

MASTERARBEIT

Augmented Reality auf der Schiffsbrücke Entwicklung eines latenzoptimierten Smart-Window-Displays zur stabilisierten Darstellung von räumlichen Navigationsinhalten

zur Erlangung des akademischen Grades Master of Science (M.Sc.)

vorgelegt am 22. November 2023
Jan Jessen

Erstprüfer: Prof. Dr. Eike Langbehn
Zweitprüfer: Prof. Dr. Torsten Edeler

**HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE
WISSENSCHAFTEN HAMBURG**

Department Medientechnik
Finkenau 35
22081 Hamburg

Zusammenfassung

Möglichkeiten zum produktiven Einsatz von Augmented Reality (AR) Technologien auf der Schiffsbrücke sind ein sehr aktives Forschungsfeld. Insbesondere bei der technischen Umsetzung gibt es keinen Konsens und daher viele vorgeschlagene Technologien und Einsatzszenarien. In dieser Arbeit wird als Alternative zum Einsatz von kommerziellen AR-Headsets oder reinen Video-Overlays ein „Smart Window“ entwickelt und evaluiert. Durch die Kombination von Projektion auf einer dimmbaren Glasscheibe mit einem Headtracking-System lassen sich sowohl statische als auch dynamische Inhalte direkt im Sichtfeld des Schiffsführers darstellen.

Die Konzeption und Konstruktion dieses Systems wird ausführlich beschrieben und begründet. Besonderer Fokus liegt hier auf der Optimierung von Helligkeit und Latenz sowie der Härtung gegen Umwelteinflüsse und der klaren Perspektive auf einen wartungsarmen Dauereinsatz. Das fertige System wird in die Brückensysteme eines Vermessungsschiffs der Hamburger Hafenbehörde HPA integriert und in einem praktischen Test mit Schwerpunkt auf dem gebotenen Mehrwert und zukünftigen Verbesserungsmöglichkeiten evaluiert.

Abstract

Using Augmented Reality (AR) technology on a ship's bridge to aid skippers in navigating and general ship procedures is an active field of research. Current approaches however do not show a consensus for the best technical implementation. There are many proposed technologies and scenarios. In this thesis, a "smart window" is developed and evaluated as an alternative to commercially available AR headsets or pure video overlays. By combining image projection directly onto a dimmable glass pane together with a head tracking system, both static and dynamic content can be displayed directly in the skipper's field of view.

The design and construction of this system is described and explained in detail. Special focus lies on optimizing brightness and latency as well as hardening the system against environmental factors to prepare it for low-maintenance, continuous use. The finished system is integrated into the bridge systems of a the Hamburg Port Authority (HPA) survey vessel and evaluated in a practical test, focused on determining the added value offered and future possibilities for improvement.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
1 Einleitung	2
1.1 Motivation	5
1.2 Bestehende Vorarbeit und Unterstützung	7
1.2.1 Eigenleistung	7
1.3 Einsatzszenario	8
1.4 Zielsetzung	9
1.5 Aufbau und Methodik	10
2 Grundlagen und Forschungsstand	11
2.1 Optische Kombination	11
2.1.1 Waveguide-Displays	12
2.1.2 Head-Up-Displays	13
2.1.3 Transparente Displays	13
2.2 Digitale Kombination	15
2.2.1 Smartphone-AR	15
2.2.2 Passthrough-AR	15
2.3 AR auf der Schiffsbrücke	16
2.3.1 Technological Readiness Level - TRL	16
2.3.2 Relevante Forschung	18
2.4 Bestehender Technologiedemonstrator	22
3 Technische Konzeption	24
3.1 Anforderungen	24
3.1.1 Systemlatenz	25
3.1.2 Headtracking-System	26
3.1.3 Darstellungshelligkeit	27
3.1.4 Software	30
3.2 Komponentenauswahl	30
3.2.1 Displaytechnologie	30
3.2.2 Headtracking-Lösung	33

3.2.3	Software-Stack	35
3.3	Finales Konzept	36
4	Umsetzung	37
4.1	Headtracking	38
4.2	Projektion	40
4.3	Latenzoptimierung	42
4.3.1	Messmethodik	42
4.3.2	Optitrack	43
4.3.3	Projektor	44
4.3.4	Grafiktreiber	45
4.3.5	Unity	45
4.4	Software	46
4.4.1	Überblick	47
4.4.2	Seekarte und Koordinatensystem	48
4.4.3	Off-Axis-Projection	50
4.4.4	Projektor-Überlagerung	54
4.4.5	Schnittstellen	55
4.5	Benutzeroberfläche und Design	58
4.6	Kalibrierung	61
4.7	Zusammenfassung des finalen Prototypen	62
5	Auswertung	64
5.1	Forschungsfragen	64
5.2	Operationalisierung	65
5.3	Methodik	67
5.3.1	Eyetracking	68
5.3.2	Befragung	68
5.4	Konzeption und Ablauf des Probandenversuches	69
5.4.1	Durchführung	70
5.5	Ergebnisse	71
5.6	Diskussion	79
6	Fazit	82
7	Ausblick	84
	Literatur	86
	Anhang	90

Abbildungsverzeichnis

1.1	Passthrough-Modus auf der Oculus Quest Pro	3
1.2	AR Einsatzszenario aus der Produktvorstellung der Microsoft HoloLens 2	4
1.3	Der bereits bestehende Testcontainer für Smart Windows	7
1.4	Überblick über beide Arbeitsplätze auf dem Einsatzschiff	8
2.1	Simulierter Strahlengang verschiedener Kollimationsgrade	12
2.2	Head-Up-Display im Flugzeug Airbus A220	14
2.3	Makroaufnahme eines transparenten OLED-Bildschirms	14
2.4	TRL aller von van den Oever et al., 2023 untersuchten maritimen AR Prototypen	18
2.5	Von OH et al., 2016 entwickeltes AR-Informationssystem per Video-Overlay.	19
2.6	Vergleich verschiedener 'transparenter' Projektionsfolien	22
3.1	Visualisierung verschiedener Kontrastverhältnisse	28
3.2	Visualisierung verschiedener Dimmstärken	29
3.3	Eine Shutterbrille mit Infrarotreflektoren	34
4.1	Das für Ausbaustufe 1 verwendete Optitrack-Array mit 4 Kameras	39
4.2	Ein interessierter Fachbesucher testet Ausbaustufe 1	40
4.3	Das entwickelte doppelte Projektor-Setup	41
4.4	Der konstruierte Motion-to-Photon Latenztester	43
4.5	Kumulative Verbesserung der MtP-Latenz	46
4.6	Screenshot des Projektes im Unity-Editor	47
4.7	Warnung im Unity Editor bei zu weit gefassten Weltkoordinaten	49
4.8	Beispiel einer Off-Axis Projektion von Başar Uğur et al., 2009	51
4.9	Visualisierung von On und Off-Axis Projektion von Kooima, 2009	52
4.10	Allgemeine „View to Projection“-Matrix für perspektivische Darstellung	53
4.11	Setup zur Entzerrung beider Projektorbilder	55
4.12	Navigationsmonitor des „Deepenschriewer 3“	59
4.13	Für den Probandenversuch entwickeltes UI im Einsatz	60
4.14	Blick durch das Smart Window im Kalibriermodus	62
4.15	Tracking- und Projektorsetup in Ausbaustufe 2	63
5.1	Am Morgen der Studie aufgenommenes Bild des verwendeten UI-Designs	71

5.2	Visualisierung des in der Studie minimal aufgetretenen Kontrastverhältnisses	72
5.3	Resultate der Probandenbefragung: Bewertung technische Umsetzung	73
5.4	Korrelation der Umgebungsleuchtdichte und nutzerbewerteten Umgebungs- sichtbarkeit	73
5.5	Boxplot der gewonnenen Eyetracking-Daten	75
5.6	Karte der für die Studie verwendeten Route	77
5.7	Resultate der Probandenbefragung: Bewertung Mehrwert	78
5.8	Resultate der Probandenbefragung: Bewertung Inhalt	79

Danksagung

Bei der Entwicklung und Durchführung dieses Projektes und dem Verfassen dieser Arbeit haben mich viele Menschen mit großem Enthusiasmus unterstützt. Ich möchte mich bei ihnen allen ganz herzlich bedanken.

Bei meinem Erstprüfer Eike Langbehn für die Unterstützung bei der Themenfindung, dem Herstellen guter Kontakte und der Gelegenheit, das Projekt einem interessierten Fachpublikum vorzustellen.

Der Fehrmann Tech Group und dabei insbesondere Moritz Rath für die fantastische Zusammenarbeit, Unterstützung und das mir entgegengebrachte Vertrauen.

Julia Hertel und Marc Briede für das zur Verfügung stellen ihrer Forschungsergebnisse, ihren Input und ihre Unterstützung.

Der HPA und dort insbesondere Thomas Thies, Oliver Anders und Jörg Fölsch für die Ermöglichung der wohl produktivsten Hafenumrundfahrten meines Lebens und der Organisation einer so realitätsnahen und teilnehmerstarken Studie.

Der Firma Triolution, insbesondere Bastian Folchnandt für die immer wieder spontane Unterstützung mit Leihequipment, von Kabeln bis Zeitlupenkameras.

Fynn, Jasper, Melanie, Niklas, Fabian, Jan-Julian, Aaron, Kevin, Patrick und Amanda für ihr Feedback, ihren Zuspruch, ihre Neugier und ihr immer gerne eingebrachtes Fachwissen.

Meiner Mutter Martina für das fantastische Korrekturlesen und die Demonstration, dass auch ein Master über 25 noch etwas wert ist. Meinem Vater Gerrit für die vielen abendlichen Telefonate.

Meinem guten Freund Lars für alles.

1 Einleitung

Augmented reality is the ‘boy who cried wolf’ of the post-Internet world—it’s long been promised but has rarely been delivered in a satisfying way.

— Om Malik, *Forbes*

Das Konzept „Augmented Reality“ (AR) braucht keine weitere Fürsprache. In der Vision einer eines Tages vollständig digitalisierten Welt ist es die allgegenwärtige Schnittstelle zwischen Digitalem und Realem. Dutzende Anwendungen und Szenarien sind offensichtlich: Kommunikation, Navigation, Datenvisualisierung und Unterhaltung, nahezu jede Branche oder Produktkategorie bietet potenziell Einsatzzwecke für AR. Gigantische Mengen Geld werden in die Entwicklung verschiedenster AR-Technologien investiert. Während sich jedoch die in vielen Bereichen vergleichbare Virtual Reality Technologie seit Marktstart der ersten Generation Oculus Rift im Jahr 2016 stark weiterentwickelt, diversifiziert und etabliert hat, ist das in der AR-Entwicklung am weitesten verbreitete AR-Headset weiterhin die mittlerweile vier Jahre alte Microsoft HoloLens 2.¹

I think everyone would basically agree that we do not have the science or technology today to build the AR glasses that we want. We may in five years, or seven years, or something like that. But we’re not likely to be able to deliver the experience that we want right now.

— Mark Zuckerberg, *Meta*, 2017

Aktuell scheint die Entwicklung einer vielseitig einsetzbaren und alltagstauglichen AR-Brille zwar bei weitem nicht unmöglich, jedoch zumindest nicht sicher vorhersagbar zu sein. Aufgrund des unbestrittenen Marktpotenzials und der Vielzahl an möglichen Anwendungszwecken ergibt es aber Sinn, spezialisiertere Lösungen zu entwickeln, um zumindest einige dieser Anwendungen bereits heute zu ermöglichen. Ein weit verbreiteter Ansatz ist die Erweiterung der deutlich ausgereifteren Virtual Reality (VR) Technologie um einen oft

¹„Augmented reality for maritime navigation data visualisation: a systematic review, issues and perspectives“
Laera et al., 2021

„Passthrough“ genannten Modus. Mittels am Headset angebrachter Kameras lässt sich die Außenwelt digital betrachten und augmentieren.

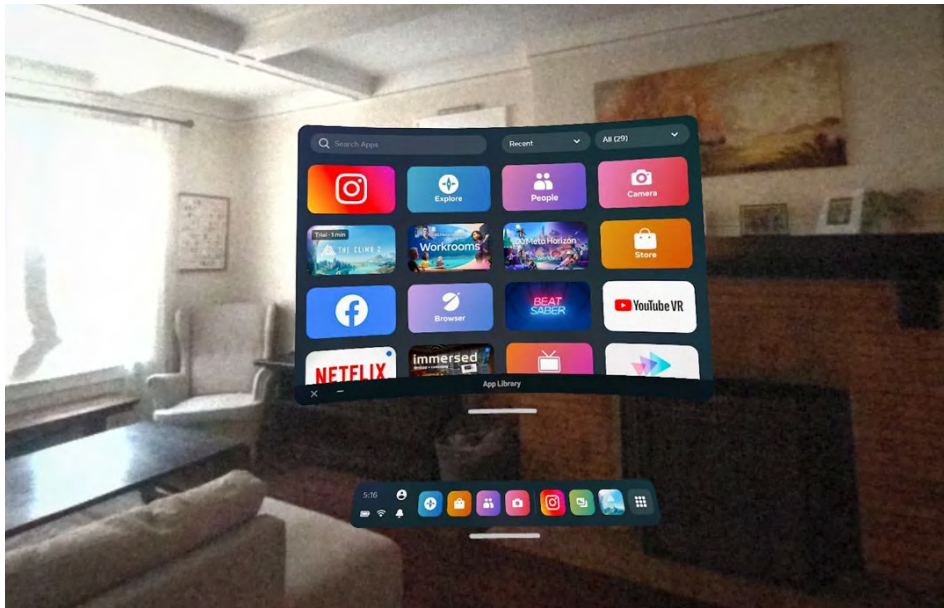


Abbildung 1.1: Passthrough auf der Oculus Quest Pro (Quelle: u/sixwaystop313, 2022)

Trotz der auch bei dieser Lösung gegebenen großen technischen Herausforderungen, wurden bei der Entwicklung von Passthrough in den letzten Jahren von mehreren Herstellern große Fortschritte gemacht. Auf dem zum Erstellungszeitpunkt dieser Arbeit noch nicht kommerziell verfügbaren Headset „Vision Pro“ von Apple soll laut ersten Testberichten das Passthrough bis auf leichte Körnigkeit und reduzierten Dynamikumfang kaum mehr Kritikpunkte aufweisen.² Für Anwendungen, deren Fokus auf den virtuellen Inhalten liegt, ist Passthrough somit eine gut geeignete Alternative zu „echtem“ AR. Die Umgebung dient lediglich als Hintergrund oder Kontext, fehlende optische Perfektion ist verschmerzbar.

Wie steht es aber um Einsatzbereiche, in denen jegliche Regression der Echtweltwahrnehmung eben nicht verschmerzbar ist? Insbesondere professionelle oder sicherheitskritische Anwendungen müssen das Prinzip „Fail-Safe“ erfüllen. Auch bei Störung oder Ausfall muss ein technisches System kontrolliert reagieren und sicher sein. Ein bei Ausfall durchsichtiges AR-Headset wie die Microsoft HoloLens erfüllt diese Anforderung. Ein bei Ausfall schwarz werdendes VR-Headset mit Passthrough tut es nicht. Somit scheint auch bei hypothetisch perfektem Passthrough der Einsatz eines VR-Headsets beispielsweise im Straßenverkehr oder in der Schiffsnavigation unwahrscheinlich.

Diese - zugegebenermaßen recht spezifische - Hürde für Passthrough-AR im professionellen

² „Adam Savage’s Tested: Apple Vision Pro Headset Hands-On Impressions!“, Chan, Norman, 2023

Einsatz zeigt jedoch einen grundlegenden Dissens in der Auswahl realistischer Einsatzszenarien für AR-Geräte auf.

Once you have an augmented reality display, you don't need any other form of display. Your smartphone does not need a screen. You don't need a tablet. You don't need a TV. You just take the screen with you on your glasses wherever you go.

— Tim Sweeney, Epic Games

Tim Sweeney beschreibt hier eine gängige Vision von Augmented Reality, die bereits erwähnte nahtlose Schnittstelle zwischen Digital und Real. Um jedoch ein flexibler Alltagsbegleiter zu werden, muss ein hypothetisches AR-Headset extrem niedrigschwellig einsetzbar sein. Dieses Kriterium stellt wiederum hohe Anforderungen an Gewicht, Akkulaufzeit, Aktivierungszeit und nicht zuletzt an die gesellschaftliche Akzeptanz. Dem gegenüber stehen die in aktuellen AR-Produktvorstellungen meist stattdessen gezeigten, sehr spezialisierten Einsatzszenarien.



Abbildung 1.2: AR Einsatzszenario aus der Produktvorstellung der Microsoft HoloLens 2 (Quelle: Microsoft, 2019)

In Situationen wie der von Microsoft in [Abbildung 1.2](#) gezeigten, wären die Prioritäten bei den geforderten Produkteigenschaften deutlich anders verteilt. Im professionellen Einsatz ist wohl für eine kleine Zeitspanne auch ein unbequemes, schweres oder anderweitig eingeschränktes Produkt akzeptabel, jedoch nur, wenn es einen sehr signifikanten Mehrwert bietet, um diesen Kompromiss zu rechtfertigen. Alle Einschränkungen und Unannehmlichkeiten bleiben jedoch bestehen und verhindern somit die Nutzung des Produktes über das absolut nötige Maß hinaus. Ein Fakt, der durch die Reaktion von Testpersonen auf aktuelle AR-Headsets in professioneller Umgebung bestätigt wird.

Long-term use of an HMD was described with terms like 'tolerable', 'straining', and 'conceivable', the latter assuming that future devices have a smaller form factor, e.g., like sunglasses.

– „*Welcome AboARd! Evaluating Augmented Reality as a Skipper's Navigator*“,
Hertel et al., 2023

Im Umkehrschluss ergibt sich jedoch eine interessante Tatsache: je niedrigschwelliger eine Anwendung gestaltet ist, umso weniger stark ausgeprägt müsste der gebotene Mehrwert sein, um weiterhin ein lohnenswertes Produkt darzustellen. Gleichzeitig ergeben sich so neue Potenziale, beispielsweise bei der Darstellung von unvorhersehbaren Inhalten wie Warnungen, Alarmen und spontanen Ereignissen. Mit einem niedrigschwellig einsetzbaren und daher dauerhaft aktiven AR-System sind diese sofort und einfach darstellbar, mit einer erst bei Alarm aufgesetzten Brille nicht.

Entwickelte man also ein spezialisiertes, technisch zuverlässiges AR-System mit derart geringer Einsatzhürde, dass es dauerhaft verwendet werden könnte, böte es einen potenziell signifikanten Mehrwert, trotz fehlender technischer Perfektion oder Einsatzvielfalt.

1.1 Motivation

Im Frühjahr 2023 fand als Kooperation der Hamburger Hafenbehörde HPA, der Universität Dortmund und der Universität Hamburg im Rahmen des Projektes WizARd³ eine Forschungsstudie von Hertel et al. mit dem Titel „*Welcome AboARd! Evaluating Augmented Reality as a Skipper's Navigator*“ statt. Als eines der ersten Projekte dieser Art wurde in einer nahezu der Realität entsprechenden Studie untersucht, wie ein auf der Microsoft HoloLens 2 basierendes AR-System Schiffsführer bei der Navigation unterstützen kann. Trotz grundsätzlich vielversprechendem Nutzerfeedback zum Potential von AR in diesem und ähnlichen Szenarien schien insbesondere die technische Grundlage ein großes Hindernis darzustellen.

³„Forschungsprojekt WizARd: Veröffentlichungen“, Universität Dortmund, 2023

[...] further, participants reported that the display frame of the HoloLens itself also occluded parts of the user's view and restricts the field of view, especially on the side and back. Light reflections on the device's glasses were found to be distracting. One participant reported that the HoloLens limited their vision too much to have a sufficient overview of the surroundings. During the study, they even relied on confirmation from other skippers that the area behind the ship was clear to steer into the turn, as their vision was too limited to ensure a safe navigation. [...] To increase safety, it was suggested to use a projection-based AR system, that does not require additional glasses.

Hertel et al., 2023

Die Verwendung der HoloLens 2 als AR-Plattform ist eine nachvollziehbare Entscheidung. Sie stellt die am weitesten verbreitete Plattform für AR-Entwicklung dar und bietet einige für den Einsatz auf Schiffen essenzielle Funktionen. Insbesondere der 2022 eingeführte „Moving Platform Mode“ zur Verbesserung des Raumtrackings in bewegten Fahrzeugen, beispielsweise als Fahrer eines Autos oder Führer eines Schiffes ist nach Hertel et al. unverzichtbar und aktuell noch einzigartig. Solche Features bieten jedoch in der Entwicklungsarbeit oft einen Nachteil: ihre geringe Konfigurierbarkeit. Diverse Probleme mit dem Headtracking und die generelle Unzuverlässigkeit des Systems wurden von den Probanden stark kritisiert und zeigen sich auch in den quantitativ erhobenen Daten. Solche Probleme sind jedoch aufgrund des geschlossenen System HoloLens als „einfacher Entwickler“ kaum zu beheben. Es besteht lediglich Hoffnung auf die Entwicklung zukünftiger Hardware- oder Softwareversionen mit stabilerem Tracking, helleren Displays, längerer Akkulaufzeit, robusterer Kalibrierung und kompakteren Ausmaßen seitens Hersteller Microsoft.

Gegenüber einem solchen „fertigen“ Produkt stünde ein für den spezifischen Einsatzzweck neu entwickeltes System. Zwar ist man auch hier nicht gegen unzureichende Leistung eines benötigten Bauteils gefeit, verfügt jedoch über weit größere Freiheit in der Komponentenauswahl, dem Design-Ansatz, der Architektur, dem Software-Design und der Integration von Einzellösungen, um derartige Probleme zu lösen. Die Konzeption, Konstruktion, Entwicklung und wissenschaftliche Auswertung eines solchen, von einem Probanden der Studie von Hertel et al. bereits vorgeschlagenen „projection-based AR systems“, würde somit zwar deutlich unsicherer und wohl auch aufwendiger sein als die Verwendung einer bestehenden Plattform, sich jedoch gerade deswegen gut als Masterarbeit im Fach Digital Reality eignen, insbesondere mit einem bereits bestehenden B.Sc. in Medientechnik.

Gleichzeitig bietet das Bestehen der Studie von Hertel et al. und ihrer Ergebnisse eine interessante Gelegenheit zum direkten Vergleich zwischen der etablierten Microsoft HoloLens und einer spezialisierten AR-Lösung mit vermutlich völlig anderen Stärken und Schwächen in einem nahezu identischen Umfeld.

1.2 Bestehende Vorarbeit und Unterstützung

Diese Arbeit entstand mit finanzieller und materieller Unterstützung der Fehrmann Tech Group⁴ sowie den Abteilungen Hydrografie und Port Process Solutions der Hamburger Hafenbehörde HPA. Im Vorfeld dieser Arbeit bestand bereits Kontakt zwischen Fehrmann Tech Group und HPA. Ein aus einem vorherigen Forschungsprojekt gemeinsam mit dem Fraunhofer-Institut für Siliziumforschung (ISIT) stammender, unvollständiger Technolgie-demonstrator⁵ für verschiedene Bauformen eines „Smart Window“, eingebaut in einen modifizierten Frachtcontainer, existierte ebenfalls.



(a) Außenansicht, Februar 2023



(b) Innenansicht, März 2023

Abbildung 1.3: Der bereits bestehende Testcontainer für Smart Windows

In diesen Frachtcontainer eingebaut waren zwei Prototypen für digitale Schiffsfenster, zum einen ein auf Glas laminiertes transparenter OLED-Bildschirm, zum anderen eine dimmbare und mit hochtransparenter Projektionsfolie beschichtete Glasscheibe mit entsprechendem Projektor. Hertel et al., deren Studie sich zum Anfangszeitpunkt dieser Arbeit in der Auswertungsphase befand, lieferten zusätzlich wertvolle Impulse und insbesondere das ausgearbeitete und ausführlich dokumentierte Szenario eines Peilschiffs.

1.2.1 Eigenleistung

Die Entstehung dieser Arbeit, die Konzeption, Verbesserung, Programmierung, Integration und Auswertung fanden eigenständig statt. In einzelnen Gebieten erhaltene Hilfe (beispielsweise bei der Konstruktion von Bauteilen), übernommene Komponenten oder Rückgriff auf bereits bestehende Forschungsinhalte oder Ressourcen (beispielsweise aus dem Projekt WizARd) werden im Laufe dieser Arbeit explizit erwähnt und kenntlich gemacht.

⁴ „High-tech metals and windows | fehrmann“, Fehrmann Tech Group, 2023

⁵ „Augmented Reality in der Schiffsführung“, Freiherr von Lukas et al., 2019

1.3 Einsatzszenario

Der Hamburger Hafen ist der drittgrößte Hafen Europas und ständiger Veränderung unterworfen. Es finden zahlreiche Bautätigkeiten statt, die Fahrrinne der Elbe ist durch Versandung gefährdet und Strömungen können jederzeit neue Grundhindernisse schaffen oder freilegen. Um all diese Veränderungen zu überwachen und zu katalogisieren, unterhält die Hamburger Hafenbehörde (HPA) eine Flotte aus vier Peilschiffen, welche mittels Sonar, Echolot und Photogrammetrie beliebige Stellen im Hafen, sowohl Über- als auch Unterwasser, hochauflösend kartieren können.



Abbildung 1.4: Die Brücke des Peilschiffs „Deepenschriewer 3“. Im Vordergrund der Arbeitsplatz des Hydrographen, im Hintergrund Schiffsführer mit Kontrollmonitor und Steuerrad

Am Vermessungsvorgang sind mindestens zwei Personen beteiligt: ein Schiffsführer und ein Hydrograph. Bei dieser Vermessung wird ein breiter Streifen Grund unter dem Schiff fortlaufend abgetastet und als Punktwolke gespeichert. Der Schiffsführer sieht hierbei den vom Hydrographen definierten Pfad sowie einige Zusatzinformationen auf einem Kontrollmonitor vor sich. Für eine präzise Vermessung muss der Kurs möglichst genau gehalten und mindestens einmal aus beiden Richtungen befahren werden, um mögliche Verschattungen des Sonars aufzufüllen.

Insbesondere im verkehrsreichen und unüberschaubaren Hafengebiet ergibt sich hier eine problematische Situation. Zum genauen Einhalten des Kurses ist der Schiffsführer dazu incentiviert auf seinen Kontrollmonitor zu schauen. Hier werden eine Übersichtskarte, die abzufahrende Peillinie sowie die aktuelle Abweichung von der Peillinie angezeigt. Der Blick auf diesen Kontrollmonitor erfordert jedoch jedes Mal eine Helligkeits- und Fokusadaption und birgt das Risiko, die Umgebung - also beispielsweise kreuzenden Verkehr oder schwimmende Hindernisse - versehentlich zu lange unbeobachtet zu lassen.

Eine Augmented-Reality-Lösung ähnlich eines Head-Up-Displays zur Anzeige von Kurs und kontextsensitiven Informationen direkt im Sichtfeld des Schiffsführers könnte diese Situation stark verbessern. Zielplattform ist das 16 Meter lange Peilschiff „Deepenschriewer 3“. Es gehört zur mittleren Größenklasse in der Peilschiffflotte der HPA, erfüllt das vielfältigste Einsatzprofil und bietet daher die höchste zeitliche Flexibilität für Entwicklung und Auswertung. Umgerüstet werden soll das zentrale Frontfenster mit einer Höhe von 110cm und einer Breite von 90cm.

1.4 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es, ein typischerweise „Smart Window“ genanntes System zu entwickeln, um Schiffsführern relevante Informationen per Augmented Reality (AR) direkt im Sichtfeld anzuzeigen. Dabei soll insbesondere der Vorteil der weltrelativen Platzierung von Informationen erhalten bleiben. Betrachtet man also beispielsweise ein Seezeichen durch das Smart Window, sollen zugehörige Informationen wie Name, Frequenz oder aktuelle Entfernung genau so auf dem Smart Window angezeigt werden, dass sie perspektivisch korrekt über dem Seezeichen zu schweben scheinen. Ein Headtracking-System soll das für jede beliebige Betrachterposition und Bewegung auf der Schiffsbrücke ermöglichen. So könnten z.B. auch Schiffsnamen über dem Verkehr oder eine vor das eigene Schiff projizierte Peillinie perspektivisch korrekt dargestellt werden. Dabei soll weder das Tragen einer aktiven oder passiven Brille noch anderweitige bewegungs- oder sichteinschränkende Elemente notwendig sein.

Falls Konzeption und Entwicklung erfolgreich abgeschlossen werden konnten, soll das System durch Einbau auf dem „Deepenschriewer 3“ unter realen Bedingungen getestet und evaluiert werden. Wo immer möglich, soll der Vergleich zur „Vorgängerstudie“ von Hertel et al. hergestellt werden, um einen Referenzpunkt zur qualitativen Evaluierung des entwickelten Systems gegenüber einer Headset-basierten Lösung zu liefern.

1.5 Aufbau und Methodik

Der Fokus dieser Arbeit soll auf der praktischen Entwicklung liegen. Darauf, einen Prototypen nicht nur zu konzeptionieren oder im Labor zu testen, sondern bis zur Einsatzreife in die reale Einsatzumgebung zu bringen. Die später in 2.3.2 beleuchtete relevante Forschung zeigt auf, dass in der geringen Entwicklungsreife bestehender Prototypen eine der größten Lücken der aktuellen Forschung liegt. Es existieren viele Konzepte und Theorien, aber nur wenige wurden bisher vollständig entwickelt und realitätsnah getestet.

Im ersten Schritt werden die verschiedenen Technologien, die in der Entwicklung und Erforschung von AR-Anwendungen im maritimen Sektor eine Rolle spielen, kurz erläutert. Eine Literaturübersicht bestehender Forschungsprojekte und Entwicklungen soll dann Aufschluss darüber geben, ob es bereits relevante Ansätze oder Ergebnisse gibt, die als Grundlage für die eigene Arbeit dienen können. Der Fokus soll hierbei insbesondere auf schwer zu erlangenden Daten, wie ausführlichem Nutzerfeedback von realen Schiffsführern, wahrnehmungspsychologischen Studien sowie Herausforderungen und Lösungen für im realen Einsatz auftretende Umweltprobleme liegen.

Auf Basis dieses gesammelten Vorwissens soll im zweiten Teil ein ausführliches technisches Konzept erarbeitet werden. In diesem Konzept sollen die ausgewählten Technologien, ihre Anforderungen, Grenzwerte, Spezifikationen und weitere relevante Aspekte definiert werden. Das Ziel ist es, eine klare Roadmap für die Umsetzung des AR-Prototypen zu erstellen.

Der dritte Schritt beinhaltet die tatsächliche Entwicklung eines Prototypen, der alle im Konzept festgelegten Anforderungen erfüllt. Diese Entwicklung soll in zwei Ausbaustufen erfolgen und sich schrittweise erst den Hardware-, dann den Softwareherausforderungen widmen, um abschließend ein möglichst ausführlich getestetes und performantes System für den vierten Schritt zu erhalten. Wo immer möglich, soll bereits in dieser Projektphase Feedback von Fachexperten eingeholt werden, um die Entwicklungsressourcen auf relevante Bereiche zu fokussieren.

Im vierten und letzten Schritt der Arbeit soll der entwickelte Prototyp aussagekräftig evaluiert und bewertet werden. Dies umfasst die Überprüfung der technischen Performance, des gebotenen Mehrwerts und der Benutzerfreundlichkeit. Die Ergebnisse dieser Evaluierung sollen dazu dienen, Schlussfolgerungen über den gebotenen Mehrwert eines Smart Windows auf der Schiffsbrücke zu ziehen und Handlungsempfehlungen für die Weiterentwicklung des Prototypen abzuleiten.

