die jeweilige dynamische Stereozone dargestellt. Die gelbe Farbe markiert die Abstände in denen die dynamische Stereozone eine Mindestbreite 10 mm besitzt, welche notwendig ist um lateral adaptieren zu können. 250
- 5.38 Die Darstellung beschreibt drei benachbarte dynamische Stereozonen der Fixen Voll-Pitch Methode, die sich jeweils ergeben, wenn zusätzlich zur Abstandsadaption eine laterale Adaption nach links und rechts zur zentralen Ausgangslänge angenommen wird. Die weißen Linien beschreiben die Positionen an denen die Barriere bei lateraler Bewegung auf die benachbarte Stereozone umschaltet 252
- 5.39 Abweichung vom idealen Blickwinkel auf die Barriereöffnung für die Anzeige ohne Adaption (links) und mit der Fixen Voll-Pitch Methode (rechts) 253
- 5.40 Maximale Winkelabweichung (blau) über dem Betrachtungsabstand für die Anzeige ohne Adaption (links) und mit der Fixen Voll-Pitch Methode (rechts). In rot die Betrachtungsabstände markiert, in denen die Barriere auf den Betrachter adaptiert. 255

5.41	Simulation der rel. Leuchtdichtevariation auf der Anzeige, wahrgenommen mit dem linken und rechten Auge in verschiedenen Betrachtungsabständen für die Fixe Voll-Pitchmethode	257
5.42	Simulierte Gradienten der rel. Leuchtdichte in den Betrachtungsabständen 650, 730 und 950 mm für die Fixe Voll-Pitch Methode	258
5.43	Maximaler Leuchtdichtegradient für das linke und rechte Auge über dem Betrachtungsabstand für die Fixe Voll-Pitch Methode	259
5.44	Simulierter Crosstalk auf der Anzeige wahrgenommen mit dem linken und rechten Auge	260
5.45	Simulierter, maximaler Crosstalk wahrgenommen mit dem linken oder rechten Auge für die Fixe Voll-Pitch Methode	261
5.46	Vergleich der Anzahl der Schaltstellen und des Schaltverhaltens der drei Adaptionismethoden	262
5.47	Darstellung der Winkelabweichung aller drei Adaptionismethoden und für den Fall ohne Adaption auf den Betrachtungsabstand	263
5.48	Vergleich der maximalen Winkelabweichungen der drei Adaptionismethoden (grün, blau, schwarz) mit der Referenz keine Adaption (rot) .	264
5.49	. . . . .	266
5.50	Vergleich die Betrachtungsabstandsbereiche mit einer Mindestbreite von 10 mm drei Adaptionismethoden	266
5.51	Stereokонтраст innerhalb der dynamischen 3D-Stereozonen bei lateraler Adaption für die drei Adaptionismethoden	267
5.52	Vergleich des minimal wahrgenommenen Stereokонтраsts bei lateraler Adaption im Betrachtungsabstandsbereich 500-1100 mm für die drei Adaptionismethoden	268
5.53	Vergleich des simulierten maximalen Crosstalks für die drei Adaptionismethoden für ein 12,3Anzeige	269
5.54	Vergleich des maximalen Leuchtdichtegradienten für die drei Adaptionismethoden	269

5.55	Darstellung der wahrgenommenen Helligkeiten für das linke und rechte Auge für drei Betrachtungsabstände (schwarz, grün, pink); Die Fehlerbalken geben die max. Winkelabweichung vom idealen Blickwinkel für die fixe Vollpitch-Methode an, welche in wahrgenommenen Helligkeitsvariationen resultiert.	272
6.1	Modell einer Anzeige mit Parallaxebarriere	280
6.2	Gemessenes Spektrum einer Hintergrundbeleuchtung mit weißen LEDs	283
6.3	Intensitätsverteilung an/nach der unteren Apertur	291
6.4	Amplitudenverteilung des Winkelspektrums nach unterer Apertur bei $z=0$	292
6.5	Intensitätsverteilung vor der oberen Apertur	293
6.6	Amplitudenverteilung des Winkelspektrums nach oberer Apertur . . .	295
6.7	Intensitätsverteilung der Anzeige im Fernfeld bei Beleuchtung mit einer ebenen Welle unter Einfallswinkel 1° und Wellenlänge 370 nm .	296
6.8	Intensitäts- und Summe der Leuchtdichtevertelungen für die Wellenlänge 370 nm und den gesamten Einfallswinkelbereich	296
6.9	Leuchtdichtevertelungen und Summe dieser für alle Wellenlängen und den gesamten Einfallswinkelbereich	297
6.10	Vergleich Messergebnisse Prototypische Anzeige 1 mit wellenoptischer Simulation	298
6.11	Vergleich Messergebnisse 10.26" Anzeige mit geometrisch-optisch und wellenoptischer Simulation	299
6.12	Simulierte Abstrahlcharakteristik ohne Optimierung (rot und blau) und Zielverteilung (schwarz)	302
6.13	Amplitudenfunktionen eines einfachen Einzelspalt und ihre Winkelspektren bei Beleuchtung mit einer ebenen Welle	303
6.14	Phasenmasken eines einfachen Einzelspalt und ihre Winkelspektren bei Beleuchtung mit einer ebenen Welle	305
6.15	Parameteroptimierung der Amplituden- (links) und Phasenmaske (rechts) der oberen Apertur der Prototypischen Anzeige 2	308

6.16	Zweidimensionale Parameteroptimierung der komplexen Spaltfunktion der oberen Apertur	309
6.17	Simulation der Abstrahlcharakteristik der Prototypischen Anzeige 2 mit (gestrichelte Linien) und ohne (durchgängige Linien) Optimierung	310
6.18	Simulation der reinen Amplituden- (rot) und Phasenmaskenoptimierung (grün) und der Kombination beider (blau) im Vergleich zu keiner Optimierung (schwarz)	310
6.19	Apertur Öffnung mit hart (links) und weicher Kante (rechts)	312
6.20	Herstellung der Phasenmaske für eine Anzeige mit Parallaxebarriere .	312
6.21	Vorversuch: Glassubstrat mit optimierter und nicht optimierter Apertur	314
6.22	Vergleich der geometrisch-optisch (grün) und wellen-optisch simulierten Verteilung mit optimierter (rot) und nicht optimierter Aperturöffnung (blau) mit Messwerten optimiert (rot Stern) und nicht optimiert (blau Stern)	315
6.23	Schematischer Aufbau der Prototypischen Anzeige 2	316
6.24	Nachweis der Funktionsfähigkeit der Optimierung durch Vergleich der Messung der Abstrahlcharakteristik der Prototypischen Anzeige 2 mit Optimierung (stern blau und rot) mit den simulierten Abstrahlcharakteristika optimiert (gestrichelte Linien) und nicht optimiert (durchgängige Linien)	317
A.1	Konzept 1: Einfacher Darstellung eines Tachometers durch teiltransparentes, zentrales Rundinstrument	359
A.2	Konzept 1: Tachometer mit zusätzlichen Informationen, ergänzt durch eine Uhr und ein Reismenü links und rechts des zentralen Rundinstrumentes	359
A.3	Konzept 1: Tachometer mit künstlich erzeugter Warnmeldung vor Fahrzeug von rechts, wie es im Fahrsimulatorversuch eingesetzt wurde.	360
A.4	Konzept 1: Räumliche Darstellung des Abstandes zum Vordermann .	360
A.5	Konzept 1: Geänderter Hintergrund, welcher die Darstellung stärker zu den seitlichen Rändern begrenzt.	360

A.6	Konzept 2: Auswahlmenü für Fahrzeugeinstellungen mit vollanimiertem Fahrzeug	361
A.7	Konzept 2: In der Tiefe gestaffeltes Auswahlmenü	361
A.8	Konzept 2: Horizontal rotierendes Telefonmenü	361
A.9	Konzept 2: Darstellung einer räumlichen Navigationsszene	362

Tabellenverzeichnis

4.1	Parameter der Prototypischen Anzeige 1	96
4.2	Eingesetztes Headtracking-System	106
4.3	Parameter des Konoskop-Messaufbaus	113
5.1	Parameter der Anzeige des Vorversuchs der Voll-Pitch-Adaption . . .	196
5.2	Parameter der Prototypischen Anzeige 2	226
6.1	Geometrie und Simulationsparameter	289
6.2	Simulierte und gemessene stereoskopische Parameter der Prototypi- schen Anzeige 2 im Vergleich mit Prot. Anzeige 1; (*)Barriere adap- tiert auf 750 mm Betrachtungsabstand	320

A. Anhang

A.1 Erstellte Inhalte für die Anzeige auf einem 3D-Kombiinstrument

Konzept 1: Einzelnes, zentrales Rundinstrument



Abbildung A.1: Konzept 1: Einfacher Darstellung eines Tachometers durch teiltransparentes, zentrales Rundinstrument



Abbildung A.2: Konzept 1: Tachometer mit zusätzlichen Informationen, ergänzt durch eine Uhr und ein Reisemenü links und rechts des zentralen Rundinstruments



Abbildung A.3: Konzept 1: Tachometer mit künstlich erzeugter Warnmeldung vor Fahrzeug von rechts, wie es im Fahrsimulatorversuch eingesetzt wurde.



Abbildung A.4: Konzept 1: Räumliche Darstellung des Abstandes zum Vordermann



Abbildung A.5: Konzept 1: Geänderter Hintergrund, welcher die Darstellung stärker zu den seitlichen Rändern begrenzt.

Konzept 2: Doppelte Rundinstrumente



Abbildung A.6: Konzept 2: Auswahlmü für Fahrzeugeinstellungen mit vollanimiertem Fahrzeug



Abbildung A.7: Konzept 2: In der Tiefe gestaffeltes Auswahlmü



Abbildung A.8: Konzept 2: Horizontal rotierendes Telefonmü



Abbildung A.9: Konzept 2: Darstellung einer räumlichen Navigationsszene

A.2 Fahr Simulatorversuch: Fragebögen mit Anweisungen für Versuchsleiter

DAIMLER
Forschung und Entwicklung

3D-Darstellung Kombi-Instrument

Teilnehmer-Nummer: _____	Interviewer: _____
Datum: _____	Uhrzeit: _____
<input type="checkbox"/> Variante 0 – 2D/3D und Hintergrund 1	
<input type="checkbox"/> Variante 1 – 2D/3D und Hintergrund 2	
<input type="checkbox"/> Variante 2 – 3D/2D und Hintergrund 1	
<input type="checkbox"/> Variante 3 – 3D/2D und Hintergrund 2	
Besonderheiten (Abweichungen vom geplanten Verlauf):	

3D-Darstellung Kombi-Instrument, Tischler, RD/RCC, Ewon, RD/RTC, Käfer, RD/FFS, 21.03.2014 1

Was erwarten Sie von einem 3D-Display im Fahrzeug?

	trifft gar nicht zu	trifft eher nicht zu	teils/ teils	trifft eher zu	trifft voll zu
1. Ich finde den Einsatz eines 3D-Displays im Fahrzeug eine sehr gute Idee.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2. Ein 3D-Display im Fahrzeug begeistert mich.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3. 3D-Displays im Fahrzeug stellen für mich eine unnötige Spielerei dar.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4. Ich befürchte, dass mich ein solches Display vom Fahren ablenkt.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Platz für Kommentare:					

Angaben zur Person

Für die Interpretation unserer Daten möchten wir Sie um einige Angaben zu Ihrer Person bitten. Diese werden natürlich streng vertraulich behandelt und nicht an Dritte weitergegeben!

Alter: _____ Jahre **Geschlecht:** männlich weiblich
Größe: _____ cm **Gewicht:** _____ kg

Seit wann besitzen Sie einen Führerschein für Pkw? Jahr des Erwerbs: _____

Wie viele Kilometer sind Sie im letzten Jahr mit Pkw gefahren? ca. _____ km

Bitte machen Sie Angaben zum Fahrzeug, das Sie <u>am häufigsten</u> fahren.	
Marke/ Hersteller (z.B. Mercedes-Benz):	
Typ/ Modell (z.B. E-Klasse):	
Baujahr:	

In unserem Alltag nutzen wir eine Vielzahl elektronischer Geräte z.B. Handys, Computer, Digitalkameras oder Geldautomaten. Die nachfolgenden Aussagen thematisieren Ihre persönliche Haltung und Ihren Umgang mit diesen Geräten.

Bitte geben Sie an, wie gut die einzelnen Aussagen auf Sie persönlich zutreffen.

	trifft gar nicht zu	trifft eher nicht zu	teils/ teils	trifft eher zu	trifft voll zu
Ich kenne mich im Bereich elektronischer Geräte aus.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Elektronische Geräte erleichtern mir den Alltag.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Elektronische Geräte machen vieles umständlicher.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich bin begeistert, wenn ein neues elektronisches Gerät auf den Markt kommt.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Es macht mir Spaß, ein elektronisches Gerät auszuprobieren.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Es fällt mir leicht, die Bedienung eines elektronischen Geräts zu lernen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Elektronische Geräte verursachen Stress.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Elektronische Geräte machen unabhängig.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Haben Sie schon einmal einen 3D-Kinofilm gesehen?

ja nein

Nutzen Sie ein 3D-Fernsehgerät oder einen 3D-Monitor?

ja nein

Falls Sie bereits Erfahrungen mit 3D-Systemen gemacht haben:
Wie gut hat Ihnen die 3D-Darstellung gefallen?

sehr schlecht <input type="checkbox"/>	schlecht <input type="checkbox"/>	mittel- mäßig <input type="checkbox"/>	gut <input type="checkbox"/>	sehr gut <input type="checkbox"/>
---	--------------------------------------	--	---------------------------------	--------------------------------------

Anmerkungen zur 3D-Erfahrung: Was war positiv, was war negativ?

Werden Sie während der Fahrt im Simulator eine der folgenden Schülfen tragen?

Fernsichtbrille Nahsichtbrille/Lesebrille Gleitsichtbrille Kontaktlinsen

Ist Ihnen eine Einschränkung Ihrer Sehfähigkeit bekannt? ja nein

Wenn ja, welche?

Bitte wenden Sie sich an Ihren Versuchsleiter!

Der **Sehtest** wird so durchgeführt, wie der Teilnehmer üblicherweise Auto fährt bzw. im Simulator unterwegs sein wird.

- Geräte desinfizieren, Gerät einschalten, warten, auf >Prog< bis G25 angezeigt wird
- Proband bitten, hineinzuschauen, $\geq \pm \leq$ mehrfach drücken bis beide Augen
- Proband bitten 3. Reihe zu fixieren und zu nennen, wo die Kreise geöffnet sind

Beide Augen		Lösungen					mind. 3 aus 5?	
80%	Zeile 3						<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	Falls ja, weiter mit + Falls nein, 2. Reihe (63%) vorlesen lassen
63%	Zeile 2						<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	

Stereotest „Sie sehen jetzt zwei Reihen mit Balken“. Falls kein 3D-Effekt wahrgenommen wird, wegschauen, wieder hinschauen.

