

Vergleich der Motion Tracking Methoden zweier VR Brillen in Kombination mit inverser Kinematik

Robin Connor Schramm

Robin_Connor.Schramm@Student.Reutlingen-University.DE
Hochschule Reutlingen

ABSTRACT

Motion Capture, auch Motion Tracking genannt, ist eine vor allem in Videospielen und Filmen weitverbreitete und größer werdende Technologie, die es ermöglicht, Bewegungen aus der realen Welt in eine virtuelle Welt zu übertragen. Eine Einsatzmöglichkeit von Motion Tracking ist das Animieren eines Avatars in einer virtuellen Realitätsumgebung, um dem Nutzer den Eindruck zu vermitteln, dass er den Avatar verkörpert. Dieses Erfassen und Umsetzen der Bewegungen auf einen virtuellen Avatar wird mit Erfolg in der Videospielebranche eingesetzt, findet aber auch Anwendung in Experimenten, bei denen die Bewegung der Probanden gemessen und ausgewertet wird. Bei Experimenten kann jedoch das Problem auftreten, dass die Wahl des Motion Tracking Systems unüberlegt stattfindet und ein System unabhängig von dessen Eignung für das Experiment, sondern nur anhand der Verfügbarkeit gewählt wird. Die Motivation in dieser Arbeit ist es, herauszufinden, ob die Art des Motion Tracking überhaupt einen Unterschied bei der Verwendung in Experimenten macht, und wenn ja, wie das am besten geeignete System für den Anwendungskontext gewählt werden kann. In dieser Arbeit wird anhand der HTC Vive und der Oculus Rift CV1 eine Literaturrecherche durchgeführt, und anhand von Modellen erklärt, ob die Art des Motion Tracking einen Unterschied macht. Der Artikel soll bei der Wahl eines Motion Tracking Systems für wissenschaftliche Experimente helfen. Dies wird anhand eines konkreten Beispiels geschehen und bietet so zwar keine Allgemeinlösung, kann aber bei Experimenten ähnlicher Art helfen und liefert Kriterien, auf die generell geachtet werden sollte.

KEYWORDS

Motion detection, Motion analysis, Virtual reality, Kinematics

1 EINFÜHRUNG

In diesem Artikel werden die Unterschiede der Motion Tracking Methoden der Oculus Rift, im folgenden Rift genannt, und der HTC Vive, im folgenden nur Vive genannt, sowie deren Auswirkung auf wissenschaftliche Experimente untersucht. Die Wahl der zu Untersuchenden Headsets war auf die Vive und die Rift gefallen, da diese in der Zeit ihrer Erscheinung im Jahr 2016 die beliebtesten verbraucherorientierten virtual Reality (VR) Systeme sind, die die Anforderungen an bestimmte wissenschaftliche Experimente erfüllen [1]. Die Anforderungen an ein solches System werden später näher erläutert. Als Beispiel für ein solches Experiment soll das im Zuge einer Bachelorarbeit [11] durchgeführte Experiment dienen. Bei dem Experiment handelt es sich um die Untersuchung von Animationen eines selbst-Avatars in einer VR Umgebung. Dazu wurde eine Anwendung entwickelt, bei der der Proband in der VR-Umgebung auf sich zukommenden Hindernissen Ausweichen muss und dabei sich ebenfalls bewegende Punkte einsammeln soll. Das Experiment

wurde mit zwei Gruppen durchgeführt. Dabei wurde der Avatar in der ersten Gruppe nur anhand des Kopfs und den Händen sowie mit inverser Kinematik animiert und in der zweiten Gruppe anhand zusätzlicher Tracker an Ellbogen, Knien und Füßen. Dieses Experiment hat unter anderem die Voraussetzung, dass die Position des Nutzers im Raum erkannt werden muss, das System schnelle Bewegungen erfasst und dabei trotzdem nicht die Bewegungen Nutzers einschränken soll. Dieses Experiment soll hier also als Grundlage dienen, die das Projizieren der in diesem Artikel gewonnenen Ergebnisse auf andere bewegungsbasierte VR-Experimente erleichtern soll. In besagtem Experiment ist die HTC Vive zum Einsatz gekommen, wofür es aber keine bestimmten aussagekräftigen Gründe gab. Hauptursache für die Wahl war die einfache Verfügbarkeit der Vive innerhalb des VR-Labors der Hochschule Reutlingen sowie das Vorhandensein der zugehörigen Tracker. Genau dieses Szenario tritt in mehreren Studien auf (z.B. [7], [10], [8]), die sich nicht explizit mit der Trackingmethode beschäftigen, sondern dabei helfen sollen, andere Phänomene in der VR Welt zu erforschen. Der Fokus vieler Artikel im VR-Bereich liegt nicht im technischen Bereich, sondern in der Zusammenarbeit des Menschen mit der Technik und der Psychologie die dahinter steckt.

Des Weiteren soll der Artikel aufklären, welche Arten des Motion Tracking die Vive und die Rift verwenden, da eine kurze Literaturrecherche in dem Gebiet gegensätzliche Ergebnisse lieferte. Vor allem die Verwirrung, ob und welches der beiden Systeme die sogenannten *inside out* oder *outside in* Methoden verwenden, soll mit Hilfe von Systemmodellierungen aufgeklärt werden.

1.1 Ziel der Arbeit

Im Folgenden werden die Forschungsfragen definiert, die zum Schluss anhand der gewonnenen Informationen durch Modelle und Vergleiche beantwortet werden. Zu beachten ist, dass die Fragen zwar allgemein formuliert sind, die Informationen zu Beantwortung aber nur aus einem einzelnen Vergleich im Kontext eines Experiments erfolgt und so in gewisser Weise generalisiert werden muss.

- (1) H0: Wie unterscheiden sich die vorgestellten Motion Tracking Varianten in der Praxis?
- (2) H1: Macht die Wahl des Motion Tracking Systems bei VR Anwendungen in Experimenten einen Unterschied bezüglich der gemessenen Daten und Ergebnissen?
- (3) H2: Welche Kriterien sollten bei der Wahl eines Motion Tracking Systems beachtet werden?

1.2 Methodik

Die Methodik des Artikels gleicht die einer Literaturreview. Zuerst wurden verschiedene Artikel untersucht, die mehrere VR-Systeme miteinander vergleichen sowie weitere Artikel, in denen die Vive

oder die Rift im Zusammenhang mit Motion Tracking untersucht wurden. Eine erste Anlaufstelle für weitere Paper lieferten hier Anthes et al., die in [1] im Jahr 2016 State of the Art VR-Technologien vorstellten. Ein weiterer Startpunkt für die Recherche war das Review Paper von Coburn et al. über die Möglichkeiten aktueller VR-Technologie in [6].

1.3 Struktur der Arbeit

Zuerst soll ein Überblick über den Stand der Wissenschaft gegeben werden, in dem die Begriffe virtuelle Realität (VR) und Motion Tracking definiert und in den Kontext der Arbeit eingeordnet werden. Außerdem werden die zwei betrachteten VR-Brillen HTC Vive und Oculus Rift sowie deren Motion Tracking Methoden beschrieben und erklärt. Im darauf folgenden Kapitel werden der Ablauf der Modellierung der Systeme sowie die Modelle selbst beschrieben. Zum Schluss werden die Modelle anhand einer Liste verglichen und deren Unterschiede und Eignung für den Kontext diskutiert, sowie die in der Einleitung gestellten Forschungsfragen beantwortet.

2 STAND DER WISSENSCHAFT

In diesem Kapitel werden die für den Artikel wichtigen Begriffe und Technologien definiert, beschrieben und dem Kontext eingeordnet.