2 Grundlagen und Forschungsstand

Als *Augmented Reality* bezeichnet man die visuelle Kombination von virtuellen und realen Inhalten. Um diese Kombination umzusetzen, gibt es verschiedene Ansätze und Methoden. Zum einen lassen sich Inhalte direkt optisch kombinieren, beispielsweise per Spiegelung, transparenten Displays oder Dioptern. Zum anderen kann die reale Welt per Kamera digitalisiert, mit virtuellen Inhalten angereichert und anschließend über eine konventionelle Displaytechnik dargestellt werden. Beide Methoden sollen im Folgenden detaillierter vorgestellt und auf ihre Tauglichkeit im beschriebenen Einsatzszenario geprüft werden.

2.1 Optische Kombination

Allen optischen AR-Technologien ist das grundlegende Betrachtungsprinzip gemein. Die reale Welt wird wie gewohnt rein optisch betrachtet, jedoch durch ein transparentes Medium, welches es erlaubt, digitale Inhalte darzustellen. Hierbei tritt ein nahezu universelles Problem auf. Obwohl das Bild teilweise nur Millimeter vor dem Auge erzeugt wird (beispielsweise in Brillen), soll es doch visuell in einer ähnlichen Distanz wie die reale Welt wahrgenommen werden, meist ca. 2-5 Meter. Hierfür ist der sogenannte Kollimationsgrad des Lichts entscheidend.

Das menschliche Auge fokussiert eintreffende Lichtstrahlen mit einer Linse auf die Netzhaut. Je weiter eine Lichtquelle entfernt ist, umso paralleler verlaufen ihre im Auge eintreffenden Lichtstrahlen. Die Fokussierung des Auges (oder einer Kamera) beschreibt somit die Verformung der Linse, um Strahlen eines spezifischen Kollimationsgrades (und damit einer spezifischen Entfernung) scharf auf die Netzhaut zu projizieren. Möchte man nun deutlich näher am Auge erzeugte Inhalte bei Distanzfokussierung trotzdem scharf erscheinen lassen, so muss deren Licht auf den passenden Grad kollimiert werden. Hierzu gibt es wiederum verschiedene Techniken, die an passender Stelle kurz beleuchtet werden, insbesondere Lichtwellenleiter und Kollimationslinsen.

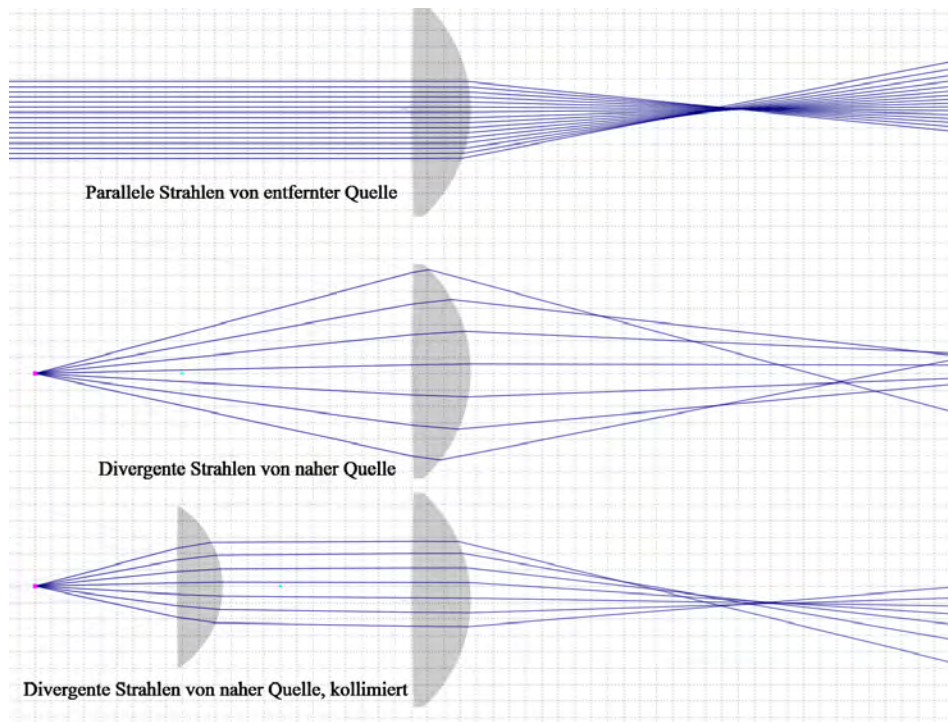


Abbildung 2.1: Simulation einer Kollimationslinse im Simulator „Ray Optics Simulation“ von Tu, 2016

2.1.1 Waveguide-Displays

Optisch kombinierende AR-Brillen kommen der verbreiteten Vorstellung von AR am nächsten, der Markt ist jedoch noch sehr jung und kein Produkt konnte bisher größere Stückzahlen an Endkunden absetzen. Führende Produkte sind hier die bereits recht alte Microsoft HoloLens 2 (Developer Kit) von 2019, sowie die Magic Leap 2 und Vuzix Blade 2. Allen gemein ist die Bilddarstellung durch Nutzung speziell bearbeiteter Brillengläser als Lichtwellenleiter. Bei dieser Technologie wird die Realweltwahrnehmung kaum gestört und es können korrekt kollimierte Inhalte dreidimensional¹ dargestellt werden. Somit ist ein exzellenter AR-Effekt geboten. Das Produkt Magic Leap 2 bietet zusätzlich noch eine lokale Dimmfunktion. Die reale Welt kann so selektiv abgedunkelt werden, beispielsweise zur Kontrastverbesserung, als dramatischer Effekt oder um die Verdeckung realer Elemente durch virtuelle Inhalte zu ermöglichen. Zu beachten ist jedoch das vergleichsweise sehr geringe Blickfeld aller

¹Bei Nutzung des Formfaktors „Brille“ werden meist beide Augen bespielt und somit dreidimensionale Darstellung ermöglicht. Dies ist aber nicht zwingend der Fall und unabhängig von der Kollimation. Das Headset „Google Glass“ zeigt beispielsweise kollimierte Inhalte auf nur einem Auge an. Dreidimensionale Darstellung ist hier nicht möglich.

bisherigen Waveguide-basierten Headsets.^{2 3 4}

Hersteller	Bezeichnung	Hor. FoV	Vert. FoV
Microsoft	HoloLens 1	30°	17.5°
Microsoft	HoloLens 2	43°	29°
Magic Leap	Magic Leap One	40°	30°
Magic Leap	Magic Leap 2	45°	55°
Meta	Quest Pro	108°	95°

Tabelle 2.1: Blinkwinkel verschiedener AR-Headsets und dem VR-Headset Meta Quest Pro (blau) zum Vergleich

2.1.2 Head-Up-Displays

In Flugzeugen und zunehmend auch Autos ist der Einsatz von Head-Up-Displays üblich. In Autos wird das kollimierte Bild meist in der Frontkonsole hinter dem Lenkrad erzeugt und im 90° Winkel direkt an die (ggf. beschichtete) Windschutzscheibe gespiegelt. In zivilen und militärischen Flugzeugen wird anstatt der Frontscheibe meist eine separate Spiegelfläche genutzt. Die Projektionseinheit ist je nach Bauart entweder über dem Kopf des Piloten oder ebenfalls in der Frontkonsole untergebracht.

Head-Up-Displays sind eine ausgereifte und etablierte Technologie, jedoch auf eine sehr spezifische Nische beschränkt. Durch den Einsatz von kollimiertem Licht bildet sich eine sogenannte Eye-Box, ein dreidimensionaler Betrachtungsbereich, der vom kollimierten Licht durchquert wird. In dieser Eye-Box muss sich der Betrachter befinden, um überhaupt ein Bild wahrzunehmen. Die Dimensionen dieser Eye-Box liegen meist in derselben Größenordnung wie das dargestellte Display und beschränken den Einsatz von HUDs somit auf sitzende oder zumindest statische Verwendung. Konventionelle HUDs benötigen außerdem erheblichen Platz für Kollimationsoptik, Strahlengang und Projektor und lassen sich somit nicht praktikabel auf typische Fensterdimensionen vergrößern.

2.1.3 Transparente Displays

Im Gegensatz zu LCD-Bildschirmen benötigt ein OLED (oder perspektivisch gesehen Mini-LED-Bildschirm) kein vollflächiges Hintergrundlicht um ein Bild darzustellen. Die einzelnen Bildpunkte modifizieren oder blockieren nicht nur das durchscheinende Licht, sie emittieren

² „Magic Leap Device Guides: Field of View“ Magic Leap, n. d.

³ „HMD Geometry Database“ Musil, 2023

⁴ „HoloLens 2’s Field of View Revealed“ Heaney, 2019



Abbildung 2.2: Head-Up-Display im Airbus A220, der Projektor ist in diesem Fall hinter den Piloten an der Cockpit-Decke angebracht (Quelle: Woodrow, B., 2018)

es. Somit benötigen transparente OLED-Bildschirme (T-OLED) weniger physischen Platz als herkömmliche HUDs, da sie keine aufwendige Kollimationsoptik oder Projektionseinheiten besitzen. Bei einem T-OLED werden die Bildpunkte nicht vollflächig, sondern in vertikalen Streifen angeordnet. Mit ausreichendem Betrachtungsabstand sind so der durchscheinende Hintergrund und das dargestellte Bild gleichzeitig zu erkennen. Strenggenommen überlagert

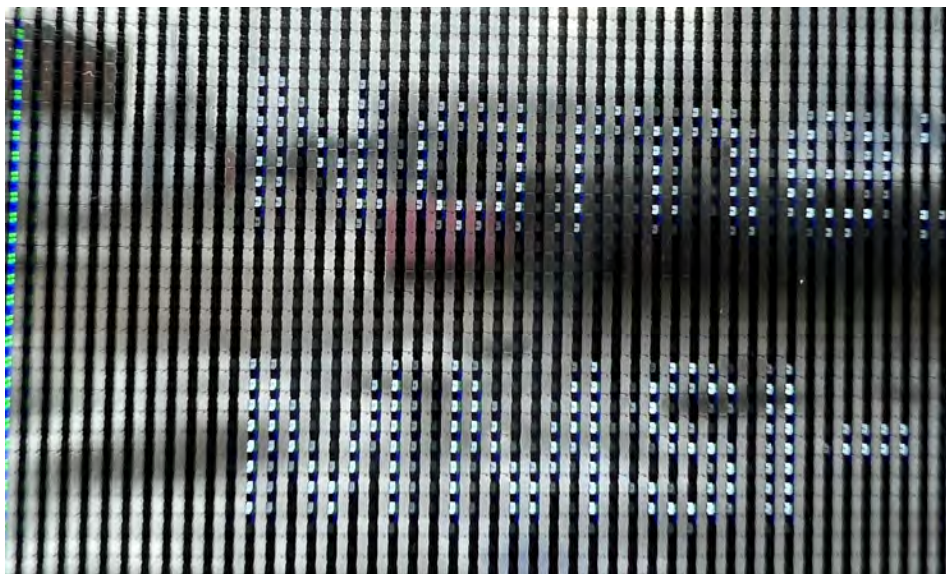


Abbildung 2.3: Makroaufnahme eines transparenten OLED-Bildschirms

sich beides jedoch nicht; die Darstellung erfolgt lediglich sehr eng nebeneinander. T-OLEDs sind schneller technischer Entwicklung unterworfen und es gibt Bemühungen, auch die im „Bildstreifen“ verbauten Komponenten transparent zu gestalten oder zumindest physisch zu verkleinern. Dennoch ergibt sich auf absehbare Zeit ein direkter Kompromiss zwischen hoher Bildhelligkeit („dicke“ Bildstreifen) und hoher Transparenz („dünne“ Bildstreifen). Mit dieser Bauart wird außerdem der betrachtete Hintergrund durch Lichtdiffraktion an den OLED-Streifen immer leicht unscharf erscheinen. Für den Einsatz als sicherheitskritische Fensterscheibe ist dies ein signifikanter Nachteil.

2.2 Digitale Kombination

Die digitale Kombination von virtuellen und realen Inhalten ist deutlich weiter fortgeschritten und etablierter als die optische. Sie profitiert insbesondere von den der Smartphone- und VR-Entwicklung zu verdankenden großen Fortschritten bei miniaturisierten Kameras, hochauflösenden Displays und günstiger Bewegungssensorik.

2.2.1 Smartphone-AR

Ein Smartphone verfügt über eine meist hochqualitative Hauptkamera, viel Rechenleistung, ein hochauflösendes Display, GPS, Orientierungssensoren sowie teilweise sogar Tiefenkameras. In das Live-Kamerabild eines Smartphones lassen sich somit realistisch gerenderte Inhalte einbauen und in der realen Welt verankern. Sowohl Android (ARCore) als auch iOS (ARKit) bieten hierfür ausgereifte Frameworks an. Etabliert ist Smartphone-AR für die Nutzung in Museen und Ausstellungen, in Apps zur Vorschau von Produkten, sowie in Spielen. Neben den meist kleinen Displays ist insbesondere die Fragmentierung eine Hürde beim Einsatz von Smartphone-AR. Geräte verschiedener Preisklassen und Hersteller verfügen über extrem unterschiedliche Fähigkeiten. Bietet man AR somit ohne das zugehörige Endgerät an, lässt sich kaum ein einheitliches Erlebnis garantieren.

2.2.2 Passthrough-AR

Abbildung 1.1 aus der Einleitung dieser Arbeit zeigt sogenanntes Passthrough-AR. An einer herkömmlichen Virtual-Reality-Brille angebrachte Kameras zeigen ein Bild der Außenwelt auf den internen Displays. Dieses Bild lässt sich dann, wie auch bei Smartphone-AR, leicht digital mit virtuellen Inhalten kombinieren, ist aber einer optischen Kombination in mehrerer Hinsicht unterlegen. Zum einen können Außenkameras offensichtlich nie die exakte Position der Nutzeraugen einnehmen, um eine realistische Tiefenwahrnehmung zu erzeugen.

Stattdessen muss das 2D-Kamerabild auf eine 3D-Annäherung der Umgebungsgeometrie projiziert werden, was insbesondere bei Objekten im Nahfeld (und damit großem Perspektivunterschied zwischen den Augen) zu starken Artefakten führen kann. Zum anderen sind (insbesondere stark miniaturisierte) Kameras nicht in der Lage, den Dynamikumfang, die Lichtempfindlichkeit und die Auflösung des menschlichen Auges zu erreichen. Aktuelle Passthrough-Implementierungen sind daher insbesondere in dunklen Umgebungen oder Umgebungen mit hohem Kontrast (wie helle Fenster) nur eingeschränkt nutzbar.

2.3 AR auf der Schiffsbrücke

Obwohl der Einsatz von Augmented Reality im maritimen Kontext auf den ersten Blick wie ein Nischenthema erscheinen kann, gibt es ausführliche, aktuelle und sehr aktive Forschungsaktivität in diesem Bereich. In einem umfangreichen Literature Review fassen van den Oever et al., 2023 zusammen: *„There were 26 publications that developed a prototype and evaluated it. 11 publications developed a prototype without evaluating it. One publication was a theoretical discussion. Four publications were review articles. Secondly, these 42 publications discussed 57 unique AR applications.“* Um das Entwicklungsstadium dieser Prototypen weiter zu quantifizieren, ordnen die Autoren nun jedem Prototypen einen Wert auf der etablierten Technological Readiness Level Skala zu.

2.3.1 Technological Readiness Level - TRL

Das Technological Readiness Level (TRL), zu Deutsch „Technologiereifegrad“, ist ein wissenschaftliches Konzept, das dazu dient, den Entwicklungsstand und die Einsatzbereitschaft von Technologien oder Innovationen in verschiedenen Phasen ihres Entwicklungsprozesses zu bewerten.⁵ Es wurde ursprünglich von der US-amerikanischen Weltraumbehörde NASA entwickelt, hat jedoch inzwischen breite Anwendung in verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen, insbesondere in der Technologieentwicklung und Forschung, gefunden. Seit 2013 ist das TRL auch in der EU als „ISO 16290:2013“ standardisiert.⁶

Der TRL reicht in neun Stufen von TRL 1 (geringste Reife) bis TRL 9 (höchste Reife) und wird folgendermaßen definiert:

TRL 1 - Grundlagenforschung: In dieser Phase wird das technologische Konzept theoretisch untersucht und erste Prinzipien werden formuliert.

⁵ „Technology Readiness Level – A White Paper“, Mankins, 1995

⁶ „From NASA to EU: the evolution of the TRL scale in Public Sector Innovation“, Mihály Héder, 2017

TRL 2 - Technologiekonzept formuliert: Es werden erste Experimente oder Simulationen durchgeführt, um die Machbarkeit zu prüfen.

TRL 3 - Proof of Concept: In dieser Phase wird ein Prototyp entwickelt, um zu zeigen, dass die technologische Idee tatsächlich umgesetzt werden kann.

TRL 4 - Technologie validiert: Der Prototyp wird in einer Laborumgebung validiert, um seine grundlegende Funktionsfähigkeit sicherzustellen.

TRL 5 - Komponentenprüfung im relevanten Umfeld: Die Technologie wird in einem Umfeld getestet, das dem späteren Einsatzgebiet ähnelt, um mögliche Herausforderungen zu identifizieren.

TRL 6 - Prototyp im relevanten Umfeld: Ein funktionsfähiger Prototyp wird in einer realistischen Umgebung getestet, um die Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit unter realen Bedingungen zu überprüfen.

TRL 7 - Systemprototyp demonstriert im relevanten Umfeld: Ein vollständiges System oder Produkt wird in einem realistischen Umfeld getestet, um seine Einsatzbereitschaft zu zeigen.

TRL 8 - Systemqualifikation durchgeführt: Das System wird in einer Vorserienproduktion hergestellt und für den Einsatz qualifiziert.

TRL 9 - Einsatz im tatsächlichen Betrieb: Die Technologie oder das Produkt wird in den tatsächlichen Betrieb integriert und in der Praxis eingesetzt.

Der TRL bietet Forschern, Entwicklern, Investoren und Entscheidungsträgern die Möglichkeit, den Entwicklungsfortschritt und die Marktreife einer Technologie zu bewerten. Dies erleichtert die Entscheidungsfindung im Hinblick auf Investitionen, Entwicklungsprioritäten und die Planung von Technologieeinführungen in verschiedenen Industriezweigen und Anwendungsgebieten. Je höher der TRL einer Technologie ist, desto geringer ist das Risiko, dass mit ihrer Implementierung verbunden ist und desto näher ist sie am kommerziellen Einsatz.

Bei allen untersuchten Prototypen stellen van den Oever et al., 2023 im Mittel einen Technologiereifegrad von 2 fest und bewerten dieses Ergebnis im Fazit kritisch: *„In general, the AR application prototypes that were identified had been developed and described at rather low TRLs. Most prototypes were at TRL 2 (technology concept formulated), with some being on slightly higher TRLs [...] That prototypes were developed to low TRLs could indicate that the field appears to be more interested in proof-of-concept than in continued development. However, we think the field would benefit from higher TRL development of AR applications that were already tested on lower TRLs with positive results, i.e., ship navigation.“*

Trotz der oft noch fehlenden Entwicklungsreife und Evaluierung werden in der aktuellen

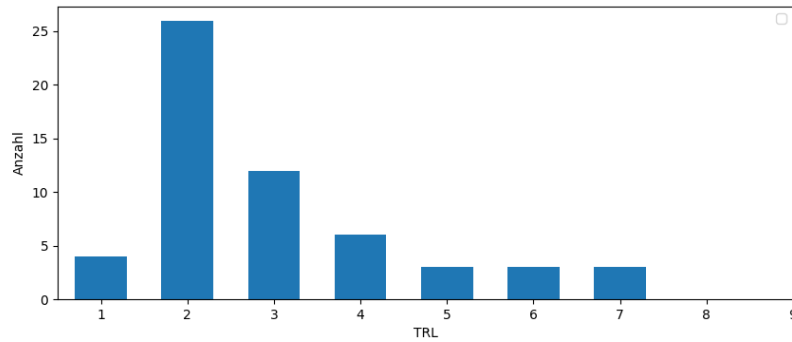


Abbildung 2.4: TRL aller von van den Oever et al., 2023 untersuchten maritimen AR Prototypen

Forschung viele hochrelevante, weil auf die Schiffsnavigation und verwandte Einsatzzwecke zugeschnittene, Konzepte behandelt. Die relevantesten davon sollen im Folgenden kurz vorgestellt werden.

2.3.2 Relevante Forschung

Das Konzept „Smart Window“, ein vermutlich projektionsbasiertes Display mit Outside-In Headtracking, ähnelt technisch betrachtet eher einem CAVE ⁷, einer seit Aufkommen massenmarktauglicher VR-Brillen deutlich unpopulärer gewordenen und bedingt durch ihre hohen Kosten vorher schon seltenen Installation. CAVEs stellen eine exakt kontrollierte Umgebung dar und der Einsatz ähnlicher Systeme auf Schiffsbrücken ist daher völlig unüblich. Somit gibt es wenig Erfahrungen über beispielsweise den Einsatz von infrarotbasierten Tracking-Systemen bei Sonnenlicht oder den Einfluss von Vibrationen auf solche Systeme.

Relevante Forschung und verwandte Entwicklungsansätze gibt es jedoch in anderen Bereichen, insbesondere im Bereich des UI-Design und der Systemintegration. In „[Study on Image-Based Ship Detection for AR Navigation](#)“ von Lee et al. und „[Advanced Navigation Aids System based on Augmented Reality](#)“ von OH et al. wurden jeweils Systeme entwickelt, die ein bestehendes Videobild mit Overlay-Informationen anreichern. Lee et al., 2016 fokussieren sich insbesondere auf die Gewinnung der relevanten Daten (wie Horizontlinie, Schiffsneigung und umgebenden Schiffsverkehr) per Computer Vision, während OH et al., 2016 das

⁷CAVE auch „Cave automatic virtual environment“ beschreibt einen Raum dessen Wände vollständig per Projektion oder Display mit Inhalt bespielt werden können. Ein Tracking-System erfasst die Nutzerposition und berechnet die dargestellten Inhalte im passenden Blickwinkel. Durch die Verwendung einer Shutterbrille wird auch dreidimensionales Sehen möglich. Es wird beispielsweise von Kooima, 2009 ausführlich beschrieben.

UI-Design auf Basis einer Nutzerumfrage in den Vordergrund stellten. Beide Prototypen funktionierten größtenteils wie erwartet, wurden aber nicht ausführlich evaluiert.

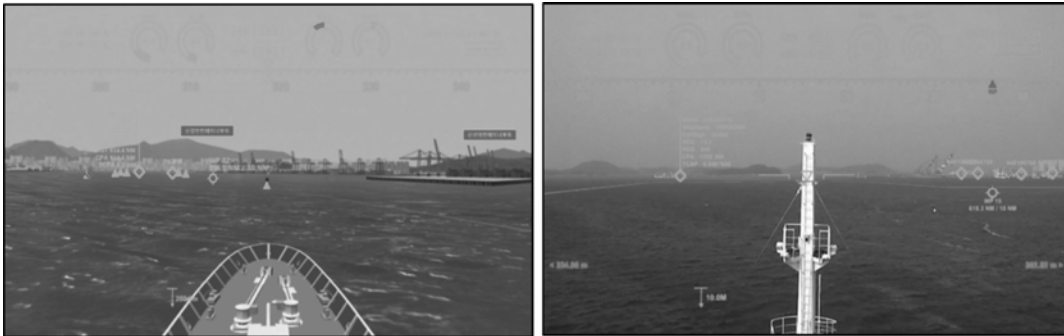


Abbildung 2.5: Von OH et al., 2016 entwickeltes AR-Informationssystem per Video-Overlay.

Frydenberg et al. beschäftigten sich in „[Development of an Augmented Reality Concept for Icebreaker Assistance and Convoy Operations](#)“ mit der Navigation eines Eisbrechers und entwickelten ebenfalls ein Konzept für die Benutzeroberfläche (UI) und Anzeige von AR-Navigationsinstrumenten, welches in einer VR-Umgebung getestet wurde. Dieses UI-Konzept orientierte sich an den Standards der elektronischen Navigationskarten (ENC-Symbole). Das System bestand wie bei OH et al., 2016 aus einer PTZ(Pan/Tilt/Zoom)-fähigen Kamera, einem „Attitude and Heading Reference System“ (AHRS) zur Ermittlung der Schiffsposition, einem NMEA Combiner zur Integration in weitere Brückensysteme sowie einer Benutzerkonsole mit einem zusätzlichen Joystick zur Kamerasteuerung. Das System erhielt positive Rückmeldungen bezüglich seiner Lesbarkeit, es wurde jedoch die hohe Nutzungsschwelle kritisiert, da für jeden Einsatz die PTZ-Kamera manuell ausgerichtet werden muss. Desweiteren wurde eine Umfrage unter Navigatoren durchgeführt, um die wichtigsten Inhalte für die Navigation zu ermitteln. Ein Einsatz der entwickelten Benutzeroberfläche in Augmented Reality wurde vorgeschlagen, um diese Daten mit geringerer Nutzungsschwelle darzustellen.

Gernez et al. führten eine Übersicht über Anwendungen von AR auf Schiffbrücken durch. Obwohl es viele Anwendungsfälle in der maritimen Literatur gibt, fehlt es auch hier an praktisch bewährten Systemen. In ihrer Übersicht identifizierten sie nur vier Referenzen, die Möglichkeiten zur Bewältigung realer Umwelteinflüsse erwähnen. Diese beinhalten unter anderem die Möglichkeit der Anpassung an unterschiedliche Lichtverhältnisse und die Option für den Benutzer, die Farben der Datenanzeige anzupassen. Lediglich ein einziges Projekt gibt die Luminanz der verwendeten Display-Lösung an (5000 nits) und beschreibt diese als ausreichend für Tageslicht-Umgebungen. Die Analyse zeigt, dass die meisten aktuellen Anwendungsfälle die Resilienz des AR-Systems gegenüber stark wechselnden Umweltbedingungen nicht ausreichend berücksichtigen, was eine erhebliche Einschränkung der aktuellen Arbeiten darstellt. Außerdem wird die fehlende Standardisierung, insbesondere von UI-Design und Datenvisualisierungen, kritisiert und der Standard „OpenBridge“ von Ocean Industries

Concept Lab, 2020 vorgestellt, ein OpenSource Projekt mit hunderten einheitlich gestalteten UI-Elementen zur Vereinheitlichung der Benutzeroberflächen verschiedener auf der Schiffsbrücke vorhandener Geräte. Es wird im Artikel „[Harmonising maritime workplace design through collaboration, new technologies and open innovation](#)“ von Nordby, 2019 genauer erläutert.

In einem weiteren Literature Review „[Augmented reality for maritime navigation data visualisation: a systematic review, issues and perspectives](#)“ benennen Laera et al., 2021 klar drei verschiedene Bezugssysteme für die Platzierung von AR-Inhalten. Weltrelativ (WR) platzierte Inhalte verharren unabhängig von der Betrachterposition (welche hierfür kontinuierlich erfasst werden muss) an einem beliebigen Punkt im Raum. Körperrelativ (BR) platzierte Inhalte verbleiben stattdessen an einem konstanten Punkt in Relation zum Betrachter, beispielsweise im oberen linken Bereich des Blickfeldes. Ein bildschirmrelativer (SR) Inhalt würde immer an z.B. der oberen linken Ecke eines statisch platzierten Bildschirms verbleiben. Zusätzlich werden verfügbare AR-Lösungen in „monoskopisch“ und „stereoskopisch“ aufgeteilt, abhängig davon ob eine dreidimensionale Darstellung der Inhalte möglich ist.

Ein wichtiges Ergebnis von Laera et al., 2021 zeigt außerdem, dass monoskopische (und somit zweidimensionale) Anzeigen auf offener See ausreichend sein können, da sich Objekte in der Regel im „Vista-Space“ (über 70m entfernt) befinden. Dort sind die binokularen Disparitätsreize kaum noch vorhanden und so für die Tiefenwahrnehmung zu vernachlässigen. Das für diese Arbeit relevante Einsatzszenario (1.3) umfasst jedoch größtenteils Situationen, in denen Ziele sich in Entfernungen von weniger als 70 Meter befinden, beispielsweise beim Verfolgen einer Peillinie und bei Manövern. Für solche Szenarien scheint sich laut Laera et al. bei monoskopischen AR-Lösungen die Darstellung herkömmlicher Bedienelemente bewährt zu haben, welche nicht weltrelativ sondern bildschirmrelativ platziert werden. Das Smart Window ist hier als Bildschirm zu verstehen.

Alle von Laera et al. untersuchten monoskopischen AR-Lösungen verwendeten einen Monitor, während alle stereoskopischen Lösungen Head-Mounted-Displays mit weltrelativ positionierbaren Inhalten verwenden. Angemerkt wird, dass dies im Gegensatz zur Praxis im Segelsport steht, wo HMDs mit körperrelativ platzierten Inhalten (beispielsweise Google Glass v2) die gängigsten Systeme sind.

Insgesamt ist in den untersuchten AR-Lösungen ein Hybridansatz aus WR und SR das am häufigsten verwendete Bezugssystem, gefolgt von reiner Weltrelativität ohne SR-Elemente. Es wurde festgestellt, dass nur zwei Lösungen ihre Benutzeroberfläche mittels AR evaluiert haben, während zwei andere Lösungen VR-Simulationen verwendeten. Zwei weitere Lösungen haben eine theoretische Fragebogenuntersuchung zur Evaluierung ihrer Benutzeroberfläche durchgeführt.

Betrachtet werden sollen insbesondere Resultate, welche auf potenziell gebotene Mehrwerte einer AR-Lösung auf der Schiffsbrücke hindeuten oder diese sogar bestätigen. Diese sind

jedoch bisher kaum verfügbar.

In „[Impacts of Wearable Augmented Reality Displays on operator performance, Situation Awareness, and communication in safety-critical systems](#)“ untersuchten Rowen et al. in einer aufwendigen Studie mit 131 Teilnehmern die Auswirkungen von AR-Headsets auf die Leistung von Schiffsführern, die Situationswahrnehmung und die Kommunikation in sicherheitskritischen Situationen. Diese Untersuchung fand in einem professionellen Simulator für das Training von Brückencrews und Lotsen statt. Die Verwendung von AR-Headsets führte zu einer Verbesserung der Leistung bei der Verfolgung von Kursen, der Anwendung bewährter seemannischer Praktiken und der Situationswahrnehmung, obwohl die Reaktionsgeschwindigkeit und Flexibilität der Schiffsführer abnahm. Die Informationen wurden auf einer Google Glass V2 dargestellt („Body-Relative“) und nicht im Raum verankert.

Weitere Studien wie „[Development of sea route display system by using augmented reality](#)“ von Okazaki et al. und „[Electronic navigational chart generator for a marine mobile augmented reality system](#)“ von Morgere et al. entwickeln jeweils Systeme zur Einbindung von Informationen in Videobilder von der Schiffsbrücke. Beide Paper treffen Aussagen zum erwarteten Mehrwert ihrer respektiven Systeme, insbesondere das Verringern möglicher Verwechslungen („the risk of misidentified information“, Okazaki et al., 2017), Hilfe bei intuitiver Erfassung der Schiffsposition („effectively assist navigators on grasping the operating ship position“, Okazaki et al., 2017) und die Reduktion der kognitive Belastung („alleviates cognitive load issues“, Morgere et al., 2014) werden genannt. Leider belegen beide Paper diese Aussagen nicht, sondern evaluieren ihre Prototypen ausschließlich technisch.