Welche Balken sind näher an Ihnen?	Oben: 2 und 4 Unten: 3 und 5	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein
Obere Reihe: Welcher ist näher an Ihnen dran, 2 oder 4?	Oben: 4 vor 2	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein
Wenn Sie nun den 3. Unten und den 4. Oben anschauen, welcher ist näher an Ihnen?	3 unten vor 4 oben	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein
Wenn Sie nun in der unteren Reihe den 3. und den 5. Balken anschauen, welcher ist näher an Ihnen dran?	Unten: 5 vor 3	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein

Augenabstand: Gerät einschalten; großes Drehrad soll bis zum Anschlag nach rechts (Unendlichkeitssymbol); Pd soll auf Lichtpunktschauen; mit den beiden Schieberegeln den schwarzen Balken auf den Reflexpunkt auf der Pupille bringen.

⇨ **Instruktion zur Fahrt (laminierte Anweisung) lesen lassen und Fragen klären**

- In Kontrollstation fragen, ob Simulator bereit ist.
- Gang in den Versuchsraum, Jacken und Wertsachen können im Vorraum abgelegt werden
- „Bitte Aufpassen auf Stufe und Ihren Kopf, nicht an Leinwand fassen!“
- Teilnehmer bitten, im Fahrzeug Platz zu nehmen.

Allgemeine Fahrzeuganweisung von der Fahrerseite aus

- Hinweis abgesigtes Lenkrad. „Damit Sie das Display besser sehen können“, Lenkrad nicht verstellbar
- Sitzstellung ist in der Fahrertür
- Bitte Anschlallen und angeschnallt bleiben „bis wir uns wiederschen“.
- Kontrolle Head-Tracking über Notebook auf Rückbank (Maske soll richtig überlagert sein, falls nicht: Kamera 3sec zuhalten)
- Seitenspiegel sind nicht einstellbar
- Klimaanlage bitte nicht selbstständig verstellen
- Auf Kameras im Fahrzeug hinweisen
- Fahrertür schließen
- VI setzt sich auf Beifahrersitz (Aufpassen auf Laserbird!)
- NEU: Check, ob ein deutlich wahrnehmbarer Luftzug aus Düsen kommt, sonst einstellen

Display erklären

- in Mitte Tacho, unten ist die Tankanzeige, an beiden Seiten Anzeigebereiche
- Alle vom Probanden geäußerten Auffälligkeiten in Tabelle notieren
- Darauf achten, dass Bewertung in Fahrposition erfolgt (nicht nach vorne lehnen etc.)

Instruktion für Bedienung

- Bedienung erfolgt über linke Lenkradlasten
- Mit rauf/runter Tachowechsel - wir werden während der Fahrt Standard, Digital und Abstands-Tacho zeigen
- Mit ok ins Hauptmenü; Rücktaste um aus Hauptmenü zu kommen
- mit links/rechts kommt man in die Seitenmenüs und kann dann Anzeigen einstellen

Einmal ausprobieren lassen

- „Suchen Sie aus dem Hauptmenü die Telefonnummer von Frau Gabi Dohm heraus.“
- „Suchen Sie aus dem rechten Seitenmenü die Kilometer ab Start heraus.“
- Bitte sicherstellen, dass Menü geschlossen ist.

Reaktionszeitaufgabe erklären

- „Während der Fahrt wird es einen Reaktionstest geben – dies kündige ich Ihnen aber noch rechtzeitig an.“
- „Eine Stimme wird Sie bitten nach vorne zu blicken, dann erfolgt ein Ton und Ihre Aufgabe ist es, auf das Display zu blicken und möglichst schnell eine der beiden Tasten rechts zu drücken.“
- Tasten zeigen: Anruf annehmen, Anruf ablehnen

Instruktion für Fahrt

- „Sie starten die Fahrt mit der 3D Darstellung, dann erfolgt ein Wechsel auf die 2D Darstellung, dazu gebe ich Ihnen dann Bescheid.“
- „Wir verändern während der Fahrt einige kleine Einstellungen – Ihre Aufgabe ist es, die Displayqualität zu bewerten. Dazu werde ich Sie in regelmäßigen Abständen befragen.“
- Bitte teilen Sie mir spontan mit, wenn Ihnen etwas Besonderes zum Display auffällt.“
- Zur Erinnerung: Während der Fahrt gibt es Warnmeldungen.

Wie fühlen Sie sich im Moment?

<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
gar nicht wohl	eher nicht wohl	weder noch	eher wohl	sehr wohl
Feld für Anmerkungen				

- „Durch die Gegensprechanlage kann Sie während der gesamten Fahrt hören. Falls irgendetwas sein sollte, geben Sie mir Bescheid.“
- „Bitte setzen Sie sich unser Messsystem Laserbird auf“ (Kontrolle ob er richtig sitzt)
- VL steigt aus, Befahrer für ist noch offen
- Kalibrierung Laserbird: „Bitte suchen Sie die Auflegen-Taste. Blicken Sie auf die Spitze des Schornsteins und drücken die *Auflegen-Taste* für mind. 2 sec.“
- Wählhebel Automatikgetriebe zeigen
- „Ich melde mich gleich wieder per Mikro bei Ihnen.“

In der Kontrollstation

- Sofort melden: „Hallo Frau X/ Herr Y, können Sie mich gut verstehen?“ VP nicht mehr mit Namen ansprechen, sobald die Videoaufnahme läuft Anonymität
- Erklärung zum Bewertungssystem: „Wir fahren jetzt unser System hoch, da kann sich etwas ungewohnt anfühlen. Ich werde Ihnen während der Fahrt einige Fragen stellen. Bitte antworten Sie mit der Schulnotenskala von 1 bis 5. Sie können sagen: *Sehr gut, gut, mittelmäßig, schlecht, sehr schlecht.*“

Wie bewerten Sie ...	sehr schlecht	schlecht	mittelmäßig	gut	sehr gut
die Erkennbarkeit der Darstellung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
die Schärfe der Darstellung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
die Wertigkeit des Displays	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
die Qualität der Grafiken	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
das Hintergrundbild	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
das Display insgesamt	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

- Wenn Simulator startbereit (grüne Symbole): Kontrolle über Drehzahlmesser. Falls Motor nicht läuft. Motor starten lassen. „Bitte schalten Sie das Automatikgetriebe auf D (auf die Bremse und Gangwählhebel nach unten), Fahren Sie bitte langsam an. Auf den ersten Metern können Sie das Fahrzeug das Fahrzeug kennenlernen.“
- „Wir schalten die Anzeige in den Ausgangszustand.“ [Screenshot 1]
- Nach etwa 2 min: „Ist alles in Ordnung? Fühlen Sie sich wohl? Falls sich etwas daran ändert, geben Sie mir bitte sofort Bescheid.“
- Bei Übelkeit oder bei Unwohlsein, das sich während der Eingewöhnungsfahrt nicht bessert bzw. während der Fahrt auftritt => ABBRUCH DER FAHRT durch VL!
- **VL überwacht während der gesamten Fahrt das Wohlbefinden der VP!**

Troubleshooting

- Falls Kombi bedienbar, Meldungen (Car2X, Reaktionstest) nicht kommen, Proband auffordern, die Rücktaste am Lenkrad links zu drücken.
- Wenn Display abstürzt, sodass es nicht mehr zu sehen ist, dann muss Rechner durch Operator direkt am Fahrzeug im Kofferraum neu gestartet werden!
- Falls Laserbird ausfällt, einfach weiterfahren.
- Falls alles schief geht, im absoluten Notfall und nur ausnahmsweise Chris anrufen: 0177 636 22 28 (private Nummer)
- [für Notfälle: Spucktüten befinden sich im Seitenfach der Fahrertür]

Eingewöhnungsfahrt mit 3D

bei km	Anweisung	Ausgeführt?
10,2	„Nennen Sie mir bitte Ihre momentane Geschwindigkeit.“	<input type="checkbox"/>
ab 11,0	<i>still sein</i>	
11,4	<i>Kreuzungsmanöver [Screenshot 2a]</i>	

bei km 12,0 „Wie bewerten Sie die Displayqualität wie Sie diese auf den letzten km erlebt haben?“	sehr schlecht <input type="checkbox"/>	schlecht <input type="checkbox"/>	mittel <input type="checkbox"/>	gut <input type="checkbox"/>	sehr gut <input type="checkbox"/>
Falls mittel, schlecht, sehr schlecht, warum? – Bitte Liste ergänzen					
Sonstige Anmerkungen:					

bei km	Anweisung	Ausgeführt?
ca. 13,5	„Bitte überholen Sie das Auto, das vor Ihnen fährt. Bitte achten Sie dabei auf das Tempolimit von 100km/h.“	<input type="checkbox"/>
16,5	„Gleich sehen Sie auf der rechten Seite ein Schild; bitte befolgen Sie die Anweisung auf dem Schild.“	<input type="checkbox"/>

bei km 17,5 „Wie bewerten Sie die Displayqualität wie Sie diese auf den letzten km erlebt haben?“	sehr schlecht <input type="checkbox"/>	schlecht <input type="checkbox"/>	mittel <input type="checkbox"/>	gut <input type="checkbox"/>	sehr gut <input type="checkbox"/>
Falls mittel, schlecht, sehr schlecht, warum? – Bitte Liste ergänzen					
Sonstige Anmerkungen:					

Block 1: Bedienaufgaben & Reaktionstest

bei km	Anweisung	Ausgeführt?
19,0	Hinweis auf Tachowechsel [Screenshot 2b]	<input type="checkbox"/>
19,0	Für Gruppen 0 und 1: Hinweis auf Umschaltung nach 2D	<input type="checkbox"/>
ab 20,3	„Nennen Sie mir bitte Ihre momentane Geschwindigkeit.“	<input type="checkbox"/>
folgend	„Bitte suchen Sie aus dem Hauptmenü eine Telefonnummer heraus. Und zwar von Ingolf Hauser. Lesen Sie mir bitte die ersten 4 Zahlen vor.“	<input type="checkbox"/>
folgend	„Bitte suchen Sie im rechten Seitenmenü die gefahrenen Kilometer ab Start heraus“	<input type="checkbox"/>

ab km 25 bis spätestens 26,5 „Wie bewerten Sie die Displayqualität wie Sie diese auf den letzten km erlebt haben?“	sehr schlecht <input type="checkbox"/>	schlecht <input type="checkbox"/>	mittel <input type="checkbox"/>	gut <input type="checkbox"/>	sehr gut <input type="checkbox"/>
Falls mittel, schlecht, sehr schlecht, warum? – Bitte Liste ergänzen					
Sonstige Anmerkungen:					

bei km	Anweisung	Ausgeführt?
28,0	„Es folgt nun eine Reihe von Reaktionsaufgaben. Sie werden eine Stimme hören, die Sie auffordert auf die Straße zu blicken. Dann ertönt ein Ton. Bitte blicken Sie dann in das Display und befolgen die Anweisung. Drücken Sie dazu möglichst schnell entweder die Annehmen- oder Auflegen Taste auf der rechten Seite des Lenkrads.“	<input type="checkbox"/>
29,6 bis 35,2	<i>Reaktionstest läuft 6x automatisch ab, [Screenshot 3]</i> <i>Falls Ton nicht kommt (die Stimme aber schon), dann soll Pd die Rücktaste drücken, um aus dem Hauptmenü zu kommen!</i>	
36,0	„Ist Ihnen irgendetwas Besonderes am Display aufgefallen?“ – Liste ergänzen	<input type="checkbox"/>
37,0	Für Gruppen 0 und 1: Hinweis auf Umschaltung nach 3D	<input type="checkbox"/>
37,7	<i>Warnmeldung Pannenfahrzeug [Screenshot 3a]</i>	

bei km 38: „Wenn Sie die Darstellung der Warnmeldung bewerten, wie gut ablesbar war diese?“	sehr schlecht <input type="checkbox"/>	schlecht <input type="checkbox"/>	mittel <input type="checkbox"/>	gut <input type="checkbox"/>	sehr gut <input type="checkbox"/>
Falls mittel, schlecht, sehr schlecht, warum? – Bitte Liste ergänzen					

Block 2: Bedienungsaufgaben & Reaktionstest

bei km	Anweisung	Ausgeführt?
41,8	Hinweis auf Tachowechsel [Screenshot 2b]	<input type="checkbox"/>
41,8	Für Gruppen 2 und 3: Hinweis auf Umschaltung nach 2D	<input type="checkbox"/>
43,8	„Nennen Sie mir bitte Ihre momentane Geschwindigkeit.“	<input type="checkbox"/>
folgend	„Bitte suchen Sie aus dem Hauptmenü eine Telefonnummer heraus. Und zwar von Frau Gabi Dohm. Lesen Sie mir bitte die ersten 4 Zahlen vor.“	<input type="checkbox"/>
folgend	„Bitte suchen Sie im rechten Seitenmenü die gefahrenen Kilometer ab Start heraus“	<input type="checkbox"/>

ab km 48 bis spätestens 50 „Wie bewerten Sie die Displayqualität wie Sie diese auf den letzten km erlebt haben?“	sehr schlecht <input type="checkbox"/>	schlecht <input type="checkbox"/>	mittel <input type="checkbox"/>	gut <input type="checkbox"/>	sehr gut <input type="checkbox"/>
Falls mittel, schlecht, sehr schlecht, warum? – Bitte Liste ergänzen					
Sonstige Anmerkungen:					

bei km	Anweisung	Ausgeführt?
50,6	„Es folgt wiederum eine Reihe von Reaktionsaufgaben. Sie werden eine Stimme hören, die Sie auffordert auf die Straße zu blicken und dann ertönt ein Ton. Bitte blicken Sie dann in das Display und befolgen die Anweisung. Drücken Sie dazu möglichst schnell entweder die Annehmen- oder Auflegen Taste auf der rechten Seite des Lenkrads.“	<input type="checkbox"/>
52,4 bis 57,9	<i>Reaktionstest läuft 6x automatisch ab. [Screenshot 3]</i> <i>Falls Ton nicht kommt (die Stimme aber schon), dann soll Pd die Rücktaste drücken, um aus dem Hauptmenü zu kommen!</i>	
58,0	„Ist Ihnen irgendetwas Besonderes am Display aufgefallen?“ - Liste ergänzen	<input type="checkbox"/>
58,6	Für Gruppen 2 und 3: Hinweis auf Umschaltung nach 3D	<input type="checkbox"/>

bei km 58,6: „Hatten Sie das Gefühl, dass Sie mit der 3D-Darstellung mehr Zeit gebraucht haben, um die Meldung zu lesen?“	nein <input type="checkbox"/>	eher nein <input type="checkbox"/>	weiß nicht <input type="checkbox"/>	eher ja <input type="checkbox"/>	ja <input type="checkbox"/>
---	----------------------------------	---------------------------------------	--	-------------------------------------	--------------------------------