2.1 Virtuelle Realität

Virtuelle Realität (VR) wird von Boas in [2] definiert als ein Feld der Computerwissenschaften mit dem Ziel, immersive virtuelle Welten zu erschaffen, in denen zusätzlich dem Benutzer die Möglichkeit gegeben wird, mit dieser Welt zu interagieren. Um solche Welten erleben zu können, muss die Virtuelle Umgebung zum einen für einen oder mehrere Menschliche Sinne einen Stimulus präsentieren und zum anderen auf die Aktionen des Nutzers reagieren. Dafür muss das System für den Menschen Ein- und Ausgabeschnittstellen zur Verfügung Stellen. Die Ausgabe erfolgt dabei wie bei regulären Computern in der Regel über Bild und Ton. Für die Ausgabe kommt jedoch kein normaler Bildschirm zum Einsatz, sondern in der Regel ein head mounted display (HMD), umgangssprachlich auch VR-Brille genannt, da sie wie eine Brille auf dem Kopf vor den Augen getragen wird. Die Eingaben des Benutzers bei VR-Systemen können ebenfalls wie bei herkömmlichen Systemen über Tastendruck bei normalen Controllern oder Tastaturen erfolgen, jedoch besitzen immer mehr VR-Systeme die Möglichkeit, Eingaben mit Hilfe von Bewegungen des Körpers zu steuern. Gängige Bewegungen sind dabei Kopfbewegungen, Handbewegungen und, bei weniger Systemen zu finden, Bewegungen des ganzen Körpers inklusive Armen und Beinen.

2.2 Motion Tracking

Der Unterschied zwischen den Begriffen Motion Tracking und motion capture scheint in der Literatur nicht geklärt zu sein, denn oft werden die Begriffe für das selbe benutzt. In diesem Artikel wird der Begriff Motion Tracking nach folgender Definition verwendet. Der Begriff Motion Tracking beschreibt das Erfassen der Bewegung von Objekten in einer gewissen Größenordnung. Die erfassten Bewegungen beinhalten die Bewegung des Objekts als ganzes im Raum oder auch die Bewegung einzelner größerer Komponenten, jedoch

nicht feine Bewegungen kleinerer Komponenten. Eine Unterkategorie des Motion Trackings, die sich rein mit Menschlichen Bewegungen auseinandersetzt, nennt sich human Motion Tracking. Die Definition des human Motion Tracking umfasst wie bei der vorigen Definition Bewegungen im größeren Maßstab, also die Bewegung des gesamten Körpers als ein Objekt sowie die Bewegungen einzelner Gliedmaßen als Skelett mit mehreren Gelenken. Bewegungen in kleineren Maßstäben wie Gesichtsausdrücke und Handgesten können von speziellen Systemen zwar ebenfalls erkannt werden, bilden dabei aber eine eigene Disziplin neben dem human Motion Tracking. Wichtig bei den Begriffen ist auch die Unterscheidung in der Anwendung. Ein Unterschied ist, ob die Anwendung in Echtzeit stattfindet oder ob die Bewegungen gemessen und gespeichert werden sollen. Da sich das Experiment, mit dem sich dieser Artikel befasst, in einer Echtzeitanwendung stattfand und makroskopische Menschliche Bewegungen erfasst wurden, wird im folgenden mit Motion Tracking immer das Human Motion Tracking in Echtzeit gemeint.

2.3 HTC Vive

Das HTC Vive VR-System (Vive) ist im Jahr 2016 erschienen und ist im öffentlichen Handel erwerblich. Die Minimalausführung der Vive besteht aus einem VR-Headset mit zwei Bildschirmen, zwei Controllern und zwei infrarot Laser Basisstationen, die Lighthouses genannt werden [9]. Weiteres für diesen Artikel relevantes Zubehör sind die Vive Tracker, die zusätzlich am Körper und an Objekten befestigt werden können.



Figure 1: Vive Headset¹

Das Tracking der Vive funktioniert über das sogenannte *inside-out Prinzip*, für den Trackingprozess werden also keine Kameras benötigt, da das Verfahren von *innen heraus* operiert. Das inside-out tracking der Vive erfolgt über zwei verschiedene Methoden. Zum einen werden die Bewegungen anhand den Messungen eines Trägheitsnavigationssystems errechnet. Die Sensorik des Navigationssystems besteht dabei aus Gyroskopen und Beschleunigungssensoren. Der Prozess, die Position des Systems ausgehend einer vorher bestimmten Position und Geschwindigkeitsmessungen zu errechnen, nennt sich *dead reckoning*. Die Kombination aus Bewegungssensoren und Dead reckoning allein liefert bereits einfach zu berechnende und sehr gute Ergebnisse, die aber nie zu 100% die Realität widerspiegeln. Da jede Berechnung nach der ersten Bewegung auf einem vorigen Punkt basiert, der jedoch

¹https://www.vive.com/media/filer_public/vive/product-overview/vive-hardware-hmd-1.png

ebenfalls berechnet wurde, kumulieren sich kleine Fehler schnell auf. Der durch diese sich verstärkenden Fehler entstehende Abweichungswinkel der Position wird *Drift* genannt [5]. Eine effektive Methode, die Genauigkeit des dead reckoning signifikant zu erhöhen, ist die Verwendung zusätzlicher Methoden, um die Position während den Berechnungen zu bestimmen. An dieser Stelle kommt die zweite tracking-Methode der Vive mit Hilfe der Lighthouses ins Spiel. Bei einer Lighthouse Basisstation handelt es sich um einen infrarot Laser Emitter, der abwechselnd horizontal und vertikal in einem jeweils 120 Grad Winkel Infrarotstrahlung aussendet. Diese Strahlen werden in den in 1 und 2 zu sehenden Einbuchtungen von Photodioden erkannt und in elektrische Signale umgewandelt. Die Einbuchtungen mit den Photodioden sind auf allen am Körper getragenen Geräten der Vive vorhanden, im angesprochenen Experiment also an dem Headset, den Controllern und den Trackern. Der zeitliche Unterschied, in dem die Photodioden ihre Signale senden, ermöglicht das Berechnen der Position und der Neigung der Geräte. Durch die Kombination der Methoden des dead reckoning und der Lighthouses können im Kontext eines Verbraucher orientierten Produkts relativ genau Positionen und Bewegungen von Objekten und Personen bestimmt werden. [9]



Figure 2: Vive Tracker²

Der genaue Prozess wird in einem späteren Kapitel anhand von Aktivitätsdiagrammen dargestellt.

2.4 Oculus Rift CV1

Bei der in diesem Artikel beschriebenen Version der Oculus Rift handelt es sich um die *Consumer Version 1* (CV1). Bei der 2016 erschienenen Oculus Rift CV1 handelt es sich wie bei der Vive, um ein VR-System und stellt die erste im Handel erwerbliche Version der Oculus Rift dar. Sie wurde vor allem in diesem Artikel als Vergleich für die Vive gewählt, da sie beide im Jahr 2016 erschienen sind und für ähnliche Anwendungsgebiete gedacht sind. Wichtig ist hierbei vor allem, dass beide Systeme über sechs Grade der Freiheit verfügen (6DOF). 6DOF bedeutet, dass nicht nur drei Dimensionen der Bewegung durch Rotation des Kopfs und damit des Headsets möglich sind, wie es bei früheren VR-Systemen oft der Fall war, sondern zusätzlich das Erkennen der Translation in drei Richtungen möglich ist. Das bedeutet für den Benutzer, dass er sich in einem bestimmten Bereich mit seinem Körper bewegen kann, um innerhalb der Anwendung zu navigieren. Die Oculus Rift CV1 wird nachfolgend und in den weiteren Kapiteln mit *Rift* abgekürzt. Die grundlegende Art des Tracking bei der Rift ist, ebenfalls wie bei der

Vive, das *inside-out Prinzip*, welches hier ebenfalls das Verfahren des dead reckoning kombiniert mit Bewegungssensoren einsetzt. Der Unterschied zwischen der Rift und der Vive, der in diesem Artikel beleuchtet werden soll, ist die Art, wie der Drift des Verfahrens umgangen wird. Anders als bei der Vive kommen bei der Rift Kameras zum Einsatz. Die Rift besitzt unterhalb der Plastikabdeckung eine Anzahl an Infrarotlichtern in einer bestimmten Konstellation. Zusätzlich werden Infrarotkameras benötigt, die die Konstellation der Kameras, die die Lichtpunkte auf dem Headset und den Controllern erkennen und so die genaue Position der Objekte ermitteln kann.



