Julius-Maximilians-Universität Würzburg
Fakultät für Mathematik und Informatik

Informationstechnik für Luft- und Raumfahrt
Lehrstuhl für Informatik 8 Prof. Dr. Sergio Montenegro





Bachelorarbeit

Implementierung einer HMD-basierten Telemetrie-Anzeige für einen Quadrokopter

Vorgelegt von

Deniz Caliskan

Matr.-Nr.: 1749594

Prüfer: Prof. Dr. Sergio Montenegro

Betreuender wissenschaftlicher Mitarbeiter: Dipl.-Ing. Nils Gageik

Würzburg, 27. 10. 2014

Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit einschließlich aller beigefügter Materialien selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe.
Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder unveröffentlichten Werken entnommen sind, sind in jedem Einzelfall unter Angabe der Quelle deutlich als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form noch nicht als Prüfungsarbeit eingereicht worden.
Mir ist bekannt, dass Zuwiderhandlungen gegen diese Erklärung und bewusste Täuschungen die Benotung der Arbeit mit der Note 5.0 zur Folge haben kann.

Würzburg, 27. 10. 2014

Deniz Caliskan

Aufgabenstellung

Die Fortschritte im Bereich Sensorik, Aktuatorik und Mikrotechnik ermöglichen heute den kostengünstigen Bau kleiner, unbemannter Luftfahrzeuge (UAV, unmanned aerial vehicle, Drohne) wie Quadrokopter. Der Lehrstuhl Informationstechnik für Luft und Raumfahrt der Uni Würzburg forscht an Quadrokoptern und entwickelt dazu eigene Systeme mit dem Forschungsschwerpunkt Autonomie (AQopterI8 Projekt). Ein denkbares Anwendungsszenario von Quadrokoptern ist die Verwendung als Kundschafter, Such- oder Messdrohne. Denkbar wäre hier, dass das System in einem Feuerwehreinsatz die Einsatzkräfte unterstützt und gemachte Messungen den Einsatzkräften auf einem HMD (head-mounted-display) zur Verfügung stellt sowie ein Video-Livestream überträgt. Damit können sich die Einsatzkräfte ein Bild von der Lage machen, ohne sich in Gefahr zu bringen. Zudem könnte eine fliegende Drohne bestimmte Orte schneller erreichen. Hauptaugenmerk dieser Arbeit ist die Erstellung einer HMD-basierten Telemetrie-Anzeige und die Integration in das bestehende System. Dazu soll die bestehende Telemetrie-Anzeige für den PC in einer geeigneten Weise für das HMD erweitert werden, so dass sich Telemetrie-Daten auf dem HMD anzeigen lassen. Dazu gehören ein Videobild und eine Anzeige für einen künstlichen Horizont. Hierzu ist die Qt-Software um eine HMD-Funktionalität zu erweitern. Der zweite wesentliche Aufgabenpunkt ist die Diskussion und Implementierung einer geeigneten Funkstreckenlösung. Der entfernte Quadrokopter muss seine Daten drahtlos an die Bodenstation und nach Möglichkeit auch drahtlos an das HMD übermitteln können. Hier sind grundsätzlich unterschiedliche Lösungen denkbar, wobei eine möglichst praktikable, robuste und kostengünstige Lösung vorzuziehen ist. Zur Arbeit gehört eine ausführliche Dokumentation. Aufgabenstellung (Stichpunktartig):

- Programmierung HMD-Anzeige in Qt
- Integration in bestehendes System, Verwendung bestehender Telemetrie
- Video-Anzeige, Künstlicher Horizont
- Drahtlose Kommunikationslösung
- Evaluierung
- Dokumentation (Quellcode Wiki)

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit erweitert das bereits bestehende System des Forschungsquadrocopters AqopterI8 der Universität Würzburg um eine Headmounted Display Funktionalität. Bisher ist der Quadrokopter in der Lage autonom zu starten, zu landen und Hindernissen auszuweichen. Dies war ein bedeutender Schritt in Richtung seiner geplanten Verwendung als voll autonome Kundschaftler, Such- und Messdrohne. Durch die montierte Kamera kann ein Video aufgenommen werden. So kann die Umgebung des Quadrocopters aus einer sicheren Distanz betrachtet werden ohne selbst in Gefahr zu geraten. Um den Untersuchung von beispielsweise brennenden Gebäuden so effizient wie möglich zu gestalten ist dabei neben einer guten Bildqualität auch eine Anzeige der gemessenen Telemetriedaten erforderlich. Daher werden die Videodaten drahtlos an ein HMD übertragen. Um die Benutzung noch einfacher und effektiver zu gestalten, werden die Telemetriedaten auf eine geeignete Art und Weise angezeigt. Zusätzlich wurde ein künstlicher Horizont implementiert um dem Benutzer so die Orientierung im Raum zu erleichtern. Als zweiten Teil der Arbeit gilt es das bereits bestehende System zur Übertragung der Videodaten zu optimieren und eine möglichst ideale drahtlose Videodatenübermittlung zu implementieren. Anschließend an die Evaluierung der Resultate erfolgt ein Ausblick, in dem auf die sich durch die Implementierung ergebenen Möglichkeiten eingegangen wird.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **1**

2 Grundlagen und Stand der Technik **3**

2.1 Augmentierte Realität . . . 3

2.1.1 Einführung . . . 3

2.1.2 Geschichte und Anwendung . . . 4

2.1.3 Ziele, Probleme und Grenzen . . . 7

2.2 Headmounted Display . . . 9

2.2.1 Mathematische Grundlagen . . . 9

2.2.2 Biologische Aspekte von Simulationen und Raumwahrnehmung . . . 21

2.2.2.1 Motion Sickness . . . 23

2.2.3 Allgemeine Funktionsweise . . . 25

2.2.4 Vergleichbare Systeme: Einsatz in Drohnen . . . 28

2.2.4.1 AirRobot AR 100-B . . . 28

2.2.4.2 AR Drone . . . 30

2.3 Grundlagen der Funkübertragung . . . 31

3 Konzept **33**

3.1 Überblick . . . 34

3.2 Drahtlose Kommunikation . . . 37

3.2.1 Direkte Kommunikation . . . 37

3.2.2 Online Kommunikation . . . 40

4 Implementierung **43**

4.1 Aufbau . . . 44

4.1.1 Software 45
4.1.2 Hardware 48
4.2 Funkstrecke 50

5 Evaluierung 53
5.1 Auswahl des HMD 53
5.2 Evaluierung der Bildwiederholrate 56
5.3 Evaluierung der Funkstrecke 59

6 Diskussion und Ausblick 62
6.1 Ergebnisse 62
6.2 Ausblick 63

7 Literaturverzeichnis 65

Abbildungsverzeichnis

2.1 Unterschied Realität und erweiterte Realität (verändert nach [29]) . . . 3
2.2 Milgram Diagramm (nach [19]) . . . 4
2.3 Der Ultraschall Kopfpositionierungssensor in Nutzung [27] . . . 5
2.4 Das Striker II Helmet-Mounted Display[3] . . . 5
2.5 Einsatz eines VR-HMDs zu Trainingszwecken [66] . . . 6
2.6 Die reale und die augmentierte Ansicht des Hera-Tempels [30] . . . 7
2.7 Erstellen einer Abbildung an einer Sammellinse [55] . . . 10
2.8 Funktionsweise einer Lochkamera [18] . . . 11
2.9 Vergleich zwischen Auge und Camera obscura [5]. . . . 12
2.10 Verschiedene Verzeichnungen in Abhängigkeit der Blendenposition [28] . . . 14
2.11 Kissenverzeichnung [40] . . . 14
2.12 Tonnenverzeichnung [40] . . . 15
2.13 Translation eines Koordinatensystems [16] . . . 17
2.14 Rotation eines Koordinatensystems [17] . . . 18
2.15 Darstellung der Umrechnung zwischen Polar- und kartesischen Koordinatensystemen [8]. . . . 19
2.16 Von links nach rechts: Diagramm des menschlichen Auges (horizontal geschnitten); die zwei Arten der Bewegungswahrnehmung: A Bewegung des Bildes, B Bewegung des Auges [15]. . . . 21
2.17 Das vestibuläre System. Die braun hervorgehobenen Kanäle (anterior, posterior und horizontal) sind für die Wahrnehmung von Kopfdrehungen zuständig, Utriculus und Sacculus nehmen translatorische Bewegungen wahr [15]. . . . 22
2.18 Illustration eines Vides see-through HMDs [2] . . . 26

2.19 MIKADO der Bundeswehr im Flug [7] 29
2.20 AR Drone von Parrot [1] 30
2.21 Darstellung einer elektromagnetische Welle, ... 31

3.1 Konzept: Hinzufügen einer HMD- Anzeige 33
3.2 Konzept unabhängig von der Bodenstation 34
3.3 Konzept mit Nutzung einer Bodenstation 35
3.4 Beispielhaftes Konzept eines Displays mit den eingeblendeten Telemetriedaten . 36
3.5 Direkte Verbindung zwischen HMD und Quadrocopter 38
3.6 Konzept einer möglichen Funkstreckenlösung 39
3.7 Links: Funkübertragung mit Bluetooth, rechts: Funkübertragung mit Infrarot . . . 40
3.8 Verbindung zwischen HMD und Quadrocopter über einen Server 41

4.1 Schematisches Blockdiagramm des vollständigen Systems. Komponenten des bestehenden Systems sind Grau hinterlegt. 43
4.2 Blockdiagramm der erstellten Software 45
4.3 Koordinatensysteme in OpenGL und für das jeweilige Auge 46
4.4 Ausschnitt einer Anzeige auf dem Oculus Rift Developer Kit 2 wie sie durch die Videobrille zu sehen ist. 47
4.5 User Interface für das HMD 48
4.6 Oculus Rift developer kit 2 49
4.7 Das Funkübertragungs-Set von Conrad 50
4.8 Beispiel einer mobilen USB-Ladestation 50
4.9 Schematischer Aufbau einer Teamviewer Sitzung mit mehreren Nutzern 51
4.10 Anmeldeprozess bei der Teilnahme an einem Meeting 52

5.1 Remote Control des Quadrocopters durch eine Bodenstation (in diesem Fall das Notebook) 59
5.2 Testaufbau für eine Verbindung mit mehreren Geräten. 60

Tabellenverzeichnis

1 Vergleich zwischen den gängigen HMDs in Hinsicht auf maximale Auflösung, Kosten und Sichtfeld Stand: Oktober 2014 53
2 Vergleich zwischen den gängigen HMDs in Hinsicht auf den Typ und das verwendete Display Stand: Oktober 2014 54
3 Test der Framerate auf einem Laptop 57
4 Test der Framerate auf dem AQopterI8 Quadrocopter der Universität Würzburg . 58

1 Einleitung

Die rasante Entwicklung im Bereich der Sensorik und Mikrotechnik der letzten Jahre hat nicht nur neue Technologien ermöglicht, sondern auch dazu beigetragen bestehende Technologien zu optimieren. Dies betrifft nicht nur Computer und Maschinen, die immer effizienter und selbständiger werden, sondern auch Roboter und Drohnen. Autonome Luftfahrzeuge (Unmanned Aerial Vehicles, UAVs, auch Drohnen) können inzwischen so kompakt gestaltet werden, dass sie sogar für den Einsatz innerhalb von Gebäuden geeignet sind und dabei autonom ihren Weg finden und Kollisionen vermeiden können. Von besonderem Interesse sind hierbei Quadrocopter, die eine Unterart der Drohnen sind. Die Aufklärungsdrohne MIKADO (AirRobot AR100-B) der Bundeswehr, ein mit Kameras und Sensoren ausgestatteter Quadrocopter, der bereits 2006 auf der CeBIT vorgestellt wurde, kann aufgrund ihrer Größe und Steuerung nur außerhalb von Gebäuden eingesetzt werden . Der am Lehrstuhl für Informatik 8 im Rahmen des Projekts AQopterI8 verwendete Quadrocopter ist wesentlich kleiner als der sich bei der Bundeswehr im Einsatz befindende AR100-B und außerdem für den Einsatz innerhalb von Gebäuden optimiert. Des Weiteren verfügt er über Infrarot und Ultraschallsensoren, die Hinderniserkennung und Kollisionsvermeidung ermöglichen. Im Rahmen des Projekts „Lebensretter mit Propellern“ wurde außerdem eine Methode implementiert mit der der Quadrocopter Objekte autonom lokalisieren und zählen kann. Ziel des Projekts AQopterI8 ist die Entwicklung eines autonomen Quadrocopters, der Erkundungs- und Suchaufgaben durchführen kann und die Ergebnisse per Funk an den Benutzer sendet. Autonom bedeutet in diesem Fall, dass der Quadrocopter selbstständig in der Lage ist ein Gebäude zu erkunden, sich also ohne externe Steuerung im Gebäude zurechtfindet, es erkundet und nach vollendeter Mission auch wieder aus dem Gebäude herausfindet. Der Quadrocopter ist dabei mit mehreren Kameras ausgestattet. Die während des Fluges aufgezeichneten Videodaten können, ebenso wie die gemessenen Telemetriedaten, in Echtzeit an die Einsatzkräfte vor Ort übermittelt werden. So wären diese der Lage sich ein Bild der Situation im Inneren zu machen

und entsprechend zu reagieren ohne dabei selbst unmittelbar in Gefahr zu geraten. Um den Einsatzkräften ein besseres Bild der Lage zu ermöglichen, ist es denkbar, die Darstellung der Daten über ein Headmounted Display (kurz HMD), also einen Bildschirm, der direkt vor den Augen befestigt ist, vorzunehmen. Da dadurch das gesamte Sichtfeld des Nutzers von dem Kamerabild abgedeckt wird, hat dieser das Gefühl, sich mitten im Geschehen zu befinden und kann Brandherde, mögliche Risiken und sich noch im Gebäude aufhaltende Menschen sowie sichere Pfade für die Rettungskräfte zu diesen ermitteln ohne vor Ort sein zu müssen. Ein Quadrocopter ermöglicht ihm auch sich in Vogelperspektive einen Überblick über die Lage zu verschaffen oder Einsicht in für den Menschen nicht zugängliche, aber für den kleineren, wendigeren Quadrocopter erreichbare Bereiche, wie verschüttete Gebäude, zu erhalten. Durch das HMD entsteht das Gefühl der Immersion, da der Nutzer das Geschehen vor Augen hat und ein Gefühl entwickelt als sei er mittendrin. Wobei der Begriff der Immersion, der das Eintauchen in die virtuelle Welt beschreibt, später in Kapitel 2 noch näher erläutert wird. Der Feuerwehrmann sieht dem Quadrocopter also nicht nur über einen Bildschirm zu, sondern hat das Gefühl selbst in dem brennenden Gebäude oder dem eingestürzten Minenschacht zu sein, ohne sich dabei unmittelbar in Gefahr zu bringen. In der hier vorliegenden Arbeit wird ein solches System für den Forschungsquadrocopter AQopterI8 der Universität Würzburg implementiert. Dabei wird nicht nur das Kamerabild auf ein geeignetes HMD übertragen, sondern auch eine Möglichkeit geschaffen, bestimmte Telemetriedaten direkt auf den Bildschirm zu projizieren. Ein wichtiger Aspekt hierbei ist, dass die Daten sicher, effizient und falls nötig über längere Strecken, beispielsweise bei Waldbränden oder bei Verwendung in weitläufigen Gebäuden, übertragen werden können. Hierfür werden verschiedene Funkstreckenlösungen, welche die Daten optimal drahtlos und sicher sowohl an das HMD als auch an die Bodenstation versenden können, in Hinsicht auf Praktikabilität, Robustheit und den Kostenfaktor diskutiert. Die Arbeit ist so aufgebaut, dass zunächst die für die Implementierung benötigten Grundlagen und der derzeitige Stand der Technik erläutert (Kapitel 2) In Kapitel 3 wird das Konzept der Arbeit zur Erweiterung des bestehenden Systems vorgestellt. Daraufhin wird die praktische Implementierung (Kapitel 4) näher erläutert. Abschließend werden nach der Evaluierung der Umsetzung (Kapitel 5) die erzielten Ergebnisse diskutiert (Kapitel 6) und auf zukünftige Methoden und Möglichkeiten eingegangen.

2 Grundlagen und Stand der Technik

2.1 Augmentierte Realität

2.1.1 Einführung

Das Realitätsempfinden des Menschen wird bestimmt durch optische, akustische und visuelle Wahrnehmungen, die er von seiner Umgebung bekommt. Unter Realität versteht man eine unmittelbar wahrnehmbare Umwelt. Wird nun mithilfe von elektronischen Hilfsmitteln diese Wahrnehmung verändert und mit zusätzlichen Informationen überlagert, spricht man von Augmented Reality (deutsch: erweiterte Realität). Der Begriff Augmented Reality beschreibt die Erweiterung der Wahrnehmung mit zusätzlichen Informationen in Echtzeit. Im Deutschen wird diese künstliche Veränderung der Realität auch als erweiterte Realität oder auch augmentierte Realität (kurz AR) bezeichnet.[2] [43]

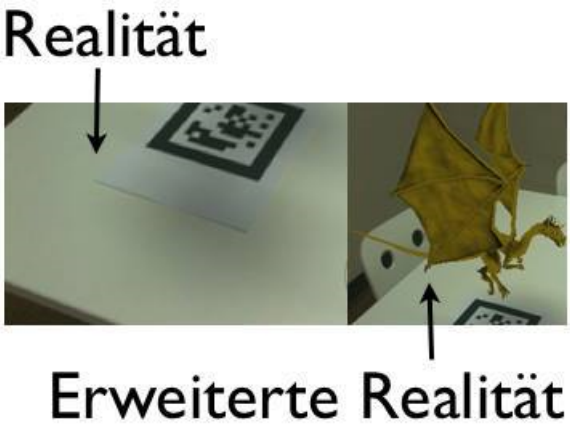


Abbildung 2.1: Unterschied Realität und erweiterte Realität (verändert nach [29])

Dabei ist die Erweiterung nicht begrenzt auf das Visuelle auch akustische und haptische Erweiterungen sind möglich wie beispielsweise bei Anwendungen für blinde Menschen.[13] Streng genommen fällt jede Veränderung der Realität darunter, zum Beispiel wenn über eine Video- Aufnahme eine Einblendung gelegt wird, oder ein roter Kreis um eine interessante Szene, die sonst nur auf den zweiten Blick zu sehen wäre, oder die Tordistanz bei einem Freistoß.[43] Allgemein assoziiert man mit der erweiterten Realität jedoch größere Änderungen, wie virtuelle Objekte, die in der realen Welt so platziert sind, dass der Betrachter sie für real hält. Im Gegensatz zur Virtual Reality ersetzt AR die reale Welt nicht, sondern ergänzt sie. In der Definition von Milgram und Kishino, wird das das gesamte Spektrum von der unaugmentierten Realität über die gemischte Realität bis zur virtuellen Realität veranschaulicht.

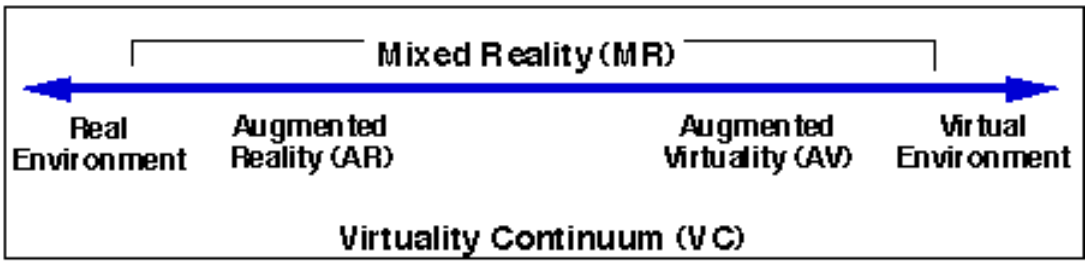


Abbildung 2.2: Milgram Diagramm (nach [19])

Während bei einer virtuellen Realität nur virtuelle Objekte wahrgenommen werden können und die Realität ausgeblendet wird, werden bei einer gemischten Realität sowohl echte als auch virtuelle Objekte wahrgenommen [19]. Die meist zitierte Beschreibung ist jedoch die von Ronald T. Azuma 1997 veröffentlichte Definition für die technischen Möglichkeiten und Verwendungen der AR. Dabei legt er sich auf folgende Definition fest: AR kombiniert die reale und die virtuelle Welt, ist in Echtzeit, interaktiv, und ist dreidimensional [2].

2.1.2 Geschichte und Anwendung

Einer der Pioniere der AR ist Ivan E. Sutherland, der bereits 1968 ein System konstruierte, bei dem ein Benutzer mittels eines HMDs virtuell geschaffene Objekte um sich herum betrachten konnte. Dabei wurden die Objekte durch das System in die Realität eingeblendet und die angezeigte Sicht abhängig von der Kopfdrehung des Benutzers angepasst. Gefördert wurde dieses

Projekt durch das Verteidigungsministerium der Vereinigten Staaten und der Advanced Research Projects Agency (ARPA). Aufgrund von Größe und Gewicht wurde dieses erste HMD noch an der Decke montiert.[27]



Abbildung 2.3: Der Ultraschall Kopfpositionierungssensor in Nutzung [27]

Nach ersten Versuchen mit sogenannten Helmet-mounted Sights Mitte der 1970er Jahre, fanden in den Achziger Jahren bereits kleinere, im Helm eines Piloten befestigte, sogenannte Helmet-mounted Displays, militärische Verwendung. Hier wurden zusätzlich zu der realen Umgebungs-Wahrnehmung des Piloten noch weitere relevante Informationen eingeblendet. Diese Informationen waren zum Beispiel den Flug betreffende Daten, wie ein künstlicher Horizont und Höhe und Richtung des Flugs, aber auch Informationen zur Steuerung der Bordwaffen, wobei Lesbarkeit, Präzision und Geschwindigkeit der Anzeige bei dieser Displayart von besonderer Bedeutung sind [2] [49] [3]



Abbildung 2.4: Das Striker II Helmet-Mounted Display[3]

Von den 1997 von Azuma beschriebenen Möglichkeiten wurden vor allem die militärische Verwendung sowie die Verwendung in der Filmindustrie entwickelt. So sollten laut Azuma zukünftige Kampfflugzeuge serienmäßig mit in den Helm montierten Displays ausgestattet sein [2]. Dies ist z.B. beim Eurofighter Typhoon umgesetzt worden [49]. Im Militär ist es inzwischen durchaus üblich Einsätze, wie Gefechtssituationen oder Fallschirmsprünge zu Unterrichtszwecken mittels AR und VR über HMDs zu simulieren [66] [22].