Insgesamt zeigt die Literaturrecherche, wie bereits von van den Oever et al. angemerkt, eine große Vielfalt an vorgeschlagenen Konzepten für verschiedenste Bereiche und Anwendungsfälle. Auch an konstruierten Prototypen wie von Okazaki et al., Frydenberg et al. und OH et al. mangelt es nicht. Stattdessen fehlen insbesondere aussagekräftige Ergebnisse über qualitative Vorteile von AR-Systemen im maritimen Bereich. Die bereits erwähnte Studie von Rowen et al., 2019 zeigt stellvertretend die Gründe auf. Dort wurde in einem professionellen Schiffsbrückensimulator für Lotsen und Kapitäne ein praktischer Versuch mit sehr hoher Anzahl Probanden (131 Personen) durchgeführt, eine wichtige Voraussetzung zur Gewinnung aussagekräftiger qualitativer Daten.

Soll eine Hypothese jedoch unter realen Bedingungen getestet werden, steigen die organisatorischen, finanziellen und regulatorischen Anforderungen extrem an. Die Kosten für Schiff und Treibstoff, Zulassung aller Testpersonen als Schiffsführer, deren Freistellung bzw. Verfügbarkeit, Sicherheitsrichtlinien wie die maximale Besatzungszahl des Schiffes und Umgebungsfaktoren wie Tide, Wetter und Verkehr müssen berücksichtigt werden.

Insbesondere die für qualitative Auswertungen benötigte hohe Anzahl Probanden macht diese Analysen unter realen Bedingungen daher extrem aufwendig. In den betrachteten Forschungsergebnissen ergibt sich somit ein Muster von entweder nur virtuell oder theoretisch

ermittelten qualitativen Resultaten gegenüber zwar vollständig entwickelten Prototypen, welche aber lediglich ohne qualitative Betrachtung auf reine Funktionsfähigkeit getestet wurden.

2.4 Bestehender Technoliedemonstrator

Mittels eines eigens konstruierten Laserprojektors auf MEMS-Basis sowie einer RGB-D Tiefenkamera sollte ebenfalls ein Smart Window mit perspektivkorrektem Rendering und Headtracking entwickelt werden. Aus dem Projekt resultierte weder ein öffentlich zugängliches Paper noch ein voll funktionsfähiger Prototyp. Für diese Arbeit wurde lediglich der bereits beschriebene Testcontainer und einige der darin verbauten Komponenten sowie die Ergebnisse der Evaluierung verschiedener Projektionsfolien verwendet. Diese Folien sollen auf Glas aufgebracht ein projiziertes Bild darstellen, bei fehlender Projektion jedoch vollständig transparent sein.

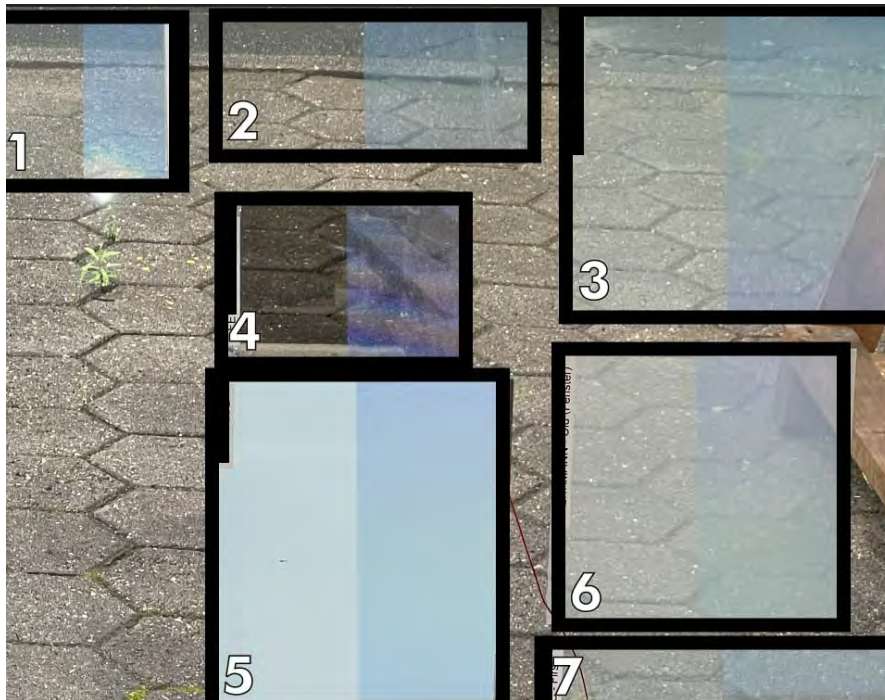


Abbildung 2.6: Vergleich verschiedener 'unsichtbarer' Projektionsfolien. Fotomontage. Jeweils rechte Hälfte mit 7000lm und linke Hälfte ohne Belichtung

Nur zwei Folien eines einzigen Herstellers erfüllten sowohl die Anforderungen an Transparenz als auch an Reflektion. Die hellere der beiden Varianten wurde für dieses Projekt verwendet, jedoch nicht klar benannt, da ihre Evaluierung nicht im Rahmen dieser Masterarbeit stattfand. Für Teile dieser Arbeit wurde die ebenfalls bereits im Testcontainer verbaute elektronisch

dimmbare Glasscheibe mitsamt Ansteuerungselektronik verwendet. Sie stammt von einem weiteren, ungenannten Industriepartner des Projekts und erlaubt eine Dimmung von 55% bis 5% der durchgelassenen Lichtmenge.

Eine weitere Nutzung von oder Einsicht in öffentliche oder nichtöffentliche Erkenntnisse aus diesem Forschungsprojekt fand nicht statt.

3 Technische Konzeption

In diesem Kapitel sollen nun alle in Kapitel 2 beleuchteten Technologien für das definierte Einsatzszenario abgewogen und in ein vollständiges technisches Konzept überführt werden. Hierfür werden zuerst die wichtigsten Anforderungen ermittelt und sinnvoll quantifiziert. Bei Erreichen dieser Anforderungen kann der Prototyp als erfolgreich konstruiert gelten. Danach soll anhand dieser Anforderungen und den in 2.3.2 beschriebenen Forschungsansätzen das eigentliche technische Konzept erarbeitet sowie Erfolgskriterien für den Abschluss der Entwicklung definiert werden. Wie in 2.3.2 ausgeführt, zeigen aktuelle Literature Reviews einen erheblichen Mangel an Konzepten welche nicht nur entwickelt, sondern auch konstruiert und auf der realen Schiffsbrücke getestet wurden. Das von der HPA ermöglichte Einsatzszenario bietet die seltene Chance, einen Prototypen in der realen Einsatzumgebung zu evaluieren. Diese Chance soll, wenn möglich, sowohl für eine quantitative als auch qualitative Analyse des Smart Window genutzt werden.

Ziel der folgenden Anforderungsdefinition und auch der Konstruktionsphase soll somit ein Prototyp sein, welcher mindestens dem Technological Readiness Level 6 entspricht. Hierfür muss der Systemprototyp im realen Umfeld demonstriert werden. Neben rein technischen Größen sollen somit in der Konzeption direkt auch Kriterien wie die Resilienz gegenüber Störeinflüssen und der für den Dauerbetrieb nötige Betreuungs- und Wartungsaufwand berücksichtigt werden.

3.1 Anforderungen

Als Kernmetriken sollen zunächst die zentralen technischen Anforderungen an das System quantifiziert werden. Der Fokus liegt hier auf für einen Prototypen relevanten Kenngrößen. Weitere für einen finalen Einbau wichtige Hardwareparameter (wie Komponentengröße, Feuerschutzklassen, Wärmeentwicklung, mechanische Belastbarkeit und Temperaturtoleranzen) werden nicht weiter betrachtet, sofern sie keine Hürde darstellen, deren grundlegende Erreichbarkeit ernsthaft in Zweifel steht. Da sich viele dieser Anforderungen an von Mensch zu Mensch oder Szenario zu Szenario unterschiedlichen Randbedingungen orientieren, sind sie zwangsläufig als Richtwerte und nicht als exakte Spezifikation zu verstehen.

3.1.1 Systemlatenz

Die sogenannte „Motion-to-Photon“-Latenz ist eine zentrale Kenngröße von sowohl VR als auch AR-Systemen. Sie beschreibt die zwischen einer Bewegung und dem entsprechenden Display-Update vergangene Zeit und somit die Latenz des Gesamtsystems aus Sensorik, Datenübertragung, Berechnung und Darstellung. Eine zu hohe MtP-Latenz kann in VR zu Übelkeit und Schwindel führen, bei AR-Anwendungen zu einem wenig überzeugenden und ablenkenden Bildeindruck sowie im Extremfall ebenfalls zu Schwindel. Kommerzielle VR-Headsets weisen je nach Modell eine Latenz zwischen 20 und 60 Millisekunden auf¹, als Wahrnehmungsschwelle werden oft 20 ms genannt².

Für Augmented Reality gibt es deutlich weniger belastbare Zahlen und öffentliche Studien. Oft als Wahrnehmungsschwelle genannt werden jedoch 5 ms, unter anderem in einem Blogbeitrag des inzwischen insolventen AR-Startups DAQRI.³ Generell ist AR noch latenzempfindlicher als VR. Während in VR eine Diskrepanz zwischen dargestellter und realer Bewegung nur indirekt über beispielsweise das Innenohr „fühlbar“ ist, so ist sie in AR auch sichtbar. Reale und virtuelle Welt werden gleichzeitig wahrgenommen, eine zu hohe Latenz ist deutlich als „Nachziehen“ der virtuellen Inhalte zu erkennen.

Alle zitierten und in der Forschung zu findenden Grenzwerte beziehen sich jedoch implizit oder explizit auf die Verwendung in Headsets und dabei insbesondere auf die Kopffotation. Beim Einsatz einer displaybasierten AR-Lösung ist jedoch theoretisch ausschließlich die Translation des Kopfes relevant, da eine Kopffotation die Betrachtungsperspektive nicht verändert. Es ist der Literatur nicht zweifelsfrei zu entnehmen, ob für die Translation des Kopfes ähnliche MtP-Wahrnehmungsschwellen angenommen werden können wie für die Rotation. Ein kurzer Überschlag stützt jedoch diese Vermutung.

In „[An Envelope of Linear and Rotational Head Motion During Everyday Activities](#)“ beschreiben Miller et al., 2019 drei verschiedene im Alltag auftretende Arten der Kopfbewegung:

(1) low rotational acceleration and high duration, (2) low acceleration and low duration, and (3) high acceleration and low duration. Loading regime 1 encompasses rotational acceleration magnitudes up to approximately 65 rad/s² and includes rotational durations exceeding 55 ms, which consists of activities such as ‘head nod,’ ‘normal sit in chair,’ and ‘look left’ [...]

Das alltägliche Verhalten eines Schiffsführers bei Ausführung seiner Aufgaben scheint deutlich der ersten Kategorie zu entsprechen. Als übliche Linearbeschleunigungen werden hier lediglich $6.8 \frac{\text{mm}}{\text{ms}}$ (0.7G) für das Szenario „Startle“, also das erschreckte Umgucken, und bis zu

¹ „Measuring motion-to-photon latency for sensorimotor experiments with VR systems“ Warburton et al., 2022

² „Latency Mitigation Strategies“ Carmack, 2013

³ „Motion to photon latency in mobile AR and VR“ Wagner, 2018

$\frac{4^\circ}{\text{ms}}$ für die Kopffrotation genannt. Bei einem angenommenen durchschnittlichen Kopfdurchmesser eines erwachsenen Mannes von 60cm^4 ergibt diese Rotation eine Translation der Augen von ca. $6.6 \frac{\text{mm}}{\text{ms}}$. Somit scheinen Kopffrotation und Kopfbewegung einen ähnlich großen Einfluss auf die finale Augenposition zu haben.

Trotz ausschließlicher Verwendung der Translation kann somit von einer nicht signifikant veränderten Wahrnehmungsschwelle für die MtP-Latenz ausgegangen werden. Es wird daher mit den bereits zitierten, etablierten Werten aus der Literatur gearbeitet. Als maximal akzeptable MtP-Latenz werden 20ms definiert, eine weitere Senkung bis zur unteren Wahrnehmungsschwelle für AR-Anwendungen bei 5ms ist wünschenswert.

3.1.2 Headtracking-System

Das Headtracking-System zur Erfassung der Betrachterposition soll insbesondere anhand der erreichbaren Latenz, Präzision und Resilienz ausgewählt werden. Die in 3.1.1 bestimmten maximal erlaubten 20ms Gesamtsystemlatenz sind ein extrem geringes Zeitbudget, von welchem das Tracking nur einen Bruchteil beanspruchen darf. Die für das Tracking „erlaubte“ Zeit lässt sich jedoch nicht klar definieren ohne den Rest des Systems zu kennen, sollte aber wohl mindestens unter 10ms und idealerweise unter 5ms liegen.

Die benötigte Präzision hängt stark von der Entfernung der dargestellten Objekte ab. Dadurch dass sich das Smart Window nur 1-2 Meter vor dem Betrachter befindet, die annotierten Inhalte aber potenziell mehrere hundert Meter entfernt sind, multiplizieren sich Ungenauigkeiten in der Betrachterposition mit einem hohen Faktor. Möchte man bei einem Betrachtungsabstand von 1.2m einen 70m entfernten Punkt im von Laera et al., 2021 definierten „Vista-Space“ mit $\pm 50\text{cm}$ Genauigkeit annotieren, so ergibt sich die maximal tolerierbare Abweichung der erfassten Kopfposition überschlagsweise als

$$\frac{1}{2}\text{m} * \frac{1.2\text{m}}{70\text{m}} = 8.5\text{mm}.$$

In der praktischen Anwendung ist vermutlich jedoch ein anderer Faktor die wichtigere Größe: die Stabilität des Trackings. Ein statischer Versatz von 8.5mm mag akzeptabel sein, ein Tracking-Rauschen mit $\sigma = 8.5\text{mm}$ und damit ein stetiges „Zittern“ der dargestellten Inhalte jedoch nicht. Da die „normale“ Vorgehensweise, das Glätten der Sensordaten mittels Filterung, aufgrund der hohen Latenzanforderungen vermieden werden sollte, muss bereits die eigentliche Genauigkeit so bemessen sein, dass das Sensorrauschen auch ungefiltert nicht mehr ins Gewicht fällt. Idealerweise liegt es also mindestens eine Größenordnung unter der akzeptablen maximalen Abweichung und damit unter $\pm 0.85\text{mm}$.⁵

⁴„Centiles for adult head circumference“, Bushby et al., 1992

⁵Sowohl der Betrachtungsabstand von 1.2m als auch die Objektdistanz von 70m sind für das Einsatzszenario

3.1.3 Darstellungshelligkeit

Zur Ermittlung der ungefähr benötigten Leuchtdichte für eine projektionsbasierte Darstellung auf der Fensterscheibe ist die Wahrnehmungsschwelle des Menschen für Helligkeitskontraste ein guter erster Anhaltspunkt. Greule, 2015 gibt als Schwelle bei mittleren Helligkeiten ca. 3% Leuchtdichtedifferenz an. Nach Crumey, 2014 liegt dieser Wert bei Tageslicht noch deutlich höher, ist jedoch kaum allgemeingültig zu beziffern, da er stark von Faktoren wie dem Kontrastmuster und dessen Größe sowie der Gesamthelligkeit abhängt. Nach Greule, 2015[S.51] ist der Kontrast folgendermaßen definiert:

$$C = \frac{L^* - L_u}{L_u} * 100\% \quad (3.1)$$

C = Kontrast

L^* = Leuchtdichte des Sehobjekts in $\frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$

L_u = Umgebungsleuchtdichte in $\frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$

L^* und L_u beschreiben hier auf derselben Fläche nebeneinander auftretende Leuchtdichten. Für ein mit Projektionsfolie beschichtetes Fenster ist dies jedoch nicht aussagekräftig. Bei fehlender Projektion kann es als vollständig transparent angenommen werden, für die Kontrastwahrnehmung ist somit der durch das Fenster betrachtete Hintergrund entscheidend, nicht die Fensteroberfläche selbst. ⁶

Zu beachten ist hierbei die extrem hohe Varianz der Außenhelligkeit je nach Tageszeit, Ort und Wetter. Eine sinnvolle Ausgangsgröße sind die am als wolkenlos beschriebenen Studientag von Hertel et al., 2023 gemessenen Außenbeleuchtungsstärken von 30.000 - 70.000 Lux. Da der wolkenlose Himmel als plausibler „Worst Case“ angenommen werden kann, werden diese Werte für die weitere Überschlagsrechnung direkt verwendet. Sie sind somit äquivalent zu einer vollständig diffus reflektierenden, weißen Fläche hinter dem Fenster, bestrahlt mit einem Lichtstrom von 30.000 - 70.000 Lumen pro Quadratmeter. In der finalen Verwendung des Fensters ist natürlich der entsprechende Bildhintergrund (beispielsweise Wasser, Bäume, Gebäude) und dessen Reflektionsgrad zu berücksichtigen.

realistische, aber arbiträr gewählte Werte die im Einsatzszenario stark variieren können. Somit ist diese Rechnung, wie bereits erwähnt, zur Ermittlung der Größenordnung relevant, aber kein starrer Zielwert.

⁶Eine Verwendung des Fensters im Innenraum bei Tageslicht wird angenommen. Somit gilt $L_{\text{ausen}} \gg L_{\text{innen}}$ und nicht vom Projektor stammende Beleuchtung durch Umgebung oder Arbeitslicht kann vernachlässigt werden. Tritt der umgekehrte Fall ein, beispielsweise bei Nacht, muss das Fenster wie eine normale Projektionsfläche behandelt und auch interne Umgebungshelligkeit berücksichtigt werden. Siehe Kap.6.

Nimmt man eine realistische Fenstergröße von einem Quadratmeter sowie eine genau passende Ausleuchtung dieser Fläche durch einen Projektor an⁷, ergibt sich der zum Erreichen der Wahrnehmungsschwelle zusätzlich zu reflektierende Lichtstrom L_{min} als

$$L_{min} = (70.000\text{lm} * \frac{3}{100}) = 2.100\text{lm}. \quad (3.2)$$

Ein durchaus erreichbarer Wert. Jedoch sind bisher die Reflektionseigenschaften der Projektionsfolie nicht berücksichtigt. Laut Datenblatt bietet die im Test beste „unsichtbare“ Projektionsfolie einen Reflektionskoeffizienten von lediglich 13% und eine Transmission von 87%. Der tatsächlich benötigte Lichtstrom (nur zum Erreichen der Wahrnehmungsschwelle bei Tageslicht!) beträgt somit

$$L_{min} = \frac{2.100\text{lm}}{13} * 100 = 16.153\text{lm} \quad (3.3)$$

Zur Berechnung des final benötigten Lichtstroms muss ein zu erreichender Zielkontrast spezifiziert werden. Es ist sinnvoll, sich hierbei an den Standards zur Textlesbarkeit zu orientieren, da diese höhere Ansprüche an das Kontrastverhältnis stellt als beispielsweise Formen- oder Bewegungserkennung. Der relevante Standard für Barrierefreiheit sind die „[Web Content Accessibility Guidelines \(WCAG\) 2.1](#)“, welche 2021 auch von der EU-Kommission in die „[Norm \(EN\) 301 549](#)“ übernommen wurden.

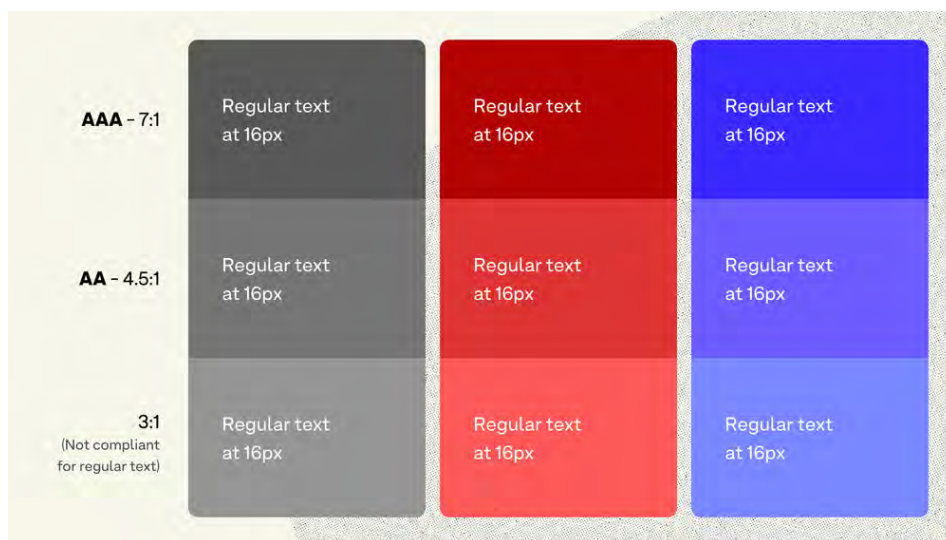


Abbildung 3.1: Visualisierung verschiedener Kontrastverhältnisse (Quelle: Stark, 2021)

⁷Dies entspricht einerseits nahezu der finalen Fenstergröße, bedeutet aber auch dass $lx == lm$, da $1lx = 1lm/m^2$

Das niedrigste für gute Textlesbarkeit empfohlene Kontrastverhältnis beträgt 3:1. Dies ist zwar nicht barrierearm, jedoch gehört zu den Voraussetzungen eines Schiffsführerscheins ein bestandener Sehtest. Gleichzeitig beschreibt dieses Kontrastverhältnis den „Worst-Case“ unter strahlendem Tageslicht. Es ergibt sich ein benötigter idealer Lichtstrom von $L_{\min} = 3 * 11.538\text{lm} = 48.461\text{lm}$. Berücksichtigt man nun noch Verluste durch eine nicht exakte Abdeckung des Fensters durch den Projektor (beispielsweise durch Trapezverzerrungen) und Verluste durch alternde Leuchtmittel, so wäre mindestens eine 50.000 Lumen Projektion nötig, um an einem hellen Sommertag auf einer nur 1m^2 großen Scheibe Text lesen zu können.

Dies ist sicherlich technisch möglich, jedoch mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit unwirtschaftlich. Zudem ist bei so hohen Lichtleistungen weder das Projektorgewicht noch die entwickelte Hitze oder die transmittierte Lichtleistung (87% der Gesamtleistung) noch vernachlässigbar. Insbesondere letztere könnte Personen im Blickfeld der Brücke, an Land oder auf anderen Schiffen blenden und so gefährden.

Eine Lösung bietet die Dimmung der Fensters. Neben elektronisch dimmbaren Fenstern für finale Installationen sind für die Nutzung im Prototypen auch Dimmfolien in verschiedenen Stärken verfügbar. Sie sind preisgünstig und in Form von herunterziehbaren Rollos auf vielen Schiffen bereits in Verwendung. Eine Dimmung um 3 Blendenstufen entspricht bereits der Reduktion der Außenhelligkeit und damit auch des benötigten Projektorlichtstroms auf 12.5% der bisherigen Stärke.

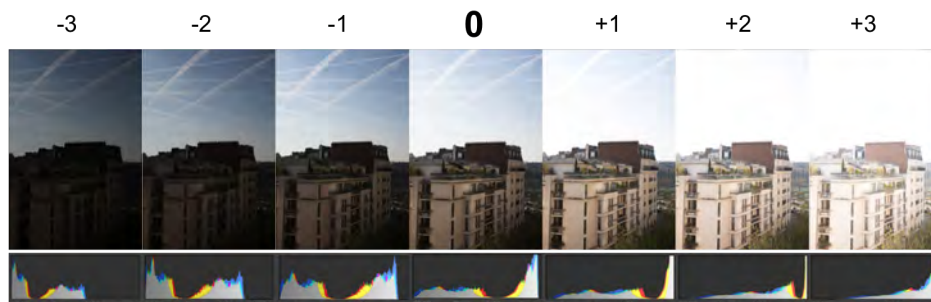


Abbildung 3.2: Visualisierung verschiedener Dimmstärken in Blendenstufen von Rowell, John, 2017

Die finale Zielspezifikation umfasst somit weder eine konkrete Dimmung noch einen konkreten Projektorlichtstrom, sondern ein minimales Kontrastverhältnis von 3:1 bei vollem Tageslicht. Mit der in [Abschnitt 2.4](#) beschriebenen, bereits verbauten maximal elektronisch gedimmten Scheibe, betrüge die benötigte Leuchtdichte somit

$$70000\text{lux} * 5\% * 3 = 10500\text{lux}$$

Je nach verfügbarem Material sowie eventuell anderen Einschränkungen⁸⁹ sollte hier jedoch eine Abwägung getroffen werden.

3.1.4 Software

Neben den dargestellten Inhalten - welche szenarioabhängig variieren - müssen einige grundlegende Anforderungen immer erfüllt sein. Für eine weltrelative Positionierung muss sowohl die Position als auch die Orientierung des Schiffs mit hoher Genauigkeit und geringer Latenz bekannt sein. Diese Informationen werden, sofern verfügbar, üblicherweise per LAN im Protokoll NMEA 0183 zur Verfügung gestellt. Die Smart Window Software muss somit dieses Protokoll implementieren, um nativ in die Brückensysteme integrierbar zu sein.

Für das Erreichen der Latenzanforderungen ist zudem eine allgemein hohe Performance ein wichtiges Ziel. Ineffiziente Datenverarbeitung, aufwendige Filterung oder lange Puffer müssen vermieden werden.

Obwohl im Rahmen dieser Arbeit lediglich der betreute Prototyp eines einzelnen Smart Windows evaluiert werden soll, muss ein klarer Pfad zu sowohl effizienter Skalierbarkeit als auch automatisiertem Deployment abgesteckt werden. Eine aufwendige Kalibrieroutine bei jedem Systemstart oder der Bedarf nach einem vollständigen zweiten System zur Bespielung eines weiteren Fensters sind nicht akzeptabel.

3.2 Komponentenauswahl

Es gilt nun, die wichtigsten Teilkomponenten des Systems so auszuwählen, dass diese die eben aufgestellten Kriterien erfüllen können. Für jede Teilkomponente soll ein kurzer Überblick über die Entscheidungsfindung, eventuelle Alternativen und insbesondere über in der Konstruktionsphase noch zu lösende Herausforderungen gegeben werden.

3.2.1 Displaytechnologie

Zur Darstellung von digitalen Inhalten auf einer transparenten Oberfläche bieten sich die in [Abschnitt 2.1](#) beschriebenen möglichen Technologien an, namentlich optische Kombination

⁸Durch starke Dimmung entstehen schnell zu hohe Helligkeitsunterschiede mit den restlichen, regulären Brückenfenstern. Diese werden jedoch für die Rundumsicht ständig verwendet, eine nötige Helligkeitsadaption ist daher inakzeptabel.

⁹Die klare Durchsicht der Scheibe muss auch bei dunkleren Lichtverhältnissen wie z.B. Nacht oder Gewitter gewährleistet sein.

via Spiegelung, transparentem Display oder Projektion auf Glas. Diese sollen kurz auf ihre Eignung für das definierte Einsatzszenario geprüft werden.

Darstellung per Spiegelung wird bei herkömmlichen Head-Up-Displays verwendet, da sie als einzige die Darstellung von kollimiertem Licht erlaubt. Gleichzeitig ist sie der bei weitem effizienteste Weg günstig hohe Leuchtdichten darzustellen, da die Inhalte spekulär und nicht diffus reflektiert werden. Aus diesen Gründen wäre sie auch für ein Smart Window theoretisch eine ideale Lösung. Leider ist der benötigte Strahlengang und somit auch die Positionierung der reflektierten Oberfläche von der Betrachterposition abhängig. Außerdem skaliert die Größe der zu reflektierenden Inhalte linear mit ihrer Darstellungsgröße. Ohne massiven Entwicklungsaufwand ist dieses Prinzip mit den Anforderungen an eine ca. 1m^2 große Scheibe mit freiem Betrachtungswinkel nicht vereinbar.

Transparente Bildschirme wären die wohl einfachste Lösung. In diesem Bereich sind in den letzten Jahren große Fortschritte gemacht worden, sie sind vergleichsweise kostengünstig und platzsparend. Diverse Nachteile machen jedoch leider auch hier einen Einsatz als Smart Window unrealistisch. Aktuell stehen T-OLED Bildschirme lediglich vom Hersteller LG und nur in den fernsehtypischen Größen 55 und 65 Zoll im Seitenverhältnis 16:9 zur Verfügung. Ein Beschnitt dieser Panels ist nicht ohne weiteres möglich. Sie bieten lediglich eine maximale Helligkeit von 150 - 400 Nits¹⁰ (entspricht cd/m^2) je nach Bildinhalt und somit deutlich weniger als in 3.1.3 mindestens gefordert. Neben diesen, sicherlich durch Produktiteration verbesserbaren, Problemen ergibt sich jedoch auch eine bauartbedingte Eigenschaft, welche T-OLEDs auf absehbare Zeit für den Einsatz in sicherheitskritischen Szenarien unbrauchbar macht; durch diese Displays wird der betrachtete Hintergrund durch Lichtdiffraktion an den OLED-Streifen immer leicht unscharf erscheinen.¹¹ Bei normaler Betrachtung fällt dies kaum auf, jedoch ist beispielsweise der Blick mit einem Fernglas durch solch ein Display nahezu unmöglich. Der Einsatz als sicherheitskritisches Brückenfenster ist somit grundsätzlich nicht möglich.

Projektion auf transparentes Glas böte zwar die flexibelste Lösung, ist jedoch nur mit einer zusätzlichen Folierung zu realisieren. Eine solche Folierung trübt das Glas aber ein, die klare Durchsicht wäre wiederum nicht gegeben.

In einem vorhergegangenen Forschungsprojekt (siehe [Abschnitt 2.4](#)) wurden diverse, als „unsichtbar“ beworbene Projektionsfolien evaluiert und bis auf die Produkte eines einzelnen Herstellers als unzureichend verworfen. In [Abbildung 2.6](#) sind die sechs besten Folien unter

¹⁰ „Transparente OLED Touch-Signage: Spezifikationen“ LG Business Solutions, 2023

¹¹ Siehe [Unterabschnitt 2.1.3](#)

jeweils starker Projektorbeleuchtung und normalem Tageslicht zu sehen. Folien 1 und 2 stammen vom selben Hersteller, Folie 1 ist eine explizit als „High Brightness“ beworbene Version und konnte als einzige Beschichtung sowohl angemessene Klarheit als auch ansatzweise ausreichende Darstellungshelligkeit bieten.

Da sowohl eine Spiegelungs-Lösung als auch die Verwendung eines transparenten Displays im gesteckten Rahmen nicht möglich sind, muss trotz großer Herausforderungen eine Projektionslösung verwendet werden. Sie bietet als einzige Technologie die Möglichkeit einer vergleichsweise klaren Durchsicht unter allen Bedingungen, der flexiblen Größenanpassung an das verbaute Fenster und eine von der Betrachtungsposition weitestgehend unabhängige Darstellung.

Eine geeignete Projektionslösung für die berechneten Anforderungen zu finden, stellt sich jedoch als größeres Problem heraus. Aus der maximal akzeptablen Latenz von 20ms für das Gesamtsystem ergibt sich, dass mindestens eine Bildwiederholrate von 120Hz (8.33ms Latenz), besser noch 240Hz (4.16ms Latenz), erreicht werden muss, beides mit der zusätzlichen Bedingung eines nicht durch interne Bildverarbeitung weiter verzögerten Input-Lag. Erstaunlicherweise ist es unüblich, dass ein Projektorhersteller im Datenblatt den internen Input-Lag spezifiziert, obwohl dieser unabhängig von der Bildwiederholrate je nach Modell stark schwanken kann. Der bereits im Testcontainer verbaute Panasonic PT-RZ770 wies nach einem kurzen Test beispielsweise ca. 35ms Latenz bei 60Hz Bildwiederholrfrequenz auf. Auch der Betrieb bei in niedrigeren Auflösungen unterstützten höheren Bildwiederholraten bis zu 120Hz reduzierte diese Latenz nicht messbar, sie scheint daher vermutlich von interner Bildverarbeitung herzurühren.