Figure 3: Rift mit sichtbaren infrarot Lichtern³

2.5 Inverse Kinematik

Eine gängige Methode, um VR-Avatare ohne Ganzkörpertracking zu animieren, ist der Einsatz von inverser Kinematik (IK). Die Kinematik ist ein Feld der Mechanik, bei dem ein Objekt oder im Fall eines Avatars der virtuelle Körper als reine Zusammensetzung von Verbindungen dargestellt wird. Andere physische Attribute wie Masse oder Kraft werden dabei nicht berücksichtigt. Der Avatar besteht bei der Computeranimation aus sogenannten Knochen, welche jeweils die Verbindung zweier Gelenke darstellen. Die IK ist ein spezieller Teil der Kinematik, der beschreibt, wie sich Gelenke der einzelnen Knochen verhalten, wenn der Endpunkt z.B. eines Arms gegeben ist. Im Fall eines üblichen VR-Aufbaus mit einer HMD und in jeder Hand ein Controller wäre beispielsweise die Position des Kopfs und der Hände gegeben, jedoch nicht die der Ellbogen. Der Winkel und die Position des Ellbogens muss also anhand der gegebenen Daten berechnet werden, wobei kein eindeutig richtiges Ergebnis existiert. Die Aufgabe des IK Algorithmus im Beispielfall ist es, die am realistischsten wirkende Konfiguration des Ellbogengelenks zu finden.

3 SYSTEMMODELLIERUNG

Im folgenden werden zuerst generelle, funktionale und nicht funktionale Anforderungen an eine verbraucherorientiertes, High-End VR-System gestellt, um es in bewegungsorientierten Experimenten bei einer VR-Anwendung verwenden zu können. Als Beispiel für eine solche Anwendung dient die Anwendung aus [11]. Anschließend werden in einem Systemkontextdiagramm die Akteure und Stakeholder definiert. Danach folgen drei Diagramme, die den Aufbau eines VR-Trackingsystems in Blockdiagrammen darstellen. Zum

²https://www.vive.com/media/filer_public/55/9c/559c48e7-7ce6-4fc7-80e4-9554a0df834d/tracker-s01-min.png

³<https://d3nevzf7ii3be.cloudfront.net/igi/QRAQvDpKKcNvXrN.huge>

Nicht funktionale Anforderungen			
ID	Name	Text	Wert
REQ1	Zuverlässigkeit	Das System sollte während eines Experimentdurchlaufs nicht abstürzen, das Tracking verlieren oder komplett die Verbindung abbrechen	Ausfallquote < 5%
REQ2	Genauigkeit	Das Tracking sollte so präzise funktionieren, dass genaue Hand- und Kopfbewegungen um mit der Umgebung zu interagieren, möglich sind.	Genauigkeit < 1cm
REQ3	Vibration und Bildschwankung (jitter)	Das System sollte genaue Bewegungen ermöglichen, ohne dass die Position der getrackten Objekte schwankt oder vibriert	Schwankung < 1cm
REQ4	Schnelligkeit	Das System soll eine so geringe Verzögerung aufweisen, dass es in einer Echtzeit Anwendung zum Einsatz kommen kann.	Latenz < 250ms
REQ5	Größe der getrackten Fläche	Das Areal, in dem das Tracking problemlos funktioniert, muss groß genug für schnelle Bewegungen in jede Richtung sein.	Areal > 3x3m
REQ6	Kosten und Verfügbarkeit	Das System sollte Verbraucherorientiert sein, ohne Spezielle Anforderungen verfügbar sein sowie von einer Einzelperson gekauft werden können	Preis < 1000 USD
REQ7	User Experience	Das System sollte state of the Art Displays verwenden um sich bewegende Objekte schnell zu erkennen und dem Nutzer ein angenehmes Erlebnis bieten.	Field of View > 90° Auflösung > 1000px
REQ8	Gewicht	Das Headset sollte leicht genug sein, dass es die Bewegungen des Benutzers so geringfügig wie möglich einschränkt.	Gewicht < 1kg

Table 1: Nicht funktionale Anforderungen an ein VR-System für Experimente

Funktionale Anforderungen		
ID	Name	Text
FREQ1	Kopf- und Hand Tracking	Das System muss in der Lage sein, mehrere Objekte oder Körperteile gleichzeitig ohne Verlust in Genauigkeit und Performanz zu erfassen
FREQ2	Echtzeitfähig	Das System soll in Echtzeit funktionieren und auch schnellere Bewegungen präzise erfassen.
FREQ3	Einbindung in Game Engine	Das System soll Schnittstellen zu gängigen Game-Engines wie die Unity Engine oder die Unreal Engine verfügen
FREQ4	Stehende Bewegungen erfassen	Das System soll in der Lage sein, bewegungen einer stehenden Person zu erfassen, die ihre Position ändert.
FREQ5	Eingabe über Controller	Das System soll über Controller verfügen, die zur Eingabe für die Software funktionieren und gleichzeitig getrackt werden können.

Table 2: Funktionale Anforderungen an ein VR-System für Experimente

Schluss wird anhand von drei Aktivitätsdiagrammen der Ablauf des Trackings der Vive und der Rift erklärt.

3.1 Anforderungen

Die Anforderungen wurden nach der Tabellenform der funktionalen und nicht funktionalen Anforderungen nach Weillkins [13] erstellt, da die grafische Darstellung die gleichen Informationen nur auf größerer Fläche dargestellt hätten und die erhobenen Anforderungen keine Abhängigkeiten untereinander aufweisen. Die nicht funktionalen Anforderungen werden im folgenden mit der ID REQ und einer zugehörigen Nummer bezeichnet und sind in Tabelle

1 dargestellt. Die funktionalen Anforderungen, die in Tabelle 2 dargestellt sind, werden mit FREQ und ebenfalls einer zugehörigen Nummer bezeichnet.

Borges et al. schreiben in [3] über die Wichtigkeit der Genauigkeit und Zuverlässigkeit eines Motion Tracking Systems, woraus sich REQ1 und REQ2 ableiten. Die Ausfallquote sollte nur 5% sein, da bei Ausfall der Brille zwar der aktuelle Experimentlauf abgebrochen wird, jedoch nichts weiter passiert und das System wieder in kurzer Zeit verbunden werden kann [9]. REQ4, die Schnelligkeit kommt zum einen von der funktionalen Anforderung der Echtzeitfähigkeit, da ein System dieser Art bei zu hohen Latenzen überhaupt nicht