Abbildung 2.5: Einsatz eines VR-HMDs zu Trainingszwecken [66]

Ziviler Nutzen der AR wurde erst seit den 1990ern erforscht. Das 1997 erschienene Paper „A Survey of Augmented Reality“ schilderte bereits vielfältige zivile Verwendungsmethoden, unter anderem in der Medizin, bei Wartungs- und Reparaturarbeiten, in der Stadtplanung oder auch zur Unterhaltung [2]. Mit erweiterter Realität ließe sich auch die bereits von Azuma vorgeschlagene Methode der Stadtplanung verwirklichen. So ist man in der Lage eventuelle Sichtbehinderungen schon im Voraus abzusehen indem ein geplantes Gebäude erst virtuell an seinem Standort platziert wird. Auch das Innenleben eines Gebäudes, mit allen Rohren und Kabeln auf dem Gebäude kann durch AR projiziert dargestellt werden [2]. In der Medizin ergibt sich der größte zivile Nutzen, hier könnten mittels Augmented Reality kritische Eingriffe unterstützt werden, indem die genaue Lage eines Tumors oder die beste Bohrerposition für einen gehirnchirurgischen Eingriff auf den Patienten projiziert werden [2]. 2002 stellten Vlahakis et al. ein Projekt vor, bei dem es Touristen und Archäologen ermöglicht ist einen verfallen Tempel mittels AR-Simulation so zu betrachten, wie er zu seiner Blütezeit ausgesehen haben könnte. Dabei wird aus der realen Wahrnehmung

des Benutzers die entsprechende Ansicht des Tempels generiert und über der Ruine eingeblendet [30].



Abbildung 2.6: Die reale und die augmentierte Ansicht des Hera-Tempels [30]

Auch bei verschiedenen Einsätzen die Menschen Leben retten können wie etwa bei einer Bergrettung, Feuerwehr Einsätzen und Einsätzen in Katastrophengebieten könnte AR von großem Nutzen sein. So können Einsatzkräfte selbst unter schwierigen Bedingungen wie schlechten Sichtverhältnissen durch beispielsweise Rauch, Brand, Dunkelheit oder schlechte Wetterverhältnisse wertvolle Informationen erhalten. Dies können Umgebungsinformationen wie eine Karte, die Temperatur, Infrarotaufnahmen und vieles mehr sein. Die Informationen können sie für den Einsatz verwenden um die Einsätze so sicher und schnell wie möglich durchzuführen [68] [24]. Dabei sind Zuverlässigkeit und intuitive Bedienbarkeit für den praktischen Einsatz einer AR unerlässlich.

2.1.3 Ziele, Probleme und Grenzen

Zusammenfassend kann man sagen, dass AR das Ziel hat Einfluss in die Wahrnehmung der realen Welt des Nutzers zu nehmen und ihm so mehr Interaktionsmöglichkeiten mit dieser zu bieten. Die Wahrnehmung der Umgebung soll hierbei nicht nur erweitert sondern im Idealfall auch effizienter gestaltet werden. Dem Benutzer wird so der Zugang zu Informationen ermöglicht, die im aktuellen Kontext sinnvoll sind und in direktem Zusammenhang mit seiner Umgebung stehen [2]. Trotz der breit gefächerten Anwendungsgebiete für AR, ergeben sich bei der technischen Umsetzung in

jedem Bereich sehr ähnliche Schwierigkeiten, die die erweiterte Wahrnehmung beeinträchtigen können. Um ein den Anforderungen entsprechendes System zu schaffen, muss eine große Anzahl von funktional abhängigen Modulen so effizient wie möglich zusammenwirken. Die Position des Benutzers sowie seine Blickrichtung und Orientierung müssen durch das System erkannt werden. Die visuelle Darstellung muss an diese Parameter angepasst werden. Dazu ist die Verwaltung und strukturierte Verarbeitung der benötigen auf die Umgebung bezogenen Informationen erforderlich. So sind die Vereinigung künstlich erstellter Bilder mit realen Objekten und die Präsentation der erhaltenen Daten in einer entsprechenden benutzerfreundlichen Form möglich [23]. Abhängig von der Anwendung wird ein teilweise sehr großer Datensatz benötigt, der alle Objekte und Informationen enthält, die in den verschiedenen sich potentiell ergebenden Situationen angezeigt werden sollen. Daraus ergeben sich zwei entscheidende Schwierigkeiten vor die jedes System, das erweiterte Realität implementiert, gestellt ist. Die erste ist die Echtzeitforderung, darunter versteht man die Forderung nach kontinuierlicher, flüssiger Darstellung von Bewegung. Dazu ist es erforderlich in jeder Sekunde mindestens 25, im Idealfall sogar mehr als 30, Einzelbilder, sogenannte Frames, zu zeigen. Ab dieser Grenze kann das menschliche Auge keine einzelnen Bilder mehr erkennen, die dargestellten Abläufe wirken flüssig. Auch virtuelle Objekte müssen demnach mit 30 fps (frames per second, Frames pro Sekunde) dargestellt werden. Um diese Forderung erfüllen zu können müssen die Lage und Orientierung der virtuellen Objekte innerhalb von weniger als 34 ms berechnet, generiert und dargestellt werden [45]. Als zweites muss versucht werden die Latenz zwischen Aufnahme und Darstellung eines Signals so gering wie möglich zu halten. Durch zu große Verzögerungen können Symptome wie Schwindel, Übelkeit oder sogar Desorientierung auftreten. Diese Beschwerden werden zusammengefasst als Cyber Sickness bezeichnet und sollten der Benutzerfreundlichkeithalber nach Möglichkeit minimiert werden [2] [59] [64]. Die durch die Software und die Menge der Hardwarekomponenten bedingte Zunahme der Komplexität korreliert mit einer steigenden Fehleranfälligkeit. Die menschliche Wahrnehmungsfähigkeit ist in der Lage selbst kleinste Abweichungen zu erkennen, daher ist die Exaktheit der Messungen und Berechnungen von großer Bedeutung. Es gilt bei der Anwendung von AR-Systemen zu berücksichtigen, dass insbesondere kritische Anwendungen zuverlässig und ausfallsicher sein müssen. Die von einem AR-System zur Verfügung gestellten Informationen sollten nach Möglichkeit gut für den Benutzer wahrnehmbar sein, damit dieser den größtmöglichen praktischen Nutzen daraus ziehen kann. Ein Headmounted Display könnte dem Anwender orts- oder kontextbezogene Infor-

mationen, die von einem AR-System generiert werden, übermitteln. So könnte eine verbesserte und effizientere Umgebungswahrnehmung geschaffen werden.

2.2 Headmounted Display

Als Display wird in der vorliegenden Arbeit ein Headmounted Display (kurz: HMD) verwendet. Daher wird an dieser Stelle noch einmal auf HMDs eingegangen.

2.2.1 Mathematische Grundlagen

Grundlagen der Optik

In diesem Kapitel werden die für das Verständnis eines Headmounted Displays nötigen Grundlagen näher erläutert. Für die Darstellung der aufgezeichneten Videodaten auf einem Headmounted Display sind sowohl Grundlagen der Optik, wie Abbildungen und Verzerrungen sowie deren Korrektur, als auch Koordinatentransformation von besonderer Bedeutung.

Optische Abbildung

Unter einer Optischen Abbildung versteht man die Erzeugung der Abbildung eines Gegenstandes unter Verwendung eines optischen Systems. Das von jedem Punkt des abzubildenden Gegenstands ausgehende Licht durchläuft ein optisches System und wird daraufhin wieder in Bildpunkte vereinigt. Aus diesen Bildpunkten entsteht eine Abbildung des Gegenstands. Ein optisches System kann aus Linsen, Prismen, Spiegeln und Blenden bestehen und ist in der Lage eine optische Abbildung zu erzeugen [26] [25].

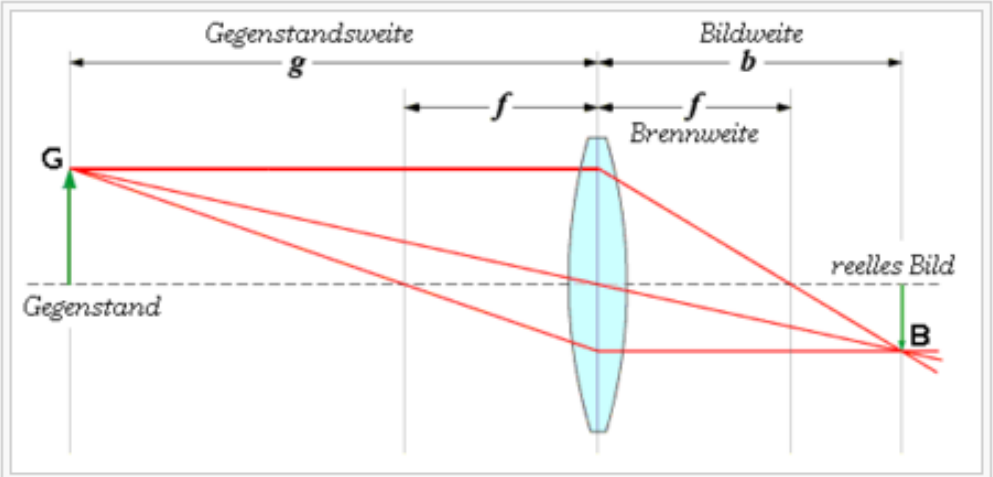


Abbildung 2.7: Erstellen einer Abbildung an einer Sammellinse [55]

Eine Sammellinse hat eine positive Brechkraft, das bedeutet, dass sie parallel einfallendes Licht in ihrer Brennebene sammelt. Licht, das parallel zur optischen Achse einfällt, wird im Brennpunkt fokussiert. Parallel einfallendes Licht wird so zu konvergentem Licht, was reelle Abbildungen ermöglicht [55]. Anhand der in Abbildung 2.7 abgebildeten Sammellinse kann man mittels der sogenannten Linsengleichung oder Abbildungsgleichung die Beziehung zwischen dem abzubildenden Gegenstand, der Abbildung und der benötigen Brennweite berechnen.

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{b} + \frac{1}{g} \tag{2.1}$$

Hierbei bezeichnet b die Bildweite, die Entfernung zwischen Abbildung und Linse, g die Gegenstandsweite, die Entfernung des Gegenstands zur Linse und f die Brennweite der Linse. Aus dem Verhältnis zwischen der Größe des Gegenstands und der Größe seiner Abbildung sich der Abbildungsmaßstab A berechnen:

$$A = \frac{B}{G} = \frac{b}{g} \tag{2.2}$$

Diese Gleichung, die auch die erste Linsengleichung war, beschreibt die Abbildung eines Gegenstands mittels Licht durch eine Sammellinse oder ein kleines Loch, in einem lichtdichten Hohlkörper, wie einer sogenannten Camera obscura oder Lochkamera [36] [37].

Camera Obscura

Der Begriff Camera obscura ist aus den lateinischen Wörtern für Kammer und dunkel hergeleitet. Sie wird auch als Lochkamera bezeichnet, wobei Lochkamera für Konstruktionen ohne Linse verwendet wird. Die Lochkamera besteht aus einem geschlossenen, lichtdichten Raum in den durch ein Loch oder eine Linse Licht hereinfällt [36] [37]. Das Licht bildet die vor der Linse befindlichen Gegenstände auf dem Kopf und spiegelverkehrt ab. Diese Abbildung des Gegenstandes wird auch Projektion genannt, sie entsteht auf der Rückwand der Kamera, auf der Projektionsfläche [36] [37]. Die Abbildung kann mit der zuvor beschriebenen Abbildungsgleichung beschrieben werden. Hierbei fällt auf, dass die Abbildung im Gegensatz zum realen Objekt nur zweidimensional ist, da räumliche Informationen, die auf derselben Projektionsgerade liegen, auf denselben Punkt abgebildet werden.

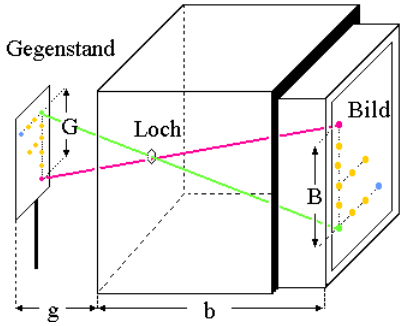


Abbildung 2.8: Funktionsweise einer Lochkamera [18]

Im Prinzip kann die Camera obscura als abstraktes Modell für Kameras mit einem punktförmigen Projektionszentrum und einer glatten und geraden Projektionsfläche, also für die meisten Kameras mit Ausnahme von Panoramakameras und 360°-Kameras, betrachtet werden. Der Abbildungsvorgang ist auch bei modernen Kameras, die eine oder mehrere Linsen anstelle des Lochs verwenden, gleich, es wird hier eine ideale Linse mit dem optischen Zentrum im Linsenmittelpunkt angenommen. In der Realität erfolgt zusätzlich eine Anpassung durch Parameter. So werden Abweichungen wie sie zum Beispiel durch eine Linse entstehen können, oder durch die unterschiedliche Skalierung bei der Abbildung auf einen CCD-Chip, der in digitalen Kameras als Projektionsfläche dient und statt des metrischen Systems das in der Außenwelt vorliegt Pixel verwendet, auftreten korrigiert [39]. Das Prinzip wurde erstmals unabhängig voneinander von Mozi (470-390 v.Chr) und Aristotetels (384-322v.Chr) beschrieben. Euklid kam schon ca. 300 vor

Christus zu dem Schluss, dass die Camera obscura den geraden Strahlengang des Lichts demonstriert [37]. Konstruktionen, bei denen ein Bereich des Kastens (entweder die Rückwand oder, bei Verwendung einer Spiegelkonstruktion, der hintere, obere Bereich des Kastens) durchsichtig war, ermöglichten dem Benutzer die abgebildete Ansicht abzumalen, wenn er mit einem Tuch oder Zelt für die nötige Verdunkelung sorgte. So konnten bereits im Mittelalter detaillierte Landschaftszeichnungen angefertigt werden. Der Einsatz von Linsen legte schließlich den Grundstein für die moderne Fotografie [36].

Historische Bedeutung der Camera Obscura

LLeonardo da Vinci war der erste Mensch, der das bildgebende Verfahren im Auge mit der Camera obscura verglich. Seine Analyse des Sehens basierte auf Alhazens Werken und er nahm aus denselben Gründen wie dieser an, dass es im Auge einen Apparat geben müsse, der die auf dem Kopf stehenden Bilder wieder richtig dreht. Da Vincis Vermutung war, dass es im Auge etwas geben müsse, mit dem sich der Transfer von der Camera obscura zum korrekten Bild physikalisch und optisch erklären lässt. Er stellte die Theorie auf, dass sich die Strahlen im crystallinus, dem Glaskörper, ein weiteres Mal schneiden und so letztendlich das wahrgenommene, korrekte Bild entsteht [5].

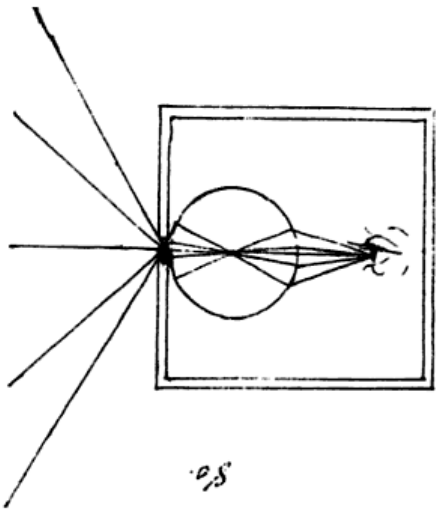


Abbildung 2.9: Vergleich zwischen Auge und Camera obscura [5].

Leonardo selbst gab zu, dass die Notwendigkeit diese Annahme beweist. Mangels geeigneter Analysemethoden konnte er zu keinem anderen Schluss gelangen als diesem, seine Erkenntnis-

se wiesen jedoch schon stark daraufhin dass das Auge vor allem ein physikalisches „Wahrnehmungswerkzeug“ ist, die eigentliche Wahrnehmung aber nicht im Auge geschieht. Dies soll in Kapitel 2.2.2 ausführlicher besprochen werden.

Optische Aberration

Während die betrachteten Objekte bei der Wahrnehmung durch das Auge in der Regel ohne Verzerrungen abgebildet werden, können bei der Abbildung mit Linsen Fehler, wie Verzerrungen oder Unschärfe auftreten. Diese werden auch als Aberrationen bezeichnet. Eine optische Aberration ist eine Abweichung der Abbildung von der idealen Position des Punktes durch ein optisches System wie etwa einer Linse. Radialsymmetrische optische Aberrationen werden Verzeichnung genannt. Unter Verzeichnungen versteht man geometrische Abbildungsfehler, die in Abhängigkeit vom Bildmittelpunkt, also dem Schnittpunkt der optischen Achse mit der Bildebene, eine nichtlineare Verzerrung der Abbildung bewirken. Anders als bei anderen Abbildungsfehlern kommt es bei Verzeichnungen nicht zu Unschärfe der Abbildung, sondern zur Krümmung der Anzeige und somit zur Veränderung des Abbildungsmaßstabes mit zunehmendem Abstand zum Bildmittelpunkt. Dabei gibt es zwei verschiedene Möglichkeiten. Vergrößert sich das Seitenverhältnis, so spricht man von einer kissenförmigen Verzeichnung (engl. pincushion distortion). Verkleinert sich der Abstand so handelt es sich um eine tonnenförmige Verzeichnung (engl. barrel distortion). Maßgeblich für die Art der Verzeichnung ist die Lage der Blende. Ist diese hinter der Linse, wie es beispielsweise bei Monitoren der Fall ist, so ist eine kissenförmige Verzeichnung zu beobachten (Abbildung 2.10). Je näher die Blende an der Linse ist, desto mehr nähert man sich einer orthoskopischen Projektion, also einer raumrichtigen Abbildung ohne Verzerrungen [20] [28].

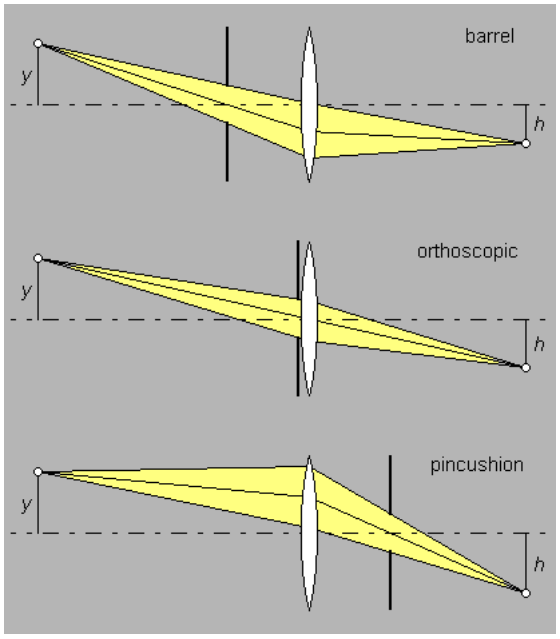


Abbildung 2.10: Verschiedene Verzeichnungen in Abhängigkeit der Blendenposition [28]

Kissenverzeichnung

EEine Kissenverzeichnung ist eine optische Aberration bei der die Pixelvergrößerung mit wachsendem Abstand zur optischen Achse ansteigt. Dadurch wirken die Linien, die nicht durch das Zentrum der Abbildung gehen, konkav in Richtung der Achse verbogen (Abbildung 2.11). Der Name stammt von der kissenförmigen Erscheinung der Verzeichnung [28] [40].