Die beste verfügbare Projektionsfolie bietet einen weiterhin extrem hohen Transmissionsgrad von 87%, dementsprechend steht nur 13% der Lichtleistung des verwendeten Projektors zur Verfügung, um ein im direkten Tageslicht klar sichtbares Bild zu erzeugen. Benötigt wird somit ein extrem schneller und gleichzeitig heller Projektor mit herstellerspezifisiertem Input-Lag. Insbesondere letzteres ist schwer zu finden, seit 2021 gibt es jedoch im Gaming-Bereich die ersten entsprechenden Produkte. Zum Auswahlzeitpunkt im April 2023 boten insgesamt vier Projektoren auf dem Markt eine Bildwiederholrate von 240Hz in 1080p Auflösung in Kombination mit einem ausgewiesenen Input-Lag von 4.16ms. Ausgewählt wurde der mit Abstand hellste dieser vier Kandidaten, der BenQ 700 STi mit einer beworbenen Lichtleistung von 3000 ANSI-Lumen, deutlich weniger als der im vorherigen Forschungsprojekt eingesetzte Panasonic PT-RZ770 mit 7000 ANSI-Lumen.

Da sich jedoch kein weiterer Projektor fand, der alle Spezifikationen erfüllt¹², muss es in der Umsetzung gelingen, einen akzeptablen Kompromiss zwischen Projektorpositionierung,

¹²Einige professionelle Projektoren für Flugsimulatoren etc. tun dies natürlich, bieten sogar bis zu 8k 240Hz, allerdings für sechsstelligen Preise.

Konfiguration und Scheibendimmung zu finden, um das anvisierte Kontrastverhältnis von 3:1 auch mit einem eigentlich deutlich zu schwachen Projektor zu erfüllen.

3.2.2 Headtracking-Lösung

Einen beliebigen Nutzer mit der erforderlichen Latenz und Präzision zu erfassen, stellt eine große Herausforderung dar. Übliche LIDAR-Kameras wie die Microsoft Azure Kinect oder Intel RealSense L515 bieten im besten Fall eine Bildwiederholrate von 90fps und somit eine reine Bilderfassungszeit von $\frac{1}{90\text{fps}} = 11\text{ms}$. Sämtliche für die Bildverarbeitung wie Gesichts- oder Objekterkennung benötigte Zeit käme hier noch hinzu. Bei einer angestrebten Gesamtsystemlatenz von unter 20ms ist das nicht akzeptabel. Bei der Verwendung reiner RGB-Kameras ergäbe sich dieselbe Problematik. Die Verwendung höherer Bildwiederholraten wird durch die für kurze Belichtungszeiten benötigte hohe Umgebungshelligkeit sowie Berechnungszeit für Bildverarbeitung und Feature-Erkennung verhindert.

Hersteller	Bezeichnung	FoV (H x V)	FPS	Auflösung	Tiefenbereich
Microsoft	Azure Kinect	120° × 120°	30fps	1024 × 1024px	0.25 - 2.2m
Microsoft	Kinect 2	70° × 60°	30fps	512 × 424px	0.50 - 4.5m
Intel	Realsense L515	70° × 55°	30fps	1024 × 768px	0.25 - 9.0m
Intel	Realsense D435	87° × 58°	90fps	1280 × 720px	0.30 - 3.0m

Nimmt man trotzdem ein Tiefenkamerasystem als die beste erreichbare Lösung an, so ergibt sich ein noch grundlegendes Problem. Wie soll der gerade aktive Benutzer im Tiefen- oder Farbbild schnell und zuverlässig identifiziert werden?

Für einen realistischen Einsatz auf der Schiffsbrücke wäre hierfür eine extrem flexible Lösung nötig, da kaum allgemeingültige Aussagen über die Brückenumgebung getroffen werden können. Je nach Jahres- und Tageszeit, Brückenlayout und Einsatzszenario ist es leicht vorstellbar, dass der Schiffsführer sich weder allein auf der Brücke noch an einer festen Position befindet, durch z.B. Sonnenbrille, Frisur oder Kopfbedeckung kaum visuell identifizierbar ist oder durch andere Personen verdeckt wird. Extremes Gegenlicht darf das Tracking genausowenig beeinträchtigen wie völlige Dunkelheit; Körpergröße, Hautfarbe, Frisur und Kleidung dürfen keine Rolle spielen. Somit ist weder die semantische Identifizierung („die vorderste Person ist der Schiffsführer“), noch die Identifizierung durch Gesichtserkennung zuverlässig umsetzbar.

Diese beiden großen Problemfelder, Latenz und Personenidentifizierung, ließen sich durch Benutzung eines aus CAVE-Systemen oder Virtual-Production-Umgebungen bekannten Outside-In-Tracking Systems lösen. Etablierte Systeme sind hier z.B. Vicon oder OptiTrack von NaturalPoint. Bei dieser Technik werden Infrarotkameras mit integrierten IR-LEDs im Raum verteilt angebracht. Trägt der Benutzer nun eine Brille mit angebrachten passiven

Infrarotreflektoren, so sind diese in den entsprechenden Kamerabildern deutlich zu identifizieren. Wird die exakte Ausrichtung aller Kameras in einem Kalibrierungsschritt bestimmt, so lässt sich durch die Position der Reflektoren in den verschiedenen 2D-Kamerabildern deren 3D-Position rekonstruieren.



Abbildung 3.3: Eine Shutterbrille mit passiven Infrarotreflektoren des Herstellers ART - Advanced Realtime Tracking, 2023

Eine solche Markerbrille kann vollkommen passiv ausgeführt sein und somit ohne schwere Akkus und störenden Ladepausen verwendet werden. Leider stellt sie trotzdem einen dramatischen Kompromiss dar, denn Brillen- sowie Sonnenbrillenträger könnten das System nur über Umwege nutzen. Auch kann die Anbringung von mehreren Tracking-Kameras im Sichtfeld des Schiffsführers ablenkend wirken. Außerdem steht zu befürchten, dass trotz dieser objektiv deutlichen Vorteile der subjektive Vorteil einer passiven Brille mit Tracking-Markern gegenüber einer aktiven „echten“ AR-Brille auf den ersten Blick nur gering ausfällt.

Der Latenzgewinn solcher Systeme ist jedoch signifikant und ergibt sich durch mehrere Faktoren. Die aktive Infrarotbeleuchtung ermöglicht es, mit sehr kurzen Verschlusszeiten und hohen Bildwiederholraten zu filmen, ohne von der Umgebungshelligkeit abhängig zu sein. Es ist keine komplexe Gesichts- oder Featureerkennung erforderlich, im Kamerabild müssen lediglich helle Kreise gefunden werden. Dies ist extrem schnell und direkt auf spezialisierter Hardware in den einzelnen Kameras machbar. Diese versenden somit lediglich die erkannten Markerpositionen per Netzwerk an einen Hostrechner. Der gesamte Bildversand sowie die Dekodierung und Analyse der Bilder auf dem Hostrechner entfällt. Laut Eigenangabe des Herstellers OptiTrack beträgt die Gesamtsystemlatenz (der gesamte Zeitraum zwischen Bewegung und Versand der finalen Bewegungsdaten via Netzwerk!) bei einer Tracking-Framerate von 240Hz sehr niedrige 4.7ms.

Die Kombination von mehreren klar definierten Markern genau spezifizierter Größe führt gleichzeitig zu einer extrem hohen Genauigkeit des Systems. Je nach Qualität der Kalibrierung und Anzahl der Kameras bietet ein OptiTrack-System eine Genauigkeit von bis zu $\pm 0.1\text{mm}$ im gesamten Tracking-Volumen.

Trotz der unausweichlichen Notwendigkeit der am Kopf angebrachten Marker wird daher mangels plausibler Alternative ein bereits an der Hochschule vorhandenes System aus insgesamt 4 OptiTrack Prime 13 Kameras verwendet. In der Umsetzungsphase sollen Wege entwickelt werden, diese Einschränkung so stark wie möglich zu minimieren.

3.2.3 Software-Stack

Für die Umsetzung des Projektes soll die Unity Engine genutzt werden. Die Wahl von Unity basiert größtenteils auf Präferenz und vorhandenem Vorwissen, ist aber gut begründbar.

Die Performanceanforderungen des Projekts spielten eine zentrale Rolle. Unity, ursprünglich aus dem Mobile-Bereich stammend, bietet eine eigene Grafikpipeline (URP) für die Entwicklung auf Low-End Hardware, was für die flüssige Ausführung von Augmented Reality-Anwendungen von hoher Bedeutung ist. Im Umkehrschluss können so auf schnellerer Hardware leicht hohe Bildwiederholraten und somit niedrige Latenzen erreicht werden. Diese Eigenschaften sollen aber nicht darüber hinwegtäuschen, dass andere etablierte Engines wie Unreal Engine oder Godot im Großen und Ganzen nicht weniger geeignet gewesen wären. Die einzigen zwingenden Voraussetzungen sind die Unterstützung von mehreren Ausgabefernern (zur Ansteuerung mehrerer Projektoren mit einem einzelnen Grafikserver) sowie die Möglichkeit, das entwickelte Programm als eigenständig lauffähige Datei zu kompilieren.

Das eigentliche Tracking soll mit der dem Optitrack-System zugehörigen Software „Motive“ erfolgen. Motive erlaubt Kalibrierung, Konfiguration und Feineinstellung des Systems. Die resultierenden finalen Positionsdaten können via UDP entweder lokal oder per LAN an die Unity-Applikation weitergereicht werden. Die Möglichkeit der Skalierung eines einzelnen Tracking-Systems auf mehrere Grafikserver ist somit gegeben. Hersteller NaturalPoint empfiehlt für die Verwendung von Motive die Ausführung auf einem separaten, nicht mit Rendering beanspruchten Rechner. Während der Umsetzungsphase dieser Arbeit soll der mögliche Latenzunterschied festgestellt und quantifiziert werden, denn zumindest für die Entwicklung des Prototypen wäre die Ausführung beider Programme auf einem einzelnen (leistungsstarken) Rechner wünschenswert.

3.3 Finales Konzept

Das Smart Window soll aus einer mit unsichtbarer Projektionsfolie beschichteten, dimmbaren Glasscheibe bestehen, auf welcher mit einem BenQ 700STi Hochgeschwindigkeitsprojektor dynamische Inhalte projiziert werden. Die Scheibe hat eine ungefähre Größe von 1m^2 .

Zur Erfassung der Kopfposition der betrachtenden Person trägt diese infrarotreflektive Marker am Kopf, sie werden mit auf der Brücke verteilten Tracking-Kameras OptiTrack Prime 13 erfasst und in der Software Motive verarbeitet. Ein mit der GameEngine Unity3D entwickeltes Programm empfängt die von Motive übertragene Kopfposition und die im NMEA 0813 vorliegenden Orientierungs- und Sensordaten des Peilschiffs via lokalem Netzwerk und verbindet sie mit einer elektronischen Seekarte und eventuell weiteren Informationsquellen zu einem User-Interface mit sowohl weltrelativen AR-Informationen als auch bildschirmrelativen Brückeninstrumenten.

Die gesamte Pipeline arbeitet mit einer minimalen Frequenz von 240Hz und soll eine Motion-to-Photon Latenz von unter 20ms erreichen. Das Tracking-System muss eine Genauigkeit von unter $\pm 0.85\text{mm}$ bieten. Außerdem soll das gesamte System vollautomatisch starten und nach einer initialen Kalibrierung selbstkalibrierend und somit autark sein.

Zusammengefasst sind folgende Zielspezifikationen zu erreichen;

- Visuellers Kontrastverhältnis von mindestens 3:1
- Motion-to-Photon Latenz von unter 20ms
- Kompensation von Schiffsbewegung und Neigung in Echtzeit
- Integration in die Brückensysteme des „Deepenschriewer 3“ durch Unterstützung der relevanten Standards und Protokolle
- Darstellung einer statischen Seekarte und dynamischer Kursplanung
- Perspektive für dauerhaften, unbetreuten Einsatz

Systematisch betrachtet ist dieses System ein monoskopisches Display ohne Lichtkollimation. Insbesondere die fehlende Kollimation macht es sowohl konventionellen Head-up-Displays als auch AR-Headsets technisch unterlegen. Die wirkliche Relevanz im praktischen Einsatz ist jedoch schwer zu quantifizieren. Durch die ebenfalls fehlende Fähigkeit zur Darstellung von dreidimensionalen Inhalten ist zu erwarten, dass insbesondere die qualitativen Stärken und Schwächen des Systems in verschiedenen Szenarien sich deutlich von sowohl HUDs als auch AR-Headsets unterscheiden werden. Dies wird in der Auswertung des Systems (Kapitel 5) genauer betrachtet.

4 Umsetzung

Bei der Umsetzung des Projektes sind viele Unwägbarkeiten und Probleme zu erwarten, außerdem einige schrittweise stattfindende Optimierungen, beispielsweise bei der Darstellungslatenz und Helligkeit sowie umfassende Softwareentwicklung. Daher wurde die Entwicklung in zwei Ausbaustufen mit jeweils eigenen Zielsetzungen aufgeteilt. Diese orientieren sich an der in [2.3.1](#) vorgestellten TRL-Skala.

Ausbaustufe 1 [TRL 1-4] 1. März 2023 - 31. Juni 2023

In Ausbaustufe 1 soll im in [Abschnitt 1.2](#) vorgestellten Erprobungscontainer ein funktionierendes Hardwaresystem konstruiert und optimiert werden. Dazu gehört insbesondere die Bewältigung der zwei großen Probleme „Projektionshelligkeit“ und „Darstellungslatenz“. Beide sollen ausführlich erforscht, verbessert und vermessen sowie entsprechende Softwaregrundlagen geschaffen werden. Ziel ist eine ausreichend helle Darstellung von wahrnehmbar latenzfreien Testinhalten, welche bei beliebigen Betrachtungswinkeln weltrelativ stabil platziert werden können. Es soll bereits vor Abschluss dieser Ausbaustufe diverses Feedback eingeholt werden, um möglicherweise bestehende Probleme früh zu erkennen und ein möglichst relevantes Produkt zu entwickeln.

Ausbaustufe 2 [TRL 5-6] 1. Juli 2023 - 14. September 2023

In Ausbaustufe 2 soll der entwickelte Hardwareprototyp bis zu einem Stand weiterentwickelt werden, der einen produktiven Einsatz im in [Abschnitt 1.3](#) spezifizierten Einsatzszenario und die Bewertung durch eine Nutzerstudie erlaubt. Nach einer ersten Validierung ob durch die neue Einsatzumgebung unerwartete Probleme auftreten, soll der Fokus auf Softwareentwicklung liegen. Insbesondere müssen Schnittstellen zu diversen Bordsystemen wie Sonar, GPS, Gyroskop und Videobild etabliert werden. Die Integration einer statischen Seekarte, dynamisch übertragener Peillinien sowie die Entwicklung einer Benutzeroberfläche sind ebenfalls geplant. Ziel dieser Ausbaustufe ist ein von beliebigen Nutzern verwendbares, ausgereiftes System, welches alle in [3.3](#) spezifizierten Inhalte stabil darstellt.

Diese Aufteilung wurde im finalen Projekt erfolgreich umgesetzt und führte zu einem geordneten und produktiven Fortschreiten des Projektes. Bei einer Vorstellung des Systems im

Rahmen der HPA-Veranstaltung „Homecoming Homeport“ am 22.06.2023 wurde das System in fertiggestellter Ausbaustufe 1 von ca. 50 interessierten Fachbesuchern getestet und es konnte wertvolles Feedback gesammelt werden. Da jedoch viele Einzelheiten auch während der laufenden Entwicklung geändert oder weiterentwickelt wurden, werden im Interesse der Lesbarkeit die folgenden Inhalte nach Themengebieten getrennt behandelt und nicht in die jeweiligen Ausbaustufen aufgeschlüsselt. Während der Demonstration von Ausbaustufe 1 gesammeltes Feedback wird an geeigneter Stelle in den jeweiligen Unterkapiteln erwähnt. Die hauptsächlich relevante Zusammenfassung des entwickelten Systems im Endausbau findet sich in [Abschnitt 4.7](#).

4.1 Headtracking

Für Ausbaustufe 1 wurden vier OptiTrack *Prime 13* Kameras sowie die dazugehörige Software *Motive* in der Version 1.10 von 2016 verwendet. Objekte werden durch das Anbringen sogenannter *Rigidbody-Marker* erfasst: Gestelle aus mehreren Infrarotreflektoren, welche sich per Klettverschluss flexibel befestigen lassen. Da bei jedem Marker die Reflektoren in einem unterschiedlichen Muster angeordnet sind, lassen sich einzelne Marker voneinander unterscheiden. Zur Bestimmung seiner Position muss jeder Reflektor von mindestens zwei Kameras gesehen werden, während der Kalibrierung von mindestens drei. Gerade bei wenigen verfügbaren Kameras ist somit deren Platzierung von hoher Bedeutung.

Zur Erfassung der benötigten Augenposition besteht die vermeintlich ideale (und aus CAVEs bekannte) Lösung aus direkt um das Fenster herum platzierten Kameras und einer Reflektorbrille, ähnlich wie in [Abbildung 3.3](#) zu sehen. Mit dieser Lösung ergibt sich jedoch einerseits wieder der Zwang zur Benutzung einer Brille, andererseits hat solch eine Anordnung Nachteile im praktischen Einsatz. Wie in [Abbildung 1.4](#) zu sehen, hat der „Deepenschriewer 3“ - wie nahezu jede andere Schiffsbrücke auch - mehrere nebeneinanderliegende Fenster. Zwischen diesen Fenstern, im direkten Sichtfeld des Schiffsführers, Kameras anzubringen und zu verkabeln, erscheint problematisch und schlecht auf mehrere Fenster skalierbar.

Bringt man die RigidBody-Marker jedoch mithilfe einer Kopfbedeckung am Hinterkopf an, lässt sich der Kompromiss, Infrarotmarker am Kopf des Benutzers befestigen zu müssen, subjektiv deutlich abmildern. Sind die Marker an einer beliebigen Stelle zuverlässig mit dem Kopf verbunden, kann nach einem einmaligen Kalibrierungsschritt dauerhaft von der Kopfposition auf die Augenposition geschlossen werden. Der Nutzer ist frei, eigene Brillen oder Sonnenbrillen zu tragen und wird allgemein nicht dazu gezwungen, etwas Fremdes im Sichtfeld zu dulden. Gleichzeitig können so die Tracking-Kameras an der rückwärtigen Brückenseite angebracht werden. Dort sind sie tendenziell deutlich flexibler und unauffälliger anzubringen. Außerdem lässt sich so mit zusätzlichen aufklebbaren Reflektoren auch die genaue Position der Ecken des Fensters und der Projektoren erfassen, sie liegen nun im



Abbildung 4.1: Das für Ausbaustufe 1 verwendete Array von vier rückwärtigen OptiTrack Prime13 Kameras, magnetisch angebracht an die Innenwände des Testcontainers

Sichtfeld der Kameras. Perspektivisch gesehen ist dies zur kontinuierlichen Kalibrierung und automatisierten Entzerrung der Projektion hilfreich.

Nach Durchführen der Systemkalibrierung in *Motive* wies das System eine Genauigkeit von $\pm 0.203\text{mm}$ aus und erfüllte damit sofort die gestellten Anforderungen an die Präzision. Bei der Demonstration der fertiggestellten ersten Ausbaustufe (zu sehen in den Abbildungen 4.1 und 4.2) wurde die Verwendung einer Basecap zum Anbringen des Rigidbody-Markers sehr gut angenommen und funktionierte ohne größere Probleme, lediglich der Bedarf nach einer Kalibrieroutine für verschiedene Kopfgrößen und Links/Rechts-Augendominanz (umgesetzt in [Abschnitt 4.6](#)) wurde deutlich.

Ein größeres Problem stellte die Genauigkeit des Systems über einen längeren Zeitraum dar. Bei einer Präzision im Submillimeterbereich ist es naheliegend, dass die Position der Kameras mit sehr hoher Genauigkeit bekannt sein muss. Direkt nach der Kalibrierung des Systems ist dies der Fall, jedoch sind sowohl beim Einsatz im Testcontainer wie auch später auf dem Schiff einige Störeinflüsse nicht zu vermeiden. Insbesondere an sonnigen oder wechselhaften Tagen genügte bereits die temperaturbedingte Ausdehnung des Testcontainers, um ca. alle zwei Stunden eine Neukalibrierung notwendig zu machen.

Um dieses Problem zu lösen und auch in der deutlich anspruchsvolleren Umgebung der



Abbildung 4.2: Ein interessierter Fachbesucher mit Tracking-Basecap. Zu sehen die reflektiven Marker an der Rückseite der Basecap sowie zusätzliche Marker an den Ecken des Fensters

Schiffsbrücke nicht wieder auftreten zu lassen, wurde eine Reihe von Maßnahmen getroffen. Ein Upgrade auf die aktuelle Softwareversion Motive 3.1 bot Zugriff auf die neue Funktion *Continuous Calibration*. Diese Funktion nutzt die bei normaler Nutzung des Systems sowieso erfassten Marker zur kontinuierlichen Feinjustierung der Kalibrierung und kann so insbesondere langsame Veränderungen automatisch kompensieren. Zusätzlich wurden von Fehrmann Windows zwei weitere Optitrack *PrimeX 13* Kameras angeschafft, um sowohl das Tracking-Volumen als auch die Redundanz zu erhöhen. Zusätzlich wurde eine neue Kamerahalterung auf Basis hochwertiger Kugelkopf-Gelenke konstruiert. Mit diesen Änderungen konnte das System während der folgenden Entwicklungszeit für Ausbaustufe 2 auf dem Schiff mehrere Wochen ohne Neukalibrierung betrieben werden. Es bietet somit eine klare Perspektive auf einen wartungsarmen Dauereinsatz auch unter realen Bedingungen.

4.2 Projektion

Der ausgewählte Projektor ist ein Kurzstanzprojektor mit einem nur sehr begrenzten Zoombereich von 0.9 bis 1.08. Bei einer Fensterbreite von 90cm müsste der Projektor somit idealerweise in einer Entfernung von 81 bis 97cm angebracht werden. Da der Projektor jedoch

keinerlei Möglichkeit zum sogenannten Lens-Shift, also der physischen Trapezkorrektur durch Verschieben der Projektionsoptik bietet, muss in der Praxis meist ein etwas größerer Abstand gewählt werden, um Platz für die digitale Trapezkorrektur zu gewinnen. Da hierbei jedoch Auflösung und Lichtleistung verloren geht, sollte diese digitale Trapezkorrektur auf ein Minimum reduziert werden.

Neben diesen sehr engen Randbedingungen für den Anbringungsort ist die verfügbare Lichtleistung des Projektors das größte Problem. Selbst vollweiß dargestellte Inhalte waren anfangs nur bei vollständig elektronisch gedimmtem Fenster und einer zusätzlich aufgebrachten statischen Dimmfolie ausreichend kontrastreich zu erkennen. Farbige Darstellung, selbst Farben mit hoher Luminanz, war quasi unmöglich und der Blick aus dem Fenster durch die extreme Dimmung ebenfalls. Trotz hoher technischer Schwierigkeit musste daher ein Setup entwickelt werden, um auf einem vibrierenden Schiff mit kaum justierbaren Consumer-Projektoren das Bild zweier identischer Geräte exakt zu überlagern.



Abbildung 4.3: Das entwickelte doppelte Projektor-Setup mit übereinanderliegendem Output auf gedimmter Scheibe. Die grünliche Färbung ist ein Artefakt der aufnehmenden Kamera.

Für Ausbaustufe 1 hielt eine von Fehrmann entwickelte Projektorhalterung beide Projektoren magnetisch und gegeneinander neigbar unter der Containerdecke. Sie können so grob auf das Fenster ausgerichtet werden, eine präzise Überlagerung muss jedoch in Software stattfinden. Zusätzlich zeigte sich bereits bei ersten Tests, dass für die Augmentierung insbesondere der Sichtbereich um den Horizont relevant ist. Daher wurde das 16:9 Bild der Projektoren an die Fensterbreite angepasst und die Höhe außer Acht gelassen. So entstehen zwar nicht augmentierbare Bereiche deutlich ober- und unterhalb der Horizontlinie, die erreichte Leuchtdichte und Auflösung wird jedoch stark verbessert. Das resultierende Bild ist mit ca. 5000

ANSI-Lumen weiterhin recht schwach, erlaubt aber den Einsatz und die plausible Evaluierung des Prototypen ohne größere Einschränkungen.

4.3 Latenzoptimierung

In [Unterabschnitt 3.1.1](#) wurde eine maximale Systemlatenz von 20ms spezifiziert. Sämtliche Komponenten und Software wurden ausgewählt um dieses Kriterium zu erfüllen, dennoch ist signifikante Optimierung notwendig, um es wirklich zu erreichen. Schrittweise wurde jedes Element der Signalkette untersucht, eventuelle Verbesserungsmöglichkeiten recherchiert und vermessen.

4.3.1 Messmethodik

Um Motion-to-Photon Latenzen im Millisekundenbereich akkurat zu messen, wurde ein spezialisierter Messaufbau entwickelt: Ein aus drei Infrarotreflektoren konstruierter Rigidbody-Marker ist an einem schnellen, elektromagnetischen Kolben (Solenoid) befestigt. Eine für den Latenztest so minimalistisch und damit performant wie möglich entwickelte Unity-Applikation zeigt ein vollschwarzes Bild an, bis die erfasste Rigidbody-Position sich um mehr als 0.15mm (minimal mehr als das Grundrauschen der Positionsdaten) verändert hat. Dann wird ein vollweißes Bild an den Projektor ausgegeben. Mittels eines manuellen Schalters kann nun der Solenoid unter Strom gesetzt werden, dies wird gleichzeitig von einem Arduino Nano Microcontroller am digitalen Eingang erfasst und die genaue Startzeit gespeichert. Mit einer an der Scheibe befestigten und ebenfalls an den Microcontroller angeschlossenen Photodiode wird der Helligkeitsanstieg des Projektors registriert. Die Differenz aus Start- und Stoppzeit ergibt die Motion-to-Photon Latenz und wird mittels einer nach der Messung aufgebauten seriellen Verbindung an einen Rechner übermittelt.¹

Die Abtastfrequenz des Microcontrollers bietet eine theoretische Genauigkeit von $\pm 0.1\text{ms}$, jedoch sind sowohl die Trägheit des Solenoids als auch eventuelle Ungenauigkeiten in der Positionierung sowie das Flackern des DLP-basierten Projektors mögliche Störeinflüsse. Daher wurde die Genauigkeit des Latenztesters zusätzlich mit einer Sony FS700 Zeitlupenkamera evaluiert. Der Messaufbau wurde mit 960 Bildern pro Sekunde gefilmt und durch manuelle Auszählung der Bildfolge von Bewegung des Solenoids bis zum ersten Anzeichen eines Weißbildes überprüft. Die Ergebnisse des Latenztesters decken sich mit den Ergebnissen der Zeitlupenkamera und können somit als mindestens $\pm \frac{1}{960}\text{s} \approx 1\text{ms}$ genau gelten. Zur weiteren

¹Die serielle Verbindung kann bei den recht langsamen Arduino Microcontrollern zur nennenswerten Verzögerung anderer Funktionen führen. Daher ist es wichtig, diese erst nach Ende der zeitkritischen Messung zu öffnen.



Abbildung 4.4: Der Messaufbau mit konstruiertem Motion-to-Photon Latenztester. Sichtbar die drei Reflektoren des Rigidbody-Markers auf silbernem Solenoid sowie der Mikrocontroller mit Photodiode auf grüner Platine.

Sicherung der Genauigkeit wurde jeder der im Folgenden erfassten Werte insgesamt zehnmal gemessen und das arithmetische Mittel verwendet.

Das mit diesem Latenzmesser evaluierte System hatte direkt nach dem ersten Aufbau und mit Ausführung aller Software auf einem einzelnen Rechner ohne weitere Optimierungen eine MtP-Latenz von 27.3ms. Dies spricht für eine gelungene Komponentenauswahl: das in [Abschnitt 1.2](#) beschriebene Vorgängersystem erreichte lediglich eine MtP-Latenz von $71.1 \pm 2.1\text{ms}$.²

4.3.2 Optitrack

Das in Motive integrierte Analysetool gibt für das mit 240Hz betriebene System insgesamt 4.9ms Latenz an, bestehend aus 4.2ms Kamera- und 0.7ms Processing-Latenz. Obwohl die bereits genutzten 240Hz die maximale Frequenz des Systems ist, erlauben die neueren Kameras der *PrimeX*-Reihe eine Frequenz von bis zu 1000Hz bei Beschnitt des Blickwinkels und damit der Auflösung und des Tracking-Volumens.³ Kompensiert man die Reduzierung des Tracking-Volumens durch Einsatz weitwinkligerer *PrimeX 13W* Kameras, ließen sich so auf Kosten einer leicht reduzierten Genauigkeit potenziell 3ms Latenz einsparen. Da das für diesen Prototypen zur Verfügung stehende System allerdings aus vier älteren *Prime 13* und nur zwei neueren *PrimeX 13* besteht, konnte diese Methode nicht angewendet werden.

²Dieser Wert wurde mit der Zeitlupenfunktion eines Smartphone (iPhone 13Pro mit 240fps) insgesamt dreimal gemessen. Er soll nur zur Orientierung dienen.

³„Optitrack Docs: Latency Measurements“, NaturalPoint, 2023

Eine in Motive direkt integrierte Funktion namens *Latency Compensation* wurde ebenfalls evaluiert. Sie dient dazu, durch Vorwärtsinterpolation der erfassten Bewegungen eine bekannte Gesamtsystemlatenz zu kompensieren, hat jedoch (wie zu erwarten war) keinen Einfluss auf die gemessene initiale Reaktionszeit des Systems. Auch ein visuell wahrnehmbare Einfluss dieser Funktion war bis auf einige Überschwinger nach schnellen Bewegungen kaum vorhanden. In den Hilfe-Tooltips zur Funktion zeigt sich, dass *Latency Compensation* insbesondere im Zusammenspiel mit der Funktion *Motion Filtering* eingesetzt werden soll, um deren erhöhte Latenz zu kompensieren. Da das Optitrack-System jedoch bereits die Genauigkeitsanforderungen erfüllt, wird es ohne *Motion Filtering* betrieben. Daher bietet auch *Latency Compensation* hier keinen Mehrwert.

Zu Evaluieren ist außerdem, ob die Ausführung von Motive und Unity auf demselben Rechner eine erhöhte Latenz verursacht. Hierzu wurde das Ausgangssystem mit einem Setup verglichen, bei dem Motive auf einem separaten Laptop betrieben und die Bewegungsdaten per LAN an den Unity-Rechner übergeben wurden. Es konnte kein nennenswerter Unterschied festgestellt werden, weswegen aus Gründen der Einfachheit der Betrieb auf einem gemeinsamen Rechner bevorzugt wurde.

Dieses Ergebnis sollte jedoch nicht als allgemeingültig betrachtet werden. Motive unterstützt hochkomplexe Optitrack-Einrichtungen aus dutzenden Kameras zur Erkennung hunderter Marker, ein größerer Einfluss auf Performance und Latenz als bei der Erkennung eines einzelnen Rigidbody-Markers durch vier Kameras scheint hier sehr plausibel.

4.3.3 Projektor

Der TK700STi erzeugt sein 4K-Bild durch sogenanntes *warbling*. Bewegt man das nur Full-HD auflösende DLP-Panel für jedes dargestellte 4K-Bild an vier leicht unterschiedliche Positionen und projiziert jeweils ein passendes HD-Bild, ergeben sich aus 240 HD-Bildern pro Sekunde schließlich 60 4K-Bilder. Die Latenz im 4K-Modus muss somit mindestens die vierfache Latenz des HD-Modus betragen und der Latenzmesser bestätigt das. Stellt man das Grundsystem auf 4K um, steigt die Gesamtsystemlatenz um 17.4ms auf insgesamt 44.7ms. Der HD-Modus ist somit zwingend erforderlich.