59,8	Hinweis auf Tachowechsel [Screenshot 4]	<input type="checkbox"/>
------	---	--------------------------

Abschlussfahrt auf Autobahn mit 3D

ab km 60, wenn Fahrzeug vor Proband: Bitte folgen Sie dem Fahrzeug und schließen Sie etwas auf! Auf der Anzeige sehen Sie den Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug dargestellt. Wie gut gefällt Ihnen diese Darstellung?	sehr schlecht <input type="checkbox"/>	schlecht <input type="checkbox"/>	mittel <input type="checkbox"/>	gut <input type="checkbox"/>	sehr gut <input type="checkbox"/>
Falls mittel, schlecht, sehr schlecht, warum?					

bei km	Anweisung	Ausgeführt?
61,0	„Bitte überholen Sie nun das Fahrzeug.“	<input type="checkbox"/>
61,8	Hinweis auf Tachowechsel [Screenshot 5]	<input type="checkbox"/>
anschließend	„Sind nun alleine auf der Autobahn unterwegs. Bitte machen Sie einige schnelle Spurwechsel hintereinander, nennen Sie mir währenddessen Ihre aktuelle Geschwindigkeit.“	<input type="checkbox"/>

anschließend: „Wie bewerten Sie die Displayqualität wie Sie diese auf den letzten km erlebt haben?“	sehr schlecht <input type="checkbox"/>	schlecht <input type="checkbox"/>	mittel <input type="checkbox"/>	gut <input type="checkbox"/>	sehr gut <input type="checkbox"/>
Falls mittel, schlecht, sehr schlecht, warum? – Bitte Liste ergänzen					
Sonstige Anmerkungen:					

- Fahrende frühestens bei s = 65 000/ ist gleich km 65
- „Die Fahrt ist hier beendet. Bitte bringen Sie das Auto auf dem Pannenstreifen zum Stillstand. [warten]
Bitte stellen Sie das Getriebe in Parkposition – drücken Sie dazu den P-Knopf am Gangwahlhebel.“
- „Bleiben Sie bitte noch angeschallt sitzen bis ich bei Ihnen am Fahrzeug bin.“

Wie fühlen Sie sich im Moment?				
<input type="checkbox"/> gar nicht wohl	<input type="checkbox"/> eher nicht wohl	<input type="checkbox"/> weder noch	<input type="checkbox"/> eher wohl	<input type="checkbox"/> sehr wohl
Feld für Anmerkungen				

- Während Fasi herunterfährt und ggf. im Fahrzeug nach Akzeptanz der genannten Problempunkte fragen.
- Falls der Proband die ersten 4 Punkte nicht von allein angesprochen hat, gezielt nachfragen!

Selbst genannte Auffälligkeiten zum 3D Display

Bitte hier die Aussagen des Probanden zum 3D-Display sammeln. Aussagen, die eindeutig den Content betreffen (z.B. Rechtschreibfehler) mit C markieren. Am Schluss der Fahrt nach Akzeptanz der negativen Punkte fragen. Content Aussagen zum Schluss nicht nach Akzeptanz abfragen.

Falls Proband die ersten vier Punkte nicht selbständig erwähnt, dann gezielt nachfragen

bei km Stand	Was fällt Ihnen auf? Falls der Proband die ersten vier Punkte von sich aus erwähnt, abhaken; restliche Punkte aufschreiben	+/- oder Content	Akzeptanz „Ist dies aus Ihrer Sicht akzeptabel, gerade noch akzeptabel oder nicht akzeptabel?“
	<input type="checkbox"/> von Proband selbst genannt ggf. Nachbefragung: Helligkeitsschwankungen wahrgenommen? <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	-	<input type="checkbox"/> akzeptabel <input type="checkbox"/> gerade noch akzeptabel <input type="checkbox"/> nicht akzeptabel
	<input type="checkbox"/> von Proband selbst genannt ggf. Nachbefragung: Unschärfen wahrgenommen? <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	-	<input type="checkbox"/> akzeptabel <input type="checkbox"/> gerade noch akzeptabel <input type="checkbox"/> nicht akzeptabel
	<input type="checkbox"/> von Proband selbst genannt ggf. Nachbefragung: Wahrgenommen, dass Bild „springt“? <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	-	<input type="checkbox"/> akzeptabel <input type="checkbox"/> gerade noch akzeptabel <input type="checkbox"/> nicht akzeptabel
	<input type="checkbox"/> von Proband selbst genannt ggf. Nachbefragung: Doppelbilder wahrgenommen? <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	-	<input type="checkbox"/> akzeptabel <input type="checkbox"/> gerade noch akzeptabel <input type="checkbox"/> nicht akzeptabel
			<input type="checkbox"/> akzeptabel <input type="checkbox"/> gerade noch akzeptabel <input type="checkbox"/> nicht akzeptabel
			<input type="checkbox"/> akzeptabel <input type="checkbox"/> gerade noch akzeptabel <input type="checkbox"/> nicht akzeptabel
			<input type="checkbox"/> akzeptabel <input type="checkbox"/> gerade noch akzeptabel <input type="checkbox"/> nicht akzeptabel
			<input type="checkbox"/> akzeptabel <input type="checkbox"/> gerade noch akzeptabel <input type="checkbox"/> nicht akzeptabel
			<input type="checkbox"/> akzeptabel <input type="checkbox"/> gerade noch akzeptabel <input type="checkbox"/> nicht akzeptabel
			<input type="checkbox"/> akzeptabel <input type="checkbox"/> gerade noch akzeptabel <input type="checkbox"/> nicht akzeptabel

bei km Stand	Was fällt Ihnen auf? Falls der Proband die gelisteten Punkte von sich aus erwähnt, abhaken; restliche Punkte aufschreiben	+/-/–	Akzeptanz „Ist dies aus Ihrer Sicht akzeptabel, gerade noch akzeptabel oder nicht akzeptabel?“
			<input type="checkbox"/> akzeptabel <input type="checkbox"/> gerade noch akzeptabel <input type="checkbox"/> nicht akzeptabel
			<input type="checkbox"/> akzeptabel <input type="checkbox"/> gerade noch akzeptabel <input type="checkbox"/> nicht akzeptabel
			<input type="checkbox"/> akzeptabel <input type="checkbox"/> gerade noch akzeptabel <input type="checkbox"/> nicht akzeptabel
			<input type="checkbox"/> akzeptabel <input type="checkbox"/> gerade noch akzeptabel <input type="checkbox"/> nicht akzeptabel
			<input type="checkbox"/> akzeptabel <input type="checkbox"/> gerade noch akzeptabel <input type="checkbox"/> nicht akzeptabel
			<input type="checkbox"/> akzeptabel <input type="checkbox"/> gerade noch akzeptabel <input type="checkbox"/> nicht akzeptabel
			<input type="checkbox"/> akzeptabel <input type="checkbox"/> gerade noch akzeptabel <input type="checkbox"/> nicht akzeptabel
			<input type="checkbox"/> akzeptabel <input type="checkbox"/> gerade noch akzeptabel <input type="checkbox"/> nicht akzeptabel
			<input type="checkbox"/> akzeptabel <input type="checkbox"/> gerade noch akzeptabel <input type="checkbox"/> nicht akzeptabel
			<input type="checkbox"/> akzeptabel <input type="checkbox"/> gerade noch akzeptabel <input type="checkbox"/> nicht akzeptabel
			<input type="checkbox"/> akzeptabel <input type="checkbox"/> gerade noch akzeptabel <input type="checkbox"/> nicht akzeptabel

Bewertung nach der Fahrt

Tn-Nummer:

Es geht nun um Ihre persönliche Sicht! Bitte lesen Sie sich die Aussagen aufmerksam durch und geben Sie an, wie stark Sie diesen zustimmen.

Wie bewerten Sie das 3D-Display als Kombi-Instrument?

	trifft gar nicht zu	trifft eher nicht zu	teils/ teils	trifft eher zu	trifft voll zu
1. Dieses System ist sinnvoll.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2. Das System wirkt hochwertig.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3. Dieses System ist innovativ.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4. Es würde mir Freude bereiten, das System meinen Freunden vorzuführen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5. Das System begeistert mich.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6. Das System ist eine unnötige Spielerei.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7. Das System ist noch nicht ausgereift.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8. Das System lenkt mich vom Fahren ab.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9. Dieses System passt zu Mercedes-Benz.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10. Ich würde dieses System weiterempfehlen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11. Das System bereitet mir großes Vergnügen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
12. Das System wirkt ästhetisch.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
13. Ich brauche mit dem 3D-Display länger, um die Anzeigen zu erkennen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
14. Das System ist aus meiner Sicht eine technische Überfrachtung des Fahrzeugs	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Für mich persönlich ist das 3D-Display im Vergleich zur 2D-Darstellung ...

deutlich schlechter <input type="checkbox"/>	eher schlechter <input type="checkbox"/>	gleich gut <input type="checkbox"/>	eher besser <input type="checkbox"/>	deutlich besser <input type="checkbox"/>
Nachteile 3D gegenüber 2D:		Vorteile 3D gegenüber 2D:		

Wie würden Sie es bewerten, wenn Ihr nächstes Fahrzeug mit einem 3D-Display ausgestattet wäre?

- Das würde mich sehr stören.
- Das könnte ich in Kauf nehmen.
- Das ist mir egal.
- Das setze ich voraus.
- Das begeistert mich.

Wie würden Sie es bewerten, wenn in Ihrem nächsten Fahrzeug kein 3D-Display verbaut wäre, also mit einem 2D Display ausgestattet wäre?

- Das würde mich sehr stören.
- Das könnte ich in Kauf nehmen.
- Das ist mir egal.
- Das setze ich voraus.

Fragen zur Kaufbereitschaft	trifft gar nicht zu	trifft eher nicht zu	teils/ teils	trifft eher zu	trifft voll zu
Ich würde das 3D-Display gern als Serienausstattung in meinem Auto besitzen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich würde das 3D-Display bei meinem nächsten Autokauf als Sonderausstattung bestellen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich würde den Kauf des 3D-Displays als Sonderausstattung in Betracht ziehen, wenn folgende Änderungen umgesetzt werden:					

Haben Sie weitere Anregungen für uns?

Vielen Dank für Ihre Unterstützung!

A.3 Matlab Simulationscode

A.3.1 Code: Abstandsadaption

Funktion: Hauptskript der Abstandsadaption

```

1  %Hauptskript zur Simulation und Untersuchung der
2  %Betrachtungsabstandsadaption
3  %by Christoph Ewen, 2014
4  close all
5  clear all

6  sw_full=1; % 1 wenn Full-Pitch simuliert werden soll
7  sw_half=1; % 1 wenn Half-Pitch simuliert werden soll
8  sw_fullfix=1; % 1 wenn Full-Pitch mit fixen Positionen simuliert werden soll

9  %% Displayparameter Anzeige
10 %als Beispiel die Daten der "Experimentellen Anzeige 2"
11 disp_pixnumh=2160;%3*720; %in px Anzahl horizontaler Pixel
12 disp_subpitchh=76.25; %horizontaler Subpixelpitch in mu m
13 disp_numsubpixh=2; %Anzahl der horizontalen Subpixel pro Pixel
14 n_barop=disp_pixnumh*disp_numsubpixh/2; %Anzahl der Barriereöffnungen %prüfen in Simu
15 disp_subpitchhmm = disp_subpitchh/1000; % Subpixelpitch in mm
16 disp_width=disp_pixnumh*disp_subpitchhmm*disp_numsubpixh; %Displaybreite in mm
17 disp_pitchh3D=2*disp_subpitchhmm; %Pitch zwischen Subpixel der selben Ansicht

18 %Barriere
19 bar_n=1.52; %Brechungsindex Material zwischen Display und Barriere
20 eye_dist=62; %Augenabstand in mm; muss Gerade sein!
21 bar_Nop=12; %Anzahl der Barriereöffnungen
22 bar_gap=1.315; %Abstand Barrierenmaske zu Pixellayout in mm
23 bar_desdist=730; %Barrierebetrachtungsabstand in mm
24 bar_pitch = disp_pitchh3D * 1/(1+(bar_gap/(bar_n*bar_desdist))); %Barrierepitch in mm
25 vrange=[650 950]; %Viewing Range [min max]
26 latoff=0;
27 %%
28 range=vrange(1):1:vrange(end);
29 pixel_num = -n_barop/2:1:n_barop/2;%Vektor Anzahl der Barriereöffnungen über die gesamte Anzeige
30 pixel_pos_x = pixel_num*disp_pitchh3D; % Berechnung der Position von jedem Pixel-Paar zur Mitte
31 shiftvec_init=pixel_num*(bar_pitch-disp_pitchh3D); %Vektor Verschiebung über Displayposition für
   ↔ initialen Barrierepitch

32 % Daten zusammenfassen
33 data.shiftvec_init=shiftvec_init;
34 data.bar_gap=bar_gap;
35 data.bar_n=bar_n;
36 data.pixel_num=pixel_num;
37 data.pixel_pos_x=pixel_pos_x;

```

```

38 data.disp_pitchh3D=disp_pitchh3D;
39 data.bar_desdist=bar_desdist;
40 data.range=range;
41 data.eyedist=eye_dist;
42 data.bar_pitch=bar_pitch;
43 data.disp_subpitchhmm=disp_subpitchhmm;

44 %% Lade gemessene Abstrahlcharakteristik
45 %Lade Messdaten
46 load('Helligkeitsverteilung.mat','Winkel','LWW','LWB','LBW','LBB');
47 off=0.625;
48 data.Lum_ang=Winkel+off;
49 data.LumBW=LBW;
50 data.LumWB=LWB;
51 data.LumBB=LBB;

52 % figure(666) %nur zum debugging
53 % plot(data.Lum_ang,data.LumWB,data.Lum_ang,data.LumBW,data.Lum_ang,data.LumBB)
54 % grid on
55 % legend('WB','BW','BB')
56 %% Ab hier keine Änderungen mehr vornehmen %%
57 Simdata.data=data;
58 %% Bestimme welche Distanz die größte Shift-Abweichung vom Design Pitch Shift hat
59 shiftvec_near=pixel_num*disp_pitchh3D*((1/(1+(bar_gap/(bar_n*vrange(1))))))-1); %Vektor
    ↪ Verschiebung über Display (Vorzeichen müsste umgekehrt sein, müsste aber in der gesamten Simu
    ↪ geändert werden, da dort berücksichtigt, Ergebnis ist richtig)
60 shiftvec_far=pixel_num*disp_pitchh3D*((1/(1+(bar_gap/(bar_n*vrange(end))))))-1);
61 diff_near=abs(shiftvec_near(1)-shiftvec_init(1));
62 diff_far=abs(shiftvec_far(1)-shiftvec_init(1));

63 if diff_far>diff_near
64     shift_vec_max=shiftvec_far;
65     max_dist=vrange(end);
66     max_diff=diff_far;
67 else
68     shift_vec_max=shiftvec_near;
69     max_dist=vrange(1);
70     max_diff=diff_near;
71 end
72 %% Simulation für den Fall: Keine Abstandsadaption
73 %Berechnung der Winkelunterschiede zw. Ideal und angewendeter Methode:
74 [ diff_shift_mm,diff_shift_ang,shiftdle_mat,diff_angmax_vec,diff_angmean_vec ] = f_diffidleinit(
    ↪ data );
75 %Simulation der Helligkeitsunterschiede
76 [ LL_left_Lumdrop,LL_right_Lumdrop,XXT_stereo_left,XXT_stereo_right ] = f_LumSimDispVDA(
    ↪ data,diff_shift_ang,shiftdle_mat );
77 %Berechnung der 3D-Stereozone:

```

```

78 y=-100:0.5:100;
79 R=550:1100;
80 step_pos_range=bar_desdist;
81 step_vec_cell{1}=[];
82 [ CC3D_stereo,CC_raute_left_mat,CC_raute_right_mat,y_out ] = f_VDARAute(
    ↪ data,step_pos_range,shftidle_mat,step_vec_cell,diff_shift_ang,y,R);
83 %Daten speichern:
84 Simdata.noVDA=struct('diff_shift_mm',diff_shift_mm,'diff_shift_ang',diff_shift_ang,'LL_left_Lumdrop' ]
    ↪ ,LL_left_Lumdrop,'LL_right_Lumdrop',LL_right_Lumdrop,'XXT_stereo_left',XXT_stereo_left,' ]
    ↪ XXT_stereo_right',XXT_stereo_right,'CC3D_stereo',CC3D_stereo,'y_out',y_out,'y',y,'R',R,' ]
    ↪ CC_raute_left_mat',CC_raute_left_mat,'CC_raute_right_mat',CC_raute_right_mat,'diff_angmax_vec' ]
    ↪ ,diff_angmax_vec,'diff_angmean_vec',diff_angmean_vec);
85 %% Full-Pitch Methode
86 if sw_full
87     fso=bar_pitch/bar_Nop; %Sprungweite an Schaltstelle in mm
88     N_switchMax=2*round(max_diff/fso);%maximale Anzahl an Schaltstellen
89     %Berechne Schaltstellen und Schaltlogik:
90     [ shf_mat,shftidle_mat,shiftstep_mat,step_vec_cell,step_vec_cell_mm ] = f_FullPitch(
    ↪ data,range,fso,latoff);
91     %In welchen Entfernungen wird geschaltet:
92     [ switch_diff_sum,step_pos_range ] = f_VDA_SwitchPos( data,shf_mat,'full');
93     %Berechnung der Winkelunterschiede zw. Ideal und angewendeter Methode:
94     [ diff_shift_mm,diff_shift_ang,diff_angmax_vec,diff_angmean_vec ] = f_diffIdlePitch(
    ↪ data,shftidle_mat,shiftstep_mat );
95     %Simulation der Helligkeitsunterschiede
96     [ LL_left_Lumdrop,LL_right_Lumdrop,XXT_stereo_left,XXT_stereo_right ] = f_LumSimDispVDA(
    ↪ data,diff_shift_ang,shftidle_mat );
97     %Berechnung der 3D-Stereozone:
98     y=-100:0.5:100;
99     R=500:1100;
100    [ CC3D_stereo,CC_raute_left_mat,CC_raute_right_mat,y_out ] = f_VDARAute(
    ↪ data,step_pos_range,shftidle_mat,step_vec_cell,diff_shift_ang,y,R);
101    % Daten speichern:
102    Simdata.full=struct('fso',fso,'N_switchMax',N_switchMax,'shf_mat',shf_mat,'shftidle_mat' ]
    ↪ ,shftidle_mat,'shiftstep_mat',shiftstep_mat,'step_vec_cell',{step_vec_cell},' ]
    ↪ step_vec_cell_mm',{step_vec_cell_mm},'switch_diff_sum',switch_diff_sum,'step_pos_range' ]
    ↪ ,step_pos_range,'diff_shift_mm',diff_shift_mm,'diff_shift_ang',diff_shift_ang,' ]
    ↪ diff_angmax_vec',diff_angmax_vec,'diff_angmean_vec',diff_angmean_vec,'LL_left_Lumdrop' ]
    ↪ ,LL_left_Lumdrop,'LL_right_Lumdrop',LL_right_Lumdrop,'XXT_stereo_left',XXT_stereo_left,' ]
    ↪ XXT_stereo_right',XXT_stereo_right,'CC3D_stereo',CC3D_stereo,'y_out',y_out,'y',y,'R',R,' ]
    ↪ CC_raute_left_mat',CC_raute_left_mat,'CC_raute_right_mat',CC_raute_right_mat);
103 end
104 %% Half-Pitch Methode
105 if sw_half
106     hso=bar_pitch/(2*bar_Nop); %Sprungweite an Schaltstelle in mm
107     N_switchHalf=2*round(max_diff/hso);%Anzahl an Schaltstellen
108     %Berechne Schaltstellen und Schaltlogik:

```

```

109     [ shf_mat,shiftdle_mat,shiftstep_mat,step_vec_cell,step_vec_cell_mm ] = f_HalfPitch(
        ↪ data,range,hso,max_diff,latoff);
110     %In welchen Entfernungen wird geschaltet:
111     [ switch_diff_sum,step_pos_range,switch_diff_zone ] = f_VDA_SwitchPos(
        ↪ data,shf_mat,step_vec_cell,'half' );
112     %Berechnung der Winkelunterschiede zw. Ideal und angewendeter Methode:
113     [ diff_shift_mm,diff_shift_ang,diff_angmax_vec,diff_angmean_vec ] = f_diffIdlePitch(
        ↪ data,shiftdle_mat,shiftstep_mat );
114     %Simulation der Helligkeitsunterschiede:
115     [ LL_left_Lumdrop,LL_right_Lumdrop,XXT_stereo_left,XXT_stereo_right ] = f_LumSimDispVDA(
        ↪ data,diff_shift_ang,shiftdle_mat);
116     %Berechnung der 3D-Stereozone:
117     y=-100:0.5:100;
118     R=550:1100;
119     [ CC3D_stereo,CC_raute_left_mat,CC_raute_right_mat,y_out ] = f_VDARaute(
        ↪ data,step_pos_range,shiftdle_mat,step_vec_cell,diff_shift_ang,y,R);
120     % Daten speichern
121     Simdata.half=struct('hso',hso,'N_switchHalf',N_switchHalf,'shf_mat',shf_mat,'shiftdle_mat' ]
        ↪ ,shiftdle_mat,'shiftstep_mat',shiftstep_mat,'step_vec_cell',{step_vec_cell},' ]
        ↪ step_vec_cell_mm',{step_vec_cell_mm},'switch_diff_sum',switch_diff_sum,'switch_diff_zone' ]
        ↪ ,switch_diff_zone,'step_pos_range',step_pos_range,'diff_shift_mm',diff_shift_mm,' ]
        ↪ diff_shift_ang',diff_shift_ang,'diff_angmax_vec',diff_angmax_vec,'diff_angmean_vec' ]
        ↪ ,diff_angmean_vec,'LL_left_Lumdrop',LL_left_Lumdrop,'LL_right_Lumdrop',LL_right_Lumdrop,' ]
        ↪ XXT_stereo_left',XXT_stereo_left,'XXT_stereo_right',XXT_stereo_right,'CC3D_stereo' ]
        ↪ ,CC3D_stereo,'y_out',y_out,'y',y,'R',R,'CC_raute_left_mat',CC_raute_left_mat,' ]
        ↪ CC_raute_right_mat',CC_raute_right_mat);
122 end
123 %% Fixe Full-Pitch Methode
124 if sw_fullfix
125     fso=bar_pitch/bar_Nop; %Sprungweite an Schaltstelle in mm
126     N_switchMax=2*round(max_diff/fso);%maximale Anzahl an Schaltstellen
127     %Berechne Schaltstellen und Schaltlogik:
128     [ shf_mat,shiftdle_mat,shiftstep_mat,step_vec_cell,step_vec_cell_mm] = f_FullFix(
        ↪ data,range,fso,max_diff,latoff);
129     %In welchen Entfernungen wird geschaltet:
130     [ switch_diff_sum,step_pos_range,switch_diff_zone ] = f_VDA_SwitchPos(
        ↪ data,shf_mat,step_vec_cell,'fullfix' );
131     %Simulation der Helligkeitsunterschiede:
132     [ diff_shift_mm,diff_shift_ang,diff_angmax_vec,diff_angmean_vec ] = f_diffIdlePitch(
        ↪ data,shiftdle_mat,shiftstep_mat );
133     %Simulation der Helligkeitsunterschiede:
134     [ LL_left_Lumdrop,LL_right_Lumdrop,XXT_stereo_left,XXT_stereo_right ] = f_LumSimDispVDA(
        ↪ data,diff_shift_ang,shiftdle_mat);
135     %Berechnung der 3D-Stereozone:
136     y=-100:0.25:100;
137     R=500:1200;

```

```

138 [ CC3D_stereo,CC_raute_left_mat,CC_raute_right_mat,y_out ] = f_VDARaute(
    ↪ data,step_pos_range,shiftdidle_mat,step_vec_cell,diff_shift_ang,y,R);
139 % Daten speichern
140 Simdata.fullfix=struct('fso',fso,'N_switchMax',N_switchMax,'shf_mat',shf_mat,'shiftdidle_mat' ]
    ↪ ,shiftdidle_mat,'shiftstep_mat',shiftstep_mat,'step_vec_cell',{step_vec_cell},' ]
    ↪ step_vec_cell_mm',{step_vec_cell_mm},'switch_diff_sum',switch_diff_sum,'switch_diff_zone' ]
    ↪ ,switch_diff_zone,'step_pos_range',step_pos_range,'diff_shift_mm',diff_shift_mm,' ]
    ↪ diff_shift_ang',diff_shift_ang,'diff_angmax_vec',diff_angmax_vec,'diff_angmean_vec' ]
    ↪ ,diff_angmean_vec,'LL_left_Lumdrop',LL_left_Lumdrop,'LL_right_Lumdrop',LL_right_Lumdrop,' ]
    ↪ XXT_stereo_left',XXT_stereo_left,'XXT_stereo_right',XXT_stereo_right,'CC3D_stereo' ]
    ↪ ,CC3D_stereo,'y_out',y_out,'y',y,'R',R,'CC_raute_left_mat',CC_raute_left_mat,' ]
    ↪ CC_raute_right_mat',CC_raute_right_mat);
141 end

142 %% Parameter zur grafischen Anzeige
143 EvalPar.dist_vec=[650,730,950]; %Beispielentfernungen für grafische Auswertung
144 EvalPar.distLum_vec=[650,730,900]; % Drei Entfernungen in denen die Abweichung auf der
    ↪ Helligkeitsverteilung ausgewertet werden soll
145 EvalPar.dist_cut=[650,730,950]; %Entfernungen in den ein Schnitt durch die Helligkeitsverteilung
    ↪ auf dem Display gelegt werden soll
146 EvalPar.lang='de'; %hier Sprache der Beschriftungen wählen 'de' == deutsch; 'en' == englisch
147 EvalPar.threslum=0.05; %Schwellwert für Helligkeitsschwankungen 0.05=5%;
148 EvalPar.thresxt=4; %Schwellwert für Crosstalk in Prozent 4= 4%
149 EvalPar.thressc=10; %Schwellwert für Stereokontrast ; 10 = 10:1
150 EvalPar.minwidth=10; %Mindestbreite in mm der Sterozone (nur zur farblichen Hervorhebung) bei
    ↪ Stereokontrast thressc
151 EvalPar.switch=[sw_full,sw_half,sw_fullfix];
152 f_VDA_display( Simdata,EvalPar); %Funktion zum Plotten der Ergebnisse

```

Funktion: f_diffidleinit.m

```

1 function [
    ↪ shift_diff_initidle_mm,shift_diff_initidle_ang,shiftdidle_mat,diff_angmax_vec,diff_angmean_vec]
    ↪ = f_diffidleinit( data)
2 %Berechnung der Winkelabweichung ohne Adaption
3 %by Christoph Ewen, 2014
4 %v. 1.0
5 range=data.range;
6 bar_n=data.bar_n;
7 bar_gap=data.bar_gap;
8 shiftvec_init=data.shiftvec_init;
9 disp_pitchh3D=data.disp_pitchh3D;
10 pixel_num=data.pixel_num;
11 shiftdidle_mat=zeros(length(range),length(shiftvec_init));
12 for kk=1:length(range)
13     shiftvec=pixel_num*disp_pitchh3D*((1/(1+(bar_gap/(bar_n*range(kk))))))-1);

```

```

14     shiftidle_mat(kk,:)=shiftvec;
15 end

16 shiftvec_init_mat= repmat(shiftvec_init,length(range),1);
17 shift_diff_initidle_mm=shiftvec_init_mat-shiftidle_mat;
18 ang_in=atand(shift_diff_initidle_mm./bar_gap);
19 shift_diff_initidle_ang=asind(bar_n.*sind(ang_in));
20 diff_angmax_vec=max(abs(shift_diff_initidle_ang),[],2);
21 diff_angmean_vec=mean(abs(shift_diff_initidle_ang),2);
22 end

```

Funktion: f_diffIdlePitch.m

```

1 function [ diff_shift_mm,diff_shift_ang,diff_angmax_vec,diff_angmean_vec ] = f_diffIdlePitch(
    ↪ data,shiftidle_mat,shiftstep_mat )
2 %Berechnet die Abweichung vom idealen Pitch zur Methode
3 % by Christoph Ewen, 2014
4 % v.1.0
5 bar_gap=data.bar_gap;
6 bar_n=data.bar_n;
7 diff_shift_mm=shiftstep_mat-shiftidle_mat;
8 ang_in=atand(diff_shift_mm./bar_gap);
9 diff_shift_ang=asind(bar_n.*sind(ang_in));
10 diff_angmax_vec=max(abs(diff_shift_ang),[],2);
11 diff_angmean_vec=mean(abs(diff_shift_ang),2);
12 end

```

Funktion: f_FullPitch.m

```

1 function [ shf_full_mat,shiftidle_mat,shiftstep_mat,step_vec_cell,step_vec_cell_mm ] =
    ↪ f_FullPitch( data,range,fso,latoff)
2 %Berechnung von Fullpitch Schaltstellen und Stufenfunktion für einen ganzen
3 %Betrachtungsrage
4 %by Christoph Ewen, 2014
5 %v. 1.0

6 %Output:
7 %shiftidle_mat == Matrix mit den idealen shifts für jeden Abstand
8 %shiftstep_mat == Matrix mit den shifts in mm an jeder Position auf dem
9 % Display und in jedem Betrachtungsabstand
10 %shf_full_mat == Matrix mit der Anzahl der Schaltvorgänge an jeder Position auf dem
11 % Display und in jedem Betrachtungsabstand
12 %step_vec_cell == Cell mit Vektoren die die Schaltstellen auf den Display
13 % für jeden Abstand beinhalten Angabe in pixel (Ausgabe +/- Mitte Display)
14 %step_vec_cell_mm ==Cell mit Vektoren für die Schaltstellen auf dem Display
15 % in mm
16 shiftvec_init=data.shiftvec_init;