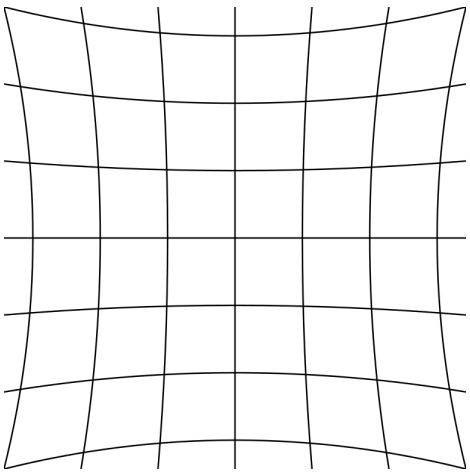


Abbildung 2.11: Kissenverzeichnung [40]

Tonnenverzeichnung

Bei der Tonnenverzeichnung verringert sich die Vergrößerung bei jedem Punkt mit wachsendem Abstand zum Bildmittelpunkt. Dadurch wölbt sich das Bild nach außen. Die Punkte, die näher an der optischen Achse liegen wirken vergrößert, während die Punkte weiter außen kleiner zu werden scheinen. Dadurch wirkt es für den Betrachter, als sei das Bild um eine Tonne herum abgebildet worden. [28][40]

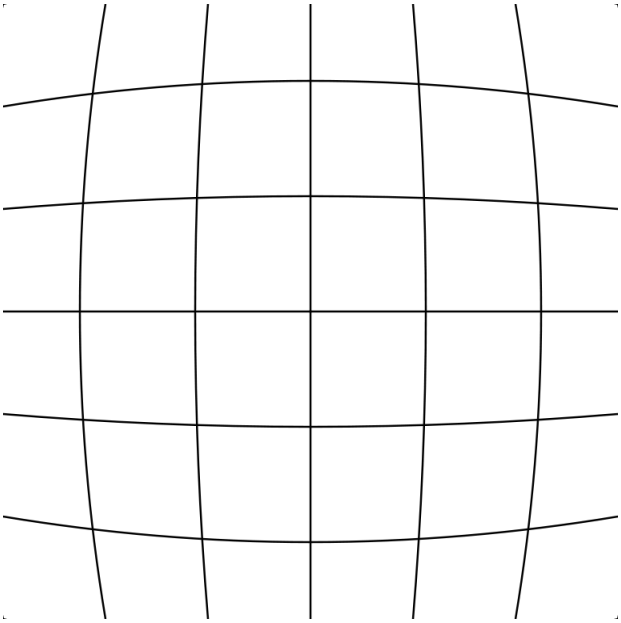


Abbildung 2.12: Tonnenverzeichnung [40]

Korrektur von Verzeichnungen

Es ist heutzutage möglich auch mit günstigeren Linsen hochwertige Bilder zu erstellen, indem die auftretenden Verzeichnungen mittels Software korrigiert werden. Dazu wird sich die radialsymmetrische Eigenschaft der Aberration zunutze gemacht. Der Ursprung des Polarkoordinatensystems wird an dem Punkt gesetzt, an dem die optische Achse die Bildebene schneidet. Der relative Abstand eines Punktes zu diesem Bildmittelpunkt ist der Radius r. Der Wert r = 1 entspricht dem Rand der Abbildung. Die Abbildungsfunktion L(r) beschreibt die Art der Verzeichnung. Dabei ist L(r) der Abstand von der optischen Achse zum Bildmittelpunkt, wenn r der Abstand von der Objektebene zur optischen Achse ist. Ist L(r) = r so ist die Abbildung optisch korrekt und es treten

keine Verzeichnungen auf. Die diagonale Vergrößerung bei einem Abstand r zum Bildmittelpunkt ist gegeben durch die Funktion:

$$M = \frac{d}{dr}L(r) \tag{2.3}$$

Ist die Ableitung von M nach dem Radius r $\frac{dM}{dr}$ größer null, so verstärkt sich die Vergrößerung mit wachsendem Abstand und es entsteht eine kissenförmige (2.2.1) Verzeichnung. Ist der Wert kleiner null, so wird die Abbildung tonnenförmig (2.2.1) verzeichnet. Um die Verzeichnung zu korrigieren wird die Umkehrfunktion „U“ der Abbildungsfunktion L(r) wie folgt definiert:

$$U^{-1} = L \tag{2.4}$$

mit

$$U(r) = \sum k_i \cdot r^i \tag{2.5}$$

mit k_i ist der i-te koeffizient der Verzeichnung. Genähert kann die Summe dargestellt werden als:

$$U(r) = r + \Delta(r) \tag{2.6}$$

Der Wert von U(r) ist der Radius im nicht-verzeichneten Zustand. Berechnet man nun U(r) für jeden Punkt in der verzeichneten Abbildung und setzt diesen ein, so entsteht ein unverzeichnetes Bild.

Koordinatentransformation

Eine Koordinatentransformation ist die Übertragung der Koordinaten eines Punktes von einem Koordinatensystem in ein anderes. Für die in dieser Arbeit behandelte Thematik sind die Translation und die Rotation für die Implementierung, sowie die Transformation von einem kartesischen in ein Polarkoordinatensystem für die Korrektur von Verzeichnungen(siehe Kapitel 2.2.1) von Bedeutung. Diese werden im folgenden erklärt[53].

Translation

Eine Translation, oder Parallelverschiebung, ist eine lineare Koordinatentransformation, die durch den Verschiebungsvektor t gegeben ist. Die Koordinaten für den Vektor $p = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$ nach der Verschiebung werden wie folgt berechnet:

$$p_{trans} = t + p, \begin{pmatrix} x_{trans} \\ y_{trans} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x + x_t \\ y + y_t \end{pmatrix} \tag{2.7}$$

,mit x_t und y_t als Koordinaten des Translationsvektors t. Dabei verändert sich der Ursprung des Koordinatensystems nicht.

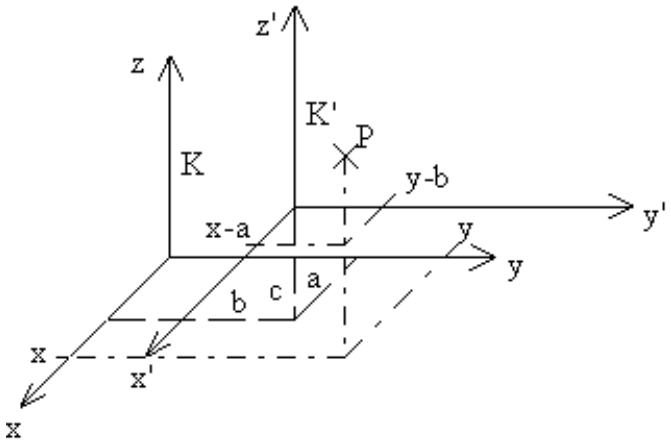


Abbildung 2.13: Translation eines Koordinatensystems [16]

Rotation

Bei einer Rotation dreht sich das Koordinatensystem um seinen Ursprung. Sie wird in Form einer Rotationsmatrix R dargestellt [41]. In der euklidischen Ebene im $\mathbb{R}^2$ ist eine Rotation um den Ursprung des Koordinatensystems für einen Punkt $p = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$ um den Winkel ϕ wie folgt definiert:

$$p_{rot} = R \cdot p, \begin{pmatrix} x_{rot} \\ y_{rot} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} cos(\phi) & -sin(\phi) \\ sin(\phi) & cos(\phi) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \tag{2.8}$$

Im $\mathbb{R}^3$ kann eine Rotation um alle drei Achsen erfolgen. Ein Punkt $p = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$ im nicht-rotierten Koordinatensystem K hat im um den Winkel ϕ rotierten Koordinatensystem K' folgende Koordinaten:

$$p_{rot} = R \cdot p, \begin{pmatrix} x_{rot} \\ y_{rot} \\ z_{rot} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \tag{2.9}$$

Mit der obigen Formel ergeben sich im $\mathbb{R}^3$ folgende drei Rotationsmatrizen für eine Rotation um die jeweilige Achse um alle drei Raumrichtungen:

$$R_x(\phi) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & cos(\phi) & -sin(\phi) \\ 0 & sin(\phi) & cos(\phi) \end{pmatrix}, \tag{2.10}$$

$$R_y(\phi) = \begin{pmatrix} cos(\phi) & 0 & sin(\phi) \\ 0 & 1 & 0 \\ -sin(\phi) & 0 & cos(\phi) \end{pmatrix}, \tag{2.11}$$

$$R_z(\phi) = \begin{pmatrix} cos(\phi) & -sin(\phi) & 0 \\ sin(\phi) & cos(\phi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{2.12}$$

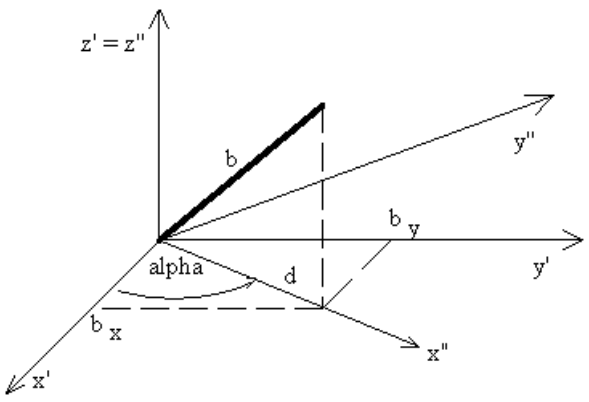


Abbildung 2.14: Rotation eines Koordinatensystems [17]

Polarkoordinatensystem

Ein Polarkoordinatensystem ist ein zweidimensionales Koordinatensystem, in dem jeder Punkt durch einen Winkel ϕ und einem Abstand r zum Koordinatenursprung eindeutig definiert ist. Der Koordinatenursprung wird als Pol bezeichnet [62]. Ein Polarkoordinatensystem ist ein zweidimensionales Koordinatensystem, in dem jeder Punkt durch einen Winkel und einem Abstand r zum Koordinatenursprung eindeutig definiert ist. Der Koordinatenursprung wird als Pol bezeichnet.

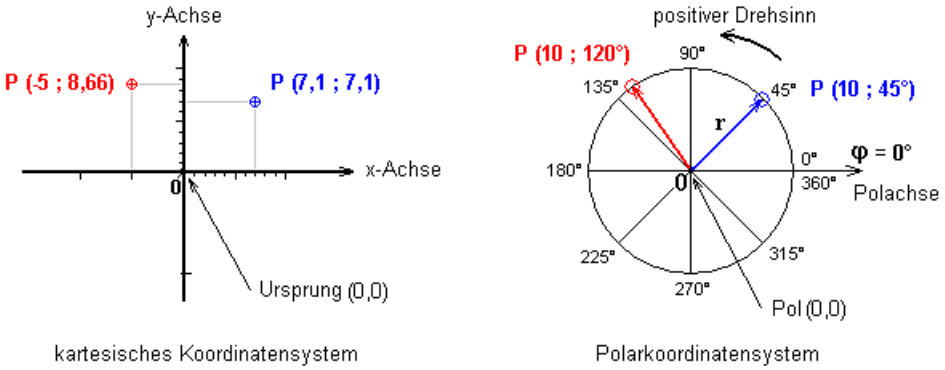


Abbildung 2.15: Darstellung der Umrechnung zwischen Polar- und kartesischen Koordinatensystemen [8].

Wie in Abbildung 2.15 zu sehen ist die Umrechnung von Polarkoordinaten in kartesische wie folgt definiert:

$$x = r \cdot cos\phi \tag{2.13}$$

$$y = r \cdot sin\phi \tag{2.14}$$

Zur Transformation von kartesischen Koordinaten in Polarkoordinaten können Radius r und Winkel ϕ separat berechnet werden. Der Radius lässt sich mit dem Satz des Pytagoras ausrechnen:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \tag{2.15}$$

Den Winkel ϕ kann man über die Umkehrfunktion einer der Trigonometrischen Funktionen bestimmen:

$$cos\phi = \frac{x}{r} \tag{2.16}$$

$$sin\phi = \frac{y}{r} \tag{2.17}$$

$$tan\phi = \frac{y}{x} \tag{2.18}$$

Dabei ist zu beachten, dass ϕ mit keiner der Funktionen ohne Fallunterscheidung eindeutig bestimmt werden kann, da diese nicht Injektiv sind und dass ϕ auch für r = 0 nicht eindeutig bestimmt werden kann, da es jeden beliebigen Wert annehmen kann. ϕ ist ausserdem für das Intervall [0;2·π] bestimmt, da ϕ und $\phi + 2 \cdot \pi$ mit dem selben Radius den selben Punkt beschreiben. Es muss also eine Fallunterscheidung gemacht werden, die je nach Wahl der Trigonometrischen Funktion verschieden groß ausfällt. Man kann jedoch mit Zuhilfenahme der Signumfunktion und der Arkuskosinusfunktion ϕ ohne Fallunterscheidung lösen:

$$\phi = sign(y) \cdot arccos(\frac{x}{r}) \tag{2.19}$$

mit sign(y) = -1 für negative y-Werte und +1 für positive Werte.
Kartesische Koordinaten und Polarkoordinaten lassen sich also mithilfe der Gleichungen 2.15, 2.19 beliebig ineinander transformieren.

2.2.2 Biologische Aspekte von Simulationen und Raumwahrnehmung

Das Menschliche Auge

Um verschieden technische Möglichkeiten und Schwierigkeiten bei der Implementierung von AR verstehen zu können, wird zunächst auf die optische Wahrnehmung des Menschen eingegangen. Die Augen sind ein wichtiges Sinnesorgan des Menschen um seine Umgebung wahrnehmen zu können. Sie können aus großen Entfernungen schon Informationen aufnehmen und an das Gehirn weiterleiten. Dabei funktionieren sie ähnlich wie die bereits beschriebene Camera obscura.

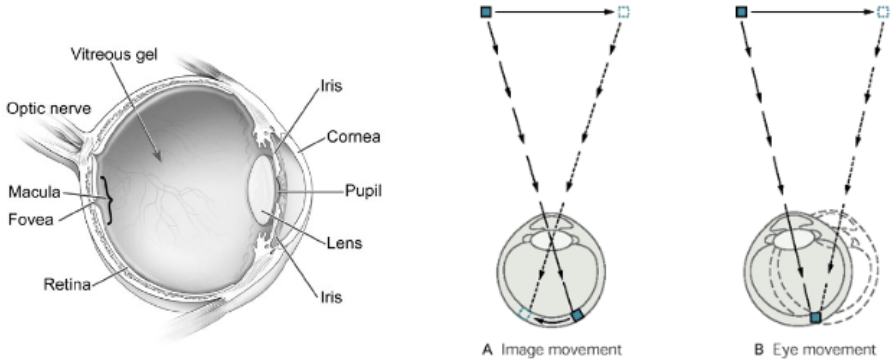


Abbildung 2.16: Von links nach rechts: Diagramm des menschlichen Auges (horizontal geschnitten); die zwei Arten der Bewegungswahrnehmung: A Bewegung des Bildes, B Bewegung des Auges [15].

Das durch die Linse fokussierte Licht trifft auf die Retina, wo die elektromagnetischen Wellen von den dort befindlichen Sinneszellen, den Zapfen und Stäbchen, in neuronale Impulse übersetzt werden [15]. Es gibt drei verschiedene Arten Zapfen, die lichtempfindlichen Zellen sind für das Farbsehen verantwortlich und reagieren jeweils auf eine spezifische Wellenlänge des Lichts. Während die Zapfen im Zentrum der Netzhaut, der Fovea, konzentriert sind, befinden sich die für das Dämmerungssehen verantwortlichen Stäbchen in der Peripherie der Retina [15]. 125 Millionen Zapfen und Stäbchen sorgen dafür, dass der Mensch, wenn beide Augen zusammen betrachtet werden, insgesamt ein Sichtfeld von 120° hat. In diesem Bereich wird Licht wahrgenommen. In gut der Hälfte der Sichtfelder hat das menschliche Auge zu dem noch volle Farberkennung. Würde man die Sehkraft in Pixel umrechnen, kann man von einer Auflösung von 150 bis 200 Pixel pro Grad ausgehen [31].

Bewegungserkennung

Bewegung wird von Gehirn aus der Kombination zweier Mechanismen erkannt. Zum einen bewegt sich die Projektion eines sich bewegenden Objekts über die Netzhaut, zum anderen können die Augen einer Bewegung folgen. Das Gesichtsfeld, setzt sich aus allen wahrgenommenen Objekten und ihren Hintergründen zusammen. Bewegen sich nur kleine Bereiche im Gesichtsfeld wird dies als sich bewegende Objekte wahrgenommen, bewegt sich der größte Anteil nimmt das Gehirn an in Bewegung zu sein. Je nach Art dieser Bewegung wird erkannt in welche Richtung die Bewegung stattfindet. Veränderungen der Bewegung werden als Drehungen oder Seitwärtsbewegungen erkannt [31].

Gleichgewichtssinn

Bewegung wird auch über den im Innenohr gelegenen Gleichgewichtssinn wahrgenommen. Das Vestibularorgan setzt sich aus drei senkrechtzueinanderstehenden Bogengängen, die Drehungen wahrnehmen, und den zwei Makulaorganen Sacculus und Utriculus, die ebenfalls senkrecht zueinander stehen und translatorische Beschleunigung wahrnehmen, zusammen. Beide Systeme sind mit Endolymphe gefüllt, bei Bewegung des Kopfes bleibt die Flüssigkeit stationär, ihre Bewegung wird über Haarzellen als gegenläufig zur stattfindenden Bewegung wahrgenommen. Dadurch kann das Gehirn Bewegung in alle drei Raumrichtungen wahrnehmen [15].

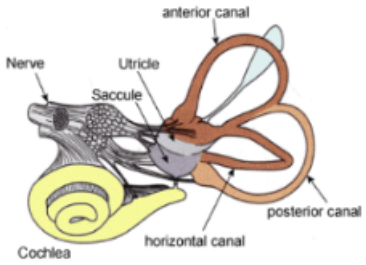


Abbildung 2.17: Das vestibuläre System. Die braun hervorgehobenen Kanäle (anterior, posterior und horizontal) sind für die Wahrnehmung von Kopfdrehungen zuständig, Utriculus und Sacculus nehmen translatorische Bewegungen wahr [15].

2.2.2.1 Motion Sickness

Erhält das Gehirn unterschiedliche Bewegungsinformationen über Augen und Gleichgewichtssinn, kann dieser Konflikt zu Übelkeit führen. Die sogenannte Motion Sickness, oder auch Cyber Sickness oder Simulator Sickness, kann drei Ursachen haben. Zum einen kann die überwiegend visuelle Wahrnehmung von Bewegung, während physikalisch weniger oder keine Bewegung wahrgenommen wird, zu einem Konflikt führen. Dies ist die häufigste Ursache für Motion Sickness in einem Simulator. Die vestibuläre Wahrnehmung von Bewegung kann, wenn die entsprechenden optischen Reize fehlen, ebenfalls zu Übelkeit führen. Dies ist beispielsweise bei Seekrankheit der Fall. Die dritte Ursache, sich widersprechende Bewegungsinformationen, tritt nur in Zentrifugen auf, sie ist als Coriolis Effekt bekannt. Die Symptome können die Augen, in Form von Überanstrengung, das Gleichgewichtsempfinden, beispielsweise in Form von Schwindel, oder das Wohlbefinden mit Symptomen von Übelkeit bis hin zu Erbrechen, betreffen [59] [64]. Um Motion Sickness zu vermeiden empfiehlt es sich die Simulationen entsprechend anzupassen. Unter Umständen kann Motion Sickness auch medikamentös behandelt werden. Ingwer und Kaubewegungen haben sich als natürliche Heilmittel erwiesen.

Um sich in der Welt zu orientieren ist nicht nur die Wahrnehmung von Bewegung wichtig, eine sehr wichtige Information ist außerdem die Wahrnehmung räumlicher Tiefe [6]. Bisher ist es ungeklärt ob es einen Zusammenhang zwischen der unbewusst wahrgenommenen Spannung der Augenmuskulatur und der Entfernungswahrnehmung gibt. Zu den okulomotorischen Informationen gehören die Akkommodation (Anpassung der Linsen) und die Konvergenz (Drehung der Augen). Allein die auf zweidimensionalen Bildern, wie Fotos, enthaltenen Informationen genügen um dem Betrachter um zu erkennen was sich im Vordergrund befindet. Durch Okklusion, dem Verdecken von Objekten, kann geschlossen werden, dass das verdeckte Objekt sich weiter im Hintergrund befindet als das verdeckende Objekt [63]. Gleichzeitig wird vorausgesetzt, dass Objekte sich umso weiter entfernt befinden, je näher sie sich am Horizont befinden. Die Linearperspektive beschreibt das Zusammenlaufen paralleler Linien an einem Fluchtpunkt, sie ist eine in der Kunst häufig genutzte Methode räumliche Tiefe zu erschaffen. Auch aufgrund der Größe bekannter Objekte kann auf ihre ungefähre Entfernung geschlossen werden, da weiter entfernte Objekte erfahrungsgemäß kleiner erscheinen wird beispielsweise angenommen, dass ein relativ klein erscheinendes Auto wahrscheinlich weiter entfernt ist [63]. Die Luft- oder atmosphärische Perspektive bezeichnet den Effekt, dass Gegenstände mit zunehmender Entfernung blasser,

bläulicher und auch unschärfer erscheinen [63]. Bewegung liefert ebenfalls Aufschluss über die Entfernung von Objekten, der Effekt dass Gegenstände sich langsamer zu bewegen scheinen je weiter sie vom Betrachter entfernt sind, wird als Bewegungsparallaxe bezeichnet und beruht darauf, dass sich der Horizont auch bei hohen Geschwindigkeiten im Vergleich zu näherliegenden Objekten nur minimal bewegt. Außerdem werden Objekte größer, wenn sie näher kommen [63] [34]. Aus dem Zusammenspiel von zwei Augen ergeben sich binokulare Informationen. Betrachtet man ein Objekt, erhält das Gehirn zwei einzelne Bilder, eins von jedem Auge. Diese ergeben sich aufgrund des Augenabstands, der beim Menschen ungefähr 6 cm beträgt. Diese sogenannte Querdisparität nimmt proportional mit der Nähe des Objekts zu. Das Gehirn kann daraus auf Entfernungen schließen. Dieser Effekt wird bei 3D-Filmen, die mit zwei Kameras im Abstand der menschlichen Augen aufgenommen werden, angewendet [38].

Dreidimensionales Sehen und AR

Da Dreidimensionalität ein entscheidender Bestandteil der Realität ist, ist es auch bei Augmented Reality wichtig räumliche Informationen bereitzustellen, damit die virtuell eingefügten Objekte möglichst real wirken. Dazu müssen die die Wahrnehmung bestimmenden Kriterien auch in der erweiterten Realität erfüllt werden. Das bedeutet, dass die bei der Verwendung eines Head-mounted Displays auf dem Bildschirm des HMDs angezeigten virtuellen Objekte entsprechend der Kriterien generiert werden müssen. Die bereits erwähnten Bildinformationen können auch im zweidimensionalen Raum, wie auf einem Bildschirm, genutzt werden um den Eindruck räumlicher Tiefe zu erwecken. Die entsprechenden Methoden, wie beispielsweise Linear- und Luftperspektive, finden schon seit Jahrhunderten in der Kunst Verwendung. In der erweiterten Realität ist die Verdeckung eines sich im Hintergrund befindenden virtuellen Gegenstands relativ aufwendig umzusetzen, deswegen wird sie meist ignoriert. Dies führt dennoch zu annehmbaren Ergebnissen [63]. Bewegungsinformationen können mittels eines aus mehreren, sich unterschiedlich schnell bewegenden Schichten aufgebauten Hintergrunds vermittelt werden. Dies findet beispielsweise in Videospielen schon lange Verwendung [34]. Die Bereitstellung binokularer Informationen, also leicht unterschiedlicher Informationen für die verschiedenen Augen, ist mit hohem technischem Aufwand verbunden. Dazu werden zum einen entsprechende Anzeigemöglichkeiten, wie ein HMD oder eine Projektion in den Raum, benötigt und zum anderen verdoppelt sich der Rechenaufwand, da für jeden Gegenstand jeweils zwei verschiedene Bilder generiert werden müs-

sen. Was bei Filmaufnahmen relativ einfach zu erreichen ist, benötigt bei virtuellen Objekten doppelten Ressourcenverbrauch. Nach Erkenntnissen von Sutherland ist eine von der Kopfbewegung abhängig verändernde Ansicht jedoch wichtiger als eine perfekte binokulare Darstellung der virtuellen Objekte [27].