Ein Latenzgewinn ist jedoch durch den Verzicht auf die projektorinterne Trapezverzerrung zu erreichen. Deaktiviert man diese komplett, reduziert sich die Systemlatenz um 3.2ms. Da, wie in [Abschnitt 4.2](#) beschrieben, zwei identische Projektoren pixelgenau übereinandergelegt werden sollen, muss diese Entzerrung ohnehin direkt in Unity stattfinden, da die eingebaute Trapezverzerrung hierfür deutlich zu grob arbeitet. Der Verzicht auf internes Keystoning ist somit nicht problematisch.

Einen größeren Kompromiss stellt der sogenannte *Game Mode* des Projektors dar. Dieser reduziert die Latenz um weitere 3.4ms gegenüber dem Modus *Bright* mit bereits deaktivier-

tem Keystoning. Jedoch reduziert *Game* auch die Ausgabehelligkeit gegenüber *Bright* von gemessenen 2584 ANSI-Lumen auf gemessene 1625 ANSI-Lumen.⁴ Der Latenzgewinn ist somit signifikant, kann jedoch mit dem aktuellen System nur ausgenutzt werden, wenn auch mit reduzierter Helligkeit eine klare Darstellung gewährleistet ist. Im Folgenden wird, wenn nicht anders erwähnt, der *Game Mode* genutzt.

4.3.4 Grafiktreiber

Im Grafiktreiber der verwendeten Grafikkarte RTX 4080 erlaubt es Hersteller Nvidia diverse normalerweise von den einzelnen 3D-Applikationen festgesetzte Einstellungen global zu überschreiben. Neben naheliegenden Einstellungen wie dem Deaktivieren einer maximalen Bildrate und der vertikalen Synchronisation (beides bereits im Ausgangssystem geschehen), bietet der sogenannte *Low Latency Mode* einen Latenzgewinn von 2.1ms. Weitere hier mögliche Grafikeinstellungen haben durch eine erhöhte Bildrate nur indirekt Einfluss auf die Systemlatenz und werden direkt in der Unity-Applikation durchgeführt.

4.3.5 Unity

Da die Bewegungsdaten nicht gefiltert und lediglich mit 240Hz erfasst werden, reicht es aus, die Unity-Applikation soweit zu optimieren, dass sie jederzeit mit mindestens 240 Bildern pro Sekunde ausgeführt wird. Bei einer höheren Tracking-Frequenz von zb. 480Hz wäre trotz der ebenfalls auf 240Hz begrenzten Bildwiederholrate des Projektors eine schneller Ausführung der Unity-Applikation von Vorteil gewesen, um im aktuell dargestellten Frame bereits „neuere“ Sensordaten anzeigen zu können.

Eine Latenzverbesserung ließ sich jedoch durch den Parameter *maxQueuedFrames* der Unity Grafikpipeline erreichen. Um die Auslastung der Pipeline bei stark unterschiedlicher CPU und GPU-Belastung zu verbessern, erlaubt es dieser Wert normalerweise, die Berechnungsarbeit des Prozessors für bis zu 2 Frames spekulativ auszuführen und diese dann in einer Warteschlange (Queue) der GPU zuzuspielen. Die Verkürzung dieser Warteschlange auf den minimal erlaubten Wert von einem Frame reduzierte zwar die Bildrate der Applikation von 390 auf 320, gleichzeitig jedoch die Latenz um 1.5ms.

In einem allgemeinen Test zeigte sich, dass die Latenz bei einem zusätzlichen Neustart des Systems im Median zwar minimal geringer ausfällt, jedoch deutlich stärker schwankt. Da viele der getesteten Einstellungen einen Neustart bedingen und die gemessenen Werte reproduzierbar sein sollen, wurden sie zwangsweise mit jeweils neu gestartetem System erprobt. Je mehr Optimierungen durchgeführt wurden, desto stärker sank nicht nur die

⁴„BenQ TK700STi 4K DLP Gaming Projector Review: Measurements“, Henninger, Mark, 2021

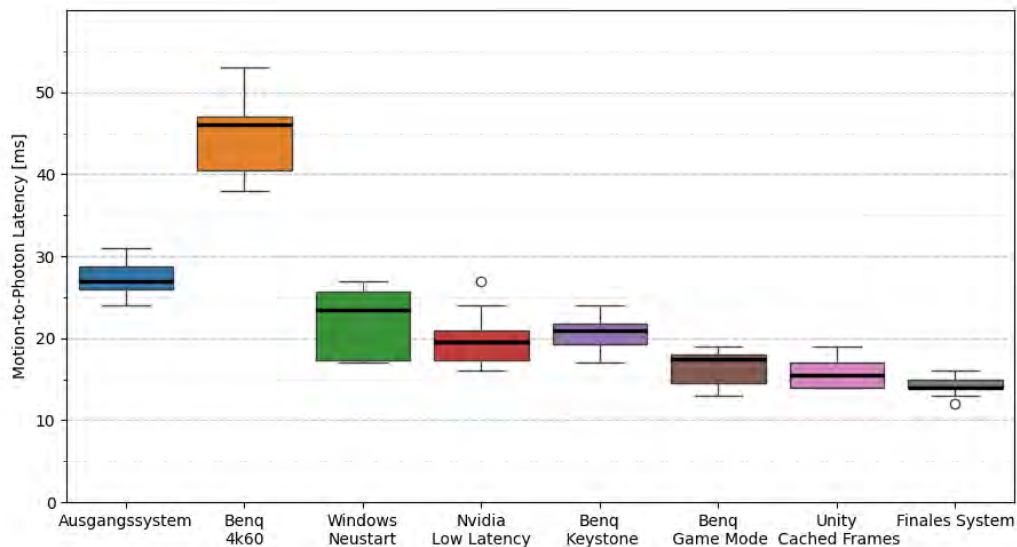


Abbildung 4.5: Kumulative Verbesserung der MtP-Latenz von 27.3ms bis auf 14.3ms

Latenz sondern auch die Spannweite der aufgetretenen Einzelwerte.

Von allen erprobten Maßnahmen wurde das finale System schließlich durch Einsatz des *Game Mode* des Projektors, Verzicht auf jegliche Filterung und mit NVidia *Low Latency Mode* sowie einem minimalen Unity FrameQueue optimiert. So erzielt das System eine Motion-to-Photon Latenz von 14,3ms und erfüllt somit die gestellten Anforderungen deutlich. Müssen die Projektoren in sehr heller Umgebung und dadurch im *Bright*-Modus eingesetzt werden, wird eine immernoch akzeptable Latenz von 18.8ms erzielt.

4.4 Software

Zur Erstellung der Applikation wurde die sehr verbreitete GameEngine Unity3D verwendet. Somit sind alle folgenden Code-Ausschnitte in der Programmiersprache C# verfasst. Die grundlegende Funktionsweise einer GameEngine wird in dieser Arbeit als bekannt vorausgesetzt, insbesondere da sie für das Verständnis nicht unbedingt erforderlich ist. Nach einem kurzen Überblick über den Gesamtaufbau soll im Folgenden somit nicht die gesamte Architektur der entwickelten Applikation beschrieben werden, sondern der Fokus auf Detaillösungen liegen, die bei der Entwicklung einer beliebigen anderen Unity-Anwendung nicht ebenfalls notwendig wären.

4.4.1 Überblick

Ein von der HPA zur Verfügung gestelltes Schiffsmodell des „Deepenschriewer 3“ ist das Kernstück der Applikation. Zwingend nötig ist zwar nur ein kleiner Teil davon, jedoch ermöglicht das 3D-Modell eine einfacheren Ausrichtung der relevanten Elemente bei nur geringem Performance-Overhead. Dieses Schiffsmodell wird anhand der vom Schiffsgyroskop empfangenen Daten in Echtzeit gegenüber dem Weltkoordinatensystem gedreht und geneigt. Relativ zu diesen Schiffsbewegungen wird nun die vom Tracking-System erfasste Kopfposition als Position einer virtuellen Kamera verwendet, welche so exakt der Betrachtungsperspektive des Schiffsführers durch das Frontfenster entspricht. An diesem Fenster sind die bildschirmrelativen 2D UI-Elemente angeordnet, während weltrelative Elemente im statischen Koordinatensystem der Engine (also außerhalb des Schiffs) platziert werden. Wie in

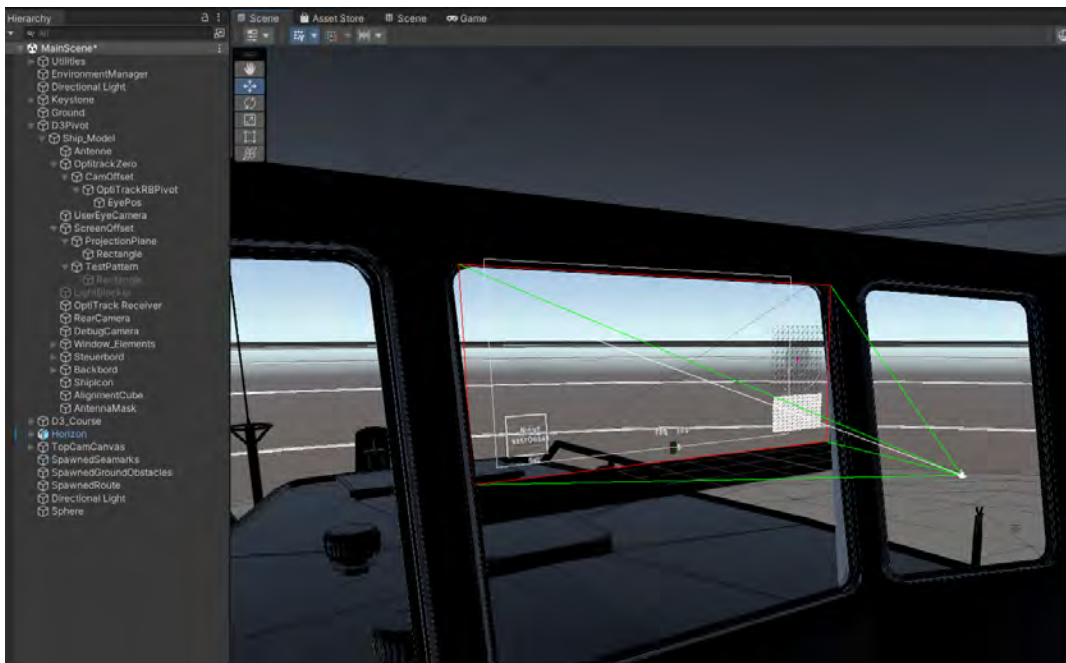


Abbildung 4.6: Screenshot des Projektes im Unity-Editor (Ausschnitt). Material des Schiffsmodells für bessere Sichtbarkeit aufgehellt. in Grün hervorgehoben die virtuelle Kamera an der Betrachtungsposition, in Rot die projizierbare Fläche des Smart Window

3.1.3 hergeleitet, werden zur Darstellung der Inhalte zwei sich deckende Projektoren benutzt. Ergebnisse aus 4.3 zeigen, dass die interne Geometriekorrektur der verwendeten Projektoren zusätzliche Latenz bedeutet, daher kann diese nicht verwendet werden. Die Applikation öffnet somit insgesamt drei Vollbild-Fenster. Jeweils eines für die beiden Projektoren und ein weiteres für einen Kontrollmonitor. Letzterer zeigt eine Debug-Ansicht des dargestellten UI und ist lediglich für Entwicklungszwecke und zur Überwachung der Nutzerstudie nötig. Für

die Berechnung wird eine moderne Workstation (Intel Core i9-13900k) mit starker Grafikkarte (NVidia GeForce RTX 4080) verwendet. Die Applikation erreicht so ca. 330 Bilder pro Sekunde und damit deutlich mehr als die mindestens geforderten 240.

4.4.2 Seekarte und Koordinatensystem

Als Quelle für Seezeichen und Grundhindernisse sowie deren Positionen wurden von der Abteilung Hydrografie der HPA mehrere Dateien aus der entsprechenden internen Datenbank exportiert. Sie folgen dem „Europäisches Terrestrisches Referenzsystem 1989“ (ETRS1989) und sind im GeoJSON-Format hinterlegt. Bei Start der Applikation werden sie einmalig in den Arbeitsspeicher eingelesen.

```
1      "features": [  
2      {  
3          "attributes": {  
4              "FID": 0,  
5              "OBJ_NR": "2040P1002_100521_B",  
6              "DEPTH_KN": 7.7,  
7              "GH_NR": 521  
8          },  
9          "geometry": {  
10             "x": 9.95685735669727,  
11             "y": 53.489614940881104  
12         }  
13     },
```

Codeblock 4.1: Ausschnitt aus der nach ETRS1989 formatierten GeoJSON-Datei. Beschrieben wird ein Grundhinderniss mit 7.7 Knoten Tiefe im Hamburger Hafen

Für den Produktiveinsatz außerhalb des begrenzten Hamburger Hafengebiets ist perspektivisch sicher die Integration in das elektronische Seekartensystem ECDIS (Electronic Chart Display and Information System) sinnvoll. Es ist der Standard im Bereich der elektronischen Seekarten, wird ständig aktualisiert und auch von anderen Brückensystemen (wie RADAR, Navigationscomputer, Autopilot etc.) verwendet. Da beim in Kapitel 1.3 definierten Einsatzszenario aber insbesondere die Peillinie und aktuelle Wassertiefe entscheidend ist, wurde aus Zeitgründen im Rahmen dieser Arbeit auf eine ECDIS- wie auch auf eine AIS-Integration zur Ortung von Schiffen verzichtet.

Wenn Inhalte fest zur realen Welt positioniert werden sollen, muss ein statisches Koordinatensystem etabliert werden. Am naheliegensten wäre es wohl, auch in der Applikation die „Echtwelt“ als statisches Koordinatensystem zu definieren. Die Koordinaten statischer Inhalte würden dann in kartesische Koordinaten gewandelt, an einer festen Unity-Position platziert

und das Schiff mitsamt Betrachterkamera analog zur echten Welt durch das Koordinatensystem bewegt. Dieser Ansatz birgt jedoch einige gravierende Nachteile, insbesondere bei der Genauigkeit. Ist ein beliebiges Objekt in Unity mehr als 10000 Einheiten vom Koordinatenur-

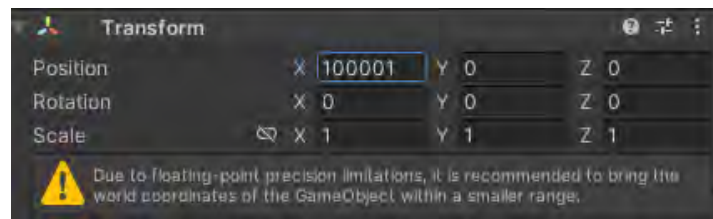


Abbildung 4.7: Warnung des Unity-Editors bei mehr als 10.000 Einheiten entfernten Game-Objects

sprung entfernt, erscheint eine Warnung und die Aufforderung, die Welt auf einen anderen Wertebereich zu skalieren. Da jedoch beim User-Tracking eine Genauigkeit im Submillimeterbereich erreicht werden kann, ist die Erhöhung der Skalierung einer Unity-Einheit von einem Zentimeter auf einen Meter keine Lösung des Problems, sondern würde es nur auf Ungenauigkeiten bei der Positionierung der Betrachterkamera verschieben.

Stattdessen wird der Koordinatenursprung des Unity-Editors als dynamischer Weltnullpunkt verwendet. An diesem Koordinatenursprung befinden sich Schiff und Betrachter, sie werden analog zu den realen Schiffsbewegungen lediglich rotiert und niemals bewegt. Statische Objekte (wie Tonnen, Brücken, Untiefen oder Routenelemente) werden von insgesamt drei Komponenten verwaltet. *FixedCoordinateObject*, *ShipPosition* und *EnvironmentManager*. Abhängig von der in *ShipPosition* hinterlegten aktuellen GPS-Position des Schiffs durchsucht der *EnvironmentManager* die statischen Datenbanken von Untiefen, Seezeichen und Anlegern nach Elementen, die innerhalb eines definierten Sichtradius um die aktuelle Schiffsposition verzeichnet sind. Für neue Elemente im Sichtradius werden die entsprechenden Unity-Gameobjects erzeugt, für den Sichtradius verlassende Elemente das entsprechende Objekt zerstört. Da dieser Prozess nicht sonderlich effizient ist, wird er asynchron alle 5 Sekunden durchgeführt.

Ein neu instanziiertes Objekt wird mit der Komponente *FixedCoordinateObject* ausgestattet, sie beinhaltet einige aus der Seekarte entnommene Informationen über das Objekt sowie seine Echtweltkoordinaten, und im *EnvironmentManager* registriert. Alle so registrierten Elemente werden vom *EnvironmentManager* dann laufend an ihre korrekte Position relativ zum Schiff bewegt.

```
1 void ManageSeamarksInView(Node[] elements){
2   for (int i = 0; i < elements.Length; i++)
3   {
4       // Calculate the Distance between the Ships Coordinates and the Elements
         Coordinates
```

```

5     float latOffset = latDist(ship.latitude, ship.longitude, elements[i].lat,
6         elements[i].lat);
7
8     // Check if the Object is not too far or too close (too close objects would block
9         the view)
10    if (distance2D(latOffset, lonOffset) < viewLimit && distance2D(latOffset,
11        lonOffset) > viewMin)
12    {
13        if (!staticallyLoadedObjects.ContainsKey(i))
14        {
15            staticallyLoadedObjects[i] = SpawnSeamarkMarker(elements[i]);
16
17            // Most Seamarks have height 0 but Lights and Bridges dont have to
18            float height = float.Parse(elements[i].tags.height);
19
20            // Multiply every value by 100 to convert from m to cm
21            staticallyLoadedObjects[i].transform.localPosition = new
22                Vector3(lonOffset * 10, height * 10 + markerHeightOffset,
23                    latOffset * 10);
24        }
25    }
26    else
27    {
28        // Despawn objects that are not in the view radius but still registered
29        if (staticallyLoadedObjects.ContainsKey(i))
30        {
31            GameObject.Destroy(staticallyLoadedObjects[i].gameObject);
32            staticallyLoadedObjects.Remove(i);
33        }
34    }
35 }
36 }
37 }

```

Codeblock 4.2: Funktion im „EnvironmentManager“, um für alle sichtbaren Seezeichen aus ihren Echtweltkoordinaten die Unity-Position zu errechnen und sie dorthin zu bewegen

4.4.3 Off-Axis-Projection

Bei einer herkömmlichen 3D-Rendering-Pipeline hängt die dargestellte Perspektive ausschließlich von der Position und den Parametern der virtuellen Kamera ab. Die Perspektive aus welcher der Betrachter das finale Bild auf dem Monitor sieht, spielt keine Rolle. Sie wird hilfsweise als genau frontal vor dem Bildschirm, also *on-axis*, angenommen. *Off-Axis-Projection* beschreibt eine Technik, diesen Kompromiss durch die für eine spezifizierte

Betrachtungsposition perfekt passende Perspektive zu ersetzen. So wird, statt einer für alle Betrachtungspositionen akzeptablen Darstellung, ein für eine einzelne Betrachtungsposition perfekt passendes Bild erzeugt. Umgangssprachlich wird dieser Effekt oft auch „Portal-Effekt“ genannt.⁵

Um die verwendete Implementierung der Off-Axis-Projektion nachvollziehen zu können, werden im Folgenden die theoretischen Hintergründe so kurz wie möglich erläutert. Dies ist nicht als vollständige Erklärung zu verstehen, die gesamte 3D Rendering-Pipeline ist sehr komplex und hat mit dieser Arbeit nur am Rande zu tun. Die Off-Axis-Projektion ist eine etablierte Technik und wird in dieser Arbeit lediglich als leicht modifizierte Komponente verwendet. Die Implementierung lehnt sich daher stark an „Off-axis projection in Unity“ von de Brisis, 2019 an, welcher eine gut dokumentierte Referenzimplementierung in der Unity-Engine zur Verfügung stellt und sich wiederum an „Generalized Perspective Projection“ von Kooima, 2009 orientiert, welcher diese Technik sehr ausführlich beschreibt.

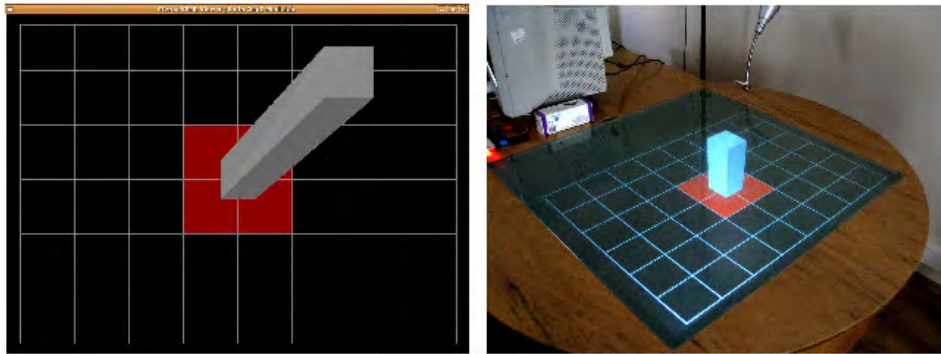


Abbildung 4.8: Beispiel einer Off-Axis Projektion von Başar Uğur et al., 2009, betrachtet einmal aus der herkömmlichen und einmal aus der beabsichtigten Renderperspektive.

Um eine dreidimensionale Szene darstellen zu können, wird (neben der eigentlichen Szene), eine virtuelle Kamera benötigt. Von dieser Kamera ausgehend wird das Frustum, ein symmetrischer Kegelstumpf welcher das Sichtfeld der Kamera umfasst, berechnet. Durch eine sogenannte „View-to-Projection“-Matrix werden alle in diesem Frustum liegenden Vertexpositionen in den „Projection Space“⁶ transformiert und so beispielsweise eine orthographische oder perspektivische Darstellung erreicht.

Da im Normalfall keine Informationen über die Betrachterposition relativ zum Bildschirm vorliegen, wird die virtuelle Kamera genau vor dem Mittelpunkt des virtuellen Bildschirms, dem „Screen-Space Origin“, positioniert. Selbst wenn der Betrachter üblicherweise nicht exakt

⁵„Coding Adventure: Portals“, Lague, Sebastian

⁶Der „Projection Space“ beschreibt ein dreidimensionales Volumen mit Seitenlängen von -1 bis +1. Aus ihm lässt sich durch eliminieren der Z-Koordinate trivial das finale zweidimensionale Bild herleiten.

vor dem Bildschirm sitzt, bietet diese Annahme den besten Kompromiss für eine akzeptable Perspektive auch bei versetzten Betrachtungswinkeln.⁷

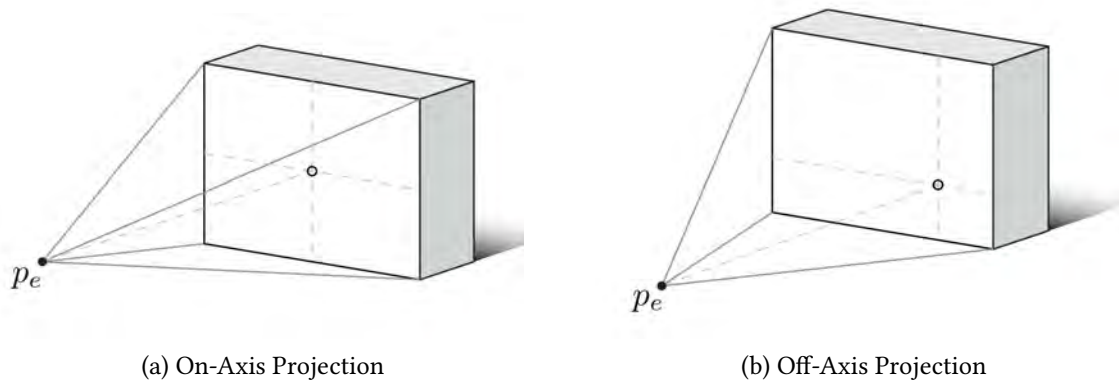


Abbildung 4.9: Visualisierung von On und Off-Axis Projektion von Kooima, 2009

Soll jedoch dieses zweidimensionale Bild auf ein Fenster projiziert werden und mit der Perspektive der dahinterliegenden Welt übereinstimmen, so kann diese Vereinfachung nicht mehr funktionieren und es muss eine individuelle Projektionsmatrix für die Darstellung verwendet werden, bei der der Koordinatenursprung des Bildschirms nicht mehr mittig, sondern weiterhin „vor“ der nun variablen Betrachtungsposition liegt. Das resultierende Frustum ist somit asymmetrisch. Für den Einsatz in der „View to Projection“-Matrix⁸ muss das neue Frustum mit insgesamt 6 Werten definiert werden. $[l, r, t, b]$ beschreiben die Distanz des neuen „Screen-Space Origin“ jeweils zur oberen, unteren, linken und rechten Bildschirmkante. n beschreibt die sogenannte „Near Clipping Plane“, also die kürzestmögliche sichtbare Distanz und f dementsprechend die „Far Clipping Plane“. In Abbildung 4.10 ist die verwendete Matrix zu sehen, sie wird von Kooima, 2009 ausführlich hergeleitet und soll hier daher als gegeben angenommen werden.

Für die Berechnung dieser sechs Werte sind zuerst einige Hilfsberechnungen erforderlich, um die Eckpunkte des Bildschirms und die drei Achsen des bildschirmrelativen Koordinatensystems zu bestimmen.

```

1 //Koordinaten der vier Eckpunkte des Bildschirms, gegen den Uhrzeigersinn,
  beginnend unten Links
2 pa = transform.TransformPoint(new Vector3(-Size.x, -Size.y) * 0.5f);
3 pb = transform.TransformPoint(new Vector3(Size.x, -Size.y) * 0.5f);
4 pc = transform.TransformPoint(new Vector3(-Size.x, Size.y) * 0.5f);
5 pd = transform.TransformPoint(new Vector3(Size.x, Size.y) * 0.5f);
6

```

⁷„World, View and Projection Transformation Matrices“ Alamia, o.J.

⁸Verwendet wird hier implizit die „View to Projection“ Matrix für perspektivische Darstellung

$$\begin{bmatrix} \frac{2n}{r-l} & 0 & \frac{r+l}{r-l} & 0 \\ 0 & \frac{2n}{t-b} & \frac{t+b}{t-b} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{f+n}{f-n} & -\frac{2fn}{f-n} \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

Abbildung 4.10: Allgemeine „View to Projection“-Matrix für perspektivische Darstellung

```

7 // Vektoren der orthonormalen Basis des Bildschirmkoordinatensystems
8 // Vektor nach rechts
9 vr = (BottomRight - BottomLeft).normalized;
10 // Vektor nach oben
11 vu = (TopLeft - BottomLeft).normalized;
12 // Normalenvektor des Bildschirms
13 vn = -Vector3.Cross(DirRight, DirUp).normalized;

```

Codeblock 4.3: Berechnung der am Bildschirm anliegenden Hilfsvektoren von de Brisis, 2019, eigene Kommentare

Aus diesen Hilfswerten lassen sich dann alle das neue Frustum beschreibende Parameter berechnen und durch die Verwendung diverser Unity-eigener Hilfsfunktionen als neue Projektionsmatrix der virtuellen Kamera definieren.

```

1 // Position der Kamera-Komponente. Diese wird in der finalen Anwendung vom
  // Headtracking-System gesteuert
2 eyePos = transform.position;
3
4 //Vektoren von der Kameraposition zu den Bildschirmecken. Sie bilden die Grenzen des
  // Frustums
5 va = pa - eyePos;
6 vb = pb - eyePos;
7 vc = pc - eyePos;
8 vd = pd - eyePos;
9
10 // Berechnung der Blickrichtung, Vektor nicht normalisiert
11 viewDir = eyePos + va + vb + vc + vd;
12
13 //Die Entfernung von Auge zu Bildschirm ergibt sich durch das Skalarprodukt
14 float d = -Vector3.Dot(va, vn);
15
16 n = cam.nearClipPlane;
17 f = cam.farClipPlane;
18
19 //Alle Distanzen müssen auf die Near Clipping Plane normalisiert werden

```

```

20 float nearOverDist = n / d;
21 l = Vector3.Dot(vr, va) * nearOverDist;
22 r = Vector3.Dot(vr, vb) * nearOverDist;
23 b = Vector3.Dot(vu, va) * nearOverDist;
24 t = Vector3.Dot(vu, vc) * nearOverDist;
25
26 Matrix4x4 P = Matrix4x4.Frustum(l, r, b, t, n, f);
27
28 //Translation to eye position
29 Matrix4x4 T = Matrix4x4.Translate(-eyePos);
30
31 Matrix4x4 R = Matrix4x4.Rotate(Quaternion.Inverse(transform.rotation) *
    ProjectionScreen.transform.rotation);
32
33 cam.worldToCameraMatrix = M * R * T;
34
35 cam.projectionMatrix = P;

```

Codeblock 4.4: Berechnung der neuen Kameraprojektionsmatrix von de Brisis, 2019 nach Kooima, 2009, eigene Kommentare

4.4.4 Projektor-Überlagerung

Das von beiden Projektoren dargestellte Bild muss jeweils individuell entzerrt dargestellt werden, um eine genau überlagernde Darstellung der Bilder beider Projektoren zu erreichen. Da die Entzerrung aus Latenzgründen nicht in den Projektoren stattfinden kann, muss beiden Projektoren ein bereits in Software individuell passend entzerrtes Bild zugeliefert werden. Die Nutzung eines HDMI Splitters o.Ä., um das dargestellte Bild nicht „doppelt“ berechnen zu müssen, ist somit nicht möglich. Da die Entzerrung per Software eine Reihe an Vorteilen bietet (höhere Präzision, Speichermöglichkeit verschiedener Situationen und Anordnungen, Möglichkeit zur automatischen Kalibrierung), ist dies nicht unbedingt als Nachteil zu betrachten.