```

```

17 bar_gap=data.bar_gap;
18 bar_n=data.bar_n;
19 pixel_num=data.pixel_num;
20 disp_pitchh3D=data.disp_pitchh3D;
21 desdist=data.bar_desdist;
22 bar_pitch=data.bar_pitch;

23 pixnum=length(shiftvec_init)-1;
24 range=reshape(range, [], 1);
25 step_vec_cell=cell(length(range), 1);
26 step_vec_cell_mm=cell(length(range), 1);
27 shf_full_mat=zeros(length(range), length(shiftvec_init));
28 shiftidle_mat=zeros(length(range), length(shiftvec_init));

29 for kk=1:length(range)
30     shiftvec=pixel_num*disp_pitchh3D*((1/(1+(bar_gap/(bar_n*range(kk))))))-1);
31     ↪ %Kleinwinkelnäherung
32     shiftidle_mat(kk, :)=shiftvec;
33     if range(kk)~=desdist;
34         stepsize_full=abs(interp1((shiftvec_init-shiftvec), pixel_num, fso/2));
35         if stepsize_full<pixnum
36             step_vec_p=round(stepsize_full):round(2*stepsize_full):pixnum/2; %
37             step_vec_n=-round(stepsize_full):-round(2*stepsize_full):-pixnum/2;
38             step_vec_n=fliplr(step_vec_n);
39             step_vec=[step_vec_n, step_vec_p];
40             step_vec_mm=step_vec*bar_pitch;
41             step_vec_cell{kk}=step_vec;
42             step_vec_cell_mm{kk}=step_vec_mm;

43             %Sprunglogik
44             zone_vec=[1 step_vec+1+pixnum/2 pixnum+1];
45             for ii=1:length(step_vec)+1
46                 if shiftvec_init(1)-shiftvec(1)<0
47                     if ii<=(length(step_vec)/2)
48                         fs_step=length(step_vec)/2-(ii-1);
49                     elseif ii>=(length(step_vec)/2)+2
50                         fs_step=-ii+(length(step_vec)/2)+1;
51                     else
52                         fs_step=0;
53                     end
54                 elseif shiftvec_init(1)-shiftvec(1)>0
55                     if ii<=(length(step_vec)/2)
56                         fs_step=-(length(step_vec)/2-(ii-1));
57                     elseif ii>=(length(step_vec)/2)+2
58                         fs_step=-(-ii+(length(step_vec)/2)+1);
59                     else

```



```

59         fs_step=0;
60     end
61     else
62         fs_step=0;
63     end
64     shf_full_mat(kk,zone_vec(ii):zone_vec(ii+1))= fs_step;
65 end
66 end
67 end
68 end
69 shf_full_mat=shf_full_mat+latoff;
70 shiftstep_mat= repmat(shiftvec_init,length(range),1)+shf_full_mat*fso;
71 end

```

Funktion: f_HalfPitch.m

```

1 function [ shf_half_mat,shiftdle_mat,shiftstep_mat,step_vec_cell,step_vec_cell_mm ] =
   ↪ f_HalfPitch( data,range,hso,max_diff,latoff)
2 %Berechnung der Halfpitch Schaltstellen und Stufenfunktion für einen Betrachtungsrage
3 %by Christoph Ewen, 2014
4 %v. 1.0
5 %Output:
6 %shiftdle_mat == Matrix mit den idealen shifts für jeden Abstand
7 %shiftstep_mat == Matrix mit den shifts in mm an jeder Position auf dem
8 % Display und in jedem Betrachtungsabstand
9 %shf_half_mat == Matrix mit der Anzahl der Schaltvorgänge an jeder Position auf dem
10 % Display und in jedem Betrachtungsabstand
11 %step_vec_cell == Cell mit Vektoren die die Schaltstellen auf den Display
12 % für jeden Abstand beinhalten Angabe in pixel (Ausgabe +/- Mitte Display)
13 %step_vec_cell_mm ==Cell mit Vektoren für die Schaltstellen auf dem Display
14 % in mm
15 shiftvec_init=data.shiftvec_init;
16 bar_gap=data.bar_gap;
17 bar_n=data.bar_n;
18 pixel_num=data.pixel_num;
19 disp_pitchh3D=data.disp_pitchh3D;
20 bar_pitch=data.bar_pitch;
21 pixnum=length(shiftvec_init)-1;
22 range=reshape(range,[],1); %Sicherstellen dass range immer Spaltenvektor ist
23 f_half=abs(max_diff/hso);
24 stepsize_theo=round(pixnum/(2*f_half));
25 if rem(stepsize_theo,2)==0
26     stepsize=stepsize_theo;

```

```

27 else
28     stepsize=stepsize_theo-1;
29 end

30 step_pos_vec_half_right=stepsize/2:stepsize:pixnum/2;
31 step_pos_vec_half_left=-stepsize/2:-stepsize:-pixnum/2;
32 step_pos_vec_half=[fliplr(step_pos_vec_half_left),step_pos_vec_half_right];
33 step_vec_cell=cell(length(range),1);
34 step_vec_cell_mm=cell(length(range),1);
35 shf_half_mat=zeros(length(range),length(shiftvec_init));
36 shiftidle_mat=zeros(length(range),length(shiftvec_init));
37 ind_steppos=step_pos_vec_half+1+pixnum/2;
38 shf=zeros(1,length(ind_steppos));
39 zone_vec=[1 ind_steppos pixnum+1];
40 for kk=1:length(range)
41     shiftvec=pixel_num*disp_pitchh3D*((1/(1+(bar_gap/(bar_n*range(kk)))))-1); %Kleinwinkelnäherung
42     shiftidle_mat(kk,:)=shiftvec;
43     step_vec_cell{kk}=step_pos_vec_half;
44     step_vec_cell_mm{kk}=step_pos_vec_half*bar_pitch;
45     for i=length(ind_steppos)/2:-1:1
46         if i==1
47             diff_0h=shiftvec_init(ind_steppos(i))+shf(i+1)*hso+hso-shiftvec(ind_steppos(i));
48             diff_0l=shiftvec_init(ind_steppos(i))+shf(i+1)*hso-hso-shiftvec(ind_steppos(i));
49             diff_1h=shiftvec_init(1)+shf(i+1)*hso+hso-shiftvec(1);
50             diff_1l=shiftvec_init(1)+shf(i+1)*hso-hso-shiftvec(1);
51         else
52             diff_0h=shiftvec_init(ind_steppos(i))+shf(i+1)*hso+hso-shiftvec(ind_steppos(i));
53             diff_0l=shiftvec_init(ind_steppos(i))+shf(i+1)*hso-hso-shiftvec(ind_steppos(i));
54             diff_1h=shiftvec_init(ind_steppos(i-1))+shf(i+1)*hso+hso-shiftvec(ind_steppos(i-1));
55             diff_1l=shiftvec_init(ind_steppos(i-1))+shf(i+1)*hso-hso-shiftvec(ind_steppos(i-1));
56         end
57         [~,I] = max([abs(diff_0h),abs(diff_0l),abs(diff_1h),abs(diff_1l)]);
58         if I==1 || I==3
59             hs_step=-1;
60         else
61             hs_step=1;
62         end
63         shf(i)=shf(i+1)+hs_step;
64     end
65     for i=(length(ind_steppos)/2)+2:length(ind_steppos)+1
66         if i==length(ind_steppos)+1
67             diff_0h=shiftvec_init(ind_steppos(i-1))+shf(i-1)*hso+hso-shiftvec(ind_steppos(i-1));
68             diff_0l=shiftvec_init(ind_steppos(i-1))+shf(i-1)*hso-hso-shiftvec(ind_steppos(i-1));
69             diff_1h=shiftvec_init(end)+shf(i-1)*hso+hso-shiftvec(end);
70             diff_1l=shiftvec_init(end)+shf(i-1)*hso-hso-shiftvec(end);
71         else
72             diff_0h=shiftvec_init(ind_steppos(i-1))+shf(i-1)*hso+hso-shiftvec(ind_steppos(i-1));

```

```

73         diff_0l=shiftvec_init(ind_steppos(i-1))+shf(i-1)*hso-hso-shiftvec(ind_steppos(i-1));
74         diff_1h=shiftvec_init(ind_steppos(i))+shf(i-1)*hso+hso-shiftvec(ind_steppos(i));
75         diff_1l=shiftvec_init(ind_steppos(i))+shf(i-1)*hso-hso-shiftvec(ind_steppos(i));
76     end
77     [~,I] = max([abs(diff_0h),abs(diff_0l),abs(diff_1h),abs(diff_1l)]);
78     if I==1 || I==3
79         hs_step=-1;
80     else
81         hs_step=1;
82     end
83     shf(i)=shf(i-1)+hs_step;
84 end
85 shf_half=shf;
86 for ii=1:length(ind_steppos)+1
87     shf_half_mat(kk,zone_vec(ii):zone_vec(ii+1))=shf_half(ii);
88 end
89 end
90 shf_half_mat=shf_half_mat+2*latoff;
91 shiftstep_mat=repmat(shiftvec_init,length(range),1)+shf_half_mat*hso;
92 end

```

Funktion: f_FullFix.m

```

1 function [ shf_fullfix_mat,shiftdle_mat,shiftstep_mat,step_vec_cell,step_vec_cell_mm] =
   ↪ f_FullFix( data,range,fso,max_diff,latoff)
2 %Berechnung von Fixen Fullpitch Schaltstellen an festen Stellen, im Gegensatz zu HalfPitch muss
3 %allerdings nicht geschaltet werden
4 %by Christoph Ewen, 2014
5 %v. 1.0
6 shiftvec_init=data.shiftvec_init;
7 bar_gap=data.bar_gap;
8 bar_n=data.bar_n;
9 pixel_num=data.pixel_num;
10 disp_pitchh3D=data.disp_pitchh3D;
11 bar_pitch=data.bar_pitch;
12 pixnum=length(shiftvec_init)-1;
13 range=reshape(range,[],1); %sicherstellen dass range immer Spaltenvektor ist
14 f_fullfix=abs(max_diff/fso);
15 stepsize_theo=round(pixnum/(2*f_fullfix));
16 if rem(stepsize_theo,2)==0
17     stepsize=stepsize_theo;
18 else
19     stepsize=stepsize_theo-1;
20 end
21 step_pos_vec_fullfix_right=stepsize/2:stepsize:pixnum/2;

```

```

22 step_pos_vec_fullfix_left=-stepsize/2:-stepsize:-pixnum/2;
23 step_pos_vec_fullfix=[fliplr(step_pos_vec_fullfix_left),step_pos_vec_fullfix_right];
24 step_vec_cell=cell(length(range),1);
25 step_vec_cell_mm=cell(length(range),1);
26 shf_fullfix_mat=zeros(length(range),length(shiftvec_init));
27 shiftidle_mat=zeros(length(range),length(shiftvec_init));
28 ind_steppos=step_pos_vec_fullfix+1+pixnum/2;
29 zone_vec=[1 ind_steppos pixnum+1];

30 for kk=1:length(range)
31     shiftvec=pixel_num*disp_pitchh3D*((1/(1+(bar_gap/(bar_n*range(kk)))))-1); %Kleinwinkelnäherung
32     shiftidle_mat(kk,:)=shiftvec; %Matrix mit den idealen Shifts für alle Entfernung (unabhängig
    ↪ von Adaptionsmethode)
33     step_vec_cell{kk}=step_pos_vec_fullfix;
34     step_vec_cell_mm{kk}=step_pos_vec_fullfix*bar_pitch;

35     %an jeder Stelle schauen ob geschaltet werden soll, wenn ja in welche
36     %Richtung
37     diff_vec=shiftvec_init(ind_steppos)-shiftvec(ind_steppos);
38     sw_vec=zeros(1,length(ind_steppos)+1);

39     for ii=1:(length(ind_steppos)/2)
40         diffpos=diff_vec((length(ind_steppos)/2)-ii+1)/fso;
41         if ii~=length(ind_steppos)/2
42             diffposup=diff_vec((length(ind_steppos)/2)-ii)/fso;
43         else
44             diffposup=(shiftvec_init(1)-shiftvec(1))/fso;
45         end
46         diff0h=diffpos+sw_vec((length(ind_steppos)/2)-ii+2)+1;
47         diff0l=diffpos+sw_vec((length(ind_steppos)/2)-ii+2)-1;
48         diff00=diffpos+sw_vec((length(ind_steppos)/2)-ii+2);
49         diff1h=diffposup+sw_vec((length(ind_steppos)/2)-ii+2)+1;
50         diff1l=diffposup+sw_vec((length(ind_steppos)/2)-ii+2)-1;
51         diff10=diffposup+sw_vec((length(ind_steppos)/2)-ii+2);

52         [~,I]=max([abs(diff0h),abs(diff1h),abs(diff0l),abs(diff1l),abs(diff00),abs(diff10)]);

53         if I==1 || I==2
54             [~,II]=max([abs(diff0l),abs(diff1l),abs(diff00),abs(diff10)]);
55             if II==1 || II==2
56                 sw_vec((length(ind_steppos)/2)-ii+1)=sw_vec((length(ind_steppos)/2)-ii+2);
57             elseif II==3 || II==4
58                 sw_vec((length(ind_steppos)/2)-ii+1)=sw_vec((length(ind_steppos)/2)-ii+2)-1;
59             end
60         elseif I==3 || I==4
61             [~,II]=max([abs(diff0h),abs(diff1h),abs(diff00),abs(diff10)]);
62             if II==1 || II==2

```

```

63         sw_vec((length(ind_steppos)/2)-ii+1)=sw_vec((length(ind_steppos)/2)-ii+2);
64     elseif II==3 || II==4
65         sw_vec((length(ind_steppos)/2)-ii+1)=sw_vec((length(ind_steppos)/2)-ii+2)+1;
66     end
67     else
68         [~,II]=max([abs(diff0h),abs(diff1h),abs(diff0l),abs(diff1l)]);
69         if II==1 || II==2
70             sw_vec((length(ind_steppos)/2)-ii+1)=sw_vec((length(ind_steppos)/2)-ii+2)-1;
71         elseif II==3 || II==4
72             sw_vec((length(ind_steppos)/2)-ii+1)=sw_vec((length(ind_steppos)/2)-ii+2)+1;
73         end
74     end
75 end
76 sw_vec((length(ind_steppos)/2)+2:end)=-fliplr(sw_vec(1:(length(ind_steppos)/2)));
77 for nn=1:length(zone_vec)-1
78     shf_fullfix_mat(kk,zone_vec(nn):zone_vec(nn+1))=sw_vec(nn);
79 end
80 end
81 shf_fullfix_mat=shf_fullfix_mat+latoff;
82 shiftstep_mat= repmat(shiftvec_init,length(range),1)+shf_fullfix_mat*fso; %Shifts für die
    ↪ Adaptionmethode
83 end