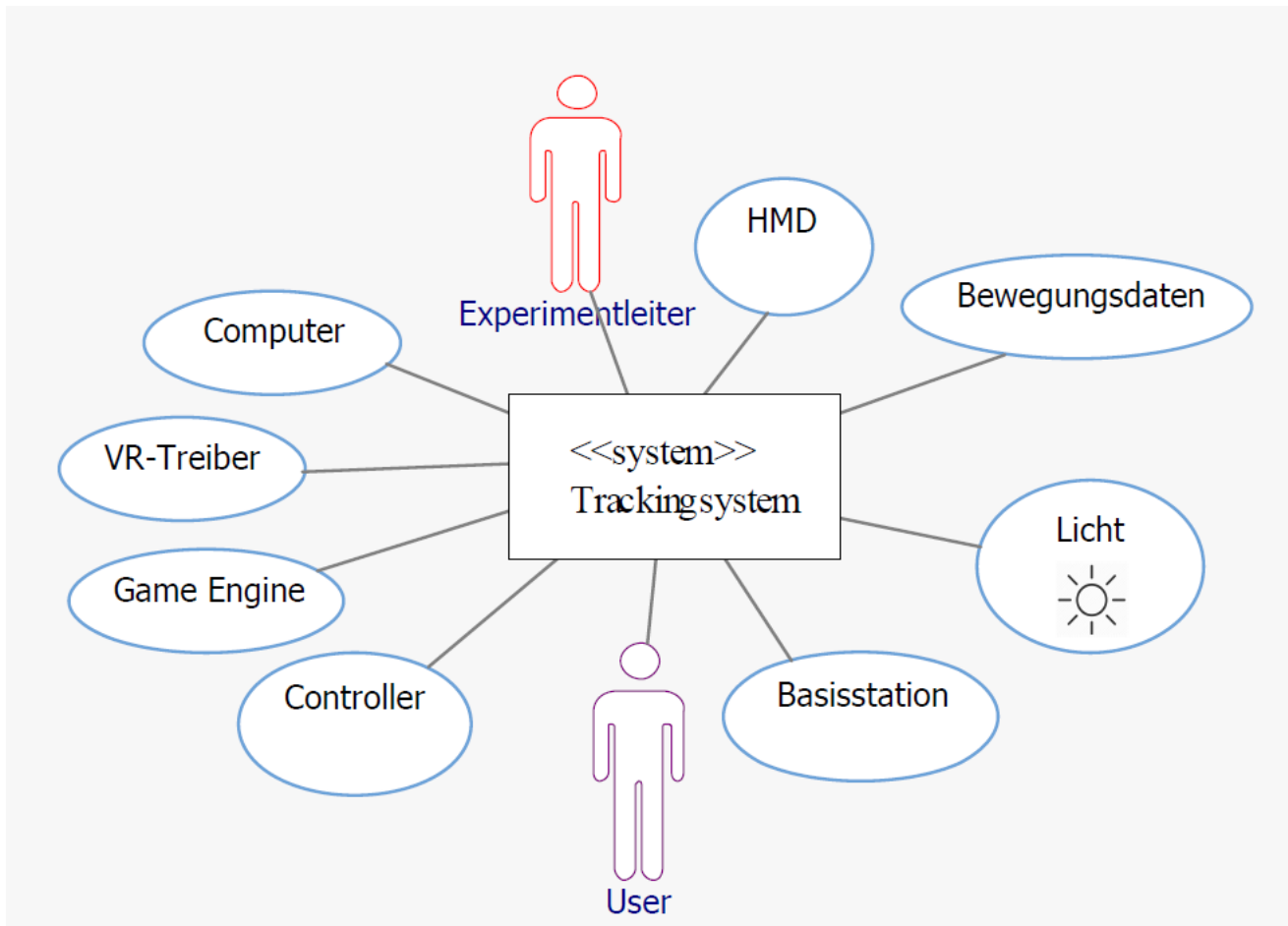


Figure 4: Systemkontextdiagramm

eingesetzt werden kann. Der Grund, warum der Wert unter 250 ms liegen soll, kommt von Untersuchungen, dass es ab einer Latenz von 250 ms zu erhöhten Körperschwankungen kommen kann [14]. Körperschwankungen könnten ein Experiment, das auf Bewegungen basiert, stark negativ beeinflussen und sollen daher vermieden werden. REQ5 leitet sich aus dem Experiment aus [11] ab, da die virtuelle Fläche der im Experiment verwendete VR-Anwendung auf die Realität übertragen ungefähr 3x3 Meter beanspruchte. Da in diesem Artikel verbraucherorientierte VR-Systeme untersucht werden, sollte der Preis der VR-Systeme in REQ6 unter 2000€ liegen. Dieser Preis stellt keine harte Grenze dar, sondern soll ein Versuch sein zu quantifizieren, ob ein System verbraucherorientiert ist oder nicht.

Die funktionalen Anforderungen in Tabelle 2 leiten sich aus dem vorgestellten Experiment ab und stellen nicht alle möglichen Anforderungen an ein VR-System dar, sondern konzentrieren sich auf wenige, für Experimente spezifische Anforderungen, die nicht alle VR-Systeme erfüllen. Aus den nicht funktionalen Anforderungen lässt sich ableiten, dass man bei Experimenten Mid- bis High-End Systeme verwenden sollten, da diese in der Regel z.B. Kopf- und

Hand Tracking ermöglichen. Sehr wichtig ist auch die leichte Einbindung in eine Game Engine, was z.B. bei dem High-End System Playstation VR nicht von Haus aus gegeben ist. Je nach Systemkontext sollten der Tabelle noch weitere Anforderungen hinzugefügt werden, um am Ende nicht ein System zu verwenden, dem eine wichtige Eigenschaft fehlt.

3.2 Systemkontext

Das Systemkontextdiagramm des SYSMOD Prozesses beinhaltet, wie von Weillins in [13] beschrieben, alle für das System relevanten Stakeholder und Akteure. Die Elemente des Kontextdiagramms in Abbildung 4 wurden aus den vorher gegebenen Informationen Extrahiert. Dazu gehören der Aufbau der VR-Systeme, woraus die Hardwarekomponenten wie HMD, Controller und Basisstation abgeleitet wurden. Das Licht stellt einen Störfaktor dar, da die Basisstationen beider untersuchter VR-Systeme Infrarotlicht einsetzen, welches z.B. durch Sonneneinstrahlung gestört werden kann. Die für das System relevanten Personen stammen aus der Beschreibung des Experiments, das als Kontext dient. Für ein Experiment werden minimal zwei Personen benötigt. Zum einen der Proband, der am Experiment teilnimmt und in Abbildung 4 User genannt wird, da

er das System aktiv verwendet. Zum anderen wird mindestens ein Experimentleiter benötigt, der dem Benutzer die Rahmenbedingungen erklärt, das System steuert und auch die Ergebnisse auswertet. Beide Rollen können von mehreren Person gleichzeitig eingenommen werden, wurden hier aber als jeweils ein Akteur dargestellt. Alle weiteren Bausteine des Kontextdiagramms stammen aus den vorher erhobenen Anforderungen. So ist es wichtig, dass sich das Trackingsystem überhaupt mit einem Computer verbinden kann und mit der Game Engine der Anwendung verknüpft werden kann.

3.3 Systemaufbau

Im folgenden wird der Allgemeine Systemaufbau eines VR-Systems nach SysML aus [13] mit Hilfe eines Blockdiagramms visualisiert. Anschließend wird der Block *VR_System* jeweils für die Vive und für die Rift in jeweils einem internen Blockdiagramm näher dargestellt.

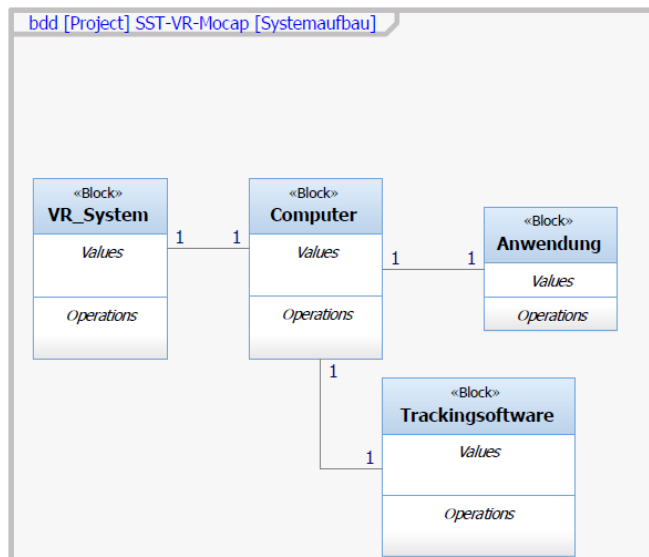


Figure 5: Blockdiagramm des Abstrakten, allgemeinen Systemaufbaus

Abbildung 5 zeigt den groben Aufbau der Hard- und Softwarekomponenten des erläuterten Experiments [11].

Abbildung 6 zeigt das interne Blockdiagramm des Blocks *VR_System* aus Abbildung 5 für die Vive. Der interne Aufbau des Vive Trackingsystems wird oft gar nicht oder nur sporadisch in wissenschaftlichen Quellen beschrieben. Die in 6 dargestellten Komponenten und deren Zusammenhänge wurden aus der Beschreibung der Vive von Niehorster in [9] sowie aus einem im Magazin *Engineering & Technology* erschienenen Artikel⁴ und einem Blogeintrag⁵ über die Trackingmethode der Vive entnommen und selbst interpretiert.