Das in 3.1.3 mit korrekt gerechneter Betrachterperspektive gerenderte Bild wird in eine Render-Texture mit der Auflösung 1920 * 1080px geschrieben und isoliert von der restlichen Umgebung auf zwei identischen Quad-Meshes dargestellt. Beide Meshes entsprechen genau den Dimensionen des realen Fensters mit dem bereits erwähnten Umrechnungsfaktor von 1 Unity-Einheit = 1cm. In wiederum „realer“ Entfernung zur Position der Quad-Meshes sind zwei Kameras an den Positionen beider Projektoren positioniert. Diese Positionen lassen sich durch temporäres Anbringen reflektiver Marker und anschließender Erfassung durch das bereits installierte Tracking-System leicht mit hoher Genauigkeit bestimmen. Durch

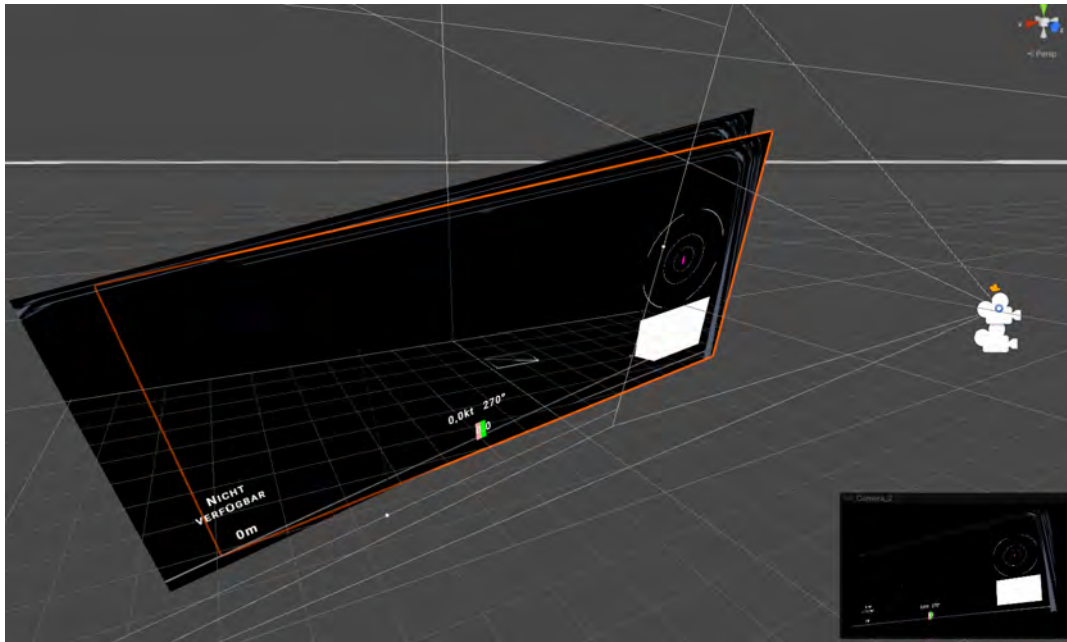


Abbildung 4.11: Screenshot des Setups zur Entzerrung beider Projektorbilder. Mittig rechts sichtbar beide Kameras für beide Projektoren, markiert Kamera 1 mit Sichtkegel und die entsprechend verzerrte Darstellungsfläche. In der rechten Ecke das final an Projektor 1 ausgegebene Bild

entsprechende Layermasken ist sichergestellt, dass jeweils eine Kamera ausschließlich das ihr zugehörige Quad-Mesh darstellt. Mit einem entsprechenden Script können nun die vier Eckpunkte der Meshes per Tastendruck schrittweise in allen Dimensionen bewegt werden. Um eine entsprechend „verzerrte“ Darstellung zu erhalten, wird bei jedem Tastendruck das Mesh und die dazugehörigen Texturkoordinaten neu berechnet. Wird nun als Bildinhalt ein beliebiges Kalibrieremuster angezeigt (das in diesem Projekt verwendete Schachbrettmuster ist auf Abbildung 4.5 zu sehen), lassen sich die Bilder beider Projektoren schnell und intuitiv fein übereinanderlegen. Die Konfiguration lässt sich per Tastendruck speichern und wird bei Neustart der Applikation selbstständig wieder geladen.

4.4.5 Schnittstellen

Der „Deepenschriewer 3“ ist ein modernes Vermessungsschiff mit digitaler Brückentechnik, somit ist ein Großteil der benötigten Daten direkt über das Schiffsnetzwerk verfügbar. Sofern nicht anders angegeben, werden die Daten über UDP-Sockets in industrieüblichen Standards empfangen, anschließend dekodiert und verwendet.

Position, Orientierung, Kurs und Sonar

Der Großteil der benötigten Daten liegt im ursprünglich seriellen Format NMEA 0183 vor. In digitalisierter Form ist es auch über UDP-Sockets verfügbar und besteht aus bis zu 80 Zeichen langen ASCII-Charaktersequenzen mit einem den Inhalt kennzeichnenden Präfix und einer abschließenden Checksumme. Die relevanteste dieser Nachrichten ist „\$HYDRO“, sie wird mit einer Frequenz von 100Hz vom hydrografischen System versendet und beinhaltet den Kompasskurs in Grad, die Roll und Neigewinkel ebenfalls in Grad, Längengrad und Breitengrad der Schiffposition und die Höhe über Grund.

```
1 $HYDRO,194.854,-0.063,0.118,53.5260907,10.0023947,39.014,0.002*51
```

Codeblock 4.5: Beispiel einer NMEA 0813 codierten Nachricht aus dem Hydrografiesystem

```
1 void ParseHydroPackets(byte[] receivedBytes)
2 {
3     string rx = Encoding.UTF8.GetString(receivedBytes);
4     string[] receivedValues = rx.Split(',');
5
6     // Assuming the numbers are of type float, change the data type if necessary
7     float[] numbers = new float[receivedValues.Length];
8
9     // Parse every number but ignore the "$Hydro" at the beginning and the checksum
10    // at the end
11    // 1 = course | 2 = roll | 3 = pitch | 4 = lat | 5 = lon
12    for (int i = 1; i < receivedValues.Length - 1; i++)
13    {
14        if (double.TryParse(receivedValues[i].Replace(".", ","), out double
15            number))
16        {
17            if (i == 1) rotation.y = (float)number;
18            if (i == 2) rotation.x = (float)number;
19            if (i == 3) rotation.z = (float)number;
20
21            if (i == 4) ship.latitude = number;
22            if (i == 5) ship.longitude = number;
23        }else
24        {
25            Debug.LogWarning("Failed to parse number: " + receivedValues[i]);
26        }
27    }
28 }
```

Codeblock 4.6: Funktion zur Verarbeitung der in 4.5 gezeigten Nachricht

Da die Checksumme bei einer im lokalen Netzwerk übertragenen Nachricht wenig Sinn ergibt (sie ist ein Überbleibsel der seriellen Übertragung) und die Daten außerdem hoch zeitkritisch sind, wurde auf eine Implementierung der Checksummenprüfung verzichtet und eventuell fehlerhafte Nachrichten einfach verworfen. Sowohl die Daten zur aktuellen Route als auch der gemessenen Wassertiefe werden ebenfalls im NMEA 0813 Format übertragen. Eine übertragene Route beginnt mit einer ersten Nachricht, welche Details über die Route enthält, gefolgt von einer Reihe seperater Nachrichten für die Wegpunkte der geplanten Route.

```
1 $GPRTE,1,1,c,smart,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13*53
2 $GPWPL,5331.558495,N,01000.140588,E,1*7Fzum
3 $GPWPL,5331.541725,N,01000.134946,E,2*71
4 [ ... ]
```

Codeblock 4.7: Die ersten drei Nachrichten einer NMEA 0813 codierten Messroute mit dem Namen „smart“ und insgesamt 13 Wegpunkten. Die zweite Nachricht beschreibt den ersten Wegpunkt.

Bei Empfang einer neuen Route wird eine eventuell bereits vorhandene alte Route gelöscht und an jedem Wegpunkt eine weiße, 1m durchmessende Kugel instanziiert. Da diese Kugeln an einer statischen Echtweltposition verbleiben sollen, werden sie mit der Komponente *FixedCoordinateObject* (erklärt in 4.4.2) ausgestattet und diese mit den eben empfangenen Koordinaten des Wegpunktes initialisiert. Mit einem Line-Renderer werden die Kugeln anschließend verbunden und bilden so die finale Peillinie.

Rückwärtige Kamera

2020 wurden im Rahmen der COVID19-Pandemie die Peilschiffe der HPA mit Netzwerkkameras ausgerüstet, um dem Hydrografen die Arbeit aus dem HomeOffice zu ermöglichen. Diese Kameras streamen ihr Videobild per RTSP direkt ins Bordnetz und können so leicht verwendet werden, ohne den normalen Schiffsbetrieb zu stören. Die Integration einer rückwärtigen Kamera war ursprünglich nicht geplant, da jedoch Probanden im Forschungsvorhaben von Hertel et al. explizit die mangelnde rückwärtige Übersicht kritisierten, wurde die Kamera als verfügbarer Vergleichspunkt in der späteren Auswertungsstudie integriert.

Da es nach kurzer Recherche keine robuste und kostenlose Lösung für den direkten Empfang von RTSP-Streams in Unity zu geben schien, wurde stattdessen das sehr ausgereifte NDI-Plugin des Herstellers NewTek verwendet. NDI ist ein Standard zur Übertragung hochwertiger Videostreams in lokalen Netzwerken. Zur Einbindung der rückwärtigen Kamera empfängt so eine eigenständige Instanz des VLC Media Player den RTSP-Stream und stellt ihn per NDI der Unity-Applikation zur Verfügung. Diese Lösung erfordert kaum zusätzlichen Aufwand und

bietet zusammen mit der ausführlichen NDI-Softwaresuite viel Flexibilität zum dynamischen Anzeigen anderer Inhalte.

4.5 Benutzeroberfläche und Design

Im Probandenversuch von Hertel et al. wurde zur Navigation lediglich die stereoskopisch und kollimiert dargestellte Peillinie sowie für einen Messdurchgang zusätzlich die aktuelle Distanz von der Peillinie angezeigt. Weitere Informationen wurden nicht zur Verfügung gestellt und auch der Kontrollmonitor war für diese Versuche deaktiviert.

Während der Entwicklung von Ausbaustufe 1 war dieses UI-Konzept auch für das Smart Window angedacht. Das zwischenzeitlich eingeholte Nutzerfeedback zeigte jedoch deutlich auf, dass die Darstellung perspektivischer Inhalte zwar möglich, jedoch keine Stärke des aktuellen Systems ist.

Es können durch die monoskopische, nicht kollimierte Darstellung, keine „echt“ dreidimensionalen Inhalte gezeigt werden und für jeden scharfen Blick auf das Smart Window ist eine Umfokussierung des Auges notwendig. Dies ist zwar nicht ideal, jedoch nicht unbedingt ein gravierender Nachteil. Je größer der Abstand von Betrachter zu Smart Window, desto geringer fällt die nötige Umfokussierung aus und nahezu jeder Mensch sieht täglich dreidimensionale Inhalte auf monoskopischen Displays und ist daher daran gewöhnt, Tiefeninformationen über Faktoren wie relative Größenunterschiede oder insbesondere Schattierung zu gewinnen. Die geringe Größe des Testschiffs „Deepenschriewer 3“ und der damit auch vergleichsweise kleine Betrachtungsabstand sowie die dem Prototypenstatus geschuldete tendenziell zu dunkle Projektion stellen hier jedoch quasi ein „Worst-Case“-Szenario dar. Es ist kaum „Helligkeitsreserve“ für Schattierungen vorhanden und die nötige Fokusedaption ist groß. Die reine Darstellung einer perspektivkorrekten Peillinie wäre somit zwar technisch möglich, jedoch keine gute Repräsentation des Smart Window.

Insbesondere die Darstellung von ursprünglich lediglich zu Dekorationszwecken dargestellten „normalen“ Brückeninstrumenten direkt auf der Scheibe wurde bei der Vorstellung der ersten Ausbaustufe sehr oft positiv hervorgehoben. Zusammen mit der hohen Zugänglichkeit des Smart Windows, insbesondere im Vergleich zu einer AR-Brille, boten sie für erfahrene Schiffsführer einen sofortigen Mehrwert ohne Eingewöhnungszeit.

Wenn das Smart Window eine plausible Alternative zur bisherigen Lösung mittels Kontrollmonitor darstellen soll, ergibt es auch generell Sinn, die relevantesten auf dem Kontrollmonitor dargestellten Informationen auch auf dem Smart Window anzuzeigen. Daher sollen für die finale Benutzeroberfläche weltrelative Inhalte wie Peillinie und Annotationen mit bildschirmrelativen Schiffsinstrumenten und Zusatzinformationen kombiniert werden.

Das Smart Window ist jedoch in erster Linie ein Fenster und erst mit zweiter Priorität ein



Abbildung 4.12: Navigationsmonitor des Deepenschwrier 3 während einer Peilfahrt. Zu sehen sind zentral die zu verfolgende Route in zwei verschiedenen Maßstäben, oben mittig aktuell 0.8m Abweichung von der Route nach Steuerbord (Grün), rechts der Speed over Ground (SOG)

unterstützendes Werkzeug, die ablenkungsfreie Durchsicht hat höchste Priorität. Durch Orientierung am Kontrollmonitor, laufende Hintergrundgespräche mit Schiffsführern und der von Hertel et al. durchgeführten Vorstudie wurden schließlich folgende Instrumente bildschirmrelativ umgesetzt:

- Eine simplifizierte Karte mit Peillinie und Seezeichen
- Ein Videobild der Rückkamera
- Die seitliche Abweichung von der aktuellen Peillinie, zusätzlich grafisch visualisiert
- Die aktuelle Geschwindigkeit und der aktuelle Kompasskurs
- Ein Diagramm der aktuellen Höhe über Grund im Zeitverlauf

Weltrelativ dargestellt wird in erster Linie die gerade aktive Peillinie. Darüber hinaus werden in der statischen Datenbank vorhandene Seezeichen (wie Lichter und Tonnen) sowie Poller und Anleger in einem Abstand von unter 400m mit einem Quadrat umrandet und ihrer aktuellen Entfernung zum Schiff beschriftet. Dies ist für den Einsatzzweck nicht zwingend

notwendig, soll aber die durch das monoskopische Fenster nur sehr begrenzt mögliche Tiefeneinschätzung verbessern.



Abbildung 4.13: Das für den Probandenversuch entwickelte UI im Einsatz. Zu sehen (im Uhrzeigersinn) Übersichtskarte mit Peillinie und Entfernungsringsen, Videobild der Rückkamera, Abweichung von der aktuellen Peillinie (0.4m nach Backbord), Kurs, Geschwindigkeit und Verlauf der Wassertiefe. Zu sehende weltrelative Inhalte die Peillinie mit Verdeckung durch das Vorschiff sowie (schwach) Entfernungsmarkierungen auf umgebender Unfrastruktur.

Zur weiteren Verbesserung der Tiefenwahrnehmung, insbesondere der Peillinie, wurde das von der HPA gestellte 3D-Modell des Vorschiffs zur Verdeckung genutzt. Durch Einsatz eines unbeleuchteten, schwarzen Shaders als Material erscheint das Vorschiff niemals sichtbar, verdeckt jedoch realistisch die Peillinie direkt vor dem Schiff. Dies ist in [Abbildung 4.13](#) auf der Peillinie zu sehen und führte nach informellen Gesprächen und Feedback nach dem Probandenversuch in der Tat zu stark verbesserter Tiefenwahrnehmung.

Zur eigentlichen Gestaltung der Peillinie haben Hertel et al., 2023 ausführliche Vorrecherche durchgeführt. Die Ergebnisse beruhen auf demselben Einsatzszenario auf dem identischen Schiff und können daher direkt übernommen werden: „To clearly highlight the survey line’s bend, 3D objects are added to represent the line’s vertex points [...] A line width of 1 m was chosen to be a trade-off between visibility and precision based on a pilot study. A white color was used for its high luminosity and its neutrality in nautical contexts, whereas, e.g., red and green usually refer to port (left) and starboard (right). while the vertex points were rendered with

specular highlights to facilitate the perception of their depth.“ Trotz der nur sehr begrenzt möglichen Schattierung wurde die Peillinie bei steigender Distanz außerdem subtil transparenter (dunkler) gefärbt. Einerseits kann dies zur Verbesserung der Tiefenwahrnehmung beitragen, führt aber andererseits zu einem harmonischeren optischen Eindruck und bei engen Kurven zu einem übersichtlicheren Gesamteindruck, da entferntere Bestandteile der Peillinie weniger präsent erscheinen.

4.6 Kalibrierung

Eine Kalibrierung des Systems ist aus zweierlei Gründen notwendig. Zum einen ist das für die wahrgenommene Perspektive entscheidende Auge, das sogenannte *dominante Auge*, von Mensch zu Mensch verschieden und muss daher per Kalibrierung bestimmt werden. Zum anderen ist durch die Verwendung eines Optitrack-Markers an der Kopfrückseite die genaue Augenposition sowohl von der individuellen Kopfform als auch von der genauen Position des Markers abhängig. Beide Informationen sollen möglichst schnell in einer intuitiven Kalibrieroutine erfasst werden. Der einfachste Weg hierfür ist die Eliminierung aller Freiheitsgrade bis auf die zu Kalibrierenden. Nutzt man ein direkt mit dem Schiff verbundenes Ziel für eine optische Kalibrierung, spielen sowohl Position als auch Orientierung des Schiffs keine Rolle mehr und die Betrachterposition ist die einzige verbleibende Variable. Da jedoch auch diese durch das Tracking-System mit hoher Genauigkeit bekannt ist, ist der einzig verbleibende Grund für einen nicht übereinstimmenden Bildeindruck der Positionsunterschied zwischen der erfassten Kopf- und der realen Augenposition.

Mittels Tastendruck kann eine grün gefärbte Box eingeblendet werden, deren Position und Größe exakt zu einer auf dem Vorschiff befindlichen Zugangsluke passt. Diese Luke ist aus quasi jeder Perspektive durch das Smart Window zu sehen und logischerweise statisch mit dem Schiff verbunden. Durch Verwendung einer dreidimensionalen Box ist neben vertikalem und horizontalem Versatz auch die passende Entfernung zum Fenster leicht zu finden, da diese die korrekte Fluchtung der Box bestimmt.

Im eigentlichen Kalibrierschritt ist nun mittels Cursortasten auf einer drahtlosen Tastatur die Perspektive durch die Testperson (oder der Versuchsleitung) so zu verschieben, dass die Kalibrierbox exakt deckend über der realen Zugangsluke erscheint und sich auch mit wechselnder Perspektive nicht mehr verändert. Diese Tastendrucke verschieben in Unity ein Child-Objekt „unter“ der erfassten Kopfposition. Dessen Position entspricht anschließend der realen Augenposition und wird als finale Position der Betrachtungskamera verwendet.

Um eventuelle Ungenauigkeiten dieser Methode, insbesondere durch die fehlende Tiefenwahrnehmung, auszugleichen, wird zusätzlich eine virtuelle Horizontlinie eingeblendet, welche mit dem realen Horizont in Übereinstimmung gebracht werden muss. Der gesamte Prozess



Abbildung 4.14: Blick durch das Smart Window im Kalibriermodus, zu sehen die grüne Box, dahinter die passend die Zugangsluke sowie mittig im Bild die Horizontlinie

ist leicht zu erklären, dauert nur wenige Sekunden und ist durch den Fokus auf die „korrekt aussehende“ Perspektive intuitiv zu verstehen. Da die Kalibrierung automatisch für die dominante Perspektive stattfindet, entfällt so außerdem die bei der ursprünglich angedachten Verwendung einer Markerbrille ohnehin nötig gewordene Kalibrierung zur Feststellung des dominanten Auges.

4.7 Zusammenfassung des finalen Prototypen

Der finale Prototyp nutzt ein Optitrack-Trackingsystem bestehend aus vier *Prime 13* und zwei *PrimeX 13* Kameras zum Erfassen der Kopfposition und zwei BenQ TK700STi Projektoren zur Darstellung der Inhalte. Er erreicht eine Gesamtsystemlatenz von 14.3ms, ist per LAN über die Protokolle NMEA 0813 sowie RTSP in alle relevanten Schiffssysteme des „Deepenschriewer 3“ eingebunden und benötigt (bei bereits bekanntem Nutzer) keinerlei aktive Kalibrierung nach dem initialen Setup.

Als Konzession an die Praktikabilität konnte die in Ausbaustufe 1 verwendete dimmbare Scheibe nicht in Ausbaustufe 2 verwendet werden. Stattdessen wurde ein System entwickelt, um mittels 3D-gedruckter Klemmelemente gedimmte Plexiglasscheiben an der Innenseite der Frontscheibe zu befestigen.⁹ Eine mit Projektionsfolie beklebte Scheibe kann so mit einer

⁹In [Abbildung 4.13](#) sind die festgeklemmte Dimmscheibe sowie die schwarzen Klemmbefestigungen gut zu erkennen.



(a) Optitrack-Array mit insgesamt 6 Kameras (unverkabelt)



(b) Doppelte
Projektorhalterung

Abbildung 4.15: Tracking- und Projektorsetup in Ausbaustufe 2

oder mehreren gedimmten Scheiben kombiniert werden, um eine zwar statische, aber für das aktuelle Umgebungslicht ungefähr passende Dimmung zu erreichen. Zusammen mit den insgesamt verfügbaren ca. 5000 ANSI-Lumen des verwendeten Projektor-Setups kann das System so das anvisierte Kontrastverhältnis von 3:1 auch bei sehr heller Umgebung erreichen.

Dargestellt wird sowohl eine Reihe von bildschirmrelativ angeordneten Schiffsinstrumenten zur Anzeige von Geschwindigkeit, Kurs und Tiefe als auch weltrelative Inhalte wie die aktuelle Peillinie und Entfernungsmarkierungen über Seezeichen und Hafeninfrastuktur.

5 Auswertung

Mit Konzeption, Entwicklung und Erfüllung aller gesetzten Zielspezifikationen ist das Hauptziel dieser Arbeit bereits erreicht. Das entwickelte Smart Window verbindet verschiedene in der etablierten Literatur bereits betrachtete Eigenschaften in einer noch nicht ausführlich betrachteten Kombination. Daher ist die Relevanz bereits existierender Forschung zu Einzelaspekten - wie Nutzerfreundlichkeit, Mehrwert, Übersichts- und Sicherheitsgewinne - nur schwer einzuschätzen. Eine Ausnahme bildet hier die bereits oft zitierte Studie „[Welcome AboARd! Evaluating Augmented Reality as a Skipper’s Navigator](#)“ von Hertel et al., welche ebenfalls auf dem „Deepenschriewer 3“ stattfand. Bei entsprechend geeignetem Versuchsdesign kann die Nutzung von dort bereits gewonnenen Daten zur Validierung von Messmethodik und Schlussfolgerungen dieser Studie beitragen.

Hauptberufliche Schiffsführer für eine wissenschaftliche Studie freizustellen ist seitens der HPA mit signifikantem Zeit- und Geldaufwand verbunden. Die somit zu erwartende geringe Anzahl an Testpersonen muss bei der Planung des Probandenversuchs und dessen späterer Interpretation berücksichtigt werden. Der Fokus soll somit zwar auf einer relevanten Einschätzung der Validität des Gesamtsystems liegen, es jedoch nicht in seinen Einzelheiten statistisch signifikant evaluieren. Stattdessen soll die allgemeine Sinnhaftigkeit eines Smart Window auf der Schiffsbrücke untersucht und sowohl allgemeines als auch spezifisches Feedback gesammelt werden, um klare Empfehlungen und Prioritäten für eine eventuelle Weiterentwicklung des Prototypen aussprechen zu können.

5.1 Forschungsfragen

Im ersten Schritt muss die technische Umsetzung untersucht werden, um festzustellen, ob gewonnene Daten und Feedback als repräsentativ für das generelle Konzept eines Smart Window angesehen werden können. Größere technische Unzulänglichkeiten würden die Validität der Ergebnisse auf den spezifisch evaluierten Prototypen beschränken. Somit lautet die erste zu beantwortende Forschungsfrage:

RQ1: Ist der entwickelte Prototyp eine ausgereifte und somit repräsentative Darstellung eines Smart Window?

Sowohl in der Literaturrecherche als auch dem definierten Einsatzszenario werden diverse mögliche Vorteile eines Augmented Reality Systems auf der Schiffbrücke genannt, im Fokus stehen jedoch insbesondere die gesteigerte Übersicht, ein erhöhtes Umgebungsbewusstsein („Ambient Awareness“) sowie ein verbessertes Sicherheitsgefühl. All diese Vorteile sind sehr relevant für das betrachtete Einsatzszenario und Teil der Motivation für die Entwicklung dieses Smart Window, sie sind jedoch nur mit hohem Aufwand und hoher Probandenanzahl statistisch signifikant nachzuweisen (siehe 2.3.2). Daher soll stattdessen versucht werden, eine allgemeinere Frage zu beantworten:

RQ2: Bietet das Smart Window einen Mehrwert gegenüber der etablierten Navigationslösung mit Kontrollmonitor?

Durch Kombination aller angenommenen Vorteile in eine einzelne Operationalisierung kann von einer höheren Effektgröße und damit einfacherer Nachweisbarkeit des Konzepts „Mehrwert“ auch bei geringer Probandenanzahl ausgegangen werden.

RQ3: Falls vorhanden, wie sieht der Mehrwert des Smart Windows gegenüber der etablierten Navigationslösung aus?

Unterstellt man einen vorhandenen Mehrwert, soll trotz vermutlich schwieriger Evaluierung die Frage gestellt werden, wie dieser aussieht und aus welchen Aspekten er sich zusammensetzt. Ziel ist hier die Bewertung verschiedener Aspekte des Designs und Konzepts. Schlussendlich soll erfragt werden, wie sich das Smart Window in den Augen der Probanden weiter verbessern lässt.

RQ4: Wie ließe sich das entwickelte Smart Window weiter verbessern?

Da je nach Ergebnis der vorherigen Forschungsfragen eine hohe Bandbreite an möglichen Antworten denkbar ist, ist diese Frage bewusst offen formuliert, um sowohl technische als auch inhaltliche oder operationelle Verbesserungen abzudecken.

5.2 Operationalisierung

Die in den aufgestellten Forschungsfragen genutzten Kernbegriffe sind nicht direkt messbar und sollen daher im Folgenden operationalisiert werden, um anschließend ein passendes Studiendesign entwerfen zu können.

Entwicklungsreife Die Entwicklungsreife soll in einen objektiven und einen subjektiven Teil aufgeteilt werden. Objektiv sollen am Tag der Studie die aufgestellten Anforderungen an Kontrast, Latenz und Stabilität nochmals messtechnisch überprüft und validiert werden.

Subjektiv ist insbesondere der Eindruck der Testpersonen entscheidend. Da ein Smart Window jedoch den meisten Probanden unbekannt sein dürfte, werden spezifische Likert-Items formuliert, welche jeweils auf die Bewertung eines separaten Entwicklungsbereiches zielen. Ihre Zustimmung zu diesen Aussagen sollen die Testpersonen auf einer fünfstufigen Skala mit vorformulierten Zustimmungsniveaus einschätzen:

1. Die Inhalte des SW waren gut zu erkennen.
2. Die reale Welt war durch das SW gut zu erkennen.
3. Das SW war zu milchig und hat meine Sicht gestört.
4. Es gab Probleme mit dem Headtracking.
5. Das Headtracking hat mich gestört oder behindert.

Diese Fragen sollen möglichst kompakt die zentralen Eigenschaften und möglichen Probleme des Smart Window abfragen: Den Kontrast (und damit die Helligkeit) der Darstellung, die Zuverlässigkeit und Niedrigschwelligkeit des Headtrackings und die optischen Eigenschaften der Projektionsfolie. Letzteres wird zwar theoretisch bereits von der zweiten Frage abgedeckt, da eine zu milchige Darstellung von Probanden jedoch eventuell nicht auf das Smart Window zurückgeführt werden könnte sondern stattdessen auf Schmutz, Sonneneinstrahlung, alternde Fenster oder Ähnliches, wird die Transparenz in einer weiteren Frage explizit behandelt.

Mehrwert Der gebotene Mehrwert soll quantitativ gemessen werden. Von Hertel et al. existieren bereits als Kontrolle erhobene Eyetracking-Daten zur prozentualen Verteilung der Blickzeit zwischen Kontrollmonitor und Frontscheibe. Bei der eigentlichen Evaluierung des AR-Headsets wurde der Kontrollmonitor jedoch abgeschaltet.

Der Ansatz des Eyetracking soll adaptiert und zum direkten Vergleich von Smart Window und Kontrollmonitor genutzt werden. Schauen Testpersonen bei identischer Aufgabenstellung und zusätzlicher Verfügbarkeit des Smart Window deutlich weniger auf den Kontrollmonitor als ohne Smart Window, so muss dieses einen Mehrwert gegenüber dem Kontrollmonitor bieten.

Auf eine Aufzeichnung der erzielten Genauigkeit bei Verfolgen der Peillinie soll jedoch bewusst verzichtet werden. Erfahrungen von Hertel et al. zeigten, dass die teilnehmenden Testpersonen stark unterschiedliche Praxiserfahrung und Routine mit der spezifischen Rolle des Peilschiffführers hatten. Da die erzielte Genauigkeit aber stark von der Vertrautheit mit dem spezifischen Schiff sowie Übung und Routine abhängt und nur mit vergleichsweise wenig Probanden gerechnet werden kann, wurde diese Datenquelle als vermutlich nicht aussagekräftig verworfen.

Der genau gebotene Mehrwert soll wiederum durch die Zustimmung zu vorformulierten Aussagen auf einer fünfstufigen Likert-Skala genauer charakterisiert werden. Sie orientieren

sich an den in der aktuellen Fachliteratur (insbesondere von Rowen et al., 2019) genannten möglichen Vorteilen von AR-Lösungen im maritimen Bereich.

1. Das SW hat mir bei der Erfüllung der Aufgabe geholfen.
2. Das SW hat mich abgelenkt.
3. Mit SW konnte ich besser auf mein Umfeld achten.
4. Mit SW habe ich mich sicherer gefühlt.
5. Ich konnte der im SW dargestellten Route gut folgen.
6. Ich empfand das Fahren mit SW als schwierig.

Um auch detailliertere oder unerwartete Antworten zu ermöglichen, werden diese Aussagen mit einem zusätzlichen, optionalen Freitextfeld sowie einer kurzen, zur Aussage passenden Frage (z.B. „Wieso nicht?“ oder „Was hat gestört?“) ergänzt.

Verbesserungsmöglichkeiten Verbesserungsmöglichkeiten sind eine subjektive Größe und sollen daher ebenfalls qualitativ ermittelt werden. Zum einen soll die dargestellte Informationsdichte wiederum durch zwei Items einer Likert-Skala bewertet werden:

1. Auf dem SW waren alle für mich relevanten Informationen zu sehen.
2. Auf dem SW waren zuviele Informationen zu sehen.
3. Auf welche Informationen haben Sie sich am meisten konzentriert?
4. Auf welche Informationen könnten Sie am ehesten verzichten?
5. Wie ließe sich das Smart Window verbessern?

Abschließend soll die Relevanz einzelner dargestellter Informationen erfasst werden. Als Antwort auf beide Fragen sind alle sieben in der Studie zu sehenden Instrumente ankreuzbar aufgelistet.¹⁾ Die letzte Frage ist als optional markiert und kann per Freitextfeld offen beantwortet werden.

5.3 Methodik

Unter den operationalisierten Variablen sind sowohl quantitativ erfasste als auch ordinal skalierte qualitative Messungen vertreten. Das Design des Probandenversuchs muss somit angemessene Erfassungsmethoden für beide Optionen bieten.

¹(zu sehen in Abbildung 4.13)

5.3.1 Eyetracking

Die Operationalisierung des Begriffs „Mehrwert“ fordert akkurate Eyetracking-Daten, um zeitlich präzise feststellen zu können, wann Probanden auf den Kontrollmonitor und wann aus dem Smart Window schauen. Da einer der Kernvorteile des entwickelten Systems darin besteht, keinerlei Brille tragen zu müssen, ist auch für die temporäre Verwendung innerhalb der Studie eine Eyetracking-Brille keine akzeptable Option. Sie würde das subjektive Empfinden des Systems und damit insbesondere die qualitative Befragung vermutlich stark beeinflussen. Stattdessen soll das Tracking mithilfe einer herkömmlichen Kamera und anschließender manueller Auswertung der Augenbewegungen erfolgen. Wird die Kamera direkt neben dem Kontrollmonitor positioniert, so lassen sich beide Zustände visuell leicht und zuverlässig unterscheiden. Zu beachten ist hier jedoch insbesondere die notwendige Zustimmung der Testpersonen zu einer Videoaufzeichnung sowie ein klar spezifizierter Verwendungszweck und eine angegebene Speicherfrist. Außerdem muss sichergestellt sein, dass die Versuchspersonen den Sichtbereich der Eyetracking-Kamera nicht verlassen und durch das System nicht abgelenkt werden.

5.3.2 Befragung

Die insgesamt 16 zu bewertenden Fragen oder Aussagen werden in Form eines Fragebogens direkt nach dem erfolgten Versuchsdurchlauf gestellt und sind in zufälliger Reihenfolge angeordnet. Zusätzlich werden für eventuelle sekundäre Fragestellungen benötigte Daten zu Vorerfahrungen und relevanten Angewohnheiten erhoben.

- Haben Sie bereits Vorerfahrungen mit „Augmented Reality“ (digitalen Einblendungen über der echten Welt) oder Head-Up Displays gemacht?
- Ihr Altersbereich?
- Sind Sie Brillenträger/in?
- Tragen Sie als Schiffsführer/in oft Sonnenbrille?