Immersion

Dadurch dass die (teilweise) simulierte Welt, die der Benutzer eines HMDs sieht, die die Kriterien der räumlichen Wahrnehmung erfüllt, wirken die virtuellen Objekte realer, was das Gefühl der Immersion begünstigt. Immersion beschreibt das Eintauchen des Benutzers in die virtuelle oder, im Fall der Augmented Reality, teilweise virtuelle Welt [2]. Je realer sich die virtuelle Welt anfühlt, desto einfacher und besser ist Immersion möglich. Die Qualität des Displays und der Grafik, die Einfachheit der Navigation und die Art der nicht-visuellen Sinneseindrücke sind hierbei entscheidend. Im Idealfall ist sich der Benutzer der Technologie nicht mehr bewusst [2] [27]. Zusätzlich zu real wirkenden Bildern mit realen Entfernungsinformationen und Dreidimensionalität, sind flüssige wirkende Bewegungen eine weitere Voraussetzung für eine gute Immersion [34]. Flüssige Bewegungen senken außerdem das Risiko für Motion Sickness. Damit eine Bewegung als flüssig wahrgenommen wird, muss sie, wie bereits erwähnt aus mehr Einzelbildern (Frames) pro Sekunde bestehen als das menschliche Auge wahrnehmen kann, also werden mindestens 25, idealerweise 30 Einzelbilder benötigt [45].

2.2.3 Allgemeine Funktionsweise

Ein Headmounted Display (HMD) ermöglicht dem Benutzer eine nahezu vollständige Immersion. Durch die Datenbrille ist das komplette Gesichtsfeld ausgefüllt, wodurch der Eindruck des „Sich direkt im Geschehen Befindens“ erweckt wird. Zusätzlich angezeigte Informationen, wie Telemetriedaten, können effektiv genutzt werden, da sie sich direkt im Blickfeld befinden und der Benutzer nicht erst auf eine Anzeige schauen muss. Im hier vorgestellten System ist es dem Benutzer beispielsweise möglich, zusätzlich zu der Kamerasicht des Quadrocopters, die aufgrund ihrer Position schon einen sehr guten Überblick bietet, relevante Daten, wie die Temperatur oder die Entfernung von Hindernissen zu erhalten. Die Datenbrille wird, wie eine normale Brille, vor den Augen positioniert, manchmal, je nach Modell, wird sie jedoch aufgrund des Gewichtes und

des Aufbaus der Brille zusätzlich am Kopf befestigt. Dies ist zum Beispiel bei dem verwendeten Oculus Rift Developer Kit 2 der Fall. Üblicherweise hat jedes Auge einen eigenen Monitor, im Fall des Oculus Rift wird dies durch einen zweigeteilten OLED Bildschirm erreicht. So sehen beide Augen minimal unterschiedliche Bilder, wie es auch im realen Leben als Voraussetzung des dreidimensionalen Sehens der Fall ist [2]. Optimaler Weise füllt das so entstehende Bild das Blickfeld vollständig aus, wird das Blickfeld nicht vollständig ausgefüllt erhält der Betrachter nur den Eindruck einen sich in der Entfernung befindenden Bildschirm zu betrachten, das Gesehene wirkt jedoch nicht real. Um die Immersion zu verbessern können die Videobrillen mit Sensoren ausgestattet werden, die die Kopfneigung erkennen und das projizierte Bild automatisch anpassen können. Diese Sensoren können sich an dem getragenen Gerät befinden oder außerhalb, beispielsweise in Form einer Kamera, die die Kopfbewegungen des Benutzers von außen registriert [27].

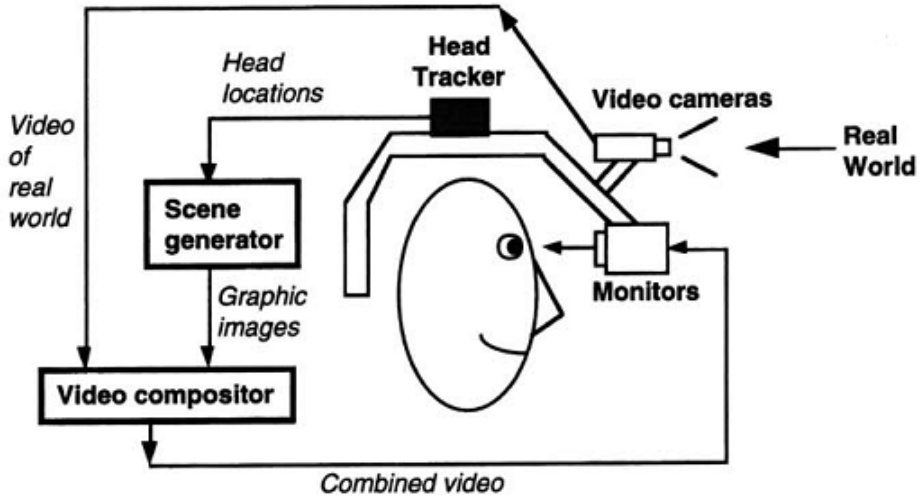


Figure 13. *Video see-through HMD conceptual diagram.*

Abbildung 2.18: Illustration eines Vides see-through HMDs [2]

Grundsätzlich existieren zwei Arten von HMDs mit denen versucht wird möglichst immersive virtuelle oder augmentierte Realität zu erschaffen, optische und Video HMDs. Da bei der virtuellen Realität die wirkliche Realität nicht berücksichtigt werden muss ist es dort einfacher auf visuellem Weg Immersion zu erzeugen. Im Folgenden soll nur auf die augmentierte Realität eingegangen werden, da die virtuelle Realität für das vorliegende Projekt nicht relevant ist. Die eine Variante, optische HMDs, funktioniert wie eine Art Sonnenbrille, die normale Welt wird etwas

ausgeblendet und die virtuellen Komponenten werden direkt in diese eingeblendet. Dies hat den Vorteil, dass bei einem eventuellen Stromausfall keine Sicherheitsrisiken entstehen, da der Benutzer in diesem Fall trotzdem noch visuelle Informationen erhält. Des Weiteren findet die Realität weiterhin in Echtzeit statt, was schnellere Reaktionen ermöglicht [2]. Dadurch dass die Videoprojektion, abhängig von ihrer Qualität und Größe sowie der Anzeigequalität, eine schlechtere Bildqualität sowie eine schwächere Deckkraft als das reale Leben haben kann und Verzögerungen auftreten können, wenn das Sichtfeld zu schnell geändert wird, kann die Immersion darunter leiden. Eine verzögerte Projektion wäre logischerweise an einer falschen Stelle und würde damit die Immersion zerstören und zudem zu einer erhöhten Motion Sickness führen, da das nun wahrgenommene AR Bild unter Umständen nicht mehr der vestibulären Wahrnehmung entspricht [2] [45] [59] [64] [15]. Die zweite Datenbrillenvariante ist das sogenannte video-see-through HMD (Abbildung 2.18), bei dem der Benutzer statt der realen Welt ein ungefähr auf Augenhöhe gefilmtes Video sieht, in dem virtuelle Objekte über das Kombinieren der beiden Videostreams eingeblendet werden. Dies hat den Vorteil dass im Gegensatz zum oben beschriebenen optical-see-through HMD die Beleuchtungsverhältnisse und Helligkeit keinen Einfluss auf die Qualität der Projektion haben [2]. Dadurch, dass die reale Welt über Videokameras wahrgenommen wird, ist es einfacher virtuelle Objekte mit der Realität zu kombinieren. Die Auflösung des die Realität zeigenden Videostroms kann an die Auflösung der virtuellen Objekte angepasst werden. Die Intensität der Einblendung ist hierbei von der Außenwelt unabhängig. Während bei einem optischen see-through HMD virtuelle Objekte schwächer oder blasser erscheinen können als die Realität, worunter die Immersion leiden kann, werden bei einem video see-through HMD zwei Filme gleicher Qualität in einander geblendet. Auch Verzerrungen können bei HMDs, die die Realität nicht mit einbeziehen leichter korrigiert werden [2]. Ein weiterer Vorteil davon, dass sowohl die Realität als auch die virtuellen Objekte Videoströme sind, ist es dass es ohne großen Aufwand einstellbar ist, dass beide Videoströme die gleiche Verzögerung haben. Diese Verzögerung kann jedoch, anders als beim optischen HMD, leichter zu Motion Sickness führen. Außerdem können Kameras die nicht exakt an der Stelle der Augen angebracht sind zu leichten Anpassungsschwierigkeiten führen. So führt ein anderer virtueller Augenabstand vor allem zu Ermüdungserscheinungen, eine andere Augenhöhe kann jedoch zu falsch eingeschätzten Entfernungen und motorischen Schwierigkeiten bei Feinarbeiten führen. Beides kann jedoch mit der richtigen Kalibrierung angepasst werden[2] [15].

2.2.4 Vergleichbare Systeme: Einsatz in Drohnen

Für den an der Universität Würzburg verwendeten Quadrocopter soll eine HMD-Anzeige mit zusätzlich angezeigten Telemetriedaten implementiert werden. Dabei soll sich der Benutzer komplett auf die übermittelten Videodaten konzentrieren können, ohne sich über die Steuerung Gedanken machen zu müssen. Das Konzept nur als Betrachter an Bord eines Quadrocopters zu sein ist bisher noch nie dagewesen [68]. Bei anderen Konzepten, die die Kombination von Drohnen und Videobrillen vorsehen, wird eine manuelle Steuerung vorausgesetzt. Ikeuchi et al. haben mit ihrer KinecDrone, einer Kombination aus der Parrot AR.Drone, dem Oculus Rift und der Micrsoft Kinect, eine Möglichkeit geschaffen die reale Welt mit der virtuellen Welt zu kombinieren. Der Benutzer trägt ein Oculus Rift während er im Sensorbereich der Kinect liegt. Im Oculus Rift werden die Aufnahmen der fliegenden Drohne auf den Monitor projiziert, die Steuerung erfolgt in Echtzeit über von der Kinect wahrgenommene Gesten. Die Autoren möchten das Gefühl vermitteln selbst am Himmel zu fliegen. Zur Verbesserung der Immersion soll der Gyroskopsensor des Oculus Rift zur Kamerakontrolle einbezogen werden, damit auch die Kopfbewegungen der realen Welt entsprechende Folgen haben. Außerdem könnte ein Ventilator, dessen Geschwindigkeit mit der Fluggeschwindigkeit korreliert, vor dem Benutzer installiert werden [14]. Pittman et al. konstruierten aus einem Oculus Rift, einem Polhemus PATRIOT Tracker für die Kopfbewegungen und einer Wii-Fernbedienung für die Bewegungen ebenfalls ein System zur Steuerung der AR.Drone. In ihrem Versuch wurden verschiedene Steuerungsarten miteinander verglichen, z.B. ob Richtungsänderungen über Kopfdrehung oder Kopfneigung benutzerfreundlicher sind [21].

2.2.4.1 AirRobot AR 100-B

Der AirRobot AR 100-B ist eine Drohne der Firma AirRobot GmbH Co. KG, die unter anderem im Militär eingesetzt wird. Eine militärische Verwendung wurde beispielsweise in Form des Projektes: das kleine Auge des Heeres der Aufklärungs-Quadrocopter MIKADO realisiert. MIKADO steht für Mikro Aufklärungsdrohne für den Ortsbereich und kann mittels eines PCs oder eines HMDs gesteuert werden. Die elektrischen Antriebe sind bürstenlose Motoren und ermöglichen mit 2000 rpm geräuscharme Missionen im urbanen Raum. Dabei dienen Gyroskope und Accelerometer zur Lagereglung und ein Barometer zur Höhenkontrolle. Er kann aus einer Entfernung von ca. 100 Metern Menschen ermitteln und verfügt über einen Tageslicht Color-Sensor,

einen Dämmerungslicht s/w-Sensor und eine Digitalkamera, sowie eine IR-Wärmebildkamera. Daten können per Datenlink an die Bodenstation übertragen werden. Außerdem ist er mit einem Videolink von 1,4 bis 2,5 GHz (200 mW, 16 Kanäle) ausgestattet. Die Maximale Reichweite beträgt 500 Meter bei einem analogen Videosignal und bis zu einen Kilometer bei einem digitalen Videosignal. MIKADO wurde unter Anderem schon im australischen Outback, in Afghanistan und im Jahr 2012 auch 2436-mal in Deutschland eingesetzt. Er findet auch bei Feuerwehr und Polizei Verwendung [32].



Abbildung 2.19: MIKADO der Bundeswehr im Flug [7]

2.2.4.2 AR Drone

Die AR.Drone von Parrot ist serienmäßig über eine App, die sowohl für IOS als auch für Android Geräte verfügbar ist, steuerbar. Version 2.0 verfügt über zwei Kameras, 4 GB Speicher und Wi-Fi. Das Linux als Betriebssystem verwendende Fluggerät besitzt ein Gyroskop, Accelerometer und einen Magnetometer. Ursprünglich war sie als Spielzeug gedacht, doch dank der offenen API Entwicklungssoftware, mit der der Hersteller anderen Entwicklern entgegen kommt, sind der Verwendung keine Grenzen gesetzt. In Frankreich stieß die Drohne sowohl militärisch für Luftüberwachung, als auch zivil beispielsweise als Übertragungsmethode für Sportereignisse, auf reges Interesse. Auf Grund der Kameras und der freien Programmierbarkeit gab es von Seiten der Politik und des Datenschutzes auch besorgte Reaktionen auf das UAV. Die einfache Steuerung über die App lässt sich auch durch eine Steuerung über andere Eingabegeräte ersetzen [1].



Abbildung 2.20: AR Drone von Parrot [1]

2.3 Grundlagen der Funkübertragung

Funkverbindungen beschreiben die Kommunikation zwischen Sender und Empfänger mittels Funk [21]. Unter Funk versteht man die kabellose Signalübertragung in Form von elektromagnetischen Wellen.

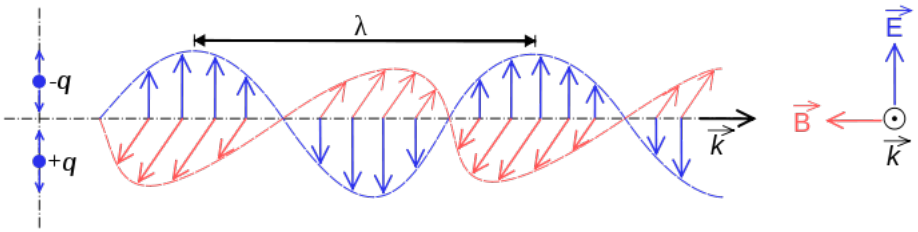


Abbildung 2.21: Darstellung einer elektromagnetische Welle, λ bezeichnet die Wellenlänge, E (in blau) das elektrische Feld und B (in rot) das Magnetfeld [42].

Elektromagnetische Wellen bestehen aus miteinander gekoppelten elektrischen und magnetischen Feldern, sie sind sinusförmig und haben eine konstante Amplitude. Ihre Übertragung ist sowohl in der Atmosphäre als auch im Vakuum möglich. Durch ein Nachrichtensignal werden die elektromagnetischen Wellen moduliert, das bedeutet, dass das zu übertragende Signal das Trägermedium, also die elektromagnetische Welle, verändert. Durch die Modulation, aus dem Lateinischen modulatio, was Takt, Rhythmus bedeutet, können die Amplitude, die Frequenz und/oder die Phase des Trägermediums verändert werden. Dabei ist es für eine erfolgreiche Signalübertragung wichtig, dass das Trägersignal eine höhere Frequenz hat als die zu übertragenden Nachrichtensignale. Beim Empfänger angekommen kann durch Demodulation das ursprüngliche Signal wiederhergestellt werden [58]. Verschiedene Funkverbindungen benutzen dabei verschiedene Sendefrequenzen. Bei jeder Frequenz wird über den Sender eine elektrische Schwingung erzeugt, welche von der Antenne des Senders kugelförmig in Lichtgeschwindigkeit ausgestrahlt wird. Verschiedene Frequenzen haben dabei verschiedene Reichweiten und Störanfälligkeiten [65].

Störungen

Elektromagnetische Wellen breiten sich oberhalb von 60 MHz quasioptisch aus, daher werden sogenannte Relaisstationen, heutzutage Satelliten, benötigt, wenn ein Signal um die Erde (kugelförmig) gefunkt wird. Der Signalweg kann von Gasen aus der Erdatmosphäre beeinträchtigt

werden, flüssige oder feste Medien schwächen das Funksignal noch stärker ab. Reflexionen durch Hindernisse wie Mauern, Metallbauwerke oder Drähte, die ab ca. 100 MHz auftreten, führen zu zeitlich versetztem Doppelempfang und Signalverfälschungen. Gegenphasige Signale können dabei ausgelöscht werden. Bewegungen, sei es von Sender- oder Empfängerantenne oder durch Objekte zwischen den beiden Antennen, können ebenfalls Störungen verursachen. Um Störungen zu vermeiden müssen Modulations- und Betriebsart angepasst werden [51].

Arten der Funkübertragung

Infrarotverbindungen ermöglichen die Übertragung einer großen Datenmenge (2,4 kbit/s bis 1 Gbit/s), benötigen allerdings Sichtkontakt und haben eine sehr geringe Reichweite von ca. 1 m [51] [50]. Daher werden Infrarotverbindungen zunehmend von Bluetooth-Verbindungen ersetzt. Diese benötigen keinen Sichtkontakt und haben Reichweiten von 1 m (10 m im Freien) bis hin zu 100 m. Sie unterstützen die Übermittlung von Sprache und Daten, theoretisch kann inzwischen eine Datenübertragungsrate von 24 Mbit/s erreicht werden [35]. Ein Nachteil ist allerdings, dass Wände und Mauern das Funksignal stören können. Das im Normalfall von Quadrocoptern verwendete GPS (Global Positioning System) zur Standortbestimmung funktioniert im Fall des Forschungsprojekts ebenfalls nicht, da der Empfang in Gebäuden meist reduziert oder gar nicht vorhanden ist [47]. Das, wie GPS, über Satellit funktionierende Internet bietet zwar hohe Datenübertragungsraten und Standortunabhängigkeit, weißt aber gleichzeitig sehr hohe Latenzzeiten auf [52]. Diese langen Signallaufzeiten können beim Benutzer Motion Sickness hervorrufen, weswegen eine andere Art der Datenübertragung von Vorteil wäre. Die Datenübertragung über GSM (Global System for Mobile Communications), wie sie bei Mobiltelefonen üblich ist, erfolgt mit einer Reichweite von bis zu 35,4 km und einer Datenübertragungsgeschwindigkeit von 24,7 kbit/s [48]. GPRS (General Packet Radio Service) unterstützte Datenübertragung ermöglicht sogar 171, 2 kbit/s [46]. Je nach verwendetem Trägermaterial können Leichtbauwände jedoch große Hindernisse sein und den Empfang empfindlich stören [67].

3 Konzept

Als Erweiterung zu den bereits vorhandenen mit Kameras ausgestatteten Quadrocoptern, die wahlweise analog zu den im Kapitel 2.2.4 vorgestellten Systemen über ein HMD betrachtet werden können, beschäftigt sich diese Arbeit auch mit der Darstellung der Informationen. Dabei werden das Kamerabild auf einem HMD dargestellt. Es können wahlweise von der Bodenstation ausgewählte Daten und Informationen auf dem Kamerabild angezeigt werden.

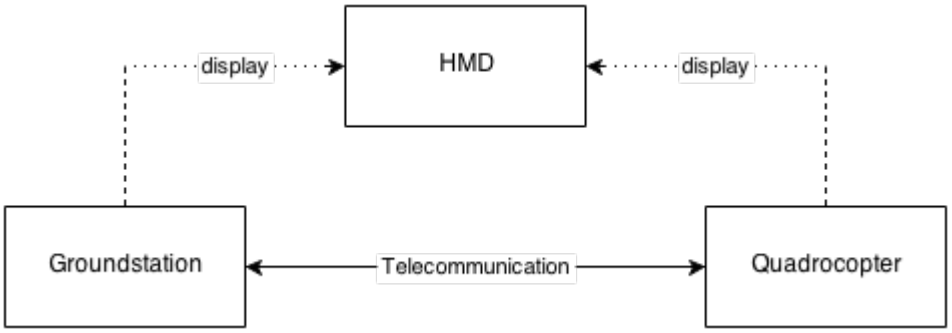


Abbildung 3.1: Konzept: Hinzufügen einer HMD- Anzeige

Im folgenden Konzept wird eine zusätzlich zu dem Bild der Kamera, geeignete Darstellung der Telemetrie Daten von einem Quadrocopter, wie beispielsweise der Wert eines Temperatursensors oder die Winkel des Gyroskops angestrebt. Es wird insbesondere darauf Wert gelegt, dass die Daten auf eine leicht verständliche Art und Weise dargestellt werden. So wird eine schnellere übersichtlichere Auffassung der Daten für den Nutzer des HMDs ermöglicht, wodurch in Gefahrensituationen eine raschere Reaktion erfolgen kann. Außerdem sieht das Konzept vor, dass HMD und Quadrocopter mit einer Funkstrecke verbunden werden. Dazu werden zwei mögliche Konzepte dargestellt und bezüglich Praktikabilität, Robustheit und dem Kostenfaktor verglichen (Kapitel 3.2.1 und 3.2.2).

3.1 Überblick

Das bestehende System besteht aus zwei größeren Komponenten, der Bodenstation und einem mit einer Kamera ausgestatteten Quadrocopter. Dabei sendet der Quadrocopter seine Telemetriedaten an die Bodenstation und erhält von dieser Befehle, die er dann autonom ausführt. Dieses System wird um den Block HMD (Abbildung 3.2) erweitert. Das HMD wird über eine geeignete Funkstrecke, die im weiteren Verlauf näher erläutert wird (Kapitel 3.5), mit dem Quadrocopter verbunden. Dabei gibt es grundätzlich zwei Möglichkeiten.