```

Funktion: f_LumSimDispVDA.m

```

1 function [ LL_left_Lumdrop,LL_right_Lumdrop,XXT_stereo_left,XXT_stereo_right ] = f_LumSimDispVDA(
    ↪ data,diff_shift_ang,shftidle_mat_full )
2 %Simuliert auf Grundlage einer statisch gemessen/simulierten
3 %Helligkeitsverteilung die wahrgenommenen Helligkeitssprünge und XT auf dem
4 %Display für jeden Abstand
5 %v. 1.0
6 %1.) Berechne Blickwinkel für linkes und rechts Auge auf jeden Pixel auf
7 %dem Display (Mitte Barriereöffnung) für jeden Betrachtungsabstand
8 % (Fehler durch Kleinwinkelnäherung wird vernachlässigt)
9 %2.) Interpoliere die Helligkeitsverteilung der statischen
10 %Helligkeitsverteilung
11 %by Christoph Ewen, 2014
12 pixel_num=data.pixel_num;
13 disp_pitchh3D=data.disp_pitchh3D;
14 bar_pitch=data.bar_pitch;
15 deye_dist=data.eyedist;
16 range=data.range;
17 Lum_ang=data.Lum_ang;
18 LumBW=data.LumBW;
19 LumWB=data.LumWB;

```

```

20 LumBB=data.LumBB;

21 ang_mat=zeros(length(range),size(shiftidle_mat_full,2));
22 ang_mat_right=zeros(length(range),size(shiftidle_mat_full,2));
23 ang_mat_left=zeros(length(range),size(shiftidle_mat_full,2));
24 LL_left_stereo=zeros(length(range),size(shiftidle_mat_full,2));
25 LL_left_pseudo=zeros(length(range),size(shiftidle_mat_full,2));
26 LL_left_BB=zeros(length(range),size(shiftidle_mat_full,2));
27 LL_right_stereo=zeros(length(range),size(shiftidle_mat_full,2));
28 LL_right_pseudo=zeros(length(range),size(shiftidle_mat_full,2));
29 LL_right_BB=zeros(length(range),size(shiftidle_mat_full,2));

30 for kk=1:length(range)
31     ang_mat(kk,:)=atand((pixel_num*bar_pitch-shiftidle_mat_full(kk,:))./range(kk)); %Winkel
        ↪ Nasenwurzel zu jedem Pixel auf Display
32     ang_mat_right(kk,:)=atand((pixel_num*bar_pitch+shiftidle_mat_full(kk,:)+deye_dist/2)./range(
        ↪ kk));
33     ang_mat_left(kk,:)=atand((pixel_num*bar_pitch+shiftidle_mat_full(kk,:)-deye_dist/2)./range(
        ↪ kk));
34     LL_left_stereo(kk,:) =
        ↪ interp1(Lum_ang,LumWB,ang_mat_left(kk,:)-ang_mat(kk,:)+diff_shift_ang(kk,:));
35     LL_left_pseudo(kk,:) =
        ↪ interp1(Lum_ang,LumBW,ang_mat_left(kk,:)-ang_mat(kk,:)+diff_shift_ang(kk,:));
36     LL_left_BB(kk,:) =
        ↪ interp1(Lum_ang,LumBB,ang_mat_left(kk,:)-ang_mat(kk,:)+diff_shift_ang(kk,:));
37     LL_right_stereo(kk,:) =
        ↪ interp1(Lum_ang,LumBW,ang_mat_right(kk,:)-ang_mat(kk,:)+diff_shift_ang(kk,:));
38     LL_right_pseudo(kk,:) =
        ↪ interp1(Lum_ang,LumWB,ang_mat_right(kk,:)-ang_mat(kk,:)+diff_shift_ang(kk,:));
39     LL_right_BB(kk,:) =
        ↪ interp1(Lum_ang,LumBB,ang_mat_right(kk,:)-ang_mat(kk,:)+diff_shift_ang(kk,:));

40 end
41 %% Helligkeitsvariation für jede Displayposition wahrgenommen im Raum
42 norm=max([max(max(LL_left_stereo)),max(max(LL_right_stereo))]);
43 LL_left_Lumdrop=LL_left_stereo./norm;
44 LL_right_Lumdrop=LL_right_stereo./norm;

45 %% Stereokontrast im Raum vorm Display für jede Displayposition
46 XXT_stereo_left=100*((LL_left_pseudo-LL_left_BB)./(LL_left_stereo-LL_left_BB));
47 XXT_stereo_right=100*((LL_right_pseudo-LL_right_BB)./(LL_right_stereo-LL_right_BB));
48 end

```

Funktion: f_VDA_SwitchPos.m

```

1 function [ switch_diff_sum,step_pos_range,switch_diff_zone] = f_VDA_SwitchPos( varargin )
2 %Berechnet abhängig von der ausgewählten Adaptionsmethode in welchem

```

```

3  %Abstand geschaltet wird; für Half-Pitch und Full Pitch Fix auch welche
4  %Zone geschaltet wird
5  %by Christoph Ewen, 2014
6  %v. 1.0
7  data=varargin{1};
8  range=data.range;
9  shf_mat=varargin{2};
10 method=varargin{end};
11 switch method
12     case 'full'
13         switch_diff=abs(diff(shf_mat,1,1));
14         switch_diff(switch_diff~=0)=1;
15         switch_diff_sum=sum(switch_diff,2);
16         switch_diff_sum(switch_diff_sum~=0)=1;
17         switch_diff_sum(switch_diff_sum==0)=NaN;
18     case 'fullfix'
19         steppos_cell=varargin{3};
20         steppos=steppos_cell{1};
21         ind_steppos=steppos+1+(length(shf_mat(1,:))-1)/2;
22         if rem(ind_steppos(1),2)~=0
23             zonepos=[ind_steppos-(ind_steppos(1)+1)/2, ind_steppos(end)+(ind_steppos(1)+1)/2];
24         else
25             zonepos=[ind_steppos-ind_steppos(1)/2, ind_steppos(end)+ind_steppos(1)/2];
26         end
27         switch_diff=abs(diff(shf_mat(:,zonepos),1,1));
28         switch_diff(switch_diff~=0)=1;
29         switch_diff_sum=sum(switch_diff,2);
30         switch_diff_sum(switch_diff_sum~=0)=1;
31         switch_diff_sum(switch_diff_sum==0)=NaN;
32
33         zone_number=-(size(switch_diff,2)-1)/2:1:(size(switch_diff,2)-1)/2;
34         switch_diff_zone=switch_diff.*repmat(zone_number,size(switch_diff,1),1);
35         switch_diff_zone(switch_diff_zone==0)=NaN;
36     case 'half'
37         steppos_cell=varargin{3};
38         steppos=steppos_cell{1};
39         ind_steppos=steppos+1+(length(shf_mat(1,:))-1)/2;
40         if rem(ind_steppos(1),2)~=0
41             zonepos=[ind_steppos-(ind_steppos(1)+1)/2, ind_steppos(end)+(ind_steppos(1)+1)/2];
42         else
43             zonepos=[ind_steppos-ind_steppos(1)/2, ind_steppos(end)+ind_steppos(1)/2];
44         end
45         switch_diff=abs(diff(shf_mat(:,zonepos),1,1));
46         switch_diff(switch_diff~=0)=1;
47         switch_diff_sum=sum(switch_diff,2);
48         switch_diff_sum(switch_diff_sum~=0)=1;
49         switch_diff_sum(switch_diff_sum==0)=NaN;

```

```

49     zone_number=-((size(switch_diff,2)-1)/2+1:(size(switch_diff,2)-1)/2);
50     switch_diff_zone=switch_diff.*repmat(zone_number,size(switch_diff,1),1);
51     switch_diff_zone(switch_diff_zone==0)=NaN;
52     otherwise
53         disp('no such method')
54     end
55     if size(shf_mat,1)==1
56         step_pos_range=range;
57     else
58         step_pos_range=range(1+find(switch_diff_sum==1)); %Entfernungen in der geschaltet wird
59     end
60     end

```

Funktion: f_VDARaute.m

```

1  function [ CC3D_stereo_mat,CC_raute_left_mat,CC_raute_right_mat,y_out ] = f_VDARaute(
   ↪  data,step_pos_range,shiftdidle_mat,step_vec_cell,diff_shift_ang,y,R)
2  %Berechnet die Stereoraute für jede Maskenadaption
3  %by Christoph Ewen,2014
4  %v. 1.0
5
6  %% 3D-Messspots Stereo
7  pixel_num=data.pixel_num;
8  range=data.range;
9  eyedist=data.eyedist;
10 disp_pitchh3D=data.disp_pitchh3D;
11 bar_pitch=data.bar_pitch;
12 bar_gap=data.bar_gap;
13 bar_n=data.bar_n;
14 Lum_ang=data.Lum_ang;
15 L_WB=data.LumWB;
16 L_BW=data.LumBW;
17
18 stepsize=abs(y(2)-y(1));
19 eyed=eyedist/stepsiz; %in einheiten stepsiz
20 y_out=y((eyed/2)+1):stepsize:y(end-(eyed/2));
21
22 [YY,ZZ] = meshgrid(y,R); %Erzeuge Grid (Raumbereich vor Display)
23 CC3D_stereo_mat=zeros(size(YY,1),size(YY,2)-eyed,length(step_pos_range));
24 CC_raute_left_mat=zeros(size(YY,1),size(YY,2)-eyed,length(step_pos_range));
25 CC_raute_right_mat=zeros(size(YY,1),size(YY,2)-eyed,length(step_pos_range));
26 evalind_cell=cell(length(step_vec_cell),1);
27
28 %Erzeuge cell mit Auswertepositioinen
29 idle_shiftdidle_mat=asind(bar_n*sind(atan2(shiftdidle_mat./bar_gap)));

```



```

26 for kk=1:length(step_pos_range)
27     if length(step_vec_cell{kk})<=1 %keine Schaltstelle oder noVDA
28         evalind_cell{kk}=[1+(length(pixel_num)-1)/2,1,length(pixel_num)-1]; %Punkte Mitte, linker
           ↳ Rand, rechter Rand
29     else
30         vecpos=step_vec_cell{kk}(:)+1+(length(pixel_num)-1)/2;
31         vecpos=vecpos';
32         leftside=vecpos-2; %Es wird immer zwei Pixel vor und hinter der Schaltstelle analysiert
33         rightside=vecpos+2;
34         leftside=leftside(leftside>0);
35         rightside=rightside(rightside<=length(pixel_num));
36         evalind_cell{kk}=sort([1,(length(pixel_num)-1),1+(length(pixel_num)-
           ↳ 1)/2,leftside,rightside]);
37     end
38     AA=zeros(size(YY,1),size(YY,2),length(evalind_cell{kk}));
39     LL_left=zeros(size(YY,1),size(YY,2),length(evalind_cell{kk}));
40     LL_right=zeros(size(YY,1),size(YY,2),length(evalind_cell{kk}));
41     C_L=zeros(size(YY,1),size(YY,2),length(evalind_cell{kk}));
42     C_R=zeros(size(YY,1),size(YY,2),length(evalind_cell{kk}));
43     C_stereo=zeros(size(YY,1),size(YY,2)-eyed,length(evalind_cell{kk}));
44     C_pseudo=zeros(size(YY,1),size(YY,2)-eyed,length(evalind_cell{kk}));
45     C_mono_left=zeros(size(YY,1),size(YY,2)-eyed,length(evalind_cell{kk}));
46     C_mono_right=zeros(size(YY,1),size(YY,2)-eyed,length(evalind_cell{kk}));
47     steppos=pixel_num(evalind_cell{kk});

48     for n=1:length(evalind_cell{kk})
49         AA(:,:,n) = atand((YY-steppos(n)*bar_pitch)./ZZ) ; %Berechne den Winkel von jedem Raumpunkt
           ↳ zu Messpunkt n
50         LL_left(:,:,n) = interp1(Lum_ang+diff_shift_ang(step_pos_range(kk)-range(
           ↳ 1)+1,evalind_cell{kk}(n))+idle_shiftang_mat(step_pos_range(kk)-range(
           ↳ 1)+1,evalind_cell{kk}(n)),L_WB,AA(:,:,n)); %Interpoliere die Luminance zu jedem
           ↳ Raumpunkt; linker View
51         LL_right(:,:,n) = interp1(Lum_ang+diff_shift_ang(step_pos_range(kk)-range(
           ↳ 1)+1,evalind_cell{kk}(n))+idle_shiftang_mat(step_pos_range(kk)-range(
           ↳ 1)+1,evalind_cell{kk}(n)),L_BW,AA(:,:,n)); %Rechter
           ↳ View
52         LL_left(:,:,n) = interp1(Lum_ang+idle_shiftang_mat(step_pos_range(kk)-range(
           ↳ 1)+1,evalind_cell{kk}(n)),L_WB,AA(:,:,n)); %Interpoliere die Luminance zu jedem
           ↳ Raumpunkt; linker View
53         LL_right(:,:,n) = interp1(Lum_ang+idle_shiftang_mat(step_pos_range(kk)-range(
           ↳ 1)+1,evalind_cell{kk}(n)),L_BW,AA(:,:,n)); %Rechter
           ↳ View
54         C_L(:,:,n)=LL_left(:,:,n)./LL_right(:,:,n);
55         C_R(:,:,n)=LL_right(:,:,n)./LL_left(:,:,n);
56         C_stereo(:,:,n)=min(C_L(:,1:end-eyed,n), C_R(:,(eyed+1):end,n)); %Berechnung Stereocontrast
           ↳ für einen Messpunkt Annahme Augenabstand 62mm
57         C_pseudo(:,:,n)=min(1./C_L(:,1:end-eyed,n), 1./C_R(:,(eyed+1):end,n));

```

```

58     C_mono_left(:,:,n)=min(C_L(:,1:end-eyed,n), 1./C_R(:,(eyed+1):end,n));
59     C_mono_right(:,:,n)=min(1./C_L(:,1:end-eyed,n), C_R(:,(eyed+1):end,n));
60     end
61     %% Lässt die Plots gut aussehen
62     nn= repmat(prod(C_L,3)==0,1,1,length(evalind_cell{kk}));
63     ll= repmat(prod(C_R,3)==0,1,1,length(evalind_cell{kk}));
64     mm= isnan(C_L(:,1:end-eyed,:).*C_R(:,(eyed+1):end,:));
65     C_L(isnan(C_L))=0;
66     C_R(isnan(C_R))=0;
67     C_L(nn)=0;
68     C_R(ll)=0;
69     C_stereo(mm)=0;
70     CC_raute_left=min(C_L,[],3);
71     CC_raute_right=min(C_R,[],3);
72     CC3D_stereo=min(C_stereo,[],3);
73     CC_raute_left_mat(:,:,kk)=CC_raute_left(:,(eyed/2)+1:end-(eyed/2));
74     CC_raute_right_mat(:,:,kk)=CC_raute_right(:,(eyed/2)+1:end-(eyed/2));
75     CC3D_stereo_mat(:,:,kk)=CC3D_stereo;
76     end