Um bei der erwarteten recht geringen Probandenzahl keine einzeln identifizierbaren Informationen zu erheben, wird das Alter in insgesamt fünf Stufen abgefragt. Jede Testperson wird über die Verwendung ihrer Daten sowie ihr Recht auf Nichtteilnahme und Widerruf aufgeklärt und muss sich schriftlich mit der Studienteilnahme und Datenspeicherung einverstanden erklären. Weitere personenbezogene Daten, welche keinen erwartbaren Einfluss auf die Ergebnisse haben (wie Geschlecht oder genaues Alter), wurden nach dem Grundsatz der Datensparsamkeit nicht erhoben.

5.4 Konzeption und Ablauf des Probandenversuches

Die Studie soll das Einsatzszenario (1.3) möglichst genau widerspiegeln. Um Ermüdung vorzubeugen und insbesondere aus organisatorischen Gründen soll die Versuchszeit pro Proband nicht mehr als 30 Minuten betragen. Da jedoch mit einer unbekannt langen Eingewöhnungszeit zu rechnen ist, soll in diesen 30 Minuten möglichst wenig Zeitbedarf für Umbauten, Kalibrierung und Einweisungen und damit möglichst viel Netto-Fahrtzeit enthalten sein.

Alle Probanden werden begrüßt, der Versuchsablauf erklärt sowie alle auf dem Smart Window sichtbaren Informationen kurz erläutert. Als Aufgabenstellung wird klar das möglichst exakte Einhalten der vorgegebenen Peillinie genannt und eine spätere Auswertung der erzielten Genauigkeit angekündigt, um diesen Punkt klar in den Vordergrund zu rücken.² Über die Videoaufzeichnung wird ebenfalls aufgeklärt und um Zustimmung gebeten, jedoch nicht explizit erklärt, dass diese dem Eyetracking dient. Start und Stopp der Videoaufzeichnung erfolgen jeweils drahtlos via Smartphone-App, um vor Versuchsbeginn keine weitere Aufmerksamkeit auf die Kamera zu lenken.

Zu Fahrtbeginn steht für die Navigation lediglich der herkömmliche Kontrollmonitor zur Verfügung. Während der Fahrt wird das Blickverhalten der Testperson kontinuierlich per Eyetracking ausgewertet. Dieses Szenario entspricht exakt der von Hertel et al. aufgestellten und ebenfalls per Eyetracking ausgewerteten *Monitor Condition*. Die dort gewonnenen Daten können somit bei Übereinstimmung die Genauigkeit des manuellen Eyetrackings und des generellen Versuchsdesigns stützen.

Nach 10 Minuten wird während der laufenden Fahrt das Smart Window aktiviert, der herkömmliche Monitor jedoch als signifikanter Unterschied zu Hertel et al. nicht abgeschaltet. Stellt sich nun eine signifikante Veränderung des Blickverhaltens hin zur Frontscheibe ein, bietet das Smart Window offenbar einen Mehrwert gegenüber dem weiterhin verfügbaren Monitor. Ein direkt nach dem Versuchsdurchlauf auszufüllender Fragebogen dient anschließend dazu, diesen Mehrwert genauer zu quantifizieren.

Das Studiendesign zielt darauf ab, möglichst aussagekräftige Eyetracking-Daten zu erzielen und ungewollte Einflüsse, insbesondere durch Umwelt und Eingewöhnung, zu minimieren und zu kontrollieren. Die zu verfolgende Route besteht sowohl aus längeren Geradeauspassagen als auch aus Kurswechseln. Sie ist geschlossen und muss in zwei Runden befahren werden. Eventuelle Einflüsse wie schwierige Passagen oder blendende Sonne treten so in beiden Runden auf.

²Eine Aufzeichnung oder Auswertung der erzielten Genauigkeit finden aus in 5.2 erläuterten Gründen nicht statt. Am Tag der Studie zeigte eine Testperson tatsächlich Sorge, dass eine „schlechte“ Performance zu beruflichen Nachteilen führen könnte und wurde daher sofort nach Versuchsende explizit aufgeklärt.

Das präzise Einhalten der Route hängt insbesondere von der aktuellen Strömung und den vorherigen Steuerbewegungen ab, daher ist ein „Auswendiglernen“ der Route kein wahrscheinlicher Störeinfluss. Die Aktivierung des Smart Window wird jedoch trotzdem nach ca. $\frac{3}{4}$ (10 Minuten) der ersten Runde vollzogen, um einen eventuellen Einfluss der nun bereits bekannten zweiten Runde vom Einfluss des Smart Window unterscheiden zu können. Direkt nach Abschluss der Testfahrt wird jeder Proband gebeten, einen Fragebogen auszufüllen sowie mit den noch folgenden Probanden keine Gespräche über das Smart Window zu führen.

5.4.1 Durchführung

Die Studie wurde am 13. September 2023 auf dem Schiff „Deepenschriewer 3“ durchgeführt. Es nahmen von 8:00 Uhr morgens bis 14:30 nachmittags insgesamt 10 Testpersonen am Versuch teil. Alle Testpersonen waren zugelassene Schiffsführer der Hamburger Hafenbehörde HPA. Bis auf den jüngsten waren alle abgefragten Altersbereiche vertreten. Insgesamt drei der zehn Testpersonen nahmen bereits an der Studie von Hertel et al. teil und gaben dementsprechend Vorerfahrungen mit Augmented Reality via AR-Brille an. Weitere relevante Vorerfahrungen wurden nicht angegeben.

Am Versuchstag herrschte sehr bedecktes Wetter, zu Versuchsbeginn bis ca. 9:30 Uhr regnete es. Aus organisatorischen Gründen musste die Studie bereits um 8 Uhr morgens beginnen, kurz nach Sonnenaufgang um 6:51 Uhr. Vor jedem Versuchsdurchgang wurde die Umgebungsleuchtdichte mit einem nach Osten ausgerichteten Sekonic L-858D Messgerät auf dem Vorschiff gemessen. Durch den frühen Versuchsbeginn in Kombination mit dem anfangs regnerischen Wetter traten bei den ersten vier Probanden sehr geringe Umgebungsleuchtdichten auf, welche sich im Laufe des Tages durch einen Wetterumschwung stark steigerten. Minimal wurden 340lx gemessen, maximal ca. 9000lx. Wie bereits erwähnt, konnte für diesen Versuch nicht wie ursprünglich vorgesehen eine dynamisch dimmbare Scheibe verwendet werden. Die verwendete statische Dimmung musste somit trotz der sehr wechselhaften Bedingungen einmalig so ausgewählt werden, dass für alle Probanden akzeptable Bedingungen herrschten. Verwendet wurde aufgrund bereits während der Entwicklungsarbeit für Ausbaustufe 2 gewonnener Erfahrungen eine Kombination aus zwei jeweils um 75% dimmenden Scheiben. Dieser Kompromiss wird in der folgenden Auswertung und Diskussion ausführlicher behandelt. Ein unerwarteter Nebeneffekt der transparenten Plexiglasplatten zeigte sich jedoch im Verhindern von Kondensation an den Fensterinnenseiten. Sie trat bedingt durch die hohe Personenanzahl an Bord an allen Fenstern außer dem Smart Window auf, verflüchtigte sich jedoch schnell. Der Versuch wurde hierdurch nicht gestört.

Es gab nur geringe Störungen durch Hafenverkehr oder Technik, es musste kein Versuchsdurchlauf abgebrochen oder verworfen werden. Bedingt durch die Enge des Schiffes und den langen Versuchsablauf war eine gewisse Beeinflussung der Probanden untereinander nicht



Abbildung 5.1: Am morgen der Studie um 7:27 Uhr aufgenommenes Bild des finalen Smart Window mit (im Uhrzeigersinn) Übersichtskarte mit Entfernungsmarkierungen und zwei markierten Bojen, (beschlagener) Rückkamera, Abweichung von der aktuellen Peilinie (roter Balken und Zahl), Kurs, Geschwindigkeit und Verlauf der Wassertiefe. Rechts unterhalb des Kontrollmonitors die Eyetracking-Kamera

zu vermeiden, sie beschränkte sich aber auf kurze Reaktionen und allgemeine Gespräche über das Gesamtsystem.

5.5 Ergebnisse

RQ1: Ist der entwickelte Prototyp eine ausgereifte und somit repräsentative Darstellung eines Smart Window?

In [Abschnitt 4.7](#) wurden die erreichte Motion-to-Photon-Latenz und Genauigkeit bereits gemessen und die Zielspezifikationen erreicht. Alle in [3.3](#) definierten Zielinhalte und Funktionen wurden implementiert und im Laufe des Versuchs einwandfrei verwendet.

Ermittelt werden muss jedoch noch das tatsächlich erreichte Kontrastverhältnis am Tag der Studie. In [Abbildung 5.4](#) ist zu sehen, dass die Umgebungsleuchtdichte wetter- und uhrzeitbedingt stark schwankte. Minimal wurden 340lx, maximal ca. 9000lx gemessen. Verwendet

wurden einheitlich zwei Dimmscheiben mit jeweils 2 Blendenstufen (75%) Dimmung. Durch das Fenster betrachtet ergab sich somit eine sichtbare Umgebungsleuchtdichte von maximal $9000\text{lx}/2 * 4 = 562,5\text{lx}$ und entsprechend minimal $340\text{lx}/2 * 4 = 21,25\text{lx}$.³ Beide Projektoren wurden im Modus *Bright* betrieben und erreichten so einen Lichtstrom von 5168 ANSI-Lumen auf der final belichteten Fensterfläche von $90\text{cm} * 51\text{cm} = 0,459\text{m}^2$. Mit angenommenen 10% Verlust durch den Einsatz von Software-Keystoning und dem bereits bekannten 87% Transmissionsgrad der Projektionsfolie ergibt sich somit eine Beleuchtungsstärke der Projektoren von

$$\frac{5168\text{lm} * 0,90}{0,459\text{m}^2} * 0,13 = 1317,33\text{lx}$$

und damit ein minimales Kontrastverhältnis von $1317,33\text{lx}/562,5\text{lx} = 2,34$ sowie ein maximales Kontrastverhältnis von 62:1.



Abbildung 5.2: Visualisierung des in der Studie minimal aufgetretenen Kontrastverhältnisses von 2.34:1 sowie des anvisierten Verhältnisses von 3:1 im „WCAG Color Contrast Checker“ von Accessible Web, 2023

Das gesteckte Minimalziel eines Kontrastverhältnisses von 3:1 wurde somit knapp verfehlt. Es wurde bis zu einer maximalen Umgebungsleuchtdichte von $\frac{1317,33\text{lx}}{3} * 16 = 7025\text{lx}$ eingehalten, also bei 6 von 10 Probanden. **Abbildung 5.2** zeigt jedoch, dass ein Kontrastverhältnis von 2.34:1 zwar erkennbar, jedoch nicht signifikant von der Zielspezifikation abweicht. Das Nichterreichen der von der W3C empfohlenen Kontrastspezifikation führt somit nicht zwingend zur Invalidierung der Resultate, sollte aber bei der Bewertung kontrastabhängiger Eigenschaften und insbesondere der Weiterentwicklungsmöglichkeiten berücksichtigt werden.

Die Ergebnisse der Befragung mittels Likert-Skala zeigen jedoch ohnehin ein sehr gemischtes Bild. Gut zu erkennen ist, dass bei Auswahl von Dimmung und Projektoren die Sichtbarkeit der virtuellen Inhalte priorisiert wurde und nahezu jederzeit gegeben war, die Sichtbarkeit der realen Welt jedoch stark schwankte. Mit einem Koeffizienten von $r \approx -0,90$ korreliert sie stark mit der Umgebungsleuchtdichte.

Die Antworten auf Likert-Item 1 und 3 korrelieren ebenfalls mit der Umgebungsleuchtdichte, jedoch deutlich schwächer mit $r \approx -0,37$ sowie $r \approx 0,57$. Eine flexibel dimmbare Scheibe

³Zum Vergleich, 10lx entsprächen der Dämmerung, 100lx laut National Optical Astronomy Observatory, 2021 einem „very dark day“

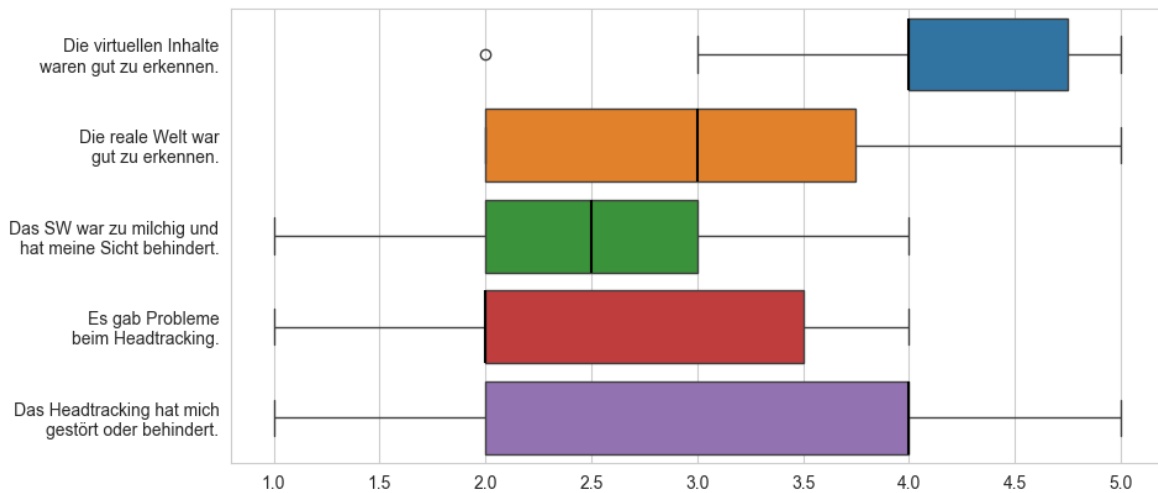


Abbildung 5.3: Resultate der Probandenbefragung mit Fragen zur technischen Validierung der Umsetzung

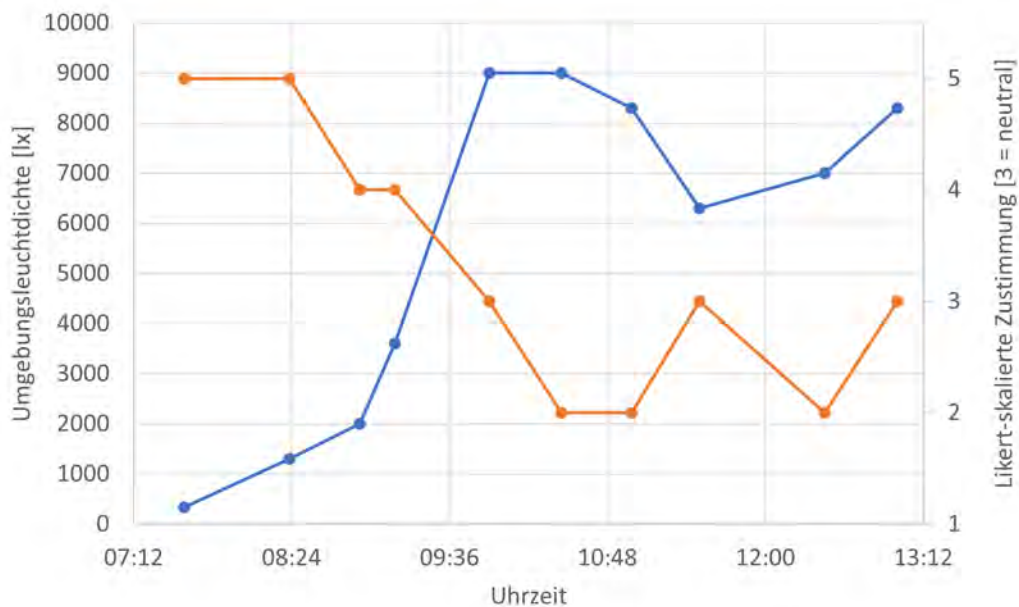


Abbildung 5.4: Korrelation der gemessenen Umgebungsleuchtdichte (blau), und den Antworten auf das Likert-Item „Die reale Welt war gut zu erkennen“ (orange).

scheint somit eine unverzichtbare Voraussetzung für den dauerhaften Einsatz eines Smart Window zu sein, da die in diesem Versuch stattdessen verwendete statische Dimmung einen deutlich negativen Einfluss auf den erzielten Eindruck gehabt zu haben scheint.

Die Bewertung beider Aussagen mit Bezug zum Headtracking fallen besonders kontrovers

aus. „Es gab Problem beim Headtracking“ wird zwar im Median mit „eher nicht“ beantwortet, es gibt jedoch eine hohe Spannweite. Diese ist jedoch unter anderem mit einem leicht zu behebbenden Fehler zu erklären. Für zwei Testpersonen war die verwendete *Universal Size-Basecap* deutlich zu groß, der angebrachte Rigidbody-Marker war daher nicht stabil mit dem Kopf verbunden und zitterte stark.

„Das Headtracking hat mich gestört oder behindert“ wird im Median mit „eher ja“ beantwortet, wobei auch hier eine hohe Spannweite der Antworten vorliegt. Nach informellem Feedback und der Auswertung der Freitextfelder scheint dies jedoch in mehreren Fällen eindeutig auf Verständnisprobleme zurückzuführen zu sein. Es wird daher in der Auswertung von RQ4 mit Verbesserungsmöglichkeiten konkreter behandelt.

Nach Betrachtung aller gewonnenen Daten kann diese Forschungsfrage jedoch mit *Nein* beantwortet werden. Der entwickelte Prototyp ist nutzbar und das aus diesem Versuch gewonnene Datenmaterial für dessen Weiterentwicklung sicher sehr wertvoll, er ist aber keine ausgereifte Entwicklungsstufe eines Smart Window und kann somit nur für sich selbst stehen.

RQ2: Bietet das Smart Window einen Mehrwert gegenüber der etablierten Navigationslösung mit Kontrollmonitor?

Diese Forschungsfrage soll primär mittels der gewonnenen Eyetracking-Daten beantwortet werden. Schaut eine Testperson nach Zuschalten des Smart Windows ohne weitere Incentivierung oder zusätzliche Informationen deutlich weniger auf den weiterhin verfügbaren Kontrollmonitor und damit deutlich mehr durch das Smart Window, so muss dieses einen - noch nicht näher beschreibbaren - Mehrwert gegenüber dem Kontrollmonitor bieten.⁴

Dies trifft tatsächlich zu. Direkt nach Aktivierung des Smart Window nimmt die Blickzeit auf den Kontrollmonitor stark ab. Zusätzlich ist eine Eingewöhnungszeit von ca. 3-4 Minuten zu erkennen. Hier sinkt die Blickzeit auf den Kontrollmonitor kontinuierlich weiter ab. Einige starke Ausreißer in Richtung Kontrollmonitor deuten auf Eingewöhnungsschwierigkeiten bei einzelnen Testpersonen hin; diese verschwinden jedoch schnell und im Laufe des Versuchs treten bei keiner Testperson mehr größere Ausreißer auf. Im Mittel⁵ schauten Probanden ohne Smart Window 59,5% ($35,7 \frac{\text{s}}{\text{min}}$) der Zeit auf den Kontrollmonitor, mit zusätzlich angebotenen Smart Window sank dieser Anteil auf 23,8% ($14,3 \frac{\text{s}}{\text{min}}$). Dies entspricht einer um Faktor 2.5 längeren Umgebungsbeobachtung.

⁴Wegen der begrenzten Genauigkeit der eingesetzten Eyetracking-Lösung wird hier implizit davon ausgegangen, dass ein Blick „nach unten“ dem Kontrollmonitor und „nach oben“ dem Smart Window gilt. Strenggenommen sind noch andere Blickziele - wie Seitenfenster oder weitere Brückeninstrumente - denkbar; laut akkuraterer Eyetracking-Daten von Hertel et al. machen diese jedoch nur ca 10% der Gesamtblickzeit aus und sind nahezu gleichverteilt zwischen Armaturenbrett und Umwelt. Sie können daher für die Zwecke dieser Auswertung vernachlässigt werden.

⁵Arithmetisches Mittel aller erfassten Blickzeiten aus Minute 0-9 bzw. 10-25, in Prozent umgerechnet

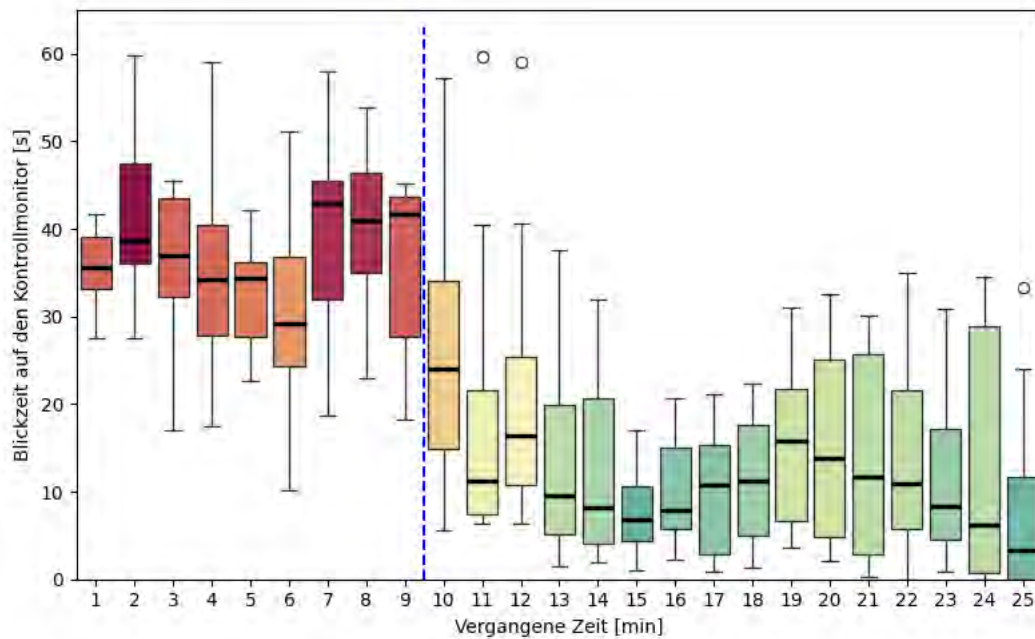


Abbildung 5.5: Boxplot der Eyetracking-Daten. Erfasst wurde die Blickzeit auf den Kontrollmonitor pro Minute, in Sekunden. In blau markiert der Einschaltzeitpunkt des Smart Window. Die farbige Kodierung der Boxen entspricht ihren Medianwerten (zusätzlich gefettet hervorgehoben)

Vor Aktivierung des Smart Window entspricht das Testsetup exakt der von Hertel et al. erfassten *Monitor Condition*, welche ebenfalls per Eyetracking vermessen wurde. Hier wurde der Zeitanteil von Monitor und Fenster als 46.4% respektive 43.1% gemessen. Da diese Daten mit der deutlich präziseren Methode einer Eyetracking-Brille aufgenommen wurden, lassen sich weitere Blickziele (beispielsweise andere Brückenarmaturen) identifizieren. Monitor und Frontscheibe machen somit nur 89.5% der erfassten Gesamtzeit aus. Im Gegensatz hierzu wurde beim manuellen Eyetracking lediglich zwischen „Blick auf Kontrollmonitor“ und „kein Blick auf den Kontrollmonitor“ unterschieden. Da beide Versuche mit recht wenigen Testpersonen (jeweils 10) und nahezu gegenteiligen Wetterbedingungen durchgeführt wurden, erscheinen 20 Prozentpunkte Abweichung als plausibel.

Trotz der sehr deutlich erscheinenden Ergebnisse soll die Signifikanz der Messdaten überprüft werden. Hierfür eignet sich ein paarweiser T-Test für abhängige Stichproben. Da bei der Datengewinnung jedoch die Stichproben im Interesse einer längeren Netto-Fahrtzeit nicht klar getrennt wurden, müssen diese aus dem Gesamtdatensatz extrahiert werden. Alle gewonnenen Daten aus Versuchsminute 2-9 werden als Stichprobe „Monitor“ betrachtet. Zur Gewährung von etwas Eingewöhnungszeit wird die erste Versuchsminute ignoriert. Die zweite Stichprobe „Monitor + Smart Window“ soll sowohl den gleichen Zeitraum als auch den möglichst gleichen Routenverlauf wie die erste Stichprobe abdecken. Aus [Abbildung 5.6](#) lässt

sich ablesen, dass dies ungefähr den Versuchsminuten 15 bis 23 entspricht.⁶ Somit besteht jede Stichprobe aus insgesamt 80 Datenpunkten.

Der T-Test fordert (neben metrischer Skalierung der erfassten Werte) die Normalverteilung der Residuen einzelner Wertepaare. Diese wurde mit einem Shapiro-Wilk-Test ($p = 0.959$) überprüft und bestätigt, dass die Normalverteilung angenommen werden kann. Nun kann überprüft werden, ob die Nullhypothese H_0 : Die Blickzeit aus dem Fenster fällt bei „Monitor + Smart Window“ nicht signifikant höher aus als bei „Monitor“ verworfen werden kann. Mit einem Mittelwert der Residuen von $\bar{x}_{\text{diff}} = 24.19$, einer Standardabweichung von $\sigma = 15.039$, einem Standardfehler von $SE = 1.68$ und einer Dimensionalität von $df = 79$ ergibt sich ein Resultat des T-Tests von $t = 14.39$. Selbst bei einem kritisch angenommenen $\alpha = 0.01$, also einer Fehlerwahrscheinlichkeit von einem Prozent, beträgt der zu übertreffende kritische T-Wert lediglich $t = 2.375$. Selbst unter Berücksichtigung schwer zu kontrollierender Effekte wie Neugier oder eventuell vorhandener Reaktion auf das Eyetracking ist dieser Effekt signifikant, zumal bei Start der Stichprobe das Smart Window bereits 5 Minuten genutzt wurde. Der reine „Neuheitswert“ des Smart Window war somit zumindest vermutlich bereits abgemildert.

Die Forschungsfrage kann also klar bejaht werden. Das konstruierte Smart Window bietet einen deutlichen und statistisch signifikanten Mehrwert gegenüber der etablierten Navigationsmethode per Kontrollmonitor.

Durch Verbindung der Abbildungen 5.5 und 5.6 lassen sich weitere Informationen gewinnen. Abbildung 5.6 zeigt eine Runde der abzufahrenden Route. Jeder Wegpunkt ist mit dem Zeitpunkt der ersten und zweiten Rundung beschriftet. Zusätzlich ist die Route mit dem Farbschema aus Abbildung 5.5 eingefärbt, jedoch aus Gründen der Übersichtlichkeit nur mit den Werten der ersten Runde.

Zum einen zeigt sich, dass die starke Veränderung des Betrachtungsfokus nicht mit dem Start der zweiten Runde zusammenfällt, also nicht durch reine Gewöhnung an die Route verursacht worden sein kann. Zum anderen ist ein Einfluss des momentanen Schwierigkeitsgrades der Route zu erkennen. Die westliche Wende der Route besteht aus den zwei stärksten Richtungswechseln und ist sowohl bei Minute 7-8 in Runde 1 als auch bei Minute 19-20 in Runde 2 gut in Abbildung 5.5 zu erkennen. Dies ist sowohl ein guter Anhaltspunkt für die Validität der (manuell erfassten) Eyetracking-Daten und ihrer Verarbeitung als auch ein plausibles Muster. Hertel et al. haben durch Trennung der Messdaten in *Curve* und *Straight* ebenfalls einen signifikant höheren empfundenen Schwierigkeitsgrad bei der Kurvenverfolgung festgestellt. Da sowohl Kontrollmonitor als auch Smart Window dieselben Informationen anzeigen, kann vermutet werden, dass sich Testpersonen in anspruchsvolleren Situationen zurück in geübte oder als sicherer empfundene Muster begeben, namentlich der Navigation mittels Kontrollmonitor. Unklar ist, ob nach einer längeren Eingewöhnungszeit auch in diesen Momenten

⁶Kleine Variationen in Strömung, Kursgenauigkeit und Schiffsgeschwindigkeit führen zu leicht unterschiedlichen Versuchsdauern pro Proband. Die Stichprobe wurde definiert als „8 Minuten ab Minute 15“

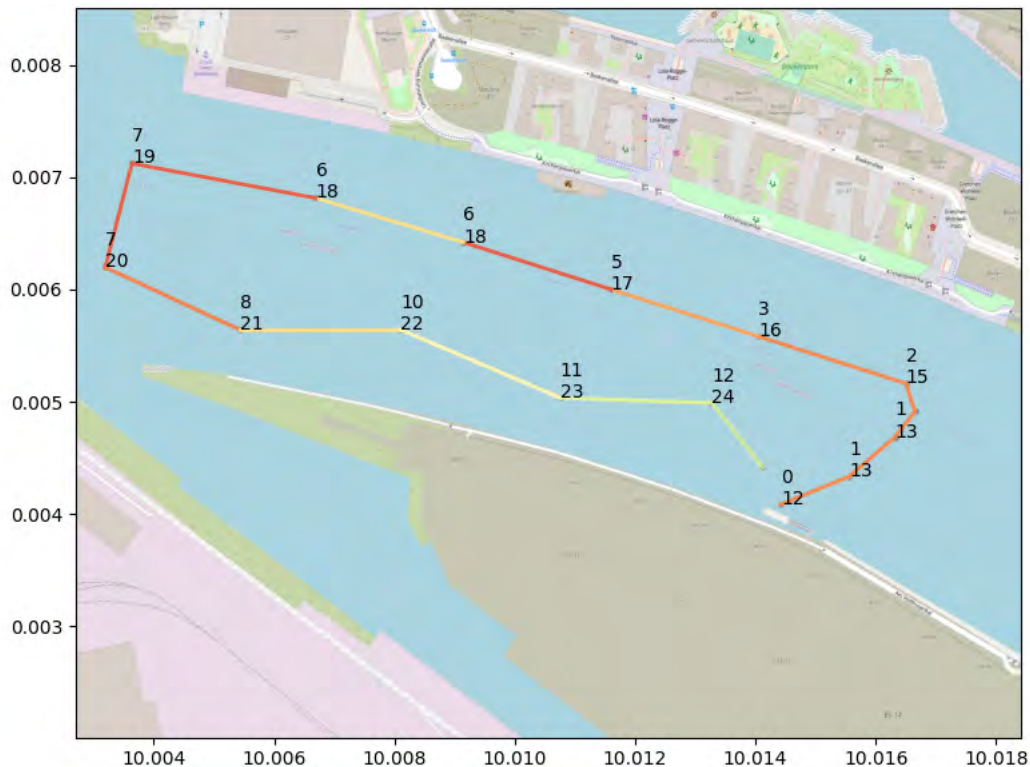


Abbildung 5.6: GPS-Plot der für die Studie verwendeten Route vor der Hamburger Hafencity.

das Smart Window bevorzugt werden würde.

RQ3: Falls vorhanden, wie sieht der Mehrwert des Smart Windows gegenüber der etablierten Navigationslösung aus?

Trotz einer quantitativ nachgewiesenen klaren Präferenz der Testpersonen für das Smart Window sind die Einschätzungen der potenziell gebotenen Vorteile sehr gemischt. Lediglich das Vorhandensein von Ablenkung und die generelle Schwierigkeit werden im Median mit „eher niedrig“ bewertet, wobei auffällig ist, dass die Beurteilung der verschiedenen Teilnehmer stark variiert. Während einige den Prototypen generell positiv sowie unterstützend empfinden und nahezu alle Fragen positiv beantworten, ist bei einigen Probanden auch das genaue Gegenteil der Fall.