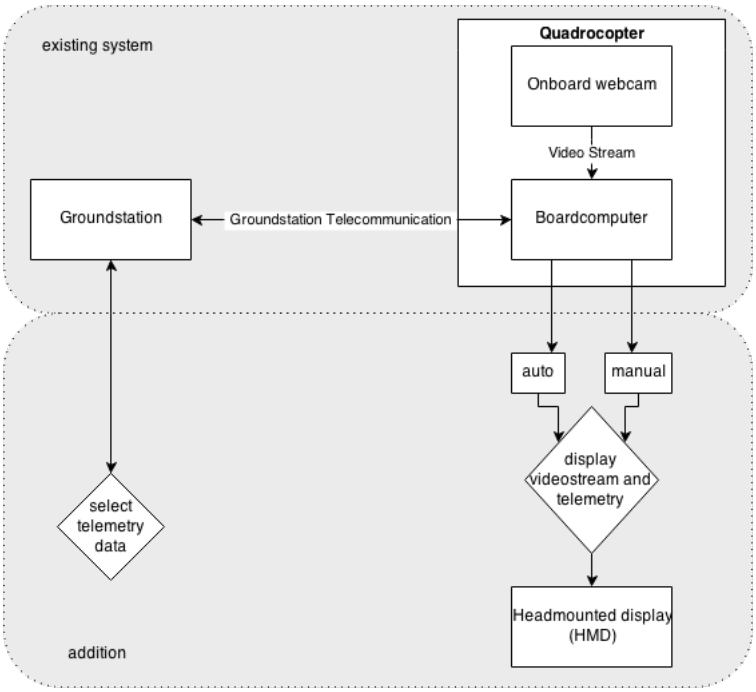


Abbildung 3.2: Konzept unabhängig von der Bodenstation

Die erste Möglichkeit ist es das HMD direkt über den Videoausgang des Quadrcopters und den Quadrocopter anzuschließen (siehe Abbildung 3.2). Hierbei sendet die Bodenstation alle nötigen Informationen, die der Quadrocopter benötigt um den Frame zu erstellen, direkt als Befehl an den Quadrocopter. Dieser erhält das Kamerabild und erweitert das Bild um die Telemetriedaten. Der fertige Frame wird anschließend an das HMD zur Anzeige gesendet. Die zweite Möglichkeit ist es, dass die Bodenstation per Fernzugriff an den Boardcomputer des Quadrocopters verbunden ist und auf alle Daten des Quadrocopters direkten Zugriff hat(siehe Abbildung 3.3). Das HMD ist in diesem Fall nicht mit dem Quadrocopter verbunden, sondern an die Bodenstation. Die fertige Kameraübertragung mit den Telemetriedaten wird von der Bodenstation an das HMD gesendet.

Denkbar ist eine Erweiterung dieses Systems auf weitere Bildschirme. Dabei teilt der Quadrocopter seinen Bildschirm nicht nur mit der Bodenstation, sondern auch mit weiteren Geräten, die aber keine Berechtigungen haben. Das könnte in Einsätzen mit mehreren Teams von Vorteil sein, da für jedes Team die Kameraübertragung des Quadrocopters zur Verfügung stehen würde.

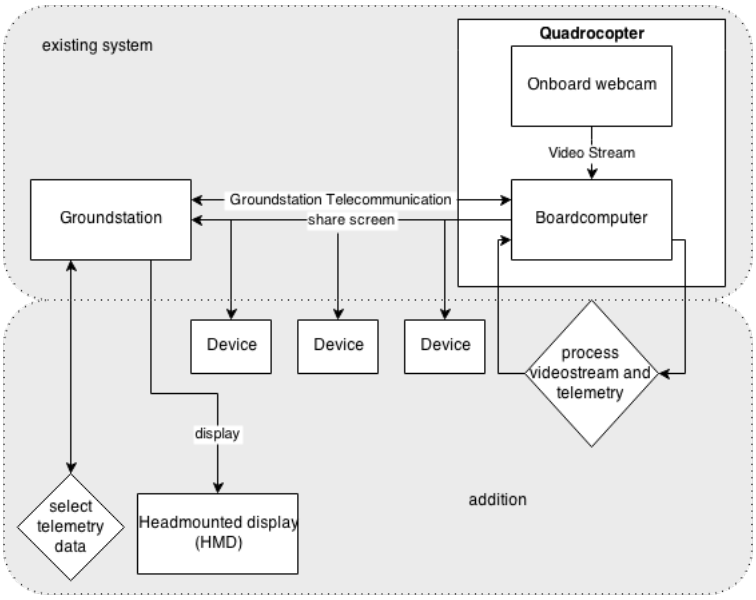


Abbildung 3.3: Konzept mit Nutzung einer Bodenstation

Der Nutzer des Systems trägt das HMD und sieht durch dieses das Bild der Kamera. Er ist dabei weder an die Bodenstation noch an den Quadrocopter mit Kabeln verbunden.
Die Bodenstation wird um eine Funktion erweitert, welche die Einstellungen des HMD vornimmt. Diese Einstellungen umfassen die Möglichkeit, das verwendete HMD auszuwählen, die Auflösung der Kamera auf dem Quadrocopter anzupassen, sowie das Auswählen der anzuzeigenden Telemetrieparameter. Diese Werte werden als Befehl an den Quadrocopter versendet, welcher um die Funktion erweitert wurde, das Kamerabild und die Telemetriedaten auf einem Display gemeinsam anzeigen zu lassen. Die Werte werden zur Darstellung an das HMD gesendet.
Dabei wird die Immersionseigenschaft des HMDs zunutze gemacht und die Daten werden entweder als Text im Raum oder, sollte es sinnvoll erscheinen, als ein dreidimensionales Objekt, in das Blickfeld platziert.
Da ein mögliches Einsatzgebiet in brennenden Gebäuden zur Unterstützung der Feuerwehr ist, hat der Benutzer den größten Nutzen, wenn die Telemetrie Daten auf eine Art präsentiert werden, die leicht verständlich und intuitiv ist.

Es wird vorausgesetzt, dass das bestehende System bereits in der Lage ist die Telemetriedaten des Quadrocopters auf dem Bildschirm als Graph darzustellen und die Auswertung dieser zu ermöglichen. Deshalb wird hier vor allem auf die möglichst verständliche Präsentation der Daten wert gelegt, da die Einsatzkräfte anhand der Daten in die Lage gebracht werden schnelle Entscheidungen zu treffen.
Daten, die einen klar definierten minimalen und maximalen Wert besitzen können als Balkendiagramm mit 0 Prozent bis 100 Prozent dargestellt werden. Diese Balken können, wenn bestimmte kritische Werte über- bzw. unterschritten werden durch eine Änderung der Farbe oder durch Effekte den Nutzer optisch auf die Situation aufmerksam machen. Die räumliche Ausrichtung des Quadrocopters kann als künstlicher Horizont dargestellt werden. Dadurch erhält der Nutzer direkt eine optische Darstellung der Ausrichtung ohne Zahlenwerte interpretieren zu müssen(siehe Abbildung 3.4).

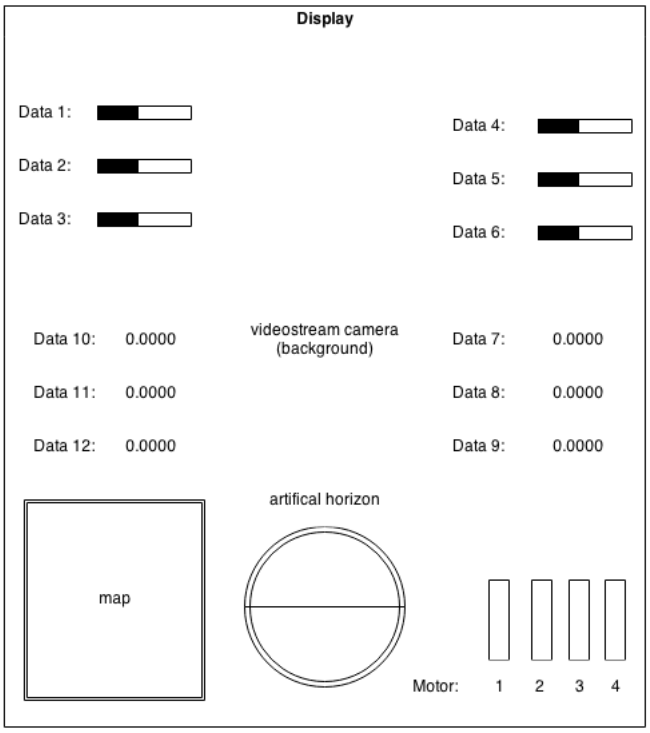


Abbildung 3.4: Beispielhaftes Konzept eines Displays mit den eingeblendeten Telemetriedaten

Es wäre denkbar die Anzeige der Telemetriedaten für die manuelle Steuerung und den autonomen Flug zu unterscheiden. Bei einer manuellen Steuerung ist es möglich, die für die Steuerung nötigen Telemetriedaten bevorzugt und an fest definierten Positionen anzeigen zu lassen um dem Piloten die wichtigsten Informationen zur Verfügung zu stellen. Der Pilot könnte außerdem durch

optische Kollisionswarnungen auf eine drohende Kollision hingewiesen werden und durch Rauch oder andere optische Hindernisse verdeckte Objekte könnten in der virtuellen Umgebung des HMDs farblich hervorgehoben werden. Auch im automatischen Betrieb sind Anwendungen für eine farbliche Hervorhebung denkbar, wie das Anzeigen von missionsrelevanten Objekten. Das Quadrocoptersystem muss jedoch die dafür nötigen Daten in Form von Telemetrie bereitstellen. Da der Nutzer sich durch das HMD in einer virtuellen Umgebung befindet lassen sich Objekte, deren dreidimensionale Position dem System bekannt sind, als Punkte an ihrer Position darstellen. Wenn eine Karte der Umgebung erstellt wurde, können Pfade auf dem Boden dargestellt werden, die sicher zu den Objekten führen.
Die Erweiterung des realen Raumes um virtuelle Objekte ermöglicht eine Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten. Diese Arbeit behandelt vor allem die möglichst intuitive, grafische Darstellung der vorhandenen Telemetriedaten eines Quadrocopters auf einem HMD unter Nutzung der Immersionseigenschaft dieser und die Diskussion einer geeigneten Funkstreckenlösung für die Kommunikation zwischen Quadrocopter und HMD auf die im Folgenden näher eingegangen wird.

3.2 Drahtlose Kommunikation

Eine Drahtlose Kommunikation zwischen dem Quadrocopter und dem Nutzer, der das HMD verwendet, ist notwendig um die Nutzung auf sicherem Abstand zu ermöglichen, wie sie bei Feuerwehreinsätzen, oder auch bei einem einfachen Flug, benötigt werden. Eine Kabelverbindung würde, unabhängig von der Länge der Kabel, die Funktionalität des Quadrocopters stark einschränken und wäre äußerst unpraktikabel. Aus diesem Grund beinhaltet das Gesamtkonzept dieser Arbeit auch die Diskussion einer möglichst kostengünstigen, aber stabilen Funkstrecke. Dabei gibt es mehrere Möglichkeiten, zwei von ihnen werden im Folgenden näher erläutert.

3.2.1 Direkte Kommunikation

Die direkte Kommunikation ist eine Form der Funkübertragung in der Empfänger und Sender direkt miteinander verbunden sind, wie beispielsweise über Bluetooth. Im allgemeinen Fall können beide miteinander verbundenen Komponenten sowohl als Sender als auch als Empfänger fungieren. Im Kontext dieser Arbeit ist der Sender der Quadrocopter, der das fertig modifizierte

Bild der Kamera an den Empfänger, das HMD, sendet. Anders als im allgemeinen Fall kann das HMD bei der direkten Funkverbindung lediglich das Bild der Kamera empfangen und darstellen, jedoch nicht von sich aus mit dem Quadrocopter oder der Bodenstation kommunizieren (siehe Abbildung 3.5).

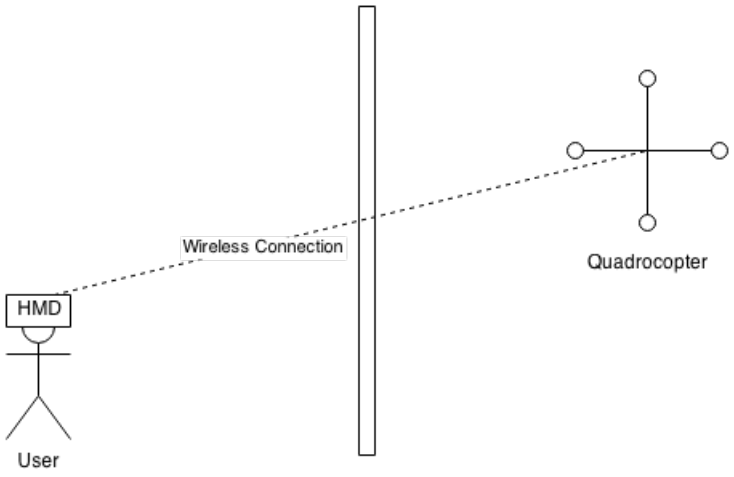


Abbildung 3.5: Direkte Verbindung zwischen HMD und Quadrocopter

Diese Form der Kommunikation lässt sich ohne größeren Aufwand in das Konzept (Abbildung 3.2) integrieren. Die Telekommunikation zwischen HMD und Quadrocopter wird durch die direkte Funkübertragung ersetzt. Zu beachten ist jedoch, dass hier keine Kommunikation mehr stattfindet, da das HMD ausschließlich empfangen kann. Es liegt eine einseitige drahtlose Verbindung vor(Abbildung 3.6). Die Funkübertragung lässt sich kostengünstig mit Zuhilfenahme von handelsüblichen Adaptern für eine Schnittstelle zur Bildübertragung, wie das High Definition Multimedia Interface (HDMI), oder das analoge Video Graphics Array (VGA) implementieren. Dabei hängt die Wahl des Adapters von der Reichweite, der Übertragungsqualität und der maximal möglichen Auflösung ab, nicht aber von den verfügbaren Ausgängen der im Quadrocopter oder HMD verbauten Hardware, da alle gängigen Schnittstellen sich mithilfe von Adaptern ineinander konvertieren lassen.

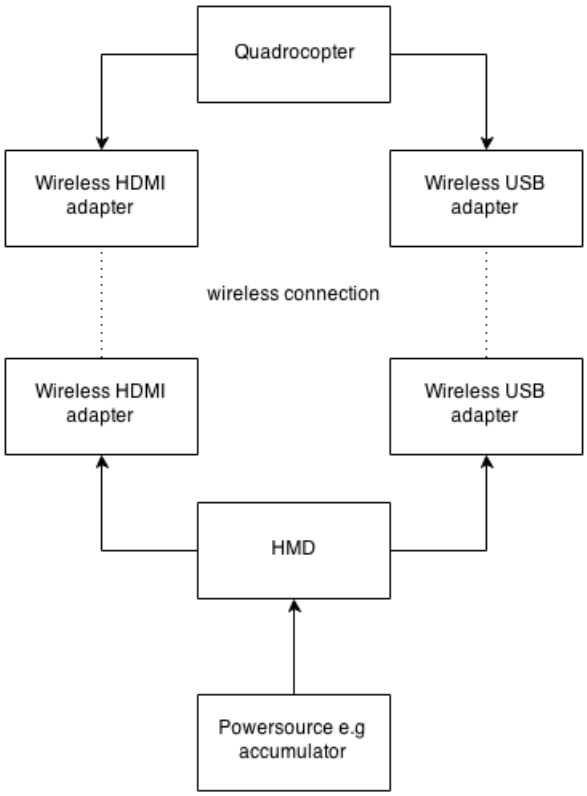


Abbildung 3.6: Konzept einer möglichen Funkstreckenlösung

Eine direkte Kommunikation über Bluetooth oder Infrarot wäre auch denkbar, würde aber entweder ein Bluetooth- beziehungsweise Infrarot-fähiges HMD benötigen, oder ein weiteres Gerät, das über eine Videoschnittstelle mit dem HMD verbunden ist und über Bluetooth beziehungsweise Infrarot an den Quadrocopter. Diese Form der Funkübertragung wäre dann wechselseitig, das HMD könnte also auch Daten an den Quadrocopter schicken. Für die reine Darstellung hätte dies keinen Vorteil gegenüber einer einseitigen Kommunikation. Wenn jedoch als kommunikationsfähiges Gerät ein System mit einer besseren Prozessorleistung als der im Quadrocopter verwendete Boardcomputer verwendet wird, kann das die allgemeine Leistung verbessern. Bei einer ausreichend großen Datenrate lassen sich das Kamerabild und die Telemetriedaten direkt an den zusätzlich hinzugefügten Computer senden und dort bearbeiten. Das würde nicht nur den Boardcomputer des Quadrocopters entlasten, sondern auch zu einer höheren Bildwiederholungsrate (engl. Framerate, FPS) führen. Es muss jedoch beachtet werden, dass die Größe, die ein einzelnes Kamerabild im Rohdatenformat, also einer nach der Digitalisierung unbearbeiteten Aufnahme der Kamera, erreichen kann je nach Auflösung im zweistelligen Megabyte Bereich liegt. Selbst nach einer Komprimierung der Aufnahme bleiben immernoch einige hundert kBit bis einige MBit pro

Sekunde der Übertragung an Daten. Für eine flüssige Darstellung der Aufnahme ist es notwendig, dass 30 Bilder pro Sekunde übertragen werden können. Die Datenrate von Bluetooth von etwa 2.2 Mbit/s ist also nur für geringe Auflösungen ausreichend für eine Kameraübertragung. Eine Infrarotverbindung, wie das VFIR oder Giga-IR (siehe Kapitel 2.3), ist mit einer Datenübertragungsrate von 96 MBit/s bzw. bis zu 1 GBit/s in der Lage die Kameraufnahmen mit einer hohen Auflösung und der benötigten Framerate zu übertragen. Da eine Infrarotverbindung aber eine dauerhafte Sichtverbindung benötigt, ist sie für den Einsatz innerhalb von Gebäuden mit vielen Wänden nicht geeignet, da die Verbindung nicht stabil aufrecht erhalten werden könnte ohne dem Quadrocopter zu folgen (siehe Abbildung 3.7).

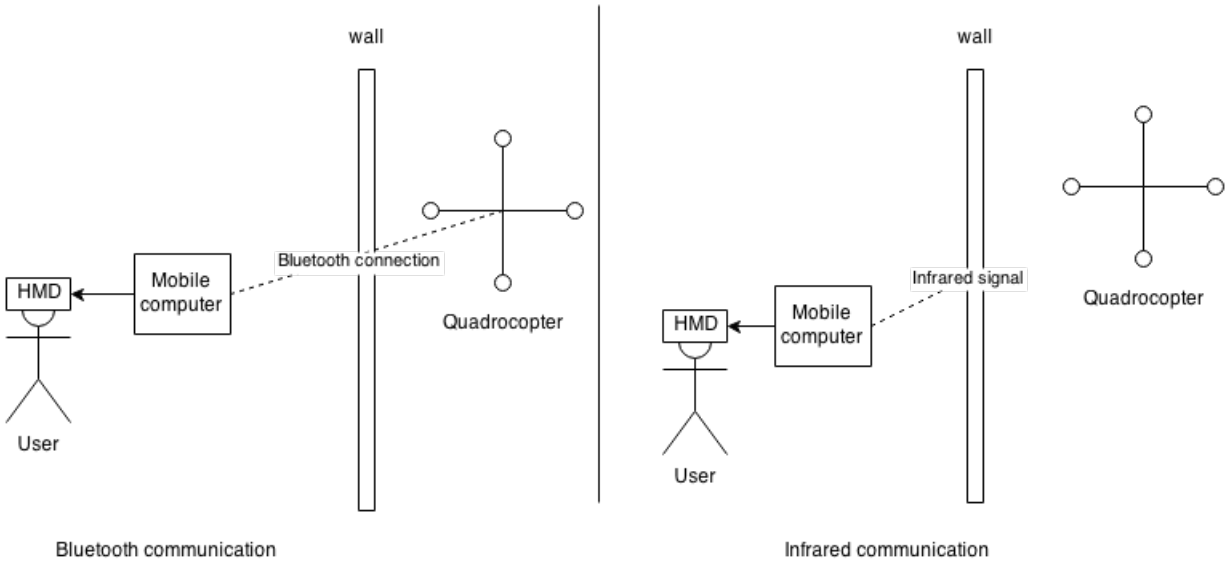


Abbildung 3.7: Links: Funkübertragung mit Bluetooth, rechts: Funkübertragung mit Infrarot

3.2.2 Online Kommunikation

Eine weitere Möglichkeit die Funkstrecke umzusetzen wäre eine Kommunikation über das Internet. Dabei würde der Quadrocopter mittels eines Internetzugangs über Satellit das Kamerabild auf einem Server als Direktübertragung laufen lassen, welches dann auf dem HMD angezeigt wird(siehe Abbildung 3.8).