```

A.3.2 Code: Wellen-Optische Simulation

Funktion: Hauptskript zur Wellen-Optischen Simulation der Abstrahlcharakteristik am Beispiel der Prototypischen Anzeige 2

```

1  %Skript zur Simulation der "Experimentellen Anzeige 2"
2  %Die Anzeige wird mit und ohne der Wellenoptischen Optimierung simuliert.
3  %by Christoph Ewen, 2016

4  close all
5  clear all
6  %% Allgemeine Steuerparameter
7  sw_fig=1; %Bilder von Zwischenergebnissen anzeigen
8  figPos=[]; %hier kann eine Figurestartposition [posx posy] zur leichteren Anzeige eingegeben werden
   ↪ falls leer automatisch
9  %% Anzeigensetup
10 %Angaben Displaygeometrie der Barriere und der Anzeige

11 %Parameter der Abbildungsfunktion der Barrieremaske
12 w_bar=0.5*152.5e-3; %Breite Maskenöffnung in mm, Zentrum der Maskenöffnung y=0
13 shift_bar=0; %%Verschiebung der Maskenöffnung bezüglich y=0 in mm;

14 %Parameter der Anzeigenfunktion des Pixellayouts
15 z_gap=1.315; %Abstand zw. Barriere und Farbfilter in mm
16 p_cf=76.25e-3; %Subpixelpitch der Anzeige
17 w_cf=p_cf/2; %Breite Farbfilteröffnung in mm

```

```

18 w_b=39e-3; %Schwarzbereich zw. dem Subpixelpaar in mm
19 n_medium=1.5; %Brechungsindex Material zw. unteren und oberen Spalt
20 shift_cf=w_b/2+w_cf/2; %Verschiebung des Farbfilters gegenüber dem Zentrum in mm;

21 %Zuordnung der Öffnungsbreiten (was liegt oben, was unten)
22 w_slit_unten=w_bar;
23 w_slit_oben=w_cf;
24 shift_oben=shift_cf;
25 shift_unten=shift_bar;

26 %%Parameter für die wellen-optische Optimierung
27 %Amplituden-Optimierung
28 w_edge=3*10^-3; %Breite eines Bereichs im Farbfilter mit reduzierter Transmission (jeweils an den
    ↪ Rändern der Farbfilteröffnung)
29 t_oben=0.5; %Wert der Transmission (0-1)
30 t_func=ones(1,1001); %Transmissionsfunktion (kann beliebig lang sein; length(t_func) ==
    ↪ w_slit_oben!!!
31 edgepos=round(1000*w_edge/w_slit_oben);
32 t_func(1,1:edgepos+1)=t_oben;
33 t_func(1,end-edgepos:end)=t_oben; %Transmissionfunktion des oberen Spaltes

34 %Phasenoptimierung
35 w_ito=18.8e-3; % in mm; Breite des phasenschiebenden Bereichs im Farbfilter
36 n_ito=1.94; %Brechungsindex vom phasenschiebenden Materials (in diesem Fall ITO)
37 d_ito=50e-6; %Dicke Ito in mm; legt zusammen mit Brechungsindex den Phasenshift fest
38 p_ito_pos=round(1000*(w_slit_oben-w_ito)/(2*w_slit_oben));
39 p_func=zeros(1,1001); %Phasenfunktion
40 p_func(1,p_ito_pos+1:end-p_ito_pos)=d_ito;
41 n_phase=n_ito;

42 %% Allgemeine Parameter der Simulation
43 %Laufparameter/Summation über Winkel und Wellenlänge

44 %Winkelbereich der einfallenden ebenen Wellen
45 ang_range=-10:0.1:10; %Winkel in Grad

46 %zu simulierender Wellenlängenbereich
47 lambda_vec=(400:25:700)*10^-6; %Wellenlängenbereich in mm (aufsteigend sortiert)

48 %Winkelbereich im Fernfeld
49 winkel_vec Ausgabe=-20:0.05:20; %Winkel in Grad
50 %% Spektrum der Hintergrundbeleuchtung
51 load('data\LichtboxSpektrum.mat','lam','spec1') %zuvor gemessenes Spektrum der Hintergrundbeleuchtung
    ↪ wird geladen
52 spec=spec1(2,:);
53 lamspec=lam;
54 %% Definition der Anzahl der Durchläufe

```

```

55 num_runs=2; %Anzahl der Durchläufe; in diesem Fall zwei Durchläufe mit und ohne Optimierung
56 for n_run=1:num_runs %Anzahl der Durchläufe
57     switch n_run
58         case 1
59             % Parameter erster Durchlauf (ohne Optimierung)
60             sw_opt_phase=0; %Optimierung Phasenfunktion aus
61             sw_opt_amp=0; %Optimierung Amplitudenfunktion aus
62         case 2
63             % Parameter zweiter Durchlauf (mit Optimierung)
64             sw_opt_phase=1; %Optimierung Phasenfunktion an
65             sw_opt_amp=1; %Optimierung Amplitudenfunktion an
66     end
67     %% Weitere Parameter
68     sw_map=0; %Experimentelle Funktion (wird nicht verwendet)
69     sw_lamb=1; %Lambertscher Strahler Charakteristik verwenden

70     %% %% ab hier keine eigenen Änderungen mehr %% %%
71     for ii=1:3 %es gibt drei durchläufe, um jeweils den Nachbarsubpixel mitzusimulieren
72         %% Zuordnung %%
73         S(ii,n_run).ang_range=ang_range;
74         S(ii,n_run).lambda_vec=lambda_vec;
75         S(ii,n_run).spec=spec;
76         S(ii,n_run).lamspec=lamspec;
77         S(ii,n_run).winkel_vec_int=winkel_vec_ausgabe;
78         S(ii,n_run).sw_map=sw_map;
79         S(ii,n_run).sw_lamb=sw_lamb;
80         S(ii,n_run).sw_opt_phase=sw_opt_phase;
81         S(ii,n_run).sw_opt_amp=sw_opt_amp;

82         %Maske
83         S(ii,n_run).w_slit_unten=w_slit_unten;
84         S(ii,n_run).w_slit_oben=w_slit_oben;
85         S(ii,n_run).shift_unten=shift_unten;
86         S(ii,n_run).z_gap=z_gap;
87         S(ii,n_run).n_medium=n_medium;

88         switch ii
89             case 1
90                 S(ii,n_run).shift_oben=shift_oben;
91             case 2
92                 S(ii,n_run).shift_oben=shift_oben+2*p_cf;
93             case 3
94                 S(ii,n_run).shift_oben=shift_oben-2*p_cf;
95         end
96         %Transmissionsfunktion
97         if sw_opt_amp
98             S(ii,n_run).t_oben.trans=t_func;

```

```

99         else
100             S(ii,n_run).t_oben.trans=NaN;
101         end
102         %Phasenfunktion
103         if sw_opt_phase
104             S(ii,n_run).p_oben.phase=p_func;
105             S(ii,n_run).n_ito=n_phase;
106         else
107             S(ii,n_run).p_oben.phase=NaN;
108             S(ii,n_run).n_ito=NaN;
109         end
110     end
111 end
112 %% Simulationsaufrufe
113 for n_sim=1:num_runs %Simulationsdurchläufe
114     %% Spektrum anzeigen
115     if ~isnan(S(1,n_sim).spec)
116         figure(200)
117         plot(S(1,n_sim).lamspec,S(1,n_sim).spec./max(S(1,n_sim).spec),'Linewidth',2)
118         xlabel('Wellenlänge in nm')
119         ylabel('Normalisierte Intensität')
120         title('Verwendetes Spektrum')
121         grid on
122     end
123     for kk=1:3
124         %% Aufruf
125         [ Winkel, L, P ] = SimDiffraction1D(
            ↪ S(kk,n_sim),S(kk,n_sim).sw_map,S(kk,n_sim).sw_opt_phase,S(kk,n_sim).sw_opt_amp,S(
            ↪ kk,n_sim).sw_lamb,sw_fig);
126     end
127 end
128 %% Darstellung plotten
129 f_plotDiffSimu2runs(0(1,1).Winkel,S(1,1),0(1,1).P,0(1,1).L,0(1,1).Winkel,S(1,2),0(1,2).P,0(
    ↪ 1,2).L,figPos);

```

Funktion: Eindimensionale Wellen-Optische Simulation

```

1 function [ Winkel,L,P ] = SimDiffraction1D(
    ↪ S,sw_map,sw_opt_phase,sw_opt_amp,sw_lamb,sw_fig,figPos,sw_opt_phase_unten )
2 %Simulation von Beugungseffekten für 3D-Displays
3 % by Christoph Ewen, 2014
4 %Input:
5 %S == Struct mit Barriereparametern
6 %Output:
7 %L == Luminance Verteilung über Winkel

```

```

8  %Winkel == Winkel des Helligkeitsverteilung
9  %P == Alle Zwischenwerte
10 set(0,'defaultLineLineWidth', 1.5,'defaultaxesfontsize',14)
11 if nargin<7
12     figPos=[0,0];
13 end
14 if nargin<8
15     sw_opt_phase_unten=0;
16 end
17 %% Parameter extrahieren
18 ang_range=S.ang_range;
19 lambda_vec=S.lambda_vec;
20 winkel_vec_int=S.winkel_vec_int;
21 %Spektrum
22 spec=S.spec;
23 lamspec=S.lamspec;

24 if ~isnan(sum(spec))
25     %Spektrum normalisieren
26     spec_norm=spec./max(spec);
27     I_vec=interp1(lamspec,spec_norm,lambda_vec*10^6,'linear',0);
28 else
29     I_vec=ones(1,length(lambda_vec));
30 end

31 %Maske
32 w_slit_unten=S.w_slit_unten;
33 w_slit_oben=S.w_slit_oben;
34 shift_oben=S.shift_oben;
35 shift_unten=S.shift_unten;
36 z_gap=S.z_gap;
37 n_medium=S.n_medium;

38 if sw_opt_phase
39     %ITO
40     n_ito=S.n_ito;
41     p_oben.phase=S.p_oben.phase;
42     p_oben.x=linspace(0,1,length(p_oben.phase));
43 end

44 if sw_opt_phase_unten
45     p_unten.phase=S.p_unten.phase;
46     p_unten.x=linspace(0,1,length(p_unten.phase));
47 end

48 if sw_opt_amp
49     %Half-Tone-Edge

```

```

50     t_oben.trans=S.t_oben.trans;
51     t_oben.x=linspace(0,1,length(t_oben.trans));
52 end
53 %% Wellenlängeninkrement
54 if length(lambda_vec)>1
55     lambda_step=diff(lambda_vec(1:2));
56 else
57     lambda_step=1;
58 end
59 %% Einfallswinkelinkrement
60 if length(ang_range)>1
61     angle_step=diff(ang_range(1:2));
62 else
63     angle_step=1;
64 end
65 %% Fouriertransformation-Parameter
66 dx=0.5*lambda_vec(1); %räumliche Auflösung; kleinste Wellenlänge
67 N_slit_oben=round(w_slit_oben/(2*dx))*2; %Anzahl der Sampling Abschnitte pro oberen slit
68 N_slit_unten=round(w_slit_unten/(2*dx))*2; %Anzahl der Sampling Abschnitte pro unteren slit
69 f_zeropad=3; %stärkeres zeropadding führt zu einer interpolation im freq raum

70 if N_slit_oben>N_slit_unten
71     N=2^(f_zeropad+nextpow2(N_slit_oben)); %Anzahl der Bildpunkte; Vielfaches von 2^n;
72 else
73     N=2^(f_zeropad+nextpow2(N_slit_unten)); %Anzahl der Bildpunkte;
74 end
75 dfx=1/(N*dx);          % Intervalllänge Freq. Raum
76 vec=linspace(-N/2,N/2,N)-0.5;
77 vecx=linspace(-N/2,N/2,N);

78 %% Definition Größe des Feldes -- Masken
79 %Spalt unten
80 shift_N_unten=round(shift_unten/dx);
81 %Amplitudenmaske unten
82 slit_unten_amp=zeros(1,N);
83 slit_unten_amp(1,((N-N_slit_unten)/2)+shift_N_unten:((N-
    ↪ N_slit_unten)/2)+N_slit_unten+shift_N_unten)=1;

84 %Phasenmaske unten
85 slit_unten=slit_unten_amp;
86 if sw_opt_phase_unten==0;
87     slit_unten_phase=zeros(1,N);
88 else
89     slit_unten_phase=zeros(1,N);
90     p_func_unten=interp1(p_unten.x,p_unten.phase,(0:N_slit_unten)/N_slit_unten);
91     slit_unten_phase(1,((N-N_slit_unten)/2)+shift_N_unten:((N-
    ↪ N_slit_unten)/2)+N_slit_unten+shift_N_unten)=p_func_unten;

```

```

92 end
93 %Spalt oben
94 shift_N_oben=round(shift_oben/dx);

95 %Amplitudenmaske Oben
96 slit_oben_amp=zeros(1,N);
97 slit_oben_amp(1,((N-N_slit_oben)/2)+shift_N_oben:((N-N_slit_oben)/2)+N_slit_oben+shift_N_oben)=1;

98 if sw_opt_amp==1
99     t_func_oben=interp1(t_oben.x,t_oben.trans,(0:N_slit_oben)/N_slit_oben);
100    slit_oben_amp(1,((N-N_slit_oben)/2)+shift_N_oben:((N-
    ↪ N_slit_oben)/2)+N_slit_oben+shift_N_oben)=t_func_oben;
101 end

102 %Phasenmaske Oben
103 if sw_opt_phase==0;
104     slit_oben_phase=zeros(1,N);
105 else
106     slit_oben_phase=zeros(1,N);
107     p_func_oben=interp1(p_oben.x,p_oben.phase,(0:N_slit_oben)/N_slit_oben);
108     slit_oben_phase(1,((N-N_slit_oben)/2)+shift_N_oben:((N-
    ↪ N_slit_oben)/2)+N_slit_oben+shift_N_oben)=p_func_oben;
109 end
110 slit_oben=slit_oben_amp;

111 %Figure plotten
112 slit1_plot=slit_unten_amp;
113 slit1_plot(slit1_plot==1)=NaN;
114 slit1_plot=slit1_plot*0;
115 slit2_plot=slit_oben_amp;
116 slit2_plot(slit2_plot==1)=NaN;
117 slit2_plot(slit2_plot==0)=1;
118 slit2_plot=slit2_plot*z_gap;
119 slit2_phase=0.1*slit_oben_phase+z_gap;
120 %%
121 if sw_fig==1
122     hf1=figure(1); %Figure vom Spalt
123     plot(dx*vecx,slit2_plot,dx*vecx,slit1_plot,'LineWidth',4);
124     if sw_opt_phase~=0
125         hold on
126         plot(dx*vecx,slit2_phase,'--r','LineWidth',2);
127         hold off
128     end
129     title('Anordnung Aperturöffnungen')
130     xlabel('x in mm')
131     ylabel('z in mm')
132     axis([min(dx*vecx) max(dx*vecx) -0.1 2*z_gap])