Leider mussten die Ergebnisse der Fragestellung *Auf welche dargestellte Information haben Sie sich am häufigsten konzentriert?* wegen anscheinend verwirrender Antwortmöglichkeiten verworfen werden.⁷ Insbesondere die 3D-Peillinie stieß jedoch allgemein auf sehr geteiltes

⁷Probanden wurden gebeten, die aufgelisteten Elemente durch Eintragen einer Rangfolge von 1-7 zu ordnen. Einige Probanden kreuzten jedoch lediglich an, einige vertauschen vermutlich die Rangfolge und einige vergaben Ränge mehrfach. Eine aussagekräftige Auswertung, ohne zu starke Verzerrung der vermutlich beabsichtigten Meinungen, ist so nicht möglich.

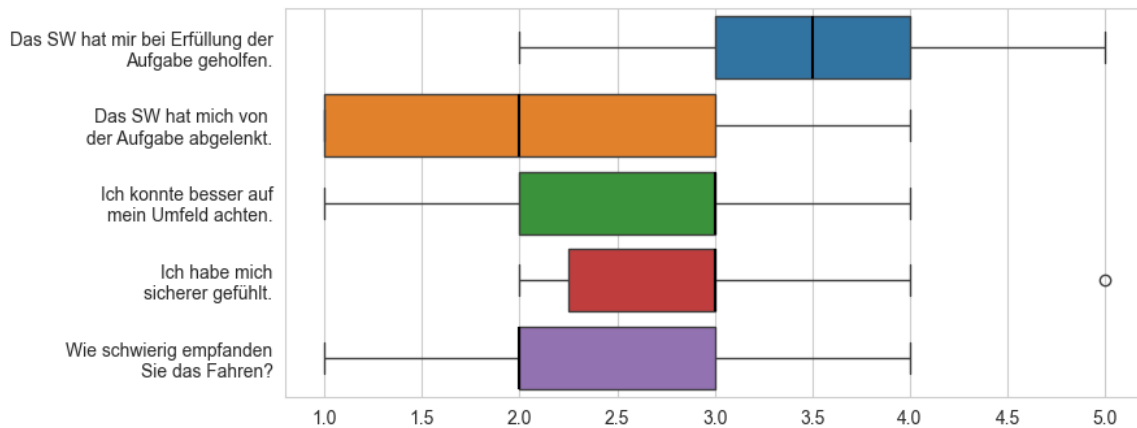


Abbildung 5.7: Resultate der Probandenbefragung mit Fragen zu Aspekten eines gebotenen Mehrwerts

Echo und wurde in den Freitextfeldern vieler Fragebögen und als informelles Feedback nach der Studie kontrovers diskutiert.

Die Tatsache eines klar gezeigten Mehrwerts bei variierenden und im Median meist neutralen Bewertungen der aufgestellten Likert-Items lässt leider keine klare Beantwortung der Forschungsfrage zu. Die Likert-Items basieren somit vermutlich auf nicht zutreffenden Annahmen über den potenziellen Mehrwert und liefern somit keine aussagekräftigen Ergebnisse. Eine genauere Diskussion und Einordnung der trotzdem gewonnenen Daten findet in 5.6 statt.

RQ4: Wie ließe sich das entwickelte Smart Window weiter verbessern?

Trotz den eher kontroversen Beurteilungen in der qualitativen Befragung wurde informell von mehreren Probanden enthusiastisch das „Potenzial“ des Smart Windows hervorgehoben und in den Freitextfeldern der Fragebögen (teilweise sogar den Rückseiten) detaillierte Verbesserungsvorschläge gemacht und begründet. Dieses erwähnte „Potenzial“ spiegelt sich auch in der im Median guten Bewertung des Likert-Items *Ich konnte der dargestellten Route gut folgen.* wider.

Bei der Frage nach noch fehlenden Informationen wurde am häufigsten (4 Antworten) ein Ruderstandsanzeiger genannt. Nach Aufklärung über das Eyetracking erklärten drei Probanden explizit, nur wegen des Ruderstandsanzeigers auch mit Smart Window auf das Armaturenbrett geschaut zu haben. Von drei Probanden gewünscht wurde eine Integration in das „Automatic Identification System“ (AIS) zur Darstellung von Name, Kurs und Geschwindigkeit umgebender Schiffe. Zwei Probanden forderten zum besseren Verfolgen der Peillinie eine sogenannte „Dreierlinie“, also zwei seitlich der Peillinie eingezeichnete Linien zur Kennzeichnung der maximal zulässigen Abweichung nach Backbord und Steuerbord.

Am ehesten verzichten konnten sieben von zehn Probanden auf die dargestellte Heckkamera.

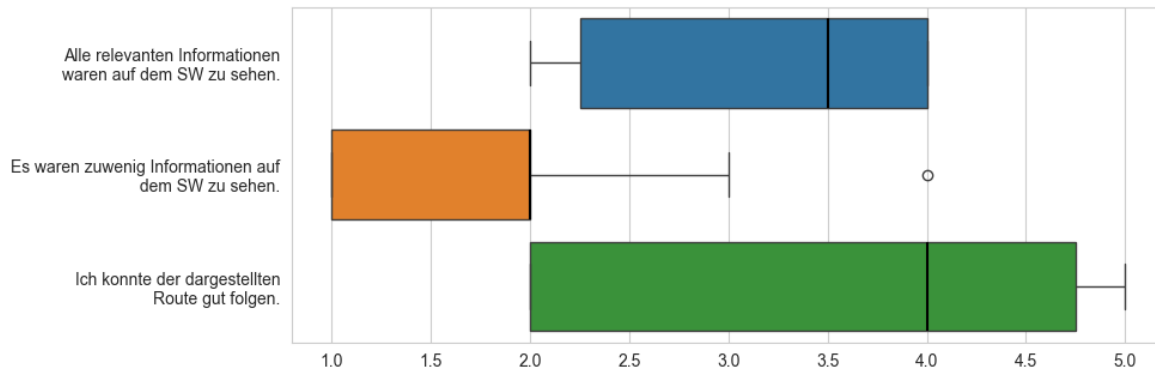


Abbildung 5.8: Resultate der Probandenbefragung mit Fragen zur Bewertung der dargestellten Informationen

Bedenkt man, dass die fehlende Übersicht ein großer Kritikpunkt der Probanden in der Studie von Hertel et al. war, welche bei deutlich besserem Wetter auf demselben Schiff stattfand, so lässt diese Antwort vermuten, dass die subjektive Qualität der Übersicht mit Smart Window deutlich besser ausfiel. Mangels präziser Fragestellung lässt sich dies aber nicht belegen. Bei dieser Frage war die Heckkamera einzige Mehrfachnennung.

Zwei Probanden nannten explizit die Basecap mit angebrachtem RigidBody-Marker als Störeinfluss. Sofern technisch möglich wäre also eine rein optische Umsetzung des Headtrackings weiterhin von Vorteil. Ein Proband kritisierte zudem, dass sich bei einem Schulterblick die Peillinie aufgrund der starken Kopfbewegung „wegduckt“, was - als ungewohnte Bewegung im Augenwinkel - ablenkend gewirkt habe. Diese scheinbare Kleinigkeit ist ein gutes Beispiel für den großen Einfluss den kleine Detailverbesserungen, oft „polishing“ genannt, auf die Nutzbarkeit des Gesamtsystems haben können. Gerade bei einem System welches auf intuitive und dauerhafte Nutzbarkeit angelegt sein soll, ist ausführliches „polishing“ somit ein wichtiger Faktor den es zu verbessern gilt.

5.6 Diskussion

Die quantitative Datenerhebung erwies sich als äußerst erfolgreich und deckte sich mit den Erwartungen, die sich aus der Forschung von Hertel et al., 2023 und der allgemeinen Literaturrecherche (2.3.2) ableiten lassen. Sie zeigt, dass das entwickelte Smart Window schnell und intuitiv zu benutzen ist und gleichzeitig einen signifikanten Mehrwert gegenüber dem bisher verwendeten Kontrollmonitor bietet. Technisch konnten bis auf den Bildkontrast alle gestellten Zielerfordernisse erfüllt werden. Die Integration einer automatisch dimmbaren Scheibe oder eines anderen Weges zur Erhöhung des Bildkontrastes ist jedoch eine klare

Voraussetzung für ein final einsetzbares Produkt. Eine höhere Benutzerfreundlichkeit des Headtrackings sowie bestenfalls eine kontaktlose Umsetzung sind ebenfalls wünschenswert.

Wie bereits durch Forschungsdesigns und Schwerpunktsetzungen in der aktuellen und relevanten Forschung zu vermuten war, stellt die Erhebung aussagekräftiger qualitativer Daten auf der realen Schiffsbrücke eine große Herausforderung dar. Obwohl zehn von ihrer Arbeit freigestellte, professionelle Schiffsführer nach allen praktischen Erwägungen eine nennenswerte Anzahl (und damit große Unterstützung seitens der Hydrografieabteilung der HPA) darstellen, kann statistisch betrachtet mit „nur“ zehn Probanden trotzdem in insbesondere qualitativen Auswertungen nur schwer statistische Signifikanz erreicht werden.

Es sollte jedoch selbstkritisch angemerkt werden, dass mehrere Aspekte sowohl des Fragebogendesigns als auch der formulierten Likert-Items einer wirklich aussagekräftigen Auswertung, auch bei theoretisch höherer Teilnehmerzahl, im Wege gestanden hätten. Insbesondere zielgerichteter formulierte Aussagen hätten vermutlich sowohl aussagekräftigeres Feedback generiert als auch es ermöglicht, die gewonnenen Daten besser einer vermuteten Ursache zuzuordnen. Im Vorfeld des Probandenversuchs war es jedoch bedingt durch die Kombination aus dem bereits erwähnten Mangel an relevanten Forschungsergebnissen und dem unüblichen Design des entwickelten Smart Windows kaum möglich, präzise und gleichzeitig relevante Vermutungen zu formulieren. So stellte sich schließlich insbesondere das in Freitextfeldern und informell nach der Studie gegebene Feedback als der relevanteste Teil der qualitativen Auswertung heraus.

In eventuellen Folgestudien kann dieses Feedback jedoch nun als Grundlage für präzisere Fragestellungen genutzt werden.

Bei der Betrachtung und Bewertung der gewonnenen Daten sollten zwei große Faktoren nicht außer Acht gelassen werden. Zum einen sind die speziellen Anforderungen des Einsatzszenarios „Peilschiff“ nicht unbedingt allgemein gültig oder relevant. Alle Probanden waren Schiffsführer in einem einzigen Revier und darüber hinaus in sehr ähnlichen Einsatzbereichen tätig. Das exakte Verfolgen einer Peillinie ist somit zwar eine relevante, aber natürlich sehr spezielle Tätigkeit.

Zum anderen orientierte sich das gesamte Versuchsdesign aus Gründen der Vergleichbarkeit an der von Hertel et al. mit einer Microsoft HoloLens AR-Brille durchgeführten Studie. Im Laufe der Literaturrecherche und dieser Arbeit zeigte sich jedoch immer deutlicher, dass sich die respektiven „Stärken und Schwächen“ von AR-Headset und Smart Window stark unterscheiden. Ein Versuchsdesign mit einer recht kurzen, dafür intensiven Aufgabe ohne jegliche Fokuswechsel durch Verkehr, Funk oder Navigation bildet nur einen sehr kleinen Teil des Alltags eines Schiffsführers ab.

Die „Stärken“ des Smart Windows zeigen sich vor allem in der Nutzerfreundlichkeit, der dauerhaften Einsatzbereitschaft und der geringen Regression bei qualitativen Eigenschaften wie Übersicht und Ablenkung.

Ein idealer Einsatzbereich des Systems scheint somit weniger in der Bereitstellung permanenter Augmented-Reality-Informationen im Nahfeld zu liegen, sondern vielmehr in der Funktion als permanent einsetzbares, intuitives Head-Up-Display im Sichtfeld. Die Integration in Schiffsfunk, AIS, ECDIS, Bordkameras und weitere Schiffssysteme bietet Potenzial für eine extrem vielseitige und gleichzeitig weder ablenkende noch störende Informationsquelle.

6 Fazit

Der Fokus dieses Projektes lag von Beginn an auf der Produktentwicklung. Als Master-Absolvent einer Fachhochschule sollte die verfasste Abschlussarbeit idealerweise sowohl ein relevanter Beitrag zum aktuellen Stand der Forschung, als auch eine praxisrelevante und wertschöpfende Entwicklung sein. Die Einleitung dieser Masterarbeit stellt daher genau dieses Ziel auf:

Entwickelte man also ein spezialisiertes, technisch zuverlässiges AR-System mit derart geringer Einsatzhürde, dass es dauerhaft verwendet werden könnte, böte es einen potenziell signifikanten Mehrwert, trotz fehlender technischer Perfektion oder Einsatzvielfalt.

Kapitel 1

Über einen Zeitraum von sechs Monaten konnte genau dies geleistet werden. Es wurde ein Augmented Reality Smart Window entwickelt, welches alle gestellten Anforderungen erfüllt und somit wie vermutet auch nachweislich einen signifikanten Mehrwert bietet.

Mit Unterstützung der Hamburger Hafenbehörde HPA wurde das direkt aus der täglichen Praxis stammende Testszenario eines Peilschiffs ausgewählt und charakterisiert. Anhand dieses Szenarios wurde definiert, welche Anforderungen - technisch und inhaltlich - ein Smart Window erfüllen muss, um eine signifikante Hilfe für den Schiffsführer zu sein. Insbesondere zu nennen ist hier die Vermeidung von Regressionen, also klaren Nachteilen oder Behinderungen, welche bei Verzicht auf das AR-System nicht aufgetreten wären. In einer ebenfalls das Testszenario „Peilschiff“ untersuchenden Studie von Hertel et al. war genau dies der Fall. Von Probanden wurde bei Verwendung einer AR-Brille insbesondere die reduzierte Übersicht kritisiert.

In einer Literaturrecherche und Übersicht über relevante Forschung und Technologien zeigte sich, dass der Einsatz verschiedenster AR-Technologien im maritimen Bereich Gegenstand vieler aktueller Paper und Forschungsvorhaben ist. Insbesondere bei der technischen Umsetzung existiert jedoch keinerlei Konsens über den favorisierten Ansatz, es werden im Gegenteil die verschiedensten Konzepte vorgeschlagen und entwickelt. Insbesondere AR-Headsets auf

der Schiffsbrücke und die Einblendung von Routen- oder Verkehrsinformationen in Live-Videobilder sind jeweils Gegenstand mehrerer aktueller Veröffentlichungen. Umfassende Literature-Reviews zeigten jedoch, dass nur wenige der vorgeschlagenen oder konstruierten Prototypen nach dem initialen Test der Funktionalität auch in einer realen oder realitätsnahen Umgebung evaluiert wurden.

Die schrittweise Konzeption des Prototypen begann mit der Identifizierung und anschließender Spezifikation der relevantesten Anforderungen, insbesondere der zu erreichenden Systemlatenz und Darstellungshelligkeit. Beides waren große Herausforderungen, welche im Laufe der Konstruktionsphase signifikante Entwicklungsarbeit benötigten.

Den zweiten Teil der Konzeptionsphase bildete die begründete Komponentenauswahl. Sie fand mit Hinblick auf die vorher aufgestellten Zielspezifikationen statt und beinhaltete neben der eigentlichen Auswahl auch die Bewertung eventueller Alternativen und die Identifizierung möglicher Schwachstellen.

Um die große Komplexität und Diversität der zu lösenden Herausforderungen, welche die Entwicklung eines solchen Gesamtsystems mit sich bringt, zu strukturieren, wurde die Entwicklung in zwei Ausbaustufen aufgeteilt. Die erste Ausbaustufe fand an Land statt und beinhaltete insbesondere die Konstruktion eines ersten funktionsfähigen „Proof-of-Concept“ sowie die anschließende Optimierung von Gesamtsystemlatenz und Projektionshelligkeit. Zur präzisen Latenzmessung der gesamten Signalkette wurde ein spezialisiertes Messgerät konstruiert und validiert. Die Gesamtsystemlatenz konnte so mittels iterativer Optimierung von 27.3ms auf 14.3ms gesenkt werden. Zur Steigerung der erzielten Projektionshelligkeit wurde eine Softwarelösung entwickelt, um die Bilder zweier Projektoren ohne negativen Einfluss auf die Systemlatenz pixelgenau zu kombinieren.

Die zweite Ausbaustufe fand bereits in der finalen Einsatzumgebung auf dem Peilschiff „Deepenschriewer 3“ statt und umfasste insbesondere Softwareentwicklung und die Härtung des Systems gegen Umwelteinflüsse. Zur nahtlosen Integration in die Brückensysteme wurde das Übertragungsprotokoll NMEA0813 implementiert, außerdem Parser für die im Format ETRS1989 hinterlegten Datenbanken von Grundhindernissen und Seezeichen im Hamburger Hafen. Insbesondere der Anspruch an die wartungsarme und niedrigschwellige Verwendung des Systems zeigte eine Vielzahl von Problemen auf, welche in dieser Ausbaustufe ebenfalls gelöst wurden. Hierzu gehören die dauerhafte automatische Kalibrierung des Headtracking-Systems, gesteigerte Resilienz gegenüber Vibrationen durch verbesserte Halterungen sowie die Entwicklung einer schnellen Kalibrieroutine zur Ermittlung des dominanten Auges der individuellen Testperson.

In einem Probandenversuch konnte die Funktionalität des Systems getestet und eine klare Präferenz aller Testpersonen für das neue Smart Window nachgewiesen werden. Viel konstruktives Feedback zeigte auf, dass ein Smart Window der hier entwickelten Bauart in der Tat eine wertvolle Ergänzung der modernen Schiffsbrücke sein kann.

7 Ausblick

Betrachtet man die vielversprechenden Ergebnisse des Probandenversuchs, die zahlreichen bereits gelösten technischen Probleme und das große Interesse an AR-Technologien im Allgemeinen, so ist die Weiterentwicklung dieses Smart Window Prototypen in ein final einsetzbares Produkt nicht nur definitiv möglich, sondern auch sinnvoll und vielversprechend. Durch die Bauart als „Monitor“ bietet es viel Potenzial für eine schnelle Erweiterung, Weiterentwicklung und Anpassung an verschiedene Einsatzszenarien.

Die Implementierung des von Ocean Industries Concept Lab, [2020](#) entwickelten OpenBridge Standards könnte die Lesbarkeit der dargestellten Instrumente deutlich verbessern. Fortschritte in den Bereichen Bildverarbeitung, KI und Sensorik können eine drahtlose Umsetzung des Headtracking-Systems ermöglichen, ein potenziell dramatischer Gewinn für die Nutzerfreundlichkeit.

Selbstdimmende Scheiben, hochtransparente LCDs, spezialisiertere Projektionsfolien und stetig neu vorgestellte Projektoren bieten Potenzial zur Steigerung des lokalen und globalen Bildkontrasts. So wären weitreichende Verbesserungen des Designs, beispielsweise bei Farbcodierung und Schattierung für die verbesserte Tiefenwahrnehmung, möglich.

Die von Lee et al., [2016](#) demonstrierten Techniken zur Erfassung von Schiffsposition und Orientierung mittels Computer-Vision könnten die Anforderungen des Smart Windows an die Genauigkeit der verbauten Schiffssysteme wie Gyroskop und GPS deutlich senken. So wären massiv niedrigere Systemkosten und gleichzeitig der Einbau auf nahezu jeder Schiffsbrücke möglich.

Neben diesen, oft von externen Faktoren und Entwicklungen abhängigen, Verbesserungsmöglichkeiten sind rund um das Smart Window auch viele weitere spannende Herausforderungen zu lösen und Fragen zu beantworten:

Wie könnte man mit dem Smart Window interagieren?

Wie lassen sich mehrere Betrachter realisieren?

Gibt es einen Weg, auch per Smart Window kollimierte Inhalte darzustellen?

Als persönliches Fazit kann ich nur antworten: „Ich weiß es nicht.“ Aber ich freue mich sehr darauf, es als verantwortlicher Entwickler bei der Fehrmann Tech Group in Zukunft herausfinden zu dürfen.

Für mich war dieses Projekt die spannendste Herausforderung meiner bisherigen Laufbahn, voller kniffliger Probleme, interessanter Lösungen, prägender Erfahrungen und enthusiastischer Unterstützung.

Ich sehe es als den besten Abschluss an, den man sich für eine lange studentische Karriere hätte wünschen können und möchte mich bei allen Beteiligten nochmals herzlich bedanken.

Literatur

- Accessible Web. (2023). *WCAG Color Contrast Checker* [letzter Besuch: 18.11.2023]. <https://accessibleweb.com/color-contrast-checker/>
- Alamia, M. (o.J.). *World, View and Projection Transformation Matrices* [letzter Besuch: 18.11.2023]. http://www.codinglabs.net/article_world_view_projection_matrix.aspx
- ART - Advanced Realtime Tracking. (2023). *Solutions:Targets* [letzter Besuch: 18.11.2023]. <https://ar-tracking.com/en/product-program/targets>
- Başar Uğur, Ali Vahit Sahiner & Isik Baris Fidaner. (2009). Off-Axis Stereo Projection and Head Tracking for a Horizontal Display. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:36007931>
- Bushby, K. M., Cole, T., Matthews, J. N., & Goodship, J. A. (1992). Centiles for adult head circumference. *Archives of Disease in Childhood*, 67(10), 1286–1287. <https://doi.org/10.1136/adc.67.10.1286>
- Carmack, J. (2013). *Latency Mitigation Strategies* [letzter Besuch: 18.11.2023]. Verfügbar 3. September 2023 unter <http://web.archive.org/web/20130226131313/http://www.altdevblogaday.com/2013/02/22/latency-mitigation-strategies/>
- Chan, Norman. (2023). *Adam Savage's Tested: Apple Vision Pro Headset Hands-On Impressions!* [letzter Besuch: 18.11.2023]. https://youtu.be/f0HBzePUmZ0?si=ZU_gHtIgeypp_lkc%5C&t=837
- Crumey, A. (2014). Human contrast threshold and astronomical visibility. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 442(3), 2600–2619. <https://doi.org/10.1093/mnras/stu992>
- de Brisis, M. (2019). *Off-axis projection in Unity* [letzter Besuch: 18.11.2023]. <https://medium.com/try-creative-tech/off-axis-projection-in-unity-1572d826541e>
- Europäische Kommission. (2021). *Norm (EN) 301 549* [letzter Besuch: 18.11.2023]. <https://www.barrierefreiheit-dienstekonsolidierung.bund.de/Webs/PB/DE/gesetze-und-richtlinien/en301549/en301549-node.html>
- Fehrmann Tech Group. (2023). *High-tech metals and windows | fehrmann* [letzter Besuch: 18.11.2023]. <https://www.fehrmann.tech/de>
- Freiherr von Lukas, U., Bauer, K., Petersen, A., & Eichholz, J. (2019). Augmented Reality in der Schiffsführung. *Schiff&Hafen*, (6), 16–19.
- Frydenberg, S., Aylward, K., Nordby, K., & Eikenes, J. O. H. (2021). Development of an Augmented Reality Concept for Icebreaker Assistance and Convoy Operations. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(9), 996. <https://doi.org/10.3390/jmse9090996>

- Gernez, E., Nordby, K., Eikenes, J. O., & Hareide, O. S. (2020). A review of augmented reality applications for ship bridges. *Necesse*, 5(3). <https://hdl.handle.net/11250/2721515>
- Greule, R. (2015). *Licht und Beleuchtung im Medienbereich*. Hanser.
- Heaney, D. (2019). *HoloLens 2's Field of View Revealed* (Upload VR, Hrsg.) [letzter Besuch: 18.11.2023]. <https://www.uploadvr.com/hololens-2-field-of-view/>
- Henninger, Mark. (2021). *BenQ TK700STi 4K DLP Gaming Projector Review: Measurements* [letzter Besuch: 18.11.2023]. <https://www.projectorcentral.com/BenQ-TK700STi-Review.htm#Measurements>
- Hertel, J., Schmidt, S., Briede, M., Anders, O., Thies, T., & Steinicke, F. (2023). Welcome AboARd! Evaluating Augmented Reality as a Skipper's Navigator. *2023 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR), Sydney, Australia [in press]*.
- Kooima, R. (2009). Generalized Perspective Projection. <http://160592857366.free.fr/joe/ebooks/ShareData/Generalized%20Perspective%20Projection.pdf>
- Laera, F., Fiorentino, M., Evangelista, A., Boccaccio, A., Manghisi, V. M., Gabbard, J., Gattullo, M., Uva, A. E., & Foglia, M. M. (2021). Augmented reality for maritime navigation data visualisation: a systematic review, issues and perspectives. *Journal of Navigation*, 74(5), 1073–1090. <https://doi.org/10.1017/S0373463321000412>
- Lague, Sebastian. (2020). *Coding Adventure: Portals* [letzter Besuch: 18.11.2023]. <https://www.youtube.com/watch?v=cWpFZbjtSQg>
- Lee, J. M., Lee, K. H., Nam, B., & Wu, Y. (2016). Study on Image-Based Ship Detection for AR Navigation. *2016 6th International Conference on IT Convergence and Security (ICITCS)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICITCS.2016.7740373>
- LG Business Solutions. (2023). *Transparente OLED Touch-Signage: Spezifikationen* [letzter Besuch: 18.11.2023]. <https://www.lg.com/de/business/oled-signage/lg-55ew5tf-a>
- Magic Leap. (n. d.). *Magic Leap Device Guides: Field of View* [letzter Besuch: 18.11.2023]. <https://developer-docs.magicleap.cloud/docs/guides/device/fov/index.html>
- Mankins, J. (1995). Technology Readiness Level – A White Paper.
- Microsoft. (2019). *Introducing Microsoft HoloLens 2* [letzter Besuch: 18.11.2023]. <https://www.youtube.com/watch?v=eqFqtAJMtYE>
- Mihály Héder. (2017). From NASA to EU: the evolution of the TRL scale in Public Sector Innovation. *The Innovation Journal*, 22, 1. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:108288388>
- Miller, L. E., Urban, J. E., Whelan, V. M., Baxter, W. W., Tatter, S. B., & Stitzel, J. D. (2019). An Envelope of Linear and Rotational Head Motion During Everyday Activities. *Biomechanics and modeling in mechanobiology*, 19(3), 1003–1014. <https://doi.org/10.1007/s10237-019-01267-6>
- Morgere, J.-C., Diguët, J.-P., & Laurent, J. (2014). Electronic navigational chart generator for a marine mobile augmented reality system. *2014 Oceans - St. John's*, 1–9. <https://doi.org/10.1109/OCEANS.2014.7003021>

- Musil, R. (2023). *HMD Geometry Database* [letzter Besuch: 18.11.2023]. <https://risa2000.github.io/hmdgdb/>
- National Optical Astronomy Observatory. (2021). *Recommended Light Levels: Recommended Light Levels (Illuminance) for Outdoor and Indoor Venues* [letzter Besuch: 18.11.2023]. https://web.archive.org/web/20210706034730/https://www.noao.edu/education/QLTkit/ACTIVITY_Documents/Safety/LightLevels_outdoor+indoor.pdf
- NaturalPoint. (2023). *Optitrack Docs: Latency Measurements* [letzter Besuch: 18.11.2023]. <https://docs.optitrack.com/developer-tools/natnet-sdk/latency-measurements>
- Nordby, K. (2019). Harmonising maritime workplace design through collaboration, new technologies and open innovation. In *The Naval Architect: International Journal of the Royal Institution of Naval Architects* (S. 22–24, Bd. March 2019 Issue).
- Ocean Industries Concept Lab. (2020). *OpenBridge Design System* [letzter Besuch: 18.11.2023]. <https://www.openbridge.no/>
- OH, J., Park, S., & Kwon, O.-S. (2016). Advanced Navigation Aids System based on Augmented Reality. *International Journal of e-Navigation and Maritime Economy*, 5, 21–31. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enavi.2016.12.002>
- Okazaki, T., Takaseki, R., Shoji, R., & Matsubara, K. (2017). Development of sea route display system by using augmented reality, 3403–3408. <https://doi.org/10.1109/SMC.2017.8123156>
- Rowell, John. (2017). *What is a stop of light?* [letzter Besuch: 18.11.2023]. <https://www.john-rowell.com/blog/2017/3/27/what-is-a-stop-of-light>
- Rowen, A., Grabowski, M., Rancy, J.-P., & Crane, A. (2019). Impacts of Wearable Augmented Reality Displays on operator performance, Situation Awareness, and communication in safety-critical systems. *Applied ergonomics*, 80, 17–27. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2019.04.013>
- Stark. (2021). *Accessible contrast ratios and A-levels explained* [letzter Besuch: 18.11.2023]. <https://www.getstark.co/blog/accessible-contrast-ratios-and-a-levels-explained/>
- Tu, Y.-T. (2016, Februar). *Ray Optics Simulation* [letzter Besuch: 18.11.2023]. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6386611>
- Universität Dortmund. (2023). *Forschungsprojekt WizARd: Veröffentlichungen* [letzter Besuch: 18.11.2023]. <https://wizard.tu-dortmund.de/index.php/veroeffentlichungen/>
- u/sixwaystop313. (2022). */r/questpro: Quest Pro's Color Passthrough is Next Level* [letzter Besuch: 18.11.2023]. https://www.reddit.com/r/QuestPro/comments/11sfjdl/quest_pros_color_passthrough_is_next_level/
- van den Oever, F., Fjeld, M., & Sætrevik, B. (2023). A Systematic Literature Review of Augmented Reality for Maritime Collaboration. *International Journal of Human–Computer Interaction*, 1–16. <https://doi.org/10.1080/10447318.2023.2209838>
- W3C. (n. d.). *Web Content Accessibility Guidelines (WCAG) 2.1* [letzter Besuch: 18.11.2023]. <https://www.w3.org/TR/WCAG21/>

- Wagner, D. (2018). *Motion to photon latency in mobile AR and VR* [letzter Besuch: 18.11.2023]. Verfügbar 20. August 2018 unter <https://medium.com/@DAQRI/motion-to-photon-latency-in-mobile-ar-and-vr-99f82c480926>
- Warburton, M., Mon-Williams, M., Mushtaq, F., & Morehead, J. R. (2022). Measuring motion-to-photon latency for sensorimotor experiments with VR systems. *Behavior research methods*. <https://doi.org/10.3758/s13428-022-01983-5>
- Woodrow, B. (2018). *Aviation Today: EASA Approves Airbus A220 for CAT III Autoland Operations* [letzter Besuch: 18.11.2023]. <https://www.aviationtoday.com/2018/12/05/easa-approves-airbus-a220-cat-iii-autoland-operations/>

Anhang

Der Anhang dieser Arbeit befindet sich auf dem der Printausgabe beigelegten Datenträger. Er umfasst:

- Alle in dieser Arbeit verwendeten Fotos
- Alle in dieser Arbeit verwendeten Diagramme und Visualisierungen
- Die Rohdaten der durchgeführten Latenzmessungen
- Den für die Nutzerbefragung entwickelten Fragebogen
- Das von den Testpersonen auszufüllende Zustimmungsfomular
- Alle aus den Fragebögen transkribierten Daten im .xlsx-Format
- Die Eyetracking-Daten aller Probanden im .edl Format mitsamt kurzer Erklärung ihrer Gewinnung und des Formats
- Die zur Auswertung der Eyetracking-Daten geschriebenen Python-Skripte
- Zusätzliches Bild und Videomaterial der Konstruktion und Erprobung

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Masterarbeit mit dem Titel

Augmented Reality auf der Schiffsbrücke
Entwicklung eines latenzoptimierten Smart-Window-Displays
zur stabilisierten Darstellung von räumlichen Navigationsinhalten

selbstständig und nur mit den angegebenen Hilfsmitteln verfasst habe. Alle Passagen, die ich wörtlich aus der Literatur oder aus anderen Quellen wie z. B. Internetseiten übernommen habe, habe ich deutlich als Zitat mit Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

Hamburg, 22. November 2023

Jan Jessen