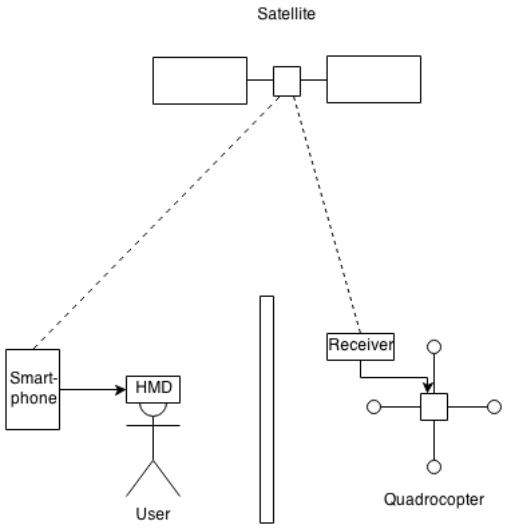


Abbildung 3.8: Verbindung zwischen HMD und Quadrocopter über einen Server

Bei diesem System wäre es nötig, dass sowohl Quadrocopter als auch HMD dauerhaften Breitband-Internetzugang besitzen um mit einer möglichst hohen Bildwiederholrate direkt übertragen zu können, da bei einer Kameraübertragung mehrere MBit/s an Daten entstehen können, wie bereits im Abschnitt 3.2.1 erwähnt. Im Fall der Internetübertragung muss beachtet werden, dass die Datenrate für Uplinks, also das Hochladen der Daten, geringer ist als die der Downlinks, also das Empfangen der Daten. Da der Quadrocopter die Daten erst hochladen muss, ist die Datenübertragungsrate für den Uplink der limitierende Faktor. Es ist notwendig, dass die Datenrate des gewählten Netzes größer ist als die für die Übertragung benötigte Datenrate. Als ortsunabhängiges Internet würden das Satellitennetz und das Mobilfunknetz in Frage kommen. Da ein HMD im Normalfall nur als Display funktioniert und nicht internetfähig ist, wäre es hier nötig das HMD zusätzlich noch an ein Gerät mit Internetzugang anzubinden. Hierfür würden sich beispielsweise Smartphones eignen. Bei dieser Art der Kommunikation sendet der Quadrocopter einen Livestream an einen Server, welcher dann von einem Smartphone abgespielt wird. Das Bild auf dem Smartphone wird dann auf dem HMD angezeigt. Das Konzept benötigt also neben einer Internetverbindung einen Server zum Abspielen des Kamerabildes, ein internetfähiges Gerät, wie ein Smartphone, eine Verbindung von diesem Gerät zum HMD und eine Software zur Steuerung der Prozesse. Da es keine Limitierung der Reichweite, wie im ersten Konzept, gibt, ist es auch möglich, das HMD über Netzspannung zu betreiben. Sollte Bedarf an der Portabilität des HMDs bestehen, kann, wie im ersten Konzept, auch hier ein Akku zur Stromversorgung genutzt werden.

Der größte Vorteil eines solchen Systems wäre, wie schon erwähnt, dass die Reichweite nicht limitiert wird. Es wäre also möglich mehrere Kilometer vom Quadrocopter entfernt zu sitzen und trotzdem das Kamerabild über ein HMD betrachten zu können. Ein weiterer Vorteil ist, dass das System so erweiterbar wäre, dass der Quadrocopter nur die Rohdaten verschickt und die Daten erst von einer aus Hardware Sicht besser ausgerüsteten Bodenstation bearbeitet werden bevor sie über einen Videostream an das HMD weitergeleitet werden. Dadurch würden die Hardwareanforderungen an den Quadrocopter verringert werden. Das System wäre praktisch an jedem Ort mit ausreichendem Internetzugang verwendbar.

4 Implementierung

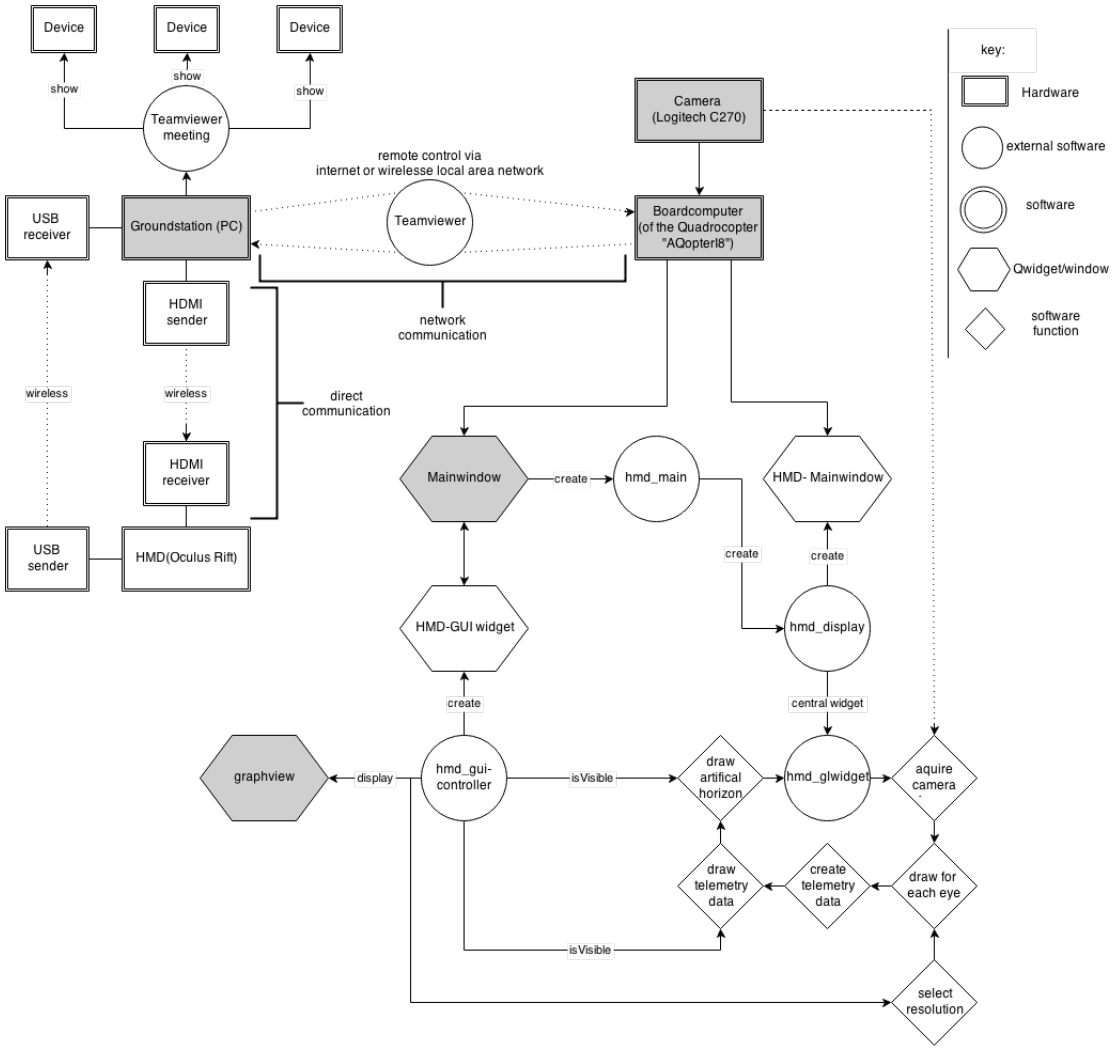


Abbildung 4.1: Schematisches Blockdiagramm des vollständigen Systems. Komponenten des bestehenden Systems sind Grau hinterlegt.

4.1 Aufbau

Eine Kombination aus verschiedenen Komponenten der in Kapitel 3 vorgestellten Konzepte bildet die Grundlage für die Implementierung. Als HMD wird die Oculus Rift Developement Kit 2 (DK2) von dem Unternehmen Oculus VR verwendet. Das HMD wird mit einer Bodenstation über eine direkte Funkverbindung verbunden. Dabei kann die Bodenstation wahlweise aus einem Desktop PC, einem Laptop, einem Smartphone oder einem Tablet bestehen. Als Funkverbindung dient ein HDMI-Wireless Adapter von Conrad (Kapitel 4.1.2). Das HMD benötigt zusätzlich eine USB Verbindung mit der Bodenstation. Dadurch kann die Anzeige der Bodenstation durch das HMD betrachtet werden. Die Bodenstation erhält einen Fernzugriff auf den Quadrocopter über die Software Teamviewer. Die Anzeige des Quadrocopters wird auf den Bildschirm der Bodenstation, und somit auch auf das HMD, projiziert. Über die „Meeting“ Funktion der Software Teamviewer lassen sich wahlweise weitere Geräte hinzufügen, die an dem von der Kamera des Quadrocopters versendeten Bild teilhaben können. Als Quadrocopter wird der Forschungsquadrocopter AQopterI8 der Universität Würzburg verwendet. Die Nutzung der Software Teamviewer, und damit auch einer Bodenstation, sind optional. Das HMD lässt sich auch direkt mit dem HDMI- und USB-Adapter kabellos mit dem Quadrocopter verbinden. Für die Anzeige der Kameraübertragung und der Telemetriedaten wird die bestehende Software des AQopterI8 um die HMD-Funktionalität erweitert.

4.1.1 Software

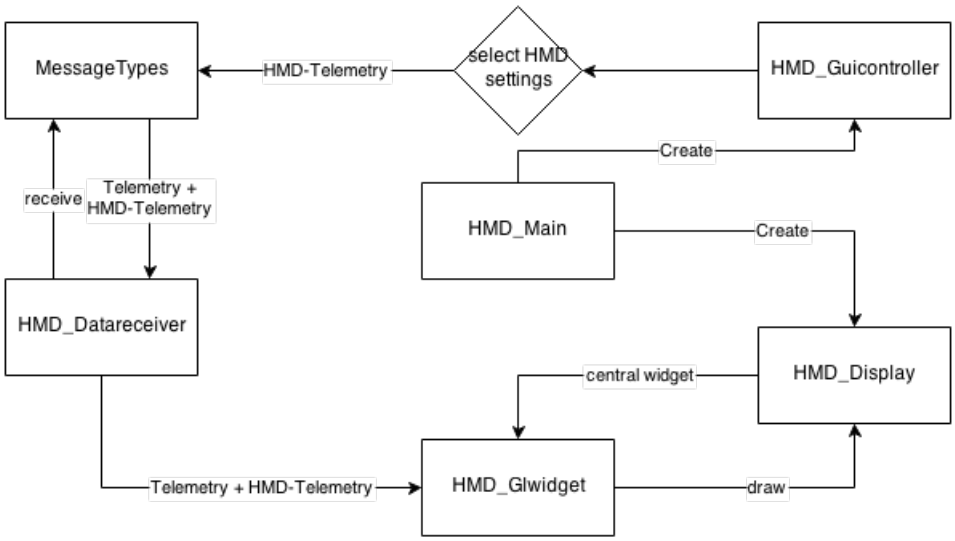


Abbildung 4.2: Blockdiagramm der erstellten Software

Die implementierte Software besteht aus zwei Teilabschnitten. Der erste Abschnitt besteht darin, das Kamerabild und die Telemetriedaten auf einem zusätzlichen Fenster in Vollbild gemeinsam anzuzeigen. Dazu wird die OpenGL Grafikbibliothek verwendet. Jedes Einzelbild der am Quadrocopter befestigten Kamera wird zu diesem Zweck in eine OpenGL Textur umgewandelt und als Textur über ein zweidimensionales Rechteck gezeichnet. Dabei wird für jedes Auge jeweils eine Hälfte des Bildschirmes von einem Rechteck abgedeckt. So wird der Bildschirm in zwei gleich große Teilbereiche links und rechts aufgeteilt, die jeweils dasselbe Kamerabild anzeigen. Diese Vorgehensweise ermöglicht die dreidimensionale Bildgenerierung im Oculus. Da im Oculus das Display durch eine Trennwand physikalisch aufgeteilt ist, sieht jedes Auge nur eine Hälfte des Bildschirmes und vereinigt es zu einem dreidimensional wahrgenommenen Bild (siehe Kapitel 2.1). Da das OpenGL Koordinatensystem, anders als in der Computergraphik üblich, seinen Ursprung im Zentrum des Bildschirms hat anstatt am oberen linken Bildschrimrand kann für das rechte Auge der negative X-Abschnitt des Koordinatensystems außer Acht gelassen werden, sodass ein neues Koordinatensystem entsteht mit dem Ursprung bei $\begin{pmatrix} 0.5 \\ 0.0 \end{pmatrix}$. Äquivalent dazu entsteht auf der linken Seite des Bildschirms für das linke Auge ein Koordinatensystem mit dem Ursprung $\begin{pmatrix} -0.5 \\ 0.0 \end{pmatrix}$ in OpenGL Koordinaten. Dadurch dass die Y-Koordinaten in beiden Syste-

men äquivalent sind kann ein Punkt in einem Koordinatensystem in die exakt selbe Position des jeweils anderen Koordinatensystems durch einfache Translation überführt werden. Es gilt also:

$$p_l = \begin{pmatrix} -0.5 \\ 0.0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -1.0 \\ 0.0 \end{pmatrix} p_r \pm \begin{pmatrix} a \\ 0.0 \end{pmatrix} \tag{4.1}$$

bzw.

$$p_r = \begin{pmatrix} +0.5 \\ 0.0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -1.0 \\ 0.0 \end{pmatrix} p_l \pm \begin{pmatrix} a \\ 0.0 \end{pmatrix} \tag{4.2}$$

wobei p_l die Position eines Punktes im linken Koordinatensystem ist und p_r die Position im rechten Koordinatensystem und a ist der Koeffizient für den Abstand zwischen den beiden Augen.

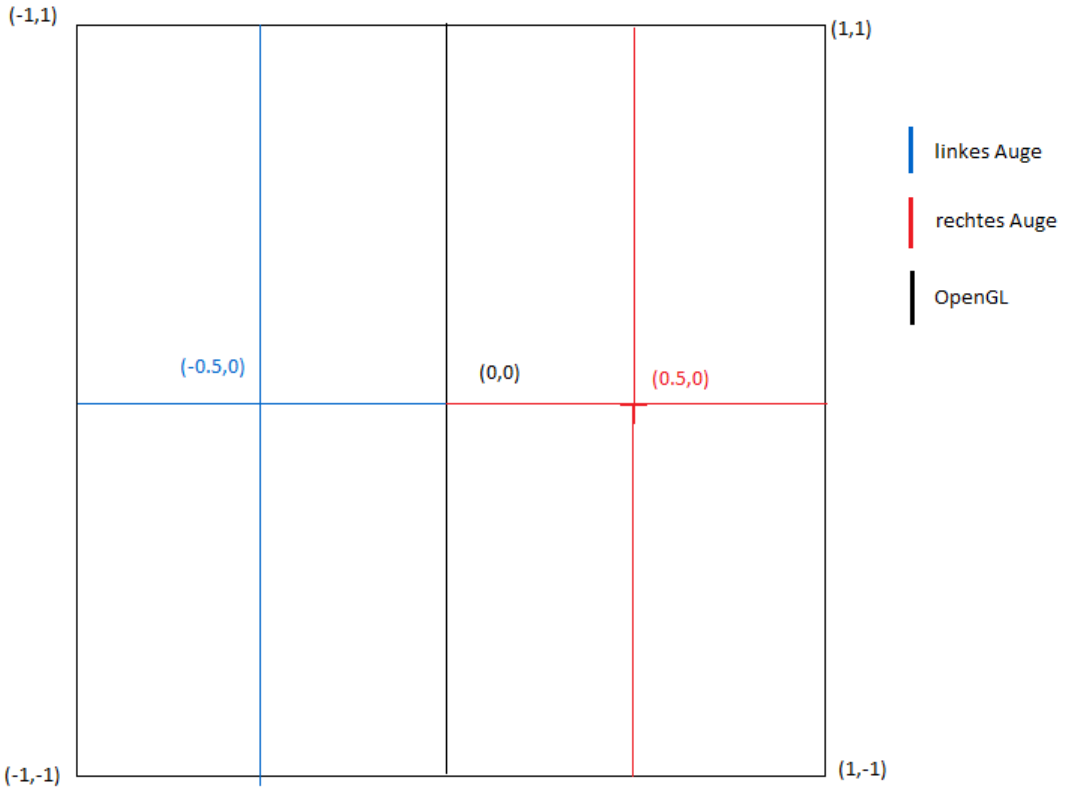


Abbildung 4.3: Koordinatensysteme in OpenGL und für das jeweilige Auge

Das Kamerabild dient als Hintergrund für die virtuelle Umgebung auf der die Telemetriedaten angezeigt werden. Die Daten werden über die schon vorhandene „Telemetrydisplay“ Klasse erhalten. Dadurch sind alle Telemetriedaten verfügbar und es wird auf eine zusätzliche Abfrage der Daten verzichtet, die Speicher und Rechenleistung benötigen würde. Die Abfrage der Telemetriedaten ist zum Zeitpunkt der Abgabe nicht vollständig funktionsfähig. Die Telemetriedaten

können auf zwei verschiedene Arten angezeigt werden. Sie können als Fließkommazahlen dargestellt werden oder, bei Werten, die klar definierte obere- und untere Grenzen haben, kann die Anzeige als Balkendiagramm erfolgen. Die Anzeige der räumlichen Ausrichtung des Quadrocopters erfolgt über einen künstlichen Horizont. Dieser wird in Form einer Navigationskugel Implementiert. Der Roll- Nick- bzw. Gierwinkel kann direkt durch die Rotation der Kugel abgelesen werden. Zur Darstellung der Kollisionswarnungsparameter wird eine optische Kollisionswarnung verwendet. Bei einer kritischen Annäherung des Quadrocopters an ein Objekt von links, rechts, oben oder unten blinkt an der jeweiligen Seite des Bildschirmes an rotes Rechteck. Die Information einer bevorstehenden Kollision wird von den vorhandenen Telemetriedaten erhalten. Da diese Daten zum Zeitpunkt der Abgabe nicht zur Verfügung stehen ist die Kollisionswarnung nicht funktionsfähig.

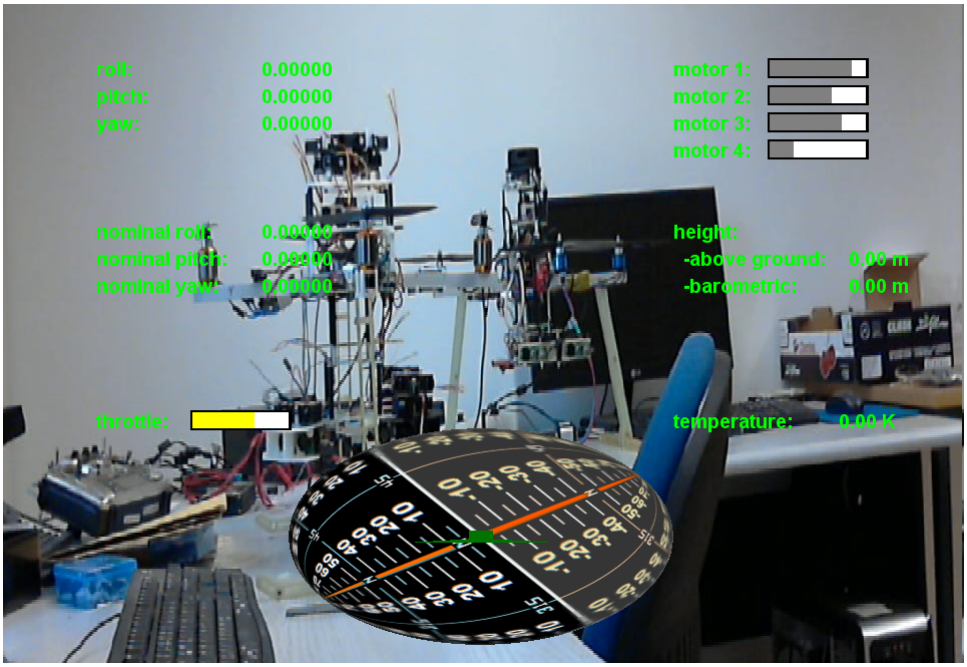


Abbildung 4.4: Ausschnitt einer Anzeige auf dem Oculus Rift Developer Kit 2 wie sie durch die Videobrille zu sehen ist.

Die Anzeige erfolgt auf einem separaten Fenster. Die Telemetriedaten sind am linken und rechten Rand positioniert und werden soweit eingerückt, dass sie auf dem HMD leicht lesbar sind (Abbildung 4.4). Die Position des künstlichen Horizonts befindet sich am unteren Rand in der Mitte der Anzeige, sodass sie sich im peripheren Blickfeld befindet und die Betrachtung des Kamerabildes nicht stört. Die Telemetriedaten können über eine an das Hauptfenster der Software

hinzugefügten Benutzerschnittstelle (engl. user interface, UI) ein- und ausgeschaltet, sowie ausgewählt werden(Abbildung 4.5). Über das UI lassen sich außerdem diverse Einstellungen für das HMD und die Kamera vornehmen. Zum Zeitpunkt der Abgabe lassen sich die Auflösung der Kamera verändern, einige ausgewählte Telemetriedaten anzeigen und der künstliche Horizont lässt sich ein und ausschalten. Weitere nicht vollständig funktionsfähige Funktionen der UI umfassen eine Auswahl von unterstützten HMDs, mit der die Verzeichnung auf das HMD angepasst wird, eine Kamera Auswahl, eine Eingliederung des im bestehenden System schon vorhandenen „graphview“ Fensters zur graphischen Darstellung der ausgewählten Telemetriedaten sowie eine Möglichkeit die optische Kollisionswarnung ein- und auszuschalten. Das auf das HMD projizierte Bild wird auch auf dem UI angezeigt.