Den Kern des Vive Trackingsystems bildet immer das zu trackende Objekt, im Modell durch den Block *trackedHardware* dargestellt. Dieser Block dient als Abstrakte repräsentation aller "trackbaren"

Objekte des Vive VR-Systems. Die davon abgeleiteten Blöcke HMD, Controller und Tracker funktionieren hinsichtlich des trackings gleich und wurden daher zusammengefasst. Jede trackbare Hardwarekomponente der Vive hat außerdem fest verbaute Sensoren, die das Tracking ermöglichen. Der Gyrosensor und der Beschleunigungssensor vom Hersteller Invensense⁴ sind dabei zuständig für die Positionsbestimmung durch dead reckoning beim inside out tracking. Für die Reduzierung des Drifts beim dead reckoning Verfahren kommen bei der Vive die in jeder trackbaren Komponente eingebauten Photodioden zum Einsatz, die bei Auftreffen von Infrarotlicht ein Signal das die jeweilige Komponente sendet. Die Photodioden werden von den beiden separat aufgestellten Lighthouse Basisstationen, die ansonsten keinerlei Verbindung mit dem Rest des Systems aufweisen, mit Infrarotlicht bestrahlt. Die getrackte Hardware ist wiederum per Bluetooth mit einem Computer verbunden, an dem die später in Aktivitätsdiagrammen gezeigten Berechnungen stattfinden.

Abbildung 7 zeigt das interne Blockdiagramm des Blocks *VR_System* aus Abbildung 5 für die Rift. Während der Literaturrecherche für diesen Artikel wurden keine nutzbaren Informationen aus wissenschaftlichen Quellen über den internen Aufbau des Rift Trackingsystems gefunden. Die in 7 dargestellten Informationen stammen aus einem auf der Website iFixIt veröffentlichten Artikel⁶ sowie aus einem offiziellen Oculus Blog Artikel von einem Facebook Angestellten über das tracken der Rift Controller⁷. Der Kern des Rift Trackingsystems bildet, wie bei der Vive, das zu trackende Objekt und wird ebenfalls durch den Block *trackedHardware* dargestellt. Ebenfalls gleich wie in Abbildung 6 leiten alle trackbaren Hardwarekomponenten der Rift vom Block *trackedHardware* ab. Wie im Kapitel Stand der Wissenschaft bereits beschrieben, sind die Grundlegenden Methoden der Vive und der Rift für das inside out Tracking genau gleich, weshalb auch die Rift über einen Gyrosensor und einen Beschleunigungssensor verfügt, jedoch vom Hersteller Bosch Sensortec, die für die Positionsbestimmung durch dead reckoning beim inside out tracking zuständig sind. Für die Reduzierung des Drifts beim dead reckoning Verfahren kommen bei der Rift, anders als bei der Vive, zwei Constellation Kameras zum Einsatz. Diese Kameras sind wie die getrackte Hardware mit dem Computer verbunden und dienen dem Erkennen des von den Infrarot LEDs ausgesendetem Licht.

Der Aufbau der Blockdiagramme der beiden Systeme unterscheidet sich überraschend wenig, da, anders als Anfangs angenommen, beide Trackingsysteme grundlegend über die selbe inside out Methode funktionieren und sich nur geringfügig in der Reduktion des Drifts unterscheiden.

⁴P. Dempsey. 2016. The Teardown: HTC Vive virtual reality headset. *Engineering Technology* 11 (August 2016), 80–81(1). Issue 7. <https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/et.2016.0731>

⁵Kreylos, O. (2016). Lighthouse tracking examined. URL: <http://doc-ok.org/?p=1478>

⁶<https://de.ifixit.com/Teardown/Oculus+Rift+CV1+Teardown/60612>

⁷<https://developer.oculus.com/blog/increasing-fidelity-with-constellation-tracked-controllers/>

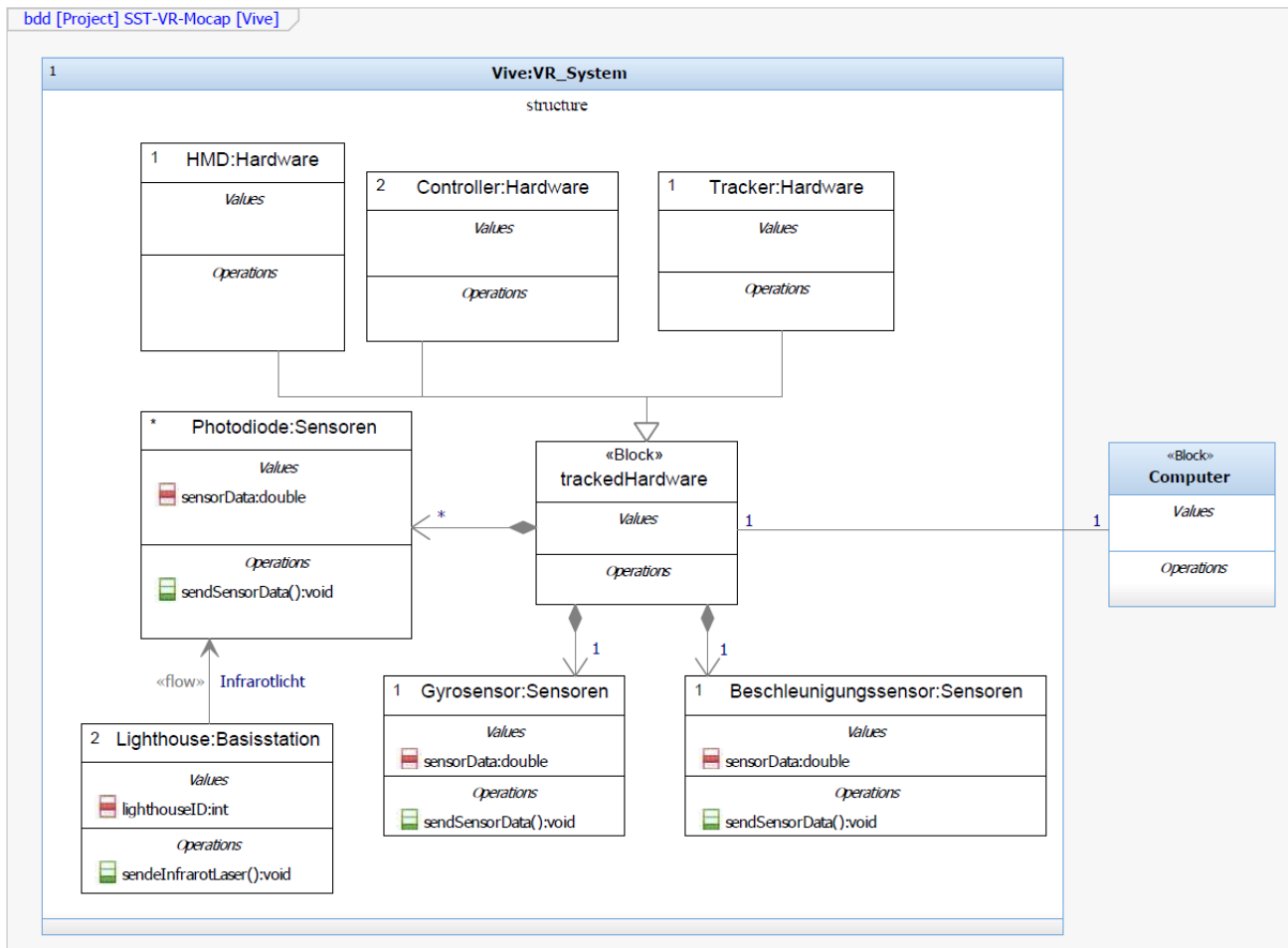


Figure 6: Blockdiagramm des Vive Systemaufbaus

3.4 Ablauf

Im folgenden wird der Ablauf des trackings anhand von drei Aktivitätsdiagrammen aus SysML nach Weilkiens [13] beschrieben.