```



```

133     set(hf1,'OuterPosition',[figPos(1) figPos(2)+500 500 500])
134     grid on

135     hf2=figure(2);
136     subplot(1,2,1)
137     ho2_1=plot(dx*vecx,zeros(1,N));
138     title('Intensität nach unterem Spalt')
139     xlabel('Feldgröße in mm')
140     ylabel('Intensität in [a. u.]')
141     grid on
142     set(gca,'XLim',[min(dx*vecx) max(dx*vecx)])
143     subplot(1,2,2)
144     ho2_2=plot(dx*vecx,zeros(1,N));
145     title('Phasenverteilung nach unterem Spalt')
146     xlabel('Feldgröße in mm')
147     ylabel('Phase')
148     set(gca,'YTick',-pi:pi/2:pi)
149     set(gca,'YTickLabel',{'-pi','-pi/2','0','pi/2','pi'})
150     set(hf2,'OuterPosition',[figPos(1)+500 figPos(2)+500 500 500])
151     grid on

152     hf3=figure(3);
153     ho3=plot(linspace(-2*pi,2*pi,N),zeros(1,N));
154     title('Winkelspektrum nach unterem Spalt(z=0)')
155     xlabel('k_x*\lambda')
156     ylabel('Log. Intensität in [a. u.]')
157     set(gca,'XTick',-2*pi:pi:2*pi)
158     set(gca,'XTickLabel',{'-2pi','-pi','0','pi','2pi'})
159     set(gca,'XLim',[-2*pi 2*pi],'LineWidth',1.2)
160     set(hf3,'OuterPosition',[figPos(1)+1000 figPos(2)+500 500 500])
161     grid on

162     hf4=figure(4);
163     ho4=plot(linspace(-2*pi,2*pi,N),zeros(1,N));
164     title('Phase Winkelspektrum an/nach unterem Spalt(z=0)')
165     xlabel('k_x*\lambda')
166     ylabel('Phase')
167     set(gca,'XTick',-2*pi:pi:2*pi)
168     set(gca,'XTickLabel',{'-2pi','-pi','0','pi','2pi'})
169     set(gca,'XLim',[-2*pi 2*pi])
170     set(hf4,'OuterPosition',[figPos(1)+1000 figPos(2)+500 500 500])
171     grid on

172     hf5=figure(5);
173     ho5=plot(linspace(-2*pi,2*pi,N),zeros(1,N));
174     title('Winkelspektrum nach oberen Spalt z_0')
175     xlabel('k_x*\lambda')

```

```

176 ylabel('Log. Intensität in [a. u.]')
177 set(gca,'XTick',-2*pi:pi:2*pi)
178 set(gca,'XTickLabel',{'-2\pi','-\pi','0','\pi','2\pi'})
179 set(gca,'XLim',[-2*pi 2*pi],'LineWidth',1.2)
180 set(hf5,'OuterPosition',[figPos(1)+1000 figPos(2)+500 500 500])
181 grid on

182 hf6=figure(6);
183 ho6=plot(dx*vecx,zeros(1,N));
184 title('Intensität nach unterem Spalt')
185 xlabel('Feldgröße in mm')
186 ylabel('Intensität in [a. u.]')
187 grid on
188 set(gca,'XLim',[min(dx*vecx) max(dx*vecx)])
189 set(hf6,'OuterPosition',[figPos(1)+500 figPos(2)+500 500 500])
190 grid on

191 hf12=figure(12);
192 subplot(1,2,1)
193 ho12_1=plot(dx*vecx,zeros(1,N));
194 title('Intensität vor oberem Spalt')
195 xlabel('Feldgröße in mm')
196 ylabel('Intensität in [a. u.]')
197 grid on
198 set(gca,'XLim',[min(dx*vecx) max(dx*vecx)])
199 subplot(1,2,2)
200 ho12_2=plot(dx*vecx,zeros(1,N));
201 title('Phasenverteilung vor oberem Spalt')
202 xlabel('Feldgröße in mm')
203 ylabel('Phase')
204 set(gca,'YTick',-pi:pi/2:pi)
205 set(gca,'YTickLabel',{'-\pi','-\pi/2','0','\pi/2','\pi'})
206 set(hf12,'OuterPosition',[figPos(1)+1000 figPos(2)+500 500 500])
207 grid on

208 hf13=figure(13);
209 ho13=plot(linspace(-2*pi,2*pi,N),zeros(1,N));
210 title('Fourierkomponenten propagiert z (vor oberem Spalt)')
211 xlabel('kx*\lambda')
212 ylabel('Log. Intensität')
213 set(gca,'XTick',-2*pi:pi:2*pi)
214 set(gca,'XTickLabel',{'-2\pi','-\pi','0','\pi','2\pi'})
215 set(gca,'XLim',[-2*pi 2*pi])
216 set(hf13,'OuterPosition',[figPos(1) figPos(2) 500 500])
217 grid on

218 hf14=figure(14);

```

```

219     ho14=plot(dx*vecx,zeros(1,N));
220     title('Intensität am/nach oberem Spalt')
221     xlabel('mm')
222     set(gca,'XLim',[min(dx*vecx) max(dx*vecx)])
223     grid on
224     set(hf14,'OuterPosition',[figPos(1)+500 figPos(2) 500 500])

225     hf16=figure(16);
226     ho16=plot(dx*vecx,zeros(1,N));
227     title('Intensität vor oberem Spalt')
228     xlabel('Feldgröße in mm')
229     ylabel('Intensität in [a. u.]')
230     grid on
231     set(gca,'XLim',[min(dx*vecx) max(dx*vecx)])
232     set(hf16,'OuterPosition',[figPos(1)+1000 figPos(2)+500 500 500])
233     grid on

234 end
235 %%
236 UU_0=zeros(length(vec),length(lambda_vec),length(ang_range)); %Feld am Ort z=0 in abhängigkeit vom
    ↪ Einfallswinkel und Wellenlänge
237 UU_z=zeros(length(vec),length(lambda_vec),length(ang_range)); %Feld am Ort z in abhängigkeit vom
    ↪ Einfallswinkel und Wellenlänge
238 FF_0=zeros(length(vec),length(lambda_vec),length(ang_range)); %Fourierkomponenten am Orte z=0
239 FF_z=zeros(length(vec),length(lambda_vec),length(ang_range)); %Fourierkomponenten am Orte z
240 I_zv=zeros(length(vec),length(lambda_vec),length(ang_range)); %Fourierkomponenten am Orte z
241 phaseX=zeros(length(ang_range),length(vec));
242 I_zv_ang=zeros(length(winkel_vec_int),length(lambda_vec),length(ang_range));

243 %Waitbar
244 if sw_fig==1
245     hw_text='Please Wait';
246     hw = waitbar(0,hw_text);
247     set(hw, 'OuterPosition',[100 100 290 100])
248 end

249 for l=1:length(lambda_vec)
250     lambda=lambda_vec(l) %Wellenlänge in mm
251     k=(2*pi/lambda);
252     if sw_fig==1
253         hw_text=sprintf('Wavelength %1.3e',lambda);
254         waitbar(1/length(lambda_vec),hw,hw_text)
255     end
256     for m=1:length(ang_range)
257         alpha=ang_range(m); %Einfallswinkel

258         IO=I_vec(l); %Intensität in Watt pro mm

```

```

259     if sw_lamb==1 %lambertsche Charakteristik
260         I_a=cosd(alpha)*I0;
261     else
262         I_a=I0;
263     end
264     I=I_a*dx; %Intensität pro Samplelänge und Einfallswinkel
265     %komplexes Wellenfeld in der Ebene des unteren Spaltes
266     E=ones(size(slit_unten));
267     E=E.*sqrt(I);
268     phaseX(m,:)=k*dx*vec*sind(alpha);
269     field=abs(E).*exp(1i*phaseX(m,:)); %komplexes elektrisches Feld ebene Welle
270     slit_unten_phaseshift=slit_unten_phase;
271     if sw_opt_phase_unten==1
272         slit_unten_phaseshift=slit_unten_phase.*k*(n_ito-1);
273     end
274     U_0=field.*slit_unten.*exp(1i* slit_unten_phaseshift); %komplexes Feld am Ort des Spaltes
    ↪
275     UU_0(:,l,m)=U_0;
276     winkel_vec=acosd(dfx*vec*lambda)-90;

277     [ U_z,F_z,F_0,kx] = fAngSpecProp1D(U_0,dx,lambda/n_medium,z_gap,vec);

278     UU_z(:,l,m)=U_z;
279     FF_0(:,l,m)=F_0;
280     FF_z(:,l,m)=F_z;

281     slit_oben_phaseshift=slit_oben_phase;
282     if sw_opt_phase==1
283         slit_oben_phaseshift=slit_oben_phase.*k*(n_ito-1);
284     end
285     U_z0=U_z.*slit_oben.*exp(1i* slit_oben_phaseshift);
286     F_zv=dx*fftshift(fft(U_z0));
287     I_zv(:,l,m)=(abs(F_zv).^2)/lambda;
288     if sw_fig==1 %Bilder anzeigen
289         set(ho2_1,'YData',abs(U_0).^2)
290         set(ho2_2,'YData',angle(U_0))
291         set(ho3,'YData',log(1+abs(F_z)), 'LineWidth',1.2) %figure updaten
292         set(ho3,'XData',kx*lambda) %figure updaten
293         set(ho4,'YData',angle(F_z)) %figure updaten
294         set(ho4,'XData',kx*lambda) %figure updaten
295         set(ho5,'YData',log(1+abs(F_zv)), 'LineWidth',1.2) %figure updaten
296         set(ho5,'XData',kx*lambda) %figure updaten
297         set(ho6,'YData',abs(U_0).^2)
298         set(ho12_1,'YData',abs(U_z).^2) %figure updaten
299         set(ho12_2,'YData',angle(U_z)) %figure updaten
300         set(ho13,'XData',kx*lambda) %figure updatenclear all
301         set(ho13,'YData',log(1+abs(F_z))) %figure updaten

```

```

302         set(ho14,'YData',abs(U_z0).^2) %figure updaten
303         set(ho16,'YData',abs(U_z).^2) %figure updaten
304     end
305     I_zv_ang(:,l,m)=interp1(winkel_vec(imag(winkel_vec)==0),(abs(F_zv(imag(
    ↪   winkel_vec)==0)).^2)/lambda,winkel_vec_int);
306     end
307 end
308 if sw_fig==1
309     close(hw)
310 end
311 sum_angle_v=angle_step*sum(I_zv_ang,3);
312 sum_angle_v_lam=lambda_step*sum(sum_angle_v,2); %Intensität Integriert über Winkel und Wellenlänge
    ↪   an Betrachterposition
313 %%
314 if sw_fig==1
315     hf400=figure(400);
316     plot(winkel_vec_int,abs(shiftdim(I_zv_ang(:,1,1),2)))
317     grid on
318     xlabel('Winkel in Grad')
319     ylabel('Intensität in [a. u.]')
320     set(gca,'XLim',[-5 5])
321     title(sprintf('Intensität Fernfeld für Einfallswinkel %1.f ° mit Wellenlänge %3.Of
    ↪   nm',ang_range(1),lambda_vec(1)*10^6))
322     set(hf400,'OuterPosition',[figPos(1)+1500 figPos(2)+250 500 500])
323 end
324 %%Leuchtdichten
325 [~,V_lambda,~,lam_norm] = normspectralwerte; %V_lambda Kurve
326 V_lam_vec=interp1(lam_norm,V_lambda,lambda_vec*10^6);
327 V_lam_mat=repmat(V_lam_vec,length(sum_angle_v),1);
328 L_sum_angle_v=sum_angle_v.*V_lam_mat;
329 L_sum_angle_v_lam=lambda_step*sum(L_sum_angle_v,2);

330 %% Ausgabe
331 %%Leuchtdichten
332 L.L_sum_angle_v=L_sum_angle_v;
333 L.L_sum_angle_v_lam=L_sum_angle_v_lam;
334 Winkel=winkel_vec_int;

335 %%Erweiterte Parameter
336 P.sum_angle_v=sum_angle_v;
337 P.sum_angle_v_lam=sum_angle_v_lam;
338 P.I_zv_ang=I_zv_ang;
339 P.expdata.I_zv=(abs(F_zv(imag(winkel_vec)==0)).^2)/lambda;
340 P.expdata.fieldupslitbefore=U_z;
341 P.expdata.fieldupslitafter=U_z0;
342 P.expdata.lam=lambda;
343 P.expdata.ang=alpha;

```

```

344 P.expdata.phase=exp(1i* slit_oben_phaseshift);
345 P.expdata.xvec=dx*vecx;
346 P.expdata.angvec=winkel_vec(imag(winkel_vec)==0);
347 end

```

Funktion: Eindimensionale Lichtpropagation

```

1 function [ U_z,F_z,F_0,kx] = fAngSpecProp1D(U_0,dx,lambda,z,vec,tophead)
2 %Propagation eines 1D elektrischen Feldes
3 % by Christoph Ewen, 2013
4 %Input:
5 % U_0 == Feld am Ort 0
6 % dx == Ortsauflösung im Ortsraum
7 % lambda == Wellenlänge
8 % z == zurückgelegte Distance
9 % vec == Positionsvektor
10 % optional: tophead == Filterfunktion im Fourierraum; muss gleiche Größe
11 % wie U_0 haben; fixer tophead
12 %
13 %Output:
14 % U_z == komplexes Feld am Ort z
15 % F_z == Spektrum am Ort z
16 % F_0 == Spektrum am Ort 0
17 % kx == Wellenvektor in x-Richtung
18 if nargin==5
19     tophead=ones(size(U_0));
20 else
21 end
22 N=length(U_0);
23 dkx=1/(N*dx); %Auflösung im Forierraum
24 k=(2*pi/lambda);
25 kx=2*pi*dkx*vec;
26 F_0=fftshift(fft(U_0)); %Fouriertransformation des Feldes
27 kz=sqrt(k^2-kx.^2); %Wellenvektor kz
28 F_0(imag(kz)~=0)=0; %evanescente Welle ignorieren
29 propterm=exp(1i*kz.*z); %Propagationsterm
30 F_z=F_0.*propterm.*tophead; %Propagation im Fourierraum
31 U_z=(N*dkx)*ifft(iffshift(F_z)); %Rücktransformation
32 end

```