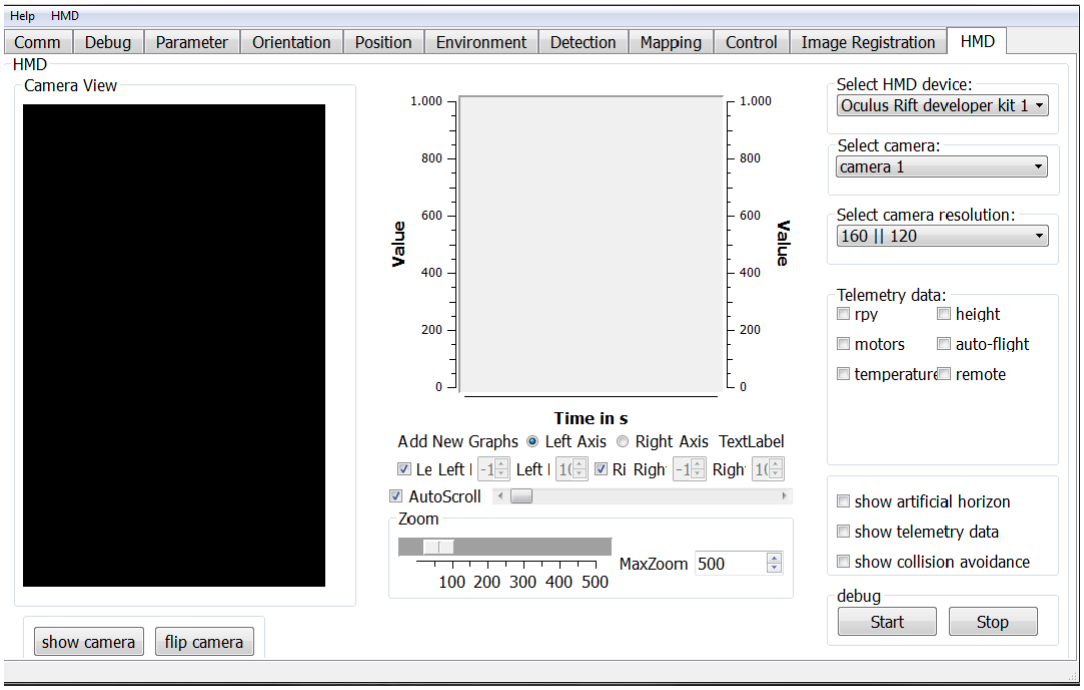


Abbildung 4.5: User Interface für das HMD

4.1.2 Hardware

Als Quadrocopter wird der AQopterI8 von dem Lehrstuhl Informatik 8 der Universität Würzburg unverändert verwendet. Es ist ein Videoausgang und mehrere USB Steckplätze vorhanden. Die für diese Arbeit verwendete Kamera ist die C270 von Logitech.

HMD

Für diese Arbeit wurde die neueste Version des sich noch in Entwicklung befindlichen Head-mounted Displays „Oculus Rift Developer Kit 2“ (Stand Oktober 2014) von Oculus VR verwendet. Dieses bietet neben einem im Vergleich zu anderen HMDs günstigeren Preis von 350 USD ein 5.7 Zoll Low Persistence OLED Display mit einer Auflösung von 1980x1080 Pixeln, also 960x1080 Pixel pro Auge. Es kann außerdem mithilfe von eingebauten Gyroskopen, Magnetometern und Accelerometern die Kopfneigung bestimmen und, mit einem near infrared CMOS Sensor, die Kopfposition. Diese Funktionen werden in dieser Arbeit nicht benutzt, eröffnen aber neue Möglichkeiten für zukünftige Implementierungen. Mit einem Gewicht von 0.44 kg ohne Verkabelung kann es auch längere Zeit ohne Probleme getragen werden.



Abbildung 4.6: Oculus Rift developer kit 2

Hardware zur Funkübertragung

Für die direkte Funkverbindung zwischen dem Oculus Rift und dem Quadrocopter beziehungsweise der Bodenstation wird das HDMI Funkübertragungs-Set verwendet. Es besitzt eine Reichweite von 10 Metern bei einer Sendefrequenz von 5 GHz.



Abbildung 4.7: Das Funkübertragungs-Set von Conrad

Für den Fernzugriff über das Internet oder lokale Netz ist bis auf einen Adapter keine weitere Hardware notwendig.

4.2 Funkstrecke

Die Implementierung der Funkstreckenverbindung besteht aus zwei Abschnitten. Der erste Abschnitt ist die Verbindung zwischen dem HMD und der Bodenstation beziehungsweise dem Quadrocopter. Für diese Verbindung werden jeweils ein USB Funk-Adapter und das Funkübertragungs-set von Conrad eingesetzt. Da sowohl die Oculus Rift als auch das Funkübertragungs-set für die Stromversorgung eine 5Volt Spannung benötigen, werden hier mobile USB-Ladestationen verwendet, damit das System unabhängig vom Stomnetz verwendet werden kann.



Abbildung 4.8: Beispiel einer mobilen USB-Ladestation

Ist das HMD direkt mit dem Quadrocopter verbunden, wird eine Bodenstation nicht benötigt. Die Funkadapter für die HDMI und USB Verbindung werden an die jeweiligen Steckplätze

des HMD und des Quadrocopters verbunden. Der AQopterI8 verfügt über einen VGA-Ausgang. Daher ist es notwendig, einen VGA zu HDMI Adapter zwischenzuschalten. Als zusätzliche Möglichkeit zur kabellosen Verbindung kann der Boardcomputer des Quadrocopters mittels einer Remoteübertragung von einer Bodenstation ferngesteuert werden. In dieser Implementierung wird die Software Teamviewer verwendet. Teamviewer bietet die Möglichkeit einen Computer über einen anderen fernzusteuern. Dadurch kann die Software auf dem IQopterI8 direkt von der Bodenstation gestartet werden. Die Bodenstation hat damit direkten Zugriff auf alle Telemetrie Daten des Quadrocopters und kann sowohl die HMD-Einstellungen vornehmen als auch das erstellte Bild auf einem neuen Fenster anzeigen. Das HMD wird, wie bei der direkten Verbindung an den Quadrocopter auch, durch Funkstreckenadapter kabellos mit der Bodenstation verbunden und kann dadurch das verarbeitete Bild mit den Telemetrie Daten des Quadrocopters über die Bodenstation betrachten.

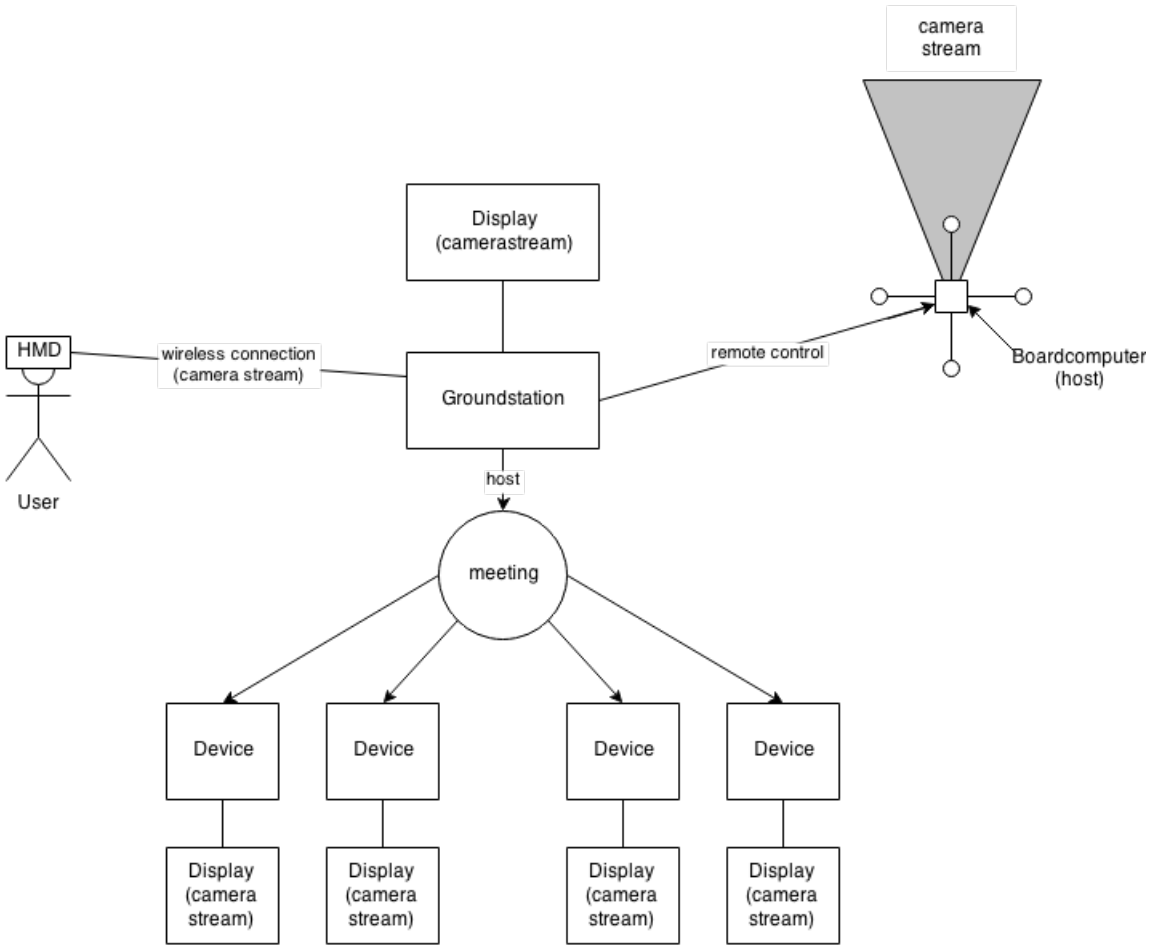


Abbildung 4.9: Schematischer Aufbau einer Teamviewer Sitzung mit mehreren Nutzern

Zusätzlich bietet Teamviewer die Möglichkeit eine sogenannte Meeting Sitzung zu starten. Das auf der Bodenstation angezeigte Bild des Quadrocopters ist dann für jeden Teilnehmer des Meetings sichtbar. An dem Meeting kann jeder PC teilnehmen, der über die zufällig generierte Meeting ID der Bodenstation verfügt und sich entweder im selben lokalen Netz befindet oder, sollte die Verbindung über das Internet stattfinden, mit dem Internet verbunden ist. Dabei funktioniert das System sowohl über das Internet als auch über ein lokales Netz.

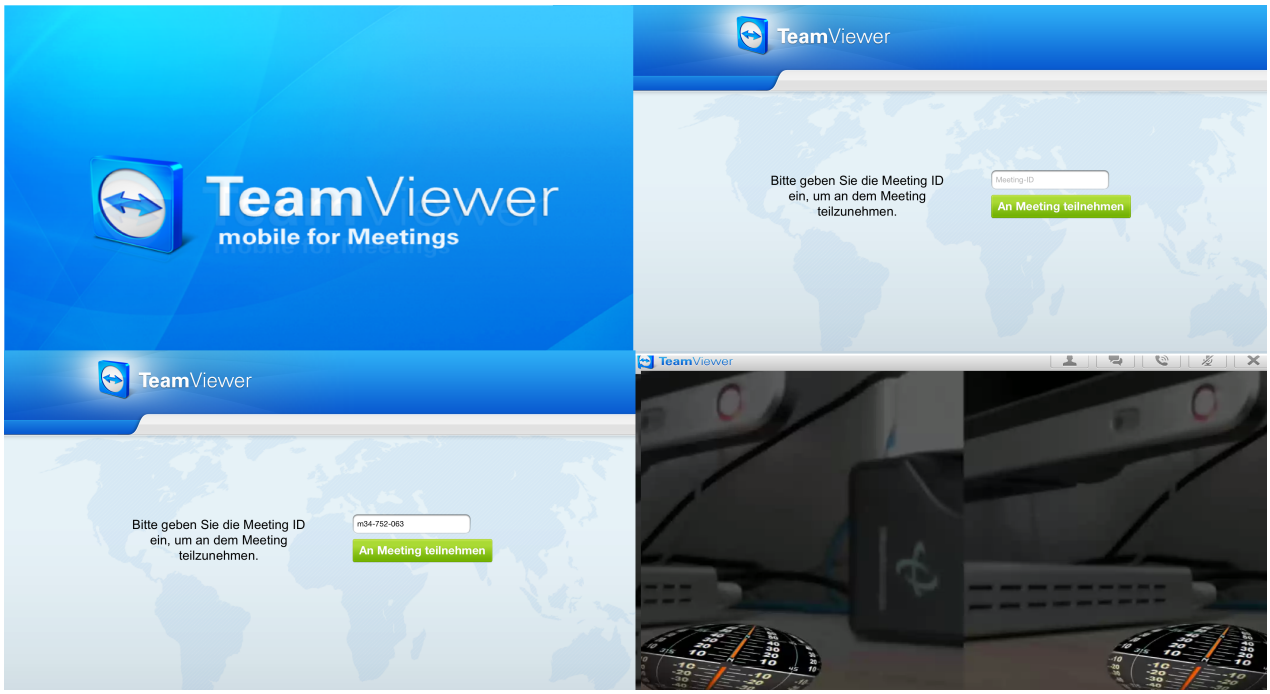


Abbildung 4.10: Anmeldeprozess bei der Teilnahme an einem Meeting

5 Evaluierung

Eine flüssige Anzeige der Kameraaufnahme ist für den Nutzen des Systems von besonderer Bedeutung. Daher ist der Schwerpunkt der Evaluierung die flüssige Darstellung der Videoaufnahme und alle damit verbundenen Teilaspekte.

5.1 Auswahl des HMD

Bei der Wahl eines geeigneten HMDs sind die wichtigsten Parameter, die in die Entscheidung mit einfließen neben den Kosten, die bei diesem Projekt möglichst gering gehalten werden sollen, die maximal mögliche Auflösung sowie das abgedeckte Sichtfeld.

Name	**Unternehmen**	**Auflösung**	**Sichtfeld**	**Kosten**
Oculus Rift DK1	Oculus VR	1280x800	100°	350 USD
Oculus Rift DK2	Oculus VR	1920x1080	100°	350 USD
Moverio BT200	Epson	960x540	23°	700 USD
Carl Zeiss Cinemizer	Carl Zeiss	870x500	30°	574 EUR
AiRScouter	Brother	600x800	-	-
HMZ-T3W	Sony	1280x720	45°	1299 GBP
Projekt Morpheus	Sony	1920x1080	90°	-
ST1080	Silicon Microdisplay	1920x1080	45°	799 USD

Tabelle 1: Vergleich zwischen den gängigen HMDs in Hinsicht auf maximale Auflösung, Kosten und Sichtfeld Stand: Oktober 2014

Für die Darstellung erweiterter Realität bietet sich allein schon aus Sicherheitsgründen die Verwendung eines optischen HMDs an. Bei einem Ausfall der Technik ist der Benutzer zwar auf sich allein gestellt, kann aber die Umwelt noch wahrnehmen, während er bei der Verwendung eines

Video HMDs visuell komplett von der Welt abgeschnitten ist [2]. In den meisten Fällen dient die augmentierte Realität zur Unterstützung bei Aufgaben, die auch ohne die Verwendung eines AR-Systems durchgeführt werden können. Beim vorliegenden System werden jedoch von einem Quadrocopter aufgezeichnete Videodaten aus der Entfernung betrachtet. Während der Quadrocopter beispielsweise ein brennendes oder einsturzgefährdetes Gebäude erkundet, befindet sich der Benutzer in sicherer Entfernung. Durch die autonome Steuerung des Quadrocopters benötigt er keine externen Befehle, die einzige Aufgabe des Benutzers ist also das Betrachten der Videodaten. Dadurch entstehen bei Ausfall des Systems weder für den Anwender, noch für den Quadrocopter Sicherheitsrisiken [68] [24] [2], [27]. Für die Betrachtung der aufgezeichneten Videodaten ist eine hohe Bildqualität entscheidend. Da bei Video HMDs die eingeblendeten Objekte und Informationen besser erkennbar sind und eine Sicht auf die reale Welt nicht benötigt wird, fällt hier die Wahl auf ein Video HMD.

Name	**Typ**	**Display**
Oculus Rift DK1	Video HMD	OLED
Oculus Rift DK2	Video HMD	OLED
Moverio BT200	See-through OTG	-
Carl Zeiss Cinemizer	Video HMD	OLED
AiRScouter	See-through	OLED
HMZ-T3W	beides, ablegbare Sichtblende	OLED
Projekt Morpheus	Video HMD	LCD
ST1080	See-through	LCoS

Tabelle 2: Vergleich zwischen den gängigen HMDs in Hinsicht auf den Typ und das verwendete Display Stand: Oktober 2014

Für die Wahl des HMD ist neben den Kosten und dem abgedeckten Sichtfeld für eine optimale Immersion auch die Bildqualität von Bedeutung. Diese wird neben der maximalen Auflösung vorallem durch die Wahl eines geeigneten Displays beeinflusst. Folgend werden die Vor-und Nahteile der verschiedenen aufgeführten Displays abgewogen.

LCD

Bei einem LCD, Liquid Crystal Display, dt. Flüssigkristallanzeige /-bildschirm, beeinflussen Flüssigkristalle auf die ein bestimmtes Maß an Spannung angelegt wird die Polarisationsrichtung des Lichts. Einige der Vorteile von LCDs sind, dass sie sehr kompakt und leicht sind, wenig Strom verbrauchen, keine geometrische Verzerrung haben, kein theoretisches Auflösungslimit haben und digitale Daten, die über eine HDMI-Verbindung empfangen werden, ohne eine vorhergehende Umrechnung in analoge Daten abbilden können. Nachteile sind jedoch unter Anderem, dass es nur eine bestimmte Auflösung hat, um andere Auflösungen anzeigen zu können muss eine Skalierung durchgeführt werden, was unter Anderem Unschärfe zur Folge hat. Auch die geringe Bildwiederholrate wirkt sich negativ auf 3D-Grafiken und das Abbilden schneller Bewegungen auswirkt. So können schnelle Bewegungen unscharf erscheinen. Die Hitzeempfindlichkeit von LCD-Bildschirmen, die sich durch Kontrast- und Helligkeitsverluste sowie eine langsamere Reaktionszeit bei hohen Temperaturen äußert, sollte bei einem Einsatz für die Feuerwehr ebenfalls beachtet werden, da der Benutzer zum Feuerwehr-Quadrocopter gehörenden HMDs eventuell in unmittelbarer Nähe des Feuers steht [44] [56].

LCoS

LCoS ist die Abkürzung für Liquid Crystal on Silicon, dt. Flüssigkristalle auf Silikon, die Technik funktioniert nach einem ähnlichen Prinzip wie die bei LCDs verwendete Technik, mit dem Unterschied, dass das Licht reflektiert wird und nicht das Flüssigkristall passiert. Die Technik wurde ursprünglich für Projektoren entworfen. Wie bei LCDs kann es auch hier zu graphischen Einschränkungen durch die fixierte Auflösung des Displays kommen. Die zurzeit erhältlichen HMDs mit LCoS-Display haben außerdem ein vergleichsweise kleines Gesichtsfeld von nur 45°, weswegen sie für den geplanten Verwendungszweck nicht in Frage kommen [54] [57].

OLED

Organische Leuchtdioden, engl. organic light emitting diode) sind organische Halbleiter, die als Reaktion auf eine elektrische Spannung Licht emittieren. Sie haben eine kürzere Haltbarkeit als LCDs, und benötigen auch mehr Strom als diese. Dafür ist die Reaktionszeit von OLED Bildschirmen um einiges höher, als die von LCD Bildschirmen. Während die Reaktionszeit eines

Standard LCD-Bildschirms zwischen 1 und 16 ms beträgt, kann ein OLED Bildschirm theoretisch schon innerhalb von 0,1 ms reagieren [61] [60].

Betrachtet man das ausgewählte HMD, die Oculus Rift DK2, in Hinsicht auf die erläuterten Kriterien, so kann man erkennen, dass die Wahl in Bezug auf Kosten, Sichtfeld, maximale Auflösung und das verbaute Display eine für die Anforderungen geeignete Lösung darstellt. Der Preis mit 350 USD ist im Vergleich günstig (siehe Tabelle 1). Das gesamte Sichtfeld des Nutzers wird mit dem 100° Sichtfeld abgedeckt und ermöglicht eine maximale Immersion. Das Verbaute OLED Display vermindert durch die verringerte Reaktionszeit die „Motion Sickness“ (siehe 2) und ermöglicht ein qualitativ hochwertiges Bild in 1920x1080 Pixeln Auflösung. Auch wenn andere HMDs ebenso verwendbar wären, ist die Oculus Rift eine kostengünstige Wahl mit hochwertiger Qualität.

5.2 Evaluierung der Bildwiederholrate

Zum Test der Bildwiederholrate (Frames per second, FPS) wurde die Software auf einem vier Jahre alten Windows Notebook und dem Boardcomputer des AQopterI8 Quadrocopter getestet. Für den Test wurde die FPS für jede implementierte Kameraauflösung jeweils 10 mal alle 100 Einzelbilder ausgegeben und der durchschnitt gebildet. Das Ergebnis ist also die durchschnittliche Framrate nach 1000 Einzelbildern. Als Kamera wurde die C270 von Logitech für die Tests verwendet. Die evaluierten Auflösungen sind Bruchteile der maximal möglichen Auflösung pro Auge des Oculus Rift DK2 von 960x1080 Pixeln. Da die Kamera nur Auflösungen bis 1280x720 Pixeln unterstützt wurden für den Tests nur die entsprechenden Auflösungen innerhalb diesen Bereiches berücksichtigt.

Test auf einem PC

Das Notebook ist mit einem Intel Core I5 M450 Prozessor mit 2 Kernen und einer ATI Mobility Radeon HD 5850 Grafikkarte ausgerüstet.

Nummer	**480x540 Pixel**	**360x405 Pixel**	**240x270 Pixel**	**120x135 Pixel**
1	12.70	32.20	32.23	23.13
2	13.84	31.49	30.21	32.37
3	11.05	25.57	24.02	28.83
4	12.33	34.04	33.06	22.38
5	14.49	30.79	29.49	31.94
6	12.66	24.67	23.27	28.06
7	12.82	33.35	32.37	21.41
8	13.38	30.02	28.95	31.26
9	13.77	23.94	22.23	27.32
10	14.24	32.80	31.94	35.11
Durchschnitt	**12.93**	**29.89**	**28.78**	**28.17**

Tabelle 3: Test der Framerate auf einem Laptop

Da die benutzte Kamera eine Framerate von 30 FPS unterstützt, ist die höchste zu erreichende durchschnittliche Framerate 30 Einzelbilder pro Sekunde. Auf dem Notebook wird dieser Wert bei der Auflösung von 360x405 Pixeln erreicht. Eine weitere Verringerung der Auflösung bringt keine nennenswerte Erhöhung der Framerate und ist somit sinnvoll für Systeme mit geringerer Leistung. Diese durchschnittlichen Werte sind ausreichend für ein flüssiges Bild und somit bei Nutzung eines HMD für ein immersives Erlebnis. Für die Immersion wäre zusätzlich noch eine möglichst hohe Kameraauflösung nötig. Um die Auflösung weiter mit gleichbleibender Framerate erhöhen zu können wird eine bessere Kamera benötigt.