Das Modell in Abbildung 8 zeigt den Systemagnostischen Ansatz, der für beide untersuchte VR-Systeme gilt. Der Unterschied der Rift und der Vive liegt der Aktivität *Referenzposition bestimmen* zugrunde und wird in Abbildung 10 und Abbildung 9 näher beschrieben. Der Startpunkt des abstrakten Ablaufs ist der Beginn des Trackings. Das VR-System muss mit dem Computer verbunden sein, worauf die Software bei Bedarf das Tracking startet. Der Kern des Trackings beider Systeme liegt im inside out Tracking, welches Anfangs ohne Parameter von außen arbeitet. Von der Ausgangsposition aus nehmen die internen Sensoren der Vive Hardware Bewegungen des Nutzers wahr und senden diese zur weiteren Bearbeitung an den Computer. Anschließend wird anhand der Sensordaten durch dead reckoning die neue Position bestimmt und weitergegeben. Dabei treten unvermeidlich kleine Fehler auf, die sich mit der Zeit aufsummieren würden, wenn nicht gleichzeitig eine Referenzposition bestimmt werden würde. Hier wird je nach VR-System mit unterschiedlichen Methoden eine Referenzposition bestimmt, was

in einer langsameren Frequenz als das dead reckoning passiert, dabei aber genauer ist. Anhand beider Orientierungs und Positionsdaten wird dann eine der Realität nahe Position bestimmt und an die Software übermittelt. Diese neue Position dient nun wieder als Ausgangsposition für den nächsten Zyklus, der wieder mit inside out Tracking beginnt. Alles zwischen inside out Tracking und Position übermitteln passiert mehrmals pro Sekunde mit unterschiedlichen Frequenzen, um die Position des Avatars in der Software in Echtzeit zu aktualisieren. Die Sensoren des inside out Tracking arbeiten typischerweise mit einer Frequenz von 1000 Hz⁸.

Das innere Aktivitätsdiagramm der Aktivität *ReferenzpositionBestimmen* von der Rift wird in Abbildung 9 dargestellt und beschreibt eine kontinuierliche Aktivität. Das Bestimmen der Referenzposition bei der Rift fängt damit an, dass die Constellation Kameras durchgehend ihre Umgebung filmen und dabei Bilddaten erzeugen. Diese Bilder werden darauf untersucht, ob Infrarotlicht in bestimmten Konstellationen auf den Bildern vorhanden ist. Diese Daten werden mit vorgefertigten 3D Modellen verglichen, die die zu trackende Hardware abbilden. Anhand der Perspektive und der Distanz von

⁸<https://uploadvr.com/how-vr-tracking-works/>

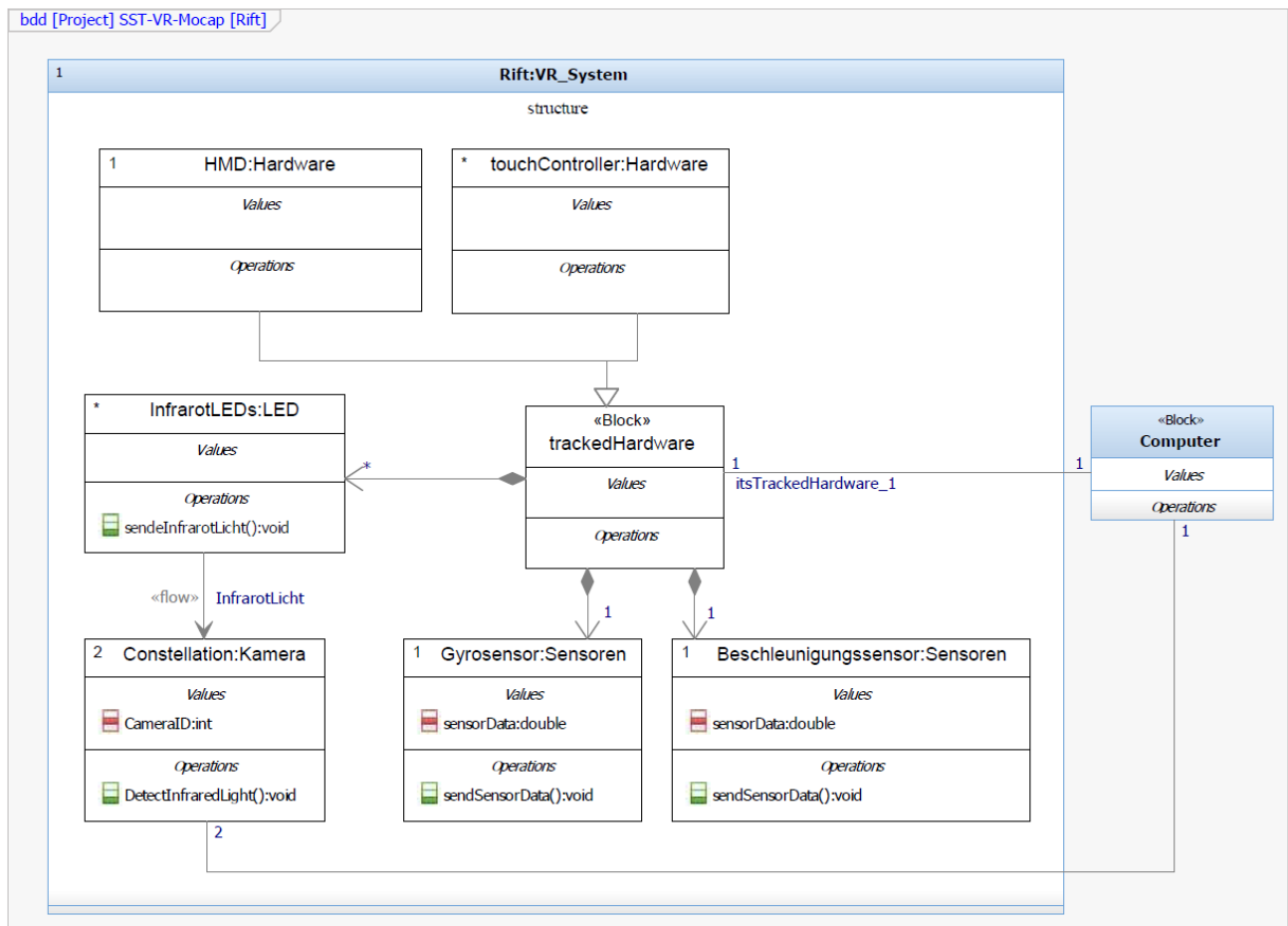


Figure 7: Internes Blockdiagramm des Rift Systemaufbaus

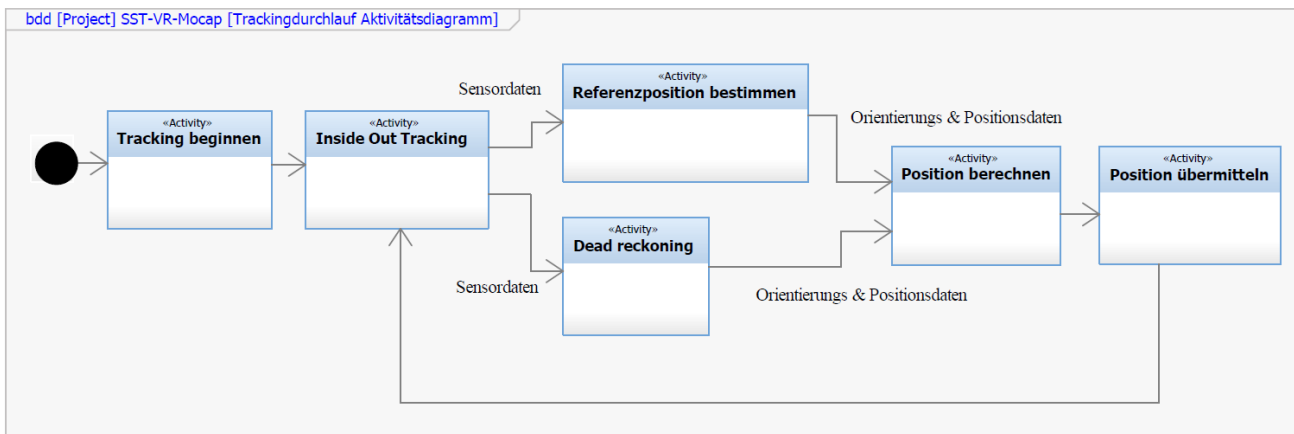


Figure 8: TrackingdurchlaufActivity

den Kameras aus, die durch den Vergleich erkannt werden, kann eine Ungefähre Position der Objekts im Raum bestimmt werden. Diese Position wird mit den zuvor gesammelten Sensor Daten des

inside out Tracking kombiniert, wodurch eine genaue Orientierung und Position in Raum berechnet wird.