Test auf dem AQopterI8

Die Software wurde auf dem AQopterI8, ebenso wie auf dem Notebook, nach Framerate überprüft.

Nummer	480x540 Pixel	360x405 Pixel	240x270 Pixel	120x135 Pixel
1	2.46	5.27	5.55	5.24
2	2.36	5.52	5.26	5.82
3	2.54	4.98	4.98	6.04
4	2.43	5.29	5.75	6.14
5	2.57	5.62	5.48	5.13
6	2.79	4.95	5.19	5.58
7	2.56	5.30	4.93	5.69
8	2.58	5.61	5.66	5.80
9	2.58	4.96	5.43	5.85
10	2.59	5.26	5.14	5.96
Durchschnitt	**2.55**	**5.28**	**5.34**	**5.73**

Tabelle 4: Test der Framerate auf dem AQopterI8 Quadrocopter der Universität Würzburg

Wie in Tabelle 4 zu erkennen ist, ist die Framerate selbst mit niedrigster Auflösung weit von den benötigten Mindestanforderungen von 25 FPS für eine flüssige Übertragung entfernt. Es ist jedoch zu erkennen, dass sich die Framerate ab einer Auflösung von 360x405 Pixeln bei Senkung der Auflösung nicht erhöht, wie auch beim Notebook (Tabelle 3). Das deutet darauf hin, dass die Auflösung der Kamera in diesem Fall nicht der limitierende Faktor für die Framerate ist. Neben der im Vergleich zum Notebook geringeren Prozessorleistung des AQopterI8 Boardcomputers könnte die geringe Framerate vorallem mit dem Fehlen einer Grafikkarte erklärt werden. Die zur Darstellung verwendete Software greift auf die OpenGL Bibliothek zurück, welche eine Hardwarebeschleunigung über die Grafikkarte unterstützt. Ohne eine Grafikkarte, und die damit verbundene Erhöhung der FPS, ist die Nutzung über ein HMD zwar möglich, aber nicht praktikabel, da kein flüssiges Bild entstehen kann.

5.3 Evaluierung der Funkstrecke

Zum Test der Funkstrecke wurde der Quadrocopter und ein als Bodenstation dienendes Notebook mit einer Lokalen Netzwerkverbindung miteinander Verbunden. Als Notebook wird das selbe Modell verwendet wie im Kapitel 3. Die Bodenstation konnte mit der Software Teamviewer auf den Boardcomputer des Quadrocopters kabellos zugreifen und bekam die Anzeige von diesem auf dem Bildschirm angezeigt. Die Implementierte Software wurde gestartet und das Kamerabild wurde auf die Bodenstation übertragen. Es wurde überprüft, ob die Latenz der Verbindung sich in einem akzeptablen Rahmen befindet und das Kamerabild somit flüssig übertragen wird(siehe Abbildung 5.1).

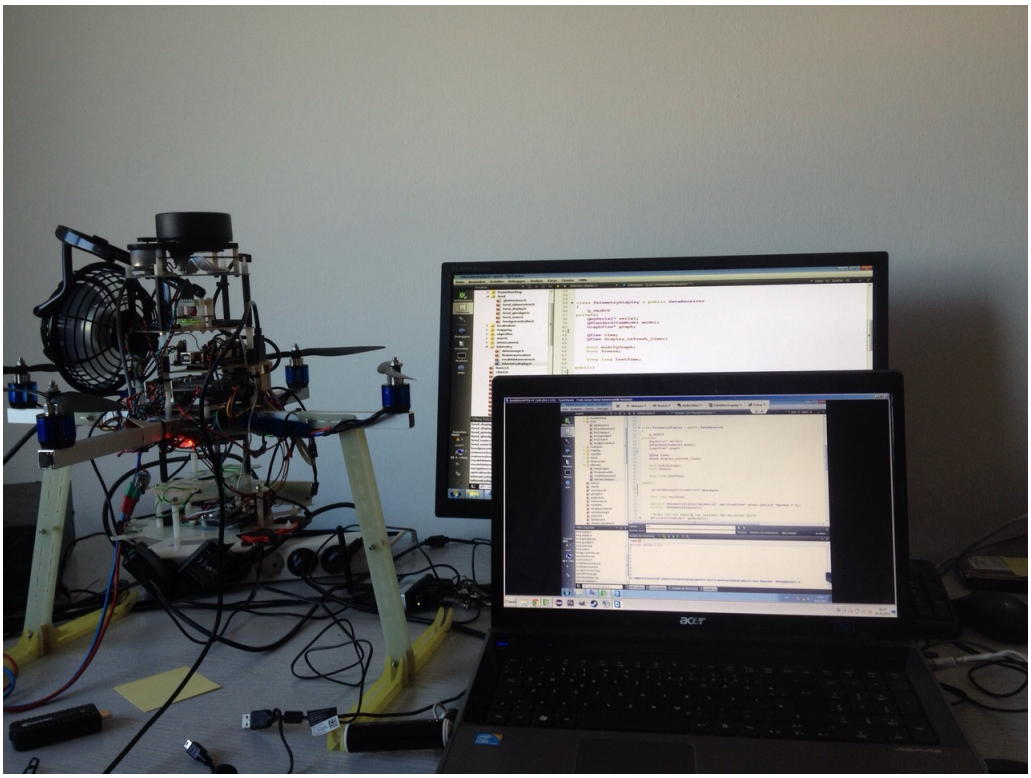


Abbildung 5.1: Remote Control des Quadrocopters durch eine Bodenstation (in diesem Fall das Notebook)

Test des Fernzugriffs

Der Test zeigte, das in einem lokalen Netz keinerlei nennenswerte Latenzen entstanden sind und das Bild mit der Framerate des Quadrocopters übertragen wurde. Da der Quadrocopter jedoch selbst bei geringsten Auflösungen nur eine Bildübertragungsrate von etwa 6 FPS erreicht konnte das Bild nicht flüssig übertragen werden. Deshalb wurde, um die Latenz der Übertragung über-

prüfen zu können, ein zweiter Testlauf gestartet. Anstatt des Quadrocopters wurde die Software an einem weiteren Notebook gestartet, welches von der Bodenstation über Teamviewer ferngesteuert wurde. Hier konnte erkannt werden, dass zwischen den angezeigten Bildern bis auf wenige Latenzspitzen kein erkennbarer Unterschied zu sehen war. Das Bild konnte auf der Bodenstation flüssig über das HMD betrachtet werden.

Test der Funkstrecke mit mehreren Nutzern

Zur Überprüfung der Latenz bei der Funkverbindung mit mehreren Geräten wurde ein weiterer Test mit folgendem Aufbau durchgeführt. Als Quadrocopter diente ein Notebook, welches mit einem Fernzugriff über Teamviewer von der Bodenstation gesteuert wurde. An die Bodenstation wurden zwei weitere Geräte über die Meeting Funktion von Teamviewer verbunden. Alle Teilnehmer waren an das selbe Netz mit einer Datenrate von 32MBit/s verbunden und kommunizierten über das Internet. (siehe Abbildung 5.2).



Abbildung 5.2: Testaufbau für eine Verbindung mit mehreren Geräten.

Alle Teilnehmer konnten das Kamerabild empfangen und flüssig betrachten. Die über die Meeting Funktion an die Bodenstation verbundenen Geräte hatten jedoch stärkere Schwankungen in der Latenz als die Bodenstation. Die Bodenstation konnte das Bild bis auf einige wenige Latenzschwankungen problemlos empfangen. Die Drahtlose Kommunikation funktioniert sowohl über ein Lokales Netz als auch über das Internet, wenn eine ausreichend große Bandbreite vorhanden ist. Je mehr Geräte an das selbe Netz verbunden sind, desto größer ist die Anforderung an das Netz.

6 Diskussion und Ausblick

6.1 Ergebnisse

Die Hauptaufgabe der Arbeit war es bestehende Telemetriedaten auf einem HMD anzeigen zu lassen. Zu diesen gehört das Videobild einer Kamera, die Anzeige der Daten und ein künstlicher Horizont. Das System wurde erfolgreich um die HMD Funktion erweitert und ist in der Lage das Bild einer Kamera auf dem HMD anzuzeigen. Die Auflösung der Kamera kann zu optimierungszwecken angepasst werden. Auf dem Kamerabild werden sowohl Telemetriedaten als auch der künstliche Horizont angezeigt, können jedoch zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht mit den Werten des Quadrocopters aktualisiert werden. Es sind bestimmte Telemetriewerte verfügbar, die über eine eingefügte Benutzerschnittstelle ein- und ausgeschaltet werden können. Die Evaluierung zeigte, dass solange die Hardware des Quadrocopters nicht um eine weitere Grafikkarte erweitert wird, die HMD Funktionaliät nur sehr beschränkt nutzbar ist, da die immersive Wirkung durch die geringe FPS und die geringe Kameraauflösung stark reduziert ist. Aus der Evaluierung ist jedoch auch ersichtlich, dass bei einer besseren Hardware und einer besseren Kamera durchaus, die für die HMD benötigte Framerate und Auflösung, erreichbar ist. Der zweite Teil der Arbeit beschäftigte sich mit der Diskussion und Implementierung einer geeigneten Funkstreckenlösung. Dabei wurden mehrere Konzepte erstellt und zwei Arten der Funkverbindung implementiert. Das HMD kann wahlweise direkt mit dem Quadrocopter verbunden werden oder indirekt über eine Bodenstation. Für die drahtlose Kommunikation zwischen dem Quadrocopter und der Bodenstation wurde eine Möglichkeit ermittelt, dass der Bodenstation Fernzugriff auf den Quadrocopter gegeben wird. Neben zahlreichen weiteren Anwendungsmöglichkeiten, die sich dadurch erschliessen, ist für die Arbeit der Zugriff auf die Kameraübertragung von Bedeutung. Das Kamerabild kann auf die Bodenstation drahtlos übermittelt werden und über eine Funkverbindung zwischen der Bodenstation und dem HMD auf dem HMD angezeigt werden. Die Evaluierung zeigte, dass die-

ses System bei ausreichender Bandbreite stabil und ohne nennenswerten Störungen funktioniert. In der Evaluierung konnte ausserdem belegt werden, dass dieses System auch auf mehrere Geräte erweiterbar ist. Dadurch kann das Kamerabild mit den Telemetriedaten nicht nur auf dem HMD, sondern auch auf der Bodenstation und weiteren an die Bodenstation verbundenen Geräten angezeigt werden.

6.2 Ausblick

Wie aus der Evaluierung hervorgeht, ist der Quadrocopter nun in der Lage einen Videostream des Gesehens nicht nur an das HMD, sondern auch an weitere zugeschaltete Geräte, zu übermitteln. Dies eröffnet viele Möglichkeiten. Beispielsweise können, im Falle eines Großeinsatzes, mehr Einsatzkräfte schon einen Überblick gewinnen, bevor sie sich direkt in das Geschehen begeben. Jeder einzelne Feuerwehrmann könnte das Bild der Kamera auf sein Display übertragen lassen. Auch im militärischen Bereich könnte diese Technik Verwendung finden. Statt wie bisher basierend auf den Informationen nur einen groben Überblick über die Lage zu erhalten, könnten alle Soldaten der Einheit über den implementierten Teamviewer das Gesehen auch sehen, während sie sich auf einen eventuellen Einsatz vorbereiten und dem Einsatzleiter, der das HMD trägt, besser folgen. Für Sicherheitskräfte, die sich schnell einen Überblick über die Umgebung machen wollen ohne ihre Position verlassen zu müssen bietet das HMD eine sichere und effektive Möglichkeit. Zivilen Nutzen hätte die Anwendung bei Firmen, die Investoren von sich überzeugen möchten. So kann eine Firmenbegehung virtuell stattfinden aber auch für Firmeninterne Besprechungen könnte das System von Vorteil sein. Mehrere Mitarbeiter gleichzeitig könnten über die Meetingfunktion bei einer virtuellen Begehung durch beispielsweise eine Fabrik dabei sein. Dabei können verschiedene Produktionshallen und Produktionsabläufe einer Fabrik ohne größeren zeitverlust während einer Besprechung durch die Kamera des Quadrocopters betrachtet und überprüft werden. Es wäre jedoch von Vorteil, eine auf die Situation des AQopterI8 zugeschnittene Lösung für den Fernzugriff und die Kameraübertragung zu finden. Das könnte sich vorteilhaft auf die Übertragungsqualität und die benötigte Bandbreite auswirken, da nur das Kamerabild übertragen werden müsste und zusätzliche Informationen für die Telemetrieanzeige. Die virtuelle Anzeige der Telemetrie Daten würden dann von dem jeweiligen Gerät selbst vorgenommen und in Echtzeit mit den über das Netzwerk gesendeten Daten aktualisiert. Wie die Evaluierung au-

ßerdem gezeigt hat, ist eine Grafikkarte für den optimalen Nutzen des HMD von großem Vorteil, da das Immersionsgefühl erst durch ein flüssiges Bild entstehen kann. Um die Immersion weiter zu stärken könnte die Kopfbewegung des HMD Nutzers auf die Kamerabewegung übersetzt werden. Dadurch kann der Nutzer sich im Raum um den Quadrocopter rum umsehehen und Objekte von Interesse direkt betrachten ohne dass sich die Ausrichtung des Quadrocopters dazu anpassen müsste. Es könnten außerdem die Schwankungen des Quadrocopters dadurch ausgeglichen werden, was zu einem besseren Bild führen würde und zu einer geringeren Motion Sickness. Mit der Implementierung von speziellen Handschuhen zur Steuerung der angezeigten Telemetrie Daten könnte eine Vielzahl neuer Funktionen in die Virtuelle Umgebung hinzugefügt werden. Die dreidimensionale Anzeige könnte Beispielsweise durch Karten der Umgebung erweitert werden. Abschließend lässt sich sagen, dass die implementierte HMD-Anzeige durch weitere Optimierungen und Erweiterungen eine sinnvolle und nützliche Ergänzung für den AQopterI8 Quadrocopter darstellt und neue Anwendungsmöglichkeiten für diesen eröffnet.

7 Literaturverzeichnis

[1] AMAZON.COM. Website, Oktober 2014.

[2] AZUMA, R. T.: *A Survey of Augmented Reality*. Presence, Vol. 6(No. 4), 1997. Massachusetts Institute of Technology.

[3] BAESYSTEMS.COM: *Striker II Digital Helmet-Mounted Display*. Website, Oktober 2014.

[4] BUNDESWEHR.DE: *Ãbersicht: Drohnen der Bundeswehr und Drohnenverluste*, Oktober 2014.

[5] CROMBIE, ALISTAIR, C.: *Science, Optics, and Music in Medival and Early Modern Thought*. The Hambledon Press, 1990.

[6] CUTTING, J. E. . P. M. VISHTON: *Perceiving layout and knowing distances: The integration, relative potency, and contextual use of different information about depth*. Handbook of perception and cognition, Vol 5; Perception of space and motion., 1995.

[7] DEUTSCHESHEER.DE: *MIKADO*, Oktober 2014. Oktober 2014.

[8] ELEKTRONIKTUTOR.DE. Website, Oktober 2014.

[9] GAGEIK, N., T. MÃ¼LLER . M. SERGIO: *Obstacle Detection and Collision Avoidance Using Ultrasonic Distance Sensors for an Autonomous Quadrocopter*, 2012.

[10] GAGEIK, N., C. REUL . S. MONTENEGRO: *Autonomous Quadrocopter for Search, Count and Localization of Objects. . UAV World 2013*, 2013.

[11] GAGEIK, N., J. ROTHE . S. MONTENEGRO: *Data Fusion Principles for Height Control and Autonomous Landing of a Quadrocopter*, 2012.

[12] GEESE, T.: *AufklÃ¤rung aus der Luft*. Feuerwehr-Presse-Hannover, 2011.

[13] HARRASSER, G. . F. REITMEIR: *Navigation Aid for Visually Impaired*. Website, Oktober 2014. Oktober 2014.

[14] IKEUCHI, K., T. OTSUKA, A. YOSHII, M. SAKAMOTO . T. NAKAJIMA: *KinecDrone: Enhancing Somatic Sensation to Fly in the Sky with Kinect and AR.Drone*. . *Proceedings of the 5th Augmented Human International Conference, Article No. 53*, 2014.

[15] KANDEL, E. R., J. H. SCHWARTZ . T. JESSEL: *Principles of Neural Science*. McGraw-Hill, 2000.

[16] KONSTANZ.DE VVL.HTWG. Website, Oktober 2014.

[17] KONSTANZ.DE VVL.HTWG. Website, Oktober 2014.

[18] LEIFIPHYSIK.DE: *Lochkamera*. Website, Oktober 2014.

[19] MILGRAM, P. . F. KISHINO: *A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays*. IEICE Transactions on Information Systems, Vol E77-D(No. 12), 1994.

[20] OJANEN, H.: *Automatic Correction of Lens Distortion by Using Digital Image Processing*. Website, Januar 1999.

[21] PITTMAN, C. . J. J. J. LA VIOLA: *Exploring Head Tracked Head Mounted Displays for First Person Robot Teleoperation*. Poster, Februar 2014.

[22] PLANUNGSAMT.BUNDESWEHR.DE: *Studie: Human Enhancement â Eine neue Herausforderung fÃ¼r StreitkrÃ¤fte?*. Website, Oktober 2014.

[23] ROMAO, T., N. CORREIA, E. DIAS, A. TRABUCO, C. SANTOS, R. SANTOS, E. NOBRE, A. CÃ¢MARA, J. DANADO . L. ROMERO: *Augmenting Reality with Geo-Referenced Information for Environmental Management*. . *Proceedings of the 10th ACM international symposium on Advances in geographic information systems*, 2002.

[24] SCHNEIDER, M.: *Fliegende Lebensretter*. FrÃ¤nkischer Tag, 2012.

[25] SPEKTRUM.DE: *Lexikon der Optik, Optisches System*. Website, Oktober 2014.

[26] SPEKTRUM.DE: *Lexikon der Physik, Abbildung, optische*. Website, Oktober 2014.

[27] SUTHERLAND, I. E.: *A head-mounted three dimensional display*. Proceedings of the AFIPS Fall Joint Computer Conference, 1968.

[28] TOOTHWALKER.ORG: *Distortion*. Website, Oktober 2014.

[29] UBERGIZMO.COM. Website, Oktober 2014.

[30] VLAHAKIS, V., N. IOANNIDIS, J. KARIGIANNIS, M. TSOTROS . M. GOUNARIS: *Virtual Reality and Information Technology for Archeological site promotion. . 5th International Conference on Business Information Systems (BIS 2002)*, 2002.

[31] WESTHEIMER, G.: *Visual acuity: Information theory, retinal image structure and resolution thresholds*. Progress in Retinal and Eye Research, 2009.

[32] WIKIPEDIA: *AirRobot*. Website, Oktober 2014.

[33] WIKIPEDIA: *AirRobot AR-100B*. Website, Oktober 2014.

[34] WIKIPEDIA: *Bewegungsparallaxe*. Website, Oktober 2014.

[35] WIKIPEDIA: *Bluetooth*. Website, Oktober 2014.

[36] WIKIPEDIA: *Camera obscura*. Website, Oktober 2014.

[37] WIKIPEDIA: *Camera obscura*. Website, Oktober 2014.

[38] WIKIPEDIA: *Depth perception*. Website, Oktober 2014.

[39] WIKIPEDIA: *Digitalkamera*. Website, Oktober 2014.

[40] WIKIPEDIA: *Distortion (optics)*. Website, Oktober 2014.

[41] WIKIPEDIA: *Drehung*. Website, Oktober 2014.

[42] WIKIPEDIA: *Elektromagnetische Welle*. Website, Oktober 2014.

[43] WIKIPEDIA: *Erweiterte RealitÃ¤t*. Website, Oktober 2014.

[44] WIKIPEDIA: *FlÃ¼ssigkristallanzeige*. Website, Oktober 2014.

[45] WIKIPEDIA: *Frame rate*. Website, Oktober 2014.

[46] WIKIPEDIA: *General Packet Radio Service*. Website, Oktober 2014.

[47] WIKIPEDIA: *Global Positioning System*. Website, Oktober 2014.

[48] WIKIPEDIA: *Global System for Mobile Communications*. Website, Oktober 2014.

[49] WIKIPEDIA: *Helmet-mounted Display*. Website, Oktober 2014.

[50] WIKIPEDIA: *Infrared Data Association*. Website, Oktober 2014.

[51] WIKIPEDIA: *Infrarotstrahlung*. Website, Oktober 2014.

[52] WIKIPEDIA: *Internetzugang Ã¼ber Satellit*. Website, Oktober 2014.

[53] WIKIPEDIA: *Koordinatentransformation*. Website, Oktober 2014.

[54] WIKIPEDIA: *LCoS*. Website, Oktober 2014.

[55] WIKIPEDIA: *Linsengleichung*. Website, Oktober 2014.

[56] WIKIPEDIA: *Liquid-crystal display*. Website, Oktober 2014.

[57] WIKIPEDIA: *Liquid crystal on silicon*. Website, Oktober 2014.

[58] WIKIPEDIA: *Modulation*. Website, Oktober 2014.

[59] WIKIPEDIA: *Motion sickness*. Website, Oktober 2014.

[60] WIKIPEDIA: *OLED*. Website, Oktober 2014.

[61] WIKIPEDIA: *Organische Leuchtdiode*. Website, Oktober 2014.

[62] WIKIPEDIA: *Polarkoordinaten*. Website, Oktober 2014.

[63] WIKIPEDIA: *Raumwahrnehmung*. Website, Oktober 2014.

[64] WIKIPEDIA: *Reisekrankheit*. Website, Oktober 2014.

[65] WIKIPEDIA: *Sendefrequenz*. Website, Oktober 2014.

[66] WIKIPEDIA: *VR-Helm*. Website, Oktober 2014.

[67] WIKIPEDIA: *Wireless Local Area Network*. Website, Oktober 2014.

[68] WUERZBURG.DE UNI: *Projektskizze Autonomous Quadrotor for Indoor Exploration*. Website, Oktober 2014. Oktober 2014.