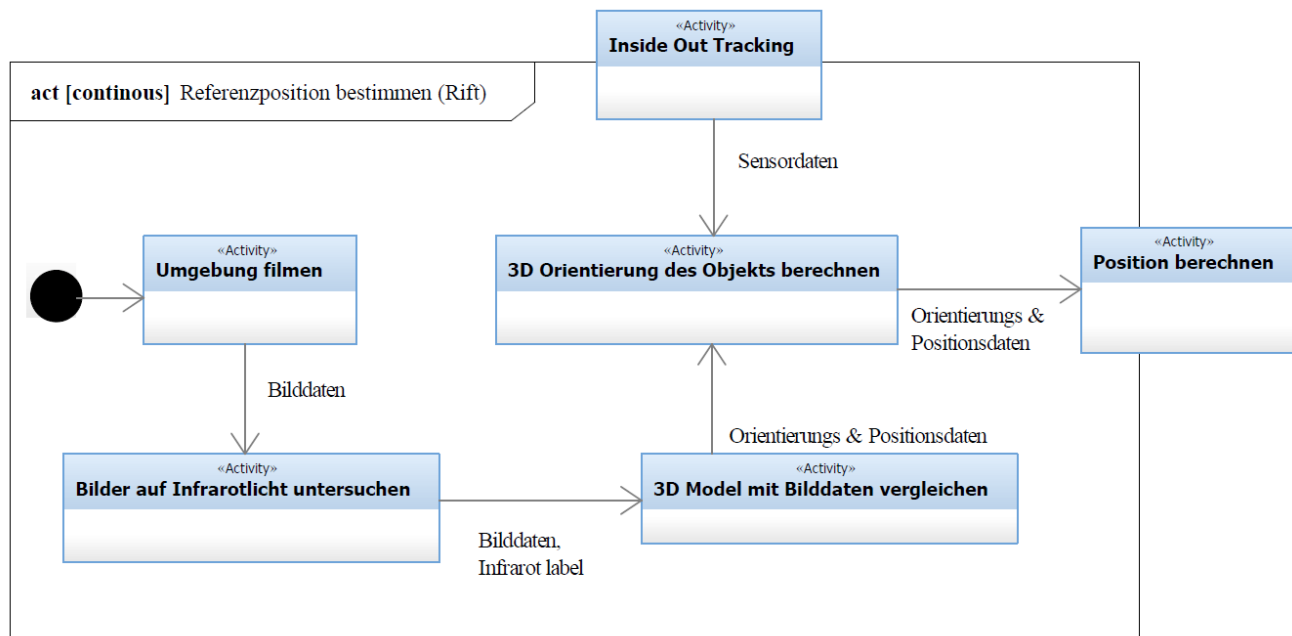


Figure 9: Aktivitätsdiagramm der Aktivität *ReferenzpositionBestimmen* für die Rift

Das innere Aktivitätsdiagramm der Aktivität *ReferenzpositionBestimmen* von der Vive wird in Abbildung 10 dargestellt und beschreibt, wie bei der Rift, eine kontinuierliche Aktivität. Hier fängt das Bestimmen der Referenzposition damit an, dass die Lighthouse Basisstationen alle 8.8 Millisekunden Infrarotlaser aussenden. Diese Laser werden dann von den in der Vive Hardware verbauten Photodioden erkannt. Jede Photodiode sendet bei einem Treffer einen Impuls und das System erkennt, welche Diode wann einen Impuls gesendet hat. Anhand dieser Daten kann durch die kurze Zeitverzögerung zwischen den Impulsen die Entfernung des zu trackenden Objekts und den Lighthouses sowie die Orientierung des Objekts im Raum berechnet werden. Anhand dieser Referenzposition und den zuvor gesammelten Sensordaten des inside out Trackings kann eine relativ genaue Position und Rotation des Objekts im Raum bestimmt werden.

Wie in den Abbildungen 9 und 10 zu sehen ist, sind die Abläufe des Trackings sehr ähnlich und unterscheiden sich nur in drei Punkten, bei denen die Referenzposition für das inside out Tracking bestimmt wird. Der Rest der Funktionsweise ist, abstrakt gesehen, genau gleich, was das gemeinsame Modell der beiden Systeme in Abbildung 8 zeigt.

4 DISKUSSION

Beide Systeme sind hinsichtlich der Genauigkeit und Bildschwankung exzellent und verfügen über große mögliche Flächen zur Anwendung [4]. Anders als Anfangs erwartet, sind die Systeme der Vive und der Rift sehr ähnlich, was die Wahl zwischen den Systemen im Allgemeinen schwierig macht und läuft am Ende vermutlich auf persönliche Präferenz zurück. Das größte Argument für die Vive stellt die größere trackbare Fläche sowie die Verfügbarkeit

von separaten Trackern dar. Sollte aber keine dieser beiden Eigenschaften relevant sein, bietet die Rift für sehr ähnliche Werte für 100 USD weniger ein sehr gutes VR-System. Die Art des Trackings funktioniert, ebenfalls anders als Anfangs angenommen, fast genau gleich, was die Untersuchung der Kriterien hinsichtlich des Trackings hinfällig macht.

Im folgenden werden die Anfangs gestellten Forschungsfragen beantwortet:

- (1) H0: Wie unterscheiden sich die vorgestellten Motion Tracking Varianten in der Praxis?

Die Motion Tracking Varianten unterscheiden sich nicht signifikant. Der größte praktische Unterschied bei den Verfahren ist die Aufstellung der Basisstationen, also der Constellation Kameras und den Lighthouses. Die Kameras der Rift müssen auf einem Tisch befestigt werden und sind jeweils in die selbe Richtung ausgerichtet. Die Lighthouses müssen stattdessen auf Ständern jeweils in eine Ecke des Raums oder an einem Gerüst befestigt sein und decken so mehr Fläche ab. Die Genauigkeit beider Systeme ist exzellent und weist keine in der Praxis relevanten Unterschiede auf.

- (2) H1: Macht die Wahl des Motion Tracking Systems bei VR Anwendungen in Experimenten einen Unterschied bezüglich der gemessenen Daten und Ergebnissen?

Ja, die Wahl des Motion Tracking Systems macht einen Unterschied, es kommt jedoch darauf an, welche Systemkategorie verwendet wird. Ein Low-End System für 25€ liefert sicher nicht die selben Ergebnisse wie ein High-End System für 500€. Werden aber die Systeme innerhalb der Kategorien verglichen, sind die Unterschiede schon geringer.

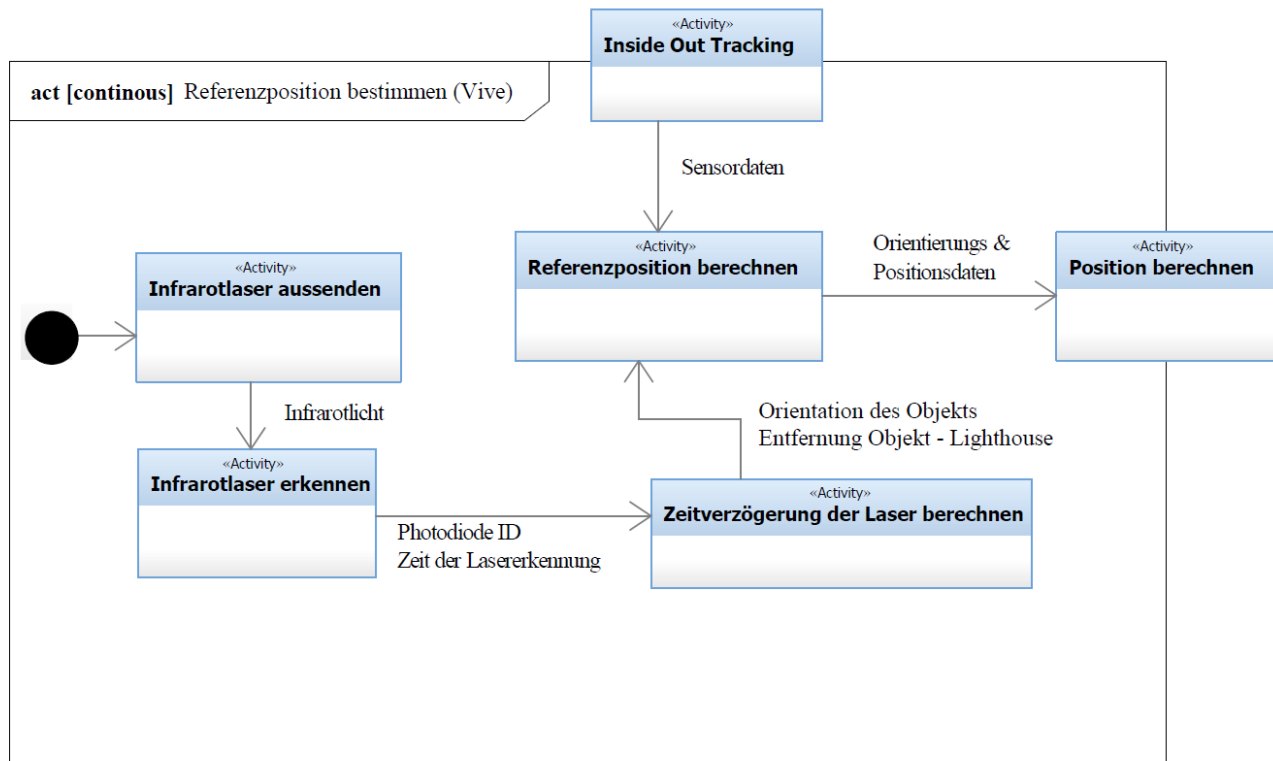


Figure 10: Aktivitätsdiagramm der Aktivität *ReferenzpositionBestimmen* für die Vive

Zumindest im High-End Bereich, zu dem die Vive und die Rift gehören, wurden bei der Untersuchung der beiden Systeme keine signifikanten Unterschiede gefunden.

- (3) H2: Welche Kriterien sollten bei der Wahl eines Motion Tracking Systems beachtet werden?

Es ist wichtig, herauszufinden, welchem Zweck das System dienen soll. Dazu sollten Anforderungen erhoben werden, anhand denen dann das System gewählt werden soll. Oft sind Genauigkeit und Geschwindigkeit weniger wichtig als z.B. die Möglichkeit, die Arme und Beine zu Tracken. Sollte die Anwendung ähnlicher Natur sein wie die in diesem Paper untersuchte Anwendung, zeigen die Tabellen 1 und 2 erste Anhaltspunkte, welche Kriterien wichtig sein können.

5 ZUSAMMENFASSUNG

In dem Artikel wurden zwei High-End VR-Systeme, die HTC Vive und die Oculus Rift CV1, auf die Unterschiede ihrer Motion Tracking Methoden sowie auf die Unterschiede in ihrer Eignung für Bewegungs-basierte VR-Experimente. Dies wurde Anhand verschiedener Modelle nach SysML visualisiert, was die Unterschiede und Gemeinsamkeiten verdeutlichen soll. Dabei entstanden funktionale und nicht funktionale Anforderungen, die als Basis für die Kriterien dienen sollen, die beim Aussuchen eines VR-Systems für ein Experiment nötig sind. Des weiteren wurde in dem Artikel verdeutlicht, dass die Oculus Rift und die HTC Vive im Kern des Trackingverfahrens die inside Out Methode verwenden und sich, hinsichtlich

des Trackingverfahrens, nur in der Reduktion des Drifts beim dead Reckoning Verfahren signifikant unterscheiden.

REFERENCES

- [1] C. Anthes, R. J. García-Hernández, M. Wiedemann, and D. Kranzlmüller. 2016. State of the Art of Virtual Reality Technologies. In *2016 IEEE Aerospace Conference, At Big Sky, Montana, United States*.
- [2] Yuri Antonio Gonçalves Vilas Boas. 2012. Overview of Virtual Reality Technologies.
- [3] M Borges, A Symington, B Coltin, T Smith, and R Ventura. 2018. HTC Vive: Analysis and Accuracy Improvement. In *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 2610–2615.
- [4] Adrián Borrego, Jorge Latorre, Mariano Alcañiz, and Roberto Llorens. 2018. Comparison of Oculus Rift and HTC Vive: Feasibility for Virtual Reality-Based Exploration, Navigation, Exergaming, and Rehabilitation. *Games for Health Journal* 7, 3 (2018), 151–156.
- [5] Chun-Ming Chang, Cheng-Hsin Hsu, Chih-Fan Hsu, and Kuan-Ta Chen. 2016. Performance Measurements of Virtual Reality Systems: Quantifying the Timing and Positioning Accuracy. In *Proceedings of the 24th ACM International Conference on Multimedia (MM '16)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 655–659.
- [6] Joshua Q Coburn, Ian Freeman, and John L Salmon. 2017. A Review of the Capabilities of Current Low-Cost Virtual Reality Technology and Its Potential to Enhance the Design Process. *Journal of Computing and Information Science in Engineering* 17, 3 (jul 2017).
- [7] Alexandros Kailias, Christos Mousas, and Christos-Nikolaos Anagnostopoulos. 2019. The Effects of Motion Artifacts on Self-Avatar Agency. *Informatics* 6, 2 (2019), 18.
- [8] Jean Luc Lugrin, Maximilian Ertl, Philipp Krop, Richard Klupfel, Sebastian Stierstorfer, Bianka Weisz, Maximilian Ruck, Johann Schmitt, Nina Schmidt, and Marc Erich Latoschik. 2018. Any 'Body' There? Avatar Visibility Effects in a Virtual Reality Game. *25th IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces, VR 2018 - Proceedings (2018)*, 17–24.

Vergleich der Vive und Rift			
ID	Anforderung	Vive	Rift
REQ1	Zuverlässigkeit	✓	✓
REQ2	Genauigkeit, Abweichung von Realität	0.9mm - 150.4mm [3], ✓	12.7 +- 9.9% der Step size [12], ✓
REQ3	Vibration und Bildschwankung	✓, 0.61±0.55cm [4]	0.31±0.56cm [4]
REQ4	Schnelligkeit	✓	✓
REQ5	Größe der möglichen Fläche (stehend)	max. 24.87m ² [4]	max. 11.75m ² [4]
REQ6	Kosten und Verfügbarkeit	499 USD	399 USD ⁹
REQ7	User Experience	✓	✓
REQ8	Gewicht	✓ 470g (neue Version) ¹⁰	✓, 450g ¹¹
FREQ1	Kopf- und Hand Tracking	✓, alle Körperteile und Objekte	✓, nur Kopf und Hände
FREQ2	Echtzeitfähig	✓	✓
FREQ3	Einbindung in Game Engine	✓, OpenVR	✓, OpenVR
FREQ4	Stehende Bewegungen erfassen	✓	✓
FREQ5	Eingabe über Controller	✓	✓

Table 3: Vergleich der Vive und Rift

- [9] Diederick C Niehorster, Li Li, and Markus Lappe. 2017. The accuracy and precision of position and orientation tracking in the HTC vive virtual reality system for scientific research. *i-Perception* 8, 3 (may 2017), 1–23.
- [10] Ye Pan and Anthony Steed. 2017. The impact of self-avatars on trust and collaboration in shared virtual environments. *PLOS ONE* 12, 12 (2017), 1–20.
- [11] Robin C. Schramm. 2019. Vergleich von Inverse Kinematics und Motion Tracking im Zuge einer VR Anwendung. Unveröffentlichte Bachelorarbeit.
- [12] Leia C Shum, Bulmaro A Valdés, and HF Machiel Van der Loos. 2019. Determining the Accuracy of Oculus Touch Controllers for Motor Rehabilitation Applications Using Quantifiable Upper Limb Kinematics: Validation Study. *JMIR Biomed Eng* 4, 1 (06 Jun 2019), e12291. <http://biomedeng.jmir.org/2019/1/e12291/>
- [13] Tim Weilkens. 2014. Systems engineering mit SysML/UML: Anforderungen, Analyse, Architektur.
- [14] Tina L Y Wu, Adam Gomes, Keegan Fernandes, and David Wang. 2019. The Effect of Head Tracking on the Degree of Presence in Virtual Reality. *International Journal of Human-Computer Interaction* 35, 17 (2019), 1569–